ББК 34.43я2
К65
УДК 669.018-419.8 (035)

Авторы: Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше, Ю. А. Быков, А. Г. Васильева, Г. П. Гардымов, И. С. Гершман, Э. Ч. Гини, М. Е. Дриц, А. А. Зябрев, И. В. Кириллов, С. И. Кишкина, Е. А. Курочкин, В. И. Кучерявый, В. И. Макарова, Т. А. Паиайоти, Ж. П. Пастухова, М. Д. Перкас, А. Г. Рахштадт, А. П. Семенов, В. И. Силаева, В. Н. Симонов, Л. М. Соколенко, Т. В. Соловьева, В. И. Солонин, Г. Б. Строганов, В. И. Третьяков, Е. А. Ульянин, И. Н. Фридляидер, О. М. Ховова, К. П. Яценко

Рецензенты: В. В. Крымов, В. С. Фролов

К65 **Конструкционные** материалы: Справочник/Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др.; Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1990. — 688 с.: ил. — (Основы проектирования машин).

ISBN 5-217-01112-2

Приведены сведения о составах, свойствах и назначении современных конструкционных материалов. Впервые классификация материалов и их описание представлены по основным эксплуатационным (служебным) требованиям, предъявляемым к деталям машин. Согласно этим требованиям материалы распределены по группам, каждая из которых определяется комплексом стандартных и нестандартных свойств, от которых зависит реализация эксплуатационных характеристик. Нетрадиционная классификация справочного материала поможет конструкторам и технологам на научно-технической основе выбирать материалы для деталей машин, приборов и приспособлений, а также назначать рациональные технологические процессы их обработки.

Для широкого круга инженерно-технических работников машиностроительной и приборостроительной промышленности; может быть полезен студентам втузов.

К $\frac{2703000000-215}{038\ (01)-90}$ 215—90

ББК 34.43я2

ISBN 5-217-01112-2

© Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др., 1990

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие (*Б. Н. Арзамасов*) 7
Принятые условные обозначения 10

Глава I. **Материалы с повышенной и высокой прочностью** 12

1. Углеродистые и низколегированные конструкционные стали (*А. Г. Васильева*) . . 12
2. Высокопрочные среднелегированные стали (*С. И. Кишкина*) 23
3. Высокопрочные высоколегированные (мартенситостареющие) стали (*О. М Ховова, А. Г. Рахштадт, М. Д. Перкас*) 30

Глава II. **Материалы с повышенными технологическими свойствами** 49

1. Классификация чугунов для отливок (*Э. Ч. Гини*) . . 49
2. Физические и химические свойства чугуна (*Э. Ч. Гини*) 57
3. Механические и технологические свойства чугуна (*Э. Ч. Гини*) 69
4. Легированный чугун со специальными свойствами (*Э. Ч. Гини*) 82
5. Латуни (*И. С. Гершман*) . . 84
6. Бронзы (*И С. Гершман*) . 104
7. Медно-никелевые сплавы (*И. С. Гершман*) 114

Глава III. **Материалы триботехнического назначения** . . 131

1. Процесс изнашивания и методы повышения износостойкости (*Н. А. Буше, А. П. Семенов*) 131
2. Износостойкие материалы высокой твердости (*А. П. Семенов*) 135
3. Износостойкие покрытия и модифицированные слои (*А. П. Семенов*) 152
4. Материалы, устойчивые к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок (*Н. А. Буше*) 163
5. Кавитационно-стойкие материалы (*Н. А. Буше*) . . . 167
6. Антифрикционные материалы (*Н. А. Буше, А. П. Семенов*) 171
7. Фрикционные материалы (*Н. А. Буше, А. П. Семенов*) 189

Глава IV. **Материалы с высокими упругими свойствами** (*А. Г Рахштадт, Ж. П. Пастухова*) 204

1. Классификация пружинных сплавов по основным способам упрочнения 204
2. Классификация пружинных сплавов по назначению . . 205

Глава V. **Материалы малой плотности и высокой удельной прочности** 234

1. Алюминиевые сплавы (*Г. Б. Строганов*) 234
2. Магниевые сплавы (*М. Е Дриц*) 272
3. Титановые сплавы (*В. И. Силаева, Т. В. Соловьева*) 291
4. Бериллиевые сплавы (*И. Н. Фридляндер, К. П. Яценко*) 321
5. Полимерные материалы (*А. А. Зябрев*) 338
6. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (*А. А. Зябрев*) 341
7. Волокнистые металлические композиционные материалы (*Г. П. Гардымов*) 349
8. Эвтектические композиционные материалы (*А. А. Зябрев*) 359

9. Волокнистые композиционные материалы с неметаллической матрицей (*Е. А. Курочкин*) 365

Глава VI. **Материалы, устойчивые к воздействию температуры и внешней рабочей среды** 379

1. Коррозионно-стойкие материалы (*Е. А. Ульянин*) 379
2. Теплостойкие материалы (*Т. А. Панайоти*) 395
3. Жаростойкие материалы (*Т. А. Панайоти*) 406
4. Жаропрочные материалы (*В. И. Третьяков, И. С. Гершман*) 423
5. Радиационно-стойкие материалы (*В. И. Солонин*) 445
6. Материалы с малым газовыделением в вакууме (*В. И. Макарова*) 462
7. Коррозионно-стойкие и жаростойкие покрытия (*Б. Н. Арзамасов, В. Н. Симонов*) 474
8. Материалы для криогенной техники (*Е. А. Ульянин*) 498

Глава VII. **Материалы с особыми физическими свойствами** . 514

1. Материалы высокой проводимости (*Л. М. Соколенко*) 514
2. Сверхпроводники (*И. В. Кириллов*) 520
3. Резистивные материалы (*Л. М. Соколенко*) . . . 526
4. Магнитотвердые материалы (*Л. М. Соколенко*) . . . 536
5. Магнитомягкие материалы (*Л. М. Соколенко*) . . . 544
6. Материалы с особыми тепловыми свойствами (*Ю. А. Быков*) 564
7. Полупроводниковые материалы (*И. В. Кириллов*) . . 568
8. Аморфные металлические сплавы (*Ю. А. Быков*) . 581
9. Диэлектрические материалы (*И. В. Кириллов*) . . . 585
10. Лазерные материалы (*И. В. Кириллов*) 589

Глава VIII. **Инструментальные материалы** 596

1. Материалы для обработки резанием (*В. А. Брострем*) 596
2. Штамповые стали для холодного деформирования (*В. И. Кучерявый*) 631
3. Штамповые стали для горячего деформирования (*В. И. Кучерявый*) 655

Предметный указатель . . . 683

ПРЕДИСЛОВИЕ

Научно-технический прогресс в машиностроении неразрывно связан с созданием новых конструкционных материалов. Революционную роль в электронике сыграли полупроводниковые материалы и жидкие кристаллы, в авиации и ракетостроении — композиционные материалы, в радиотехнике — сверхпроводники и аморфные сплавы.

Для повышения качества, надежности и экономичности изделий машиностроения при снижении их материалоемкости разрабатываются высокоэффективные методы повышения прочностных свойств, коррозионной стойкости, тепло- и хладостойкости сплавов; расширяется производство новых полимерных и композиционных материалов с заданным комплексом свойств; используются эффективные методы обработки материалов и изделий с целью существенного улучшения их свойств.

Возникает задача создания экономиолегированных сплавов, композиционных материалов и методов поверхностного упрочнения деталей машин. Поверхностные слои во многом определяют работоспособность деталей машин, поэтому износостойкость и коррозионная стойкость деталей полностью зависят от состояния их поверхности. Применением износостойких покрытий стремятся решить проблему экономии вольфрама в инструментальных сталях, а также повысить работоспособность деталей из конструкционных сталей. Ионная имплантация снижает точечную коррозию и повышает износостойкость подшипников качения. Задача создания высокожаростойких и жаропрочных сплавов для новой техники неразрывно связана с разработкой надежных защитных покрытий. Поверхностное легирование приводит к экономии дефицитных металлов, так как в этом случае их требуется меньше, чем при объемном легировании сплавов, с целью получения указанных специфических свойств.

Важнейшей характеристикой материалов, применяемых для изделий авиационной и космической техники, а также для изделий других отраслей машиностроения, является удельная прочность, т. е. отношение временного сопротивления к произведению плотности на ускорение свободного падения. Если для улучшенной стали 40Х удельная прочность равна 13 км, то для титанового сплава после термической обработки она увеличивается до 31 км, а для алюминия, армированного борным волокном, — до 43 км. Таким образом, повышение удельной прочности приводит к значительному сокращению материалоемкости изделий.

Порошковая металлургия иногда позволяет уменьшить потери металла при изготовлении деталей в 10 раз. Кроме того, возможность широкого варьирования состава порошковых сплавов позволяет получать специфические свойства, которые недостижимы при использовании традиционных способов изготовления изделий.

Порошковые быстрорежущие стали — однородный мелкозернистый материал без карбидной ликвации. По сравнению со сталями обычного передела порошковые быстрорежущие имеют более высокие твердость и теплостойкость. Металлорежущий инструмент, изготовленный из этих сталей, имеет в 1,5—2 раза большую стойкость. Порошковый бериллий после прокатки в листы находит применение в авиации и ракетостроении. Использование бериллия для обшивки сверхскоростных самолетов решает проблему жесткости конструкции и уменьшения массы. Бериллий является также перспективным материалом для ракетных двигателей с небольшой тягой. Благодаря сочетанию высоких

теплоемкости и теплопроводности бериллиевое сопло не разрушается при рабочей температуре 3000 °С в течение 60—80 с.

Объемное или поверхностное упрочнение сталей является обязательной технологической операцией в современном машиностроении, которая приводит к значительному улучшению комплекса свойств. Применение термического упрочнения проката из низколегированных сталей или контролируемой прокатки на металлургических заводах способствует значительному сокращению последующего расхода стали (примерно на 30 %) на предприятиях машиностроительного комплекса и в строительстве.

Рассмотренные в справочнике конструкционные материалы предназначены для изготовления деталей машин и приборов, инженерных сооружений и изделий, которые в основном несут механические нагрузки, а в некоторых случаях находятся под воздействием агрессивной окружающей среды и температуры.

Выбор материалов для деталей машин и приборов определяется эксплуатационным, технологическими и экономическими требованиями. Имея первостепенное значение, эксплуатационные требования к свойствам материалов часто играют определяющую роль, хотя технологические и экономические требования тоже важны, приобретая особое значение в условиях массового производства.

Отличительной особенностью справочника является классификация материалов по основным эксплуатационным (служебным) характеристикам с учетом назначения. Принятая классификация поможет конструкторам и технологам лучше ориентироваться в выборе материалов для деталей машин, приборов и приспособлений. Вспомогательным пособием к справочнику может служить учебник «Материаловедение»[1], составленный по тому же классификационному признаку. Ряд материалов, обладая универсальностью применения, относится к нескольким классификационным группам, поэтому в справочнике сделаны ссылки на соответствующие группы.

В гл. I справочника кратко рассмотрены конструкционные углеродистые и легированные стали. Краткость связана с тем, что в 1981 г. вышло третье, значительно дополненное издание справочника «Машиностроительные стали»[1], в котором стали систематизированы не по химическому составу, а по назначению и эксплуатационным свойствам. Поэтому при выборе сталей для деталей машин рекомендуется пользоваться также указанным справочником.

В гл. II представлены традиционные материалы с повышенными технологическими свойствами — это чугуны и сплавы на основе меди.

Материалы триботехнического назначения приведены в гл. III. От правильного выбора и качества этих материалов во многом зависит надежность деталей машин.

Материалы с высокими упругими свойствами (гл. IV) необходимы для многих отраслей современного машиностроения и приборостроения.

В гл. V рассмотрены материалы малой плотности и высокой удельной прочности, которые применяются в основном для изделий авиационной и ракетной техники. Это сплавы на основе алюминия, магния, титана, а также композиционные и неметаллические материалы.

В гл. VI приведены материалы специального назначения, стойкие к воздействию температуры и внешней рабочей среды. Коррозионно-стойкие и жаростойкие материалы и покрытия необходимы для ответственных деталей новой техники. Свойства теплостойких и жаропрочных материалов во многом определяют ресурс и параметры современных энергетических установок и двигателей. Радиационно-стойкие материалы необходимы для атомного машиностроения.

В гл. VII рассмотрены материалы с особыми физическими свойствами,

[1] **Материаловедение:** Учебник для высших технических учебных заведений/ Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 384 с.

[1] **Журавлев В. Н., Николаева О. И.** Машиностроительные стали: Справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.

которые имеют важное значение для электромашиностроения, электронной техники и современного приборостроения. Это сверхпроводники и полупроводники, аморфные, лазерные и другие материалы.

Инструментальные материалы (гл. VIII) играют решающую роль при разработке прогрессивных технологических процессов и повышении производительности труда.

В справочнике приведены основные группы материалов (как стандартных, так и нестандартных) с указанием их свойств, что позволит конструкторам и технологам на научно-технической, а не эмпирической основе выбирать материалы и назначать рациональные технологические процессы их обработки.

Справочник будет полезен для ИТР предприятий машиностроительного и приборостроительного комплекса, а также для научных работников НИИ и КБ, аспирантов и студентов старших курсов втузов.

ПРИНЯТЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

σ — напряжение

σ_0 — начальное напряжение при испытаниях на релаксационную стойкость

σ_Σ — остаточные напряжения

$\dot{\varepsilon}_п$ — скорость ползучести

$\dot{\varepsilon}_{р.п}$ — скорость радиационной ползучести

$\sigma_в$ — временное сопротивление при растяжении

$\sigma_{0.2}$ — предел текучести условный

$\sigma_т$ — предел текучести физический

σ_{-1} — предел выносливости при изгибе с симметричным циклом нагружения

$\sigma_{0,002;\ 0,005}$ — условный предел упругости с допуском на остаточную деформацию соответственно 0,002 и 0,005 %

$\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии

$\sigma_и$ — предел прочности при изгибе

$\sigma_{пц}$ — предел пропорциональности

$\sigma_{1;\ 10;\ 100;\ 1000;\ 10\,000}$ — длительная прочность

$\sigma_в/(\rho g)$ — удельная прочность

ρ — плотность

g — ускорение свободного падения

δ — относительное удлинение при разрыве

ψ — относительное сужение при разрыве

$E_{сж}$ — модуль упругости при сжатии

E — модуль продольной упругости

$E/(\rho g)$ — удельный модуль упругости

G — модуль сдвига

K_{1c} — напряжение вблизи вершины трещины в момент разрушения

$a_н$ — ударная вязкость материала

KCU — ударная вязкость (U-образный надрез)

KCV — ударная вязкость (V-образный надрез)

KCT — ударная вязкость (с трещиной)

$\tau_в$ — предел прочности при срезе

τ_{-1} — предел выносливости при кручении и изгибе

Rz — высота неровностей профиля по десяти точкам

Ra — среднее арифметическое отклонение профиля

HRC — твердость по Роквеллу (шкала С)

HB — твердость по Бринеллю

H — микротвердость

α — температурный коэффициент линейного расширения

λ — теплопроводность

c — удельная теплоемкость

Q_v — удельная молярная теплота плавления

ΔG°_{293} — термодинамический потенциал (стандартная энергия Гиббса)

T_{50} — температура полухрупкости

$T_{пл}$ — температура плавления

$\theta_к$ — точка Кюри

R — электрическое сопротивление

ρ_1 — удельное электрическое сопротивление

$\mu_н$ — относительная начальная магнитная проницаемость

μ_{max} — абсолютная максимальная магнитная проницаемость

B — магнитная индукция

B_r — остаточная магнитная индукция

B_s — магнитная индукция насыщения

B_m — максимальная магнитная индукция

H_c — коэрцитивная сила

H_{cB} — коэрцитивная сила по индукции

H — напряженность магнитного поля

H_{cJ} — коэрцитивная сила по намагниченности

tg δ — тангенс угла магнитных потерь

tg $\delta/\mu_н$ — относительный тангенс угла магнитных потерь

$f_{кр}$ — критическая частота

$TK\mu$ — температурный коэффициент магнитной проницаемости

$TK\rho$ — температурный коэффициент электрического сопротивления

$\mu_{эф}$ — эффективная магнитная проницаемость

$\delta_г$ — угол потерь на гистерезис

$\delta_в$ — угол потерь на вихревые токи

$\delta_п$ — угол потерь на последействие

p — удельные объемные магнитные потери

W — удельная магнитная энергия

$W_{упр}$ — часть энергии, превращенная в упругую

W_{max} — максимальная магнитная энергия

K_1 — константа кристаллографической анизотропии

$\mu_в$ — магнитная проницаемость возврата

$H_т$ — напряженность поля трогания

ε — относительная диэлектрическая проницаемость

ΔH — ширина резонансной кривой

$\alpha_т$ — коэффициент термо-ЭДС

φ — работа выхода электрона

γ — удельная электрическая проводимость

Глава I МАТЕРИАЛЫ С ПОВЫШЕННОЙ И ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

1. УГЛЕРОДИСТЫЕ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Углеродистые стали представляют значительную группу конструкционных материалов; они составляют 80 % общего объема продукции черной металлургии и применяются для изготовления различных металлоконструкций и изделий машиностроения. Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380—88) и качественные (ГОСТ 1050—74, ГОСТ 4543—71) дешевы, имеют удовлетворительные механические свойства в сочетании с хорошей обрабатываемостью резанием и давлением [11, 15, 16, 17, 32].

В зависимости от условий работы и содержания углерода углеродистые стали подвергают термической [40] и химико-термической обработке [16, 17].

Содержание углерода определяет основные характеристики физических, механических и технологических свойств. По мере увеличения его количества возрастает доля цементита в структуре, что обусловливает затруднение перемещения дислокаций и соответственно — развитие сдвиговых процессов. В результате этого повышается прочность, но снижается пластичность, а иногда и вязкость.

Углеродистые стали с пониженным содержанием углерода (до 0,3 %) имеют высокую вязкость разрушения (K_{1c} = 100÷120 МПа·м$^{1/2}$ при $\sigma_{0,2}$ = = 500 МПа) [29]. При этом существенного прироста вязкости разрушения у высокоотпущенных сталей по сравнению с низкоотпущенными не наблюдается. Определение критерия K_{1c} пластичных низкоуглеродистых сталей сопряжено со значительными трудностями, так как эти стали особенно широко применяются для изделий тонкого сечения, а существующие методики определения K_{1c} основаны на испытании образцов большой толщины, при которой соблюдается условие плоской деформации, т. е. отсутствует остаточная деформация.

Максимально высокая трещиностойкость закаленных углеродистых сталей достигается при разных температурах отпуска, определяемых содержанием углерода. С увеличением содержания углерода, в связи с уменьшением запаса пластичности стали, оптимальная температура отпуска повышается. У стали 45 максимальная трещиностойкость соответствует отпуску при 400—500 °С, что обусловлено получением хорошего сочетания прочностных и пластических свойств при таком режиме термической обработки. При переходе к более высокоуглеродистым сталям температура отпуска, при которой достигается максимальный уровень трещиностойкости, сдвигается в область более высоких температур.

Повышение температуры отпуска выше оптимальной приводит к такому разупрочнению сталей, когда эффекты, связанные с увеличением трещиностойкости в результате роста пластичности, уже подавляются значительным падением прочности.

Низколегированные конструкционные стали содержат до 0,2 % С и до 2—3 % в основном недефицитных легирующих элементов. Их упрочнение основано на легировании феррита марганцем и (или) кремнием. Это марганцовистые стали 14Г, 19Г, 09Г2 и др., марганцовокремнистые 12ГС, 09ГС, 10Г2С1 и др. Марганцовокремнистые стали имеют более высокую прочность, чем марганцовистые, но их пластичность и вязкость заметно ниже.

Низколегированная сталь поставляется по ГОСТ 5520—79, 5521—86, ГОСТ 19282—73 тонко- и толстолистовой, широкополосной; в зависимости от нормируемых механических

свойств — без термической обработки, с термической обработкой или в том и другом состоянии. Эти стали применяются в судостроении, химической промышленности, вагоностроении, мостостроении [11]. Низколегированные стали применяются, как правило, в нормализованном, реже — в горячекатаном состоянии. Их механические свойства можно улучшить с помощью термической обработки, которую целесообразно проводить после нагрева под прокатку. После закалки и отпуска упрочнение сочетается с малой чувствительностью к надрезу.

Низколегированные стали ненамного дороже углеродистых, но по сравнению с ними имеют лучший комплекс механических свойств, повышенную хладостойкость, пониженную склонность к механическому старению, лучшую свариваемость, повышенную износостойкость и коррозионную стойкость в различных средах.

Большой экономический эффект достигается при использовании в металлоконструкциях сталей с карбонитридным упрочнением.

Низколегированные стали с карбонитридным упрочнением. Легирование низкоуглеродистых (0,10—0,20 % С), марганцовистых (1,3—1,7 % Мп) сталей (0,015—0,025 % N, 0,10—0,20 % V, около 0,1 % Ti, а также ~0,05 % Al) создает предпосылки для выделения дисперсных карбонитридов ванадия и титана или нитридов алюминия. Дисперсные карбиды способствуют измельчению аустенитного (до № 10—12) и действительного зерна стали, тормозят движение дислокаций. В совокупности эти факторы благоприятно влияют на прочность, вязкость и хладостойкость [18].

Доля собственно карбонитридного упрочнения в общем упрочнении составляет около 15—25 %, а доля упрочнения в результате измельчения зерна — 30—40 %. Максимальная ударная вязкость при отрицательных температурах достигается в стали с 0,10—0,15 % V. Наиболее рациональным является совместное легирование несколькими карбидо- и нитридообразующими элементами, например 0,08V + 0,03Nb, а в сталях, содержащих азот, 0,10 V + 0,04 % Al. С учетом этого положения разработаны основные марки стали с карбонитридным упрочнением трех категорий прочности: 14Г2АФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ (ГОСТ 19282—73). После нормализации эти стали имеют предел текучести соответственно 400, 450, 500 МПа. Стали 15ГФ и 15Г2СФ, не легированные азотом и содержащие только ванадий, имеют предел текучести в горячекатаном состоянии соответственно 360 и 400 МПа.

Дополнительное легирование стали никелем до 2 % способствует сохранению высоких характеристик пластичности и вязкости.

Легирование алюминием позволяет регулировать размер зерна в горячекатаных, нормализованных и улучшенных сталях.

Добавка 0,15—0,30 % Cu способствует повышению стойкости против атмосферной коррозии.

К термически улучшаемым высокопрочным относятся стали 12Г2СМФ ($\sigma_{0,2}$ = 600 МПа) и 12ГН2МФАЮ ($\sigma_{0,2}$ = 750 МПа).

Из низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением изготовляют металлоконструкции промышленных зданий, ответственные сварные конструкции, в том числе северного исполнения, пролетные строения железнодорожных и крупных автодорожных мостов, платформы автомобилей большой грузоподъемности (до 120 т) и др.

Стали 14Г2АФ и 16Г2АФ применяют, как правило, в нормализованном состоянии. При нормализации листы из этих сталей нагревают до 900—960 °С со скоростью 2 мин/мм, охлаждают на спокойном воздухе или в струе увлажненного воздуха под вентилятором в зависимости от химического состава стали.

Высокопрочные стали 12Г2СМФ и 12ГН2МФЮ подвергают закалке с высоким отпуском. Закалку проводят в закалочных прессах. Температуру высокого отпуска назначают с учетом легирования в интервале 640—690 °С при выдержке 3—4 мин/мм.

Свойства сталей после нормализации определяются степенью растворения упрочняющих фаз при нагреве, величиной зерна и процессами выделения

1. Механические свойства сталей с карбонитридным упрочнением [11]

Сталь	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	*KCU*, МДж/м², при температуре, °С	
	МПа		%	—40	—70
	не менее				
15ГСФ	560	400	18	—	—
15Г2СФД	560	400	18	0,3	—
14Г2АФД	550	400	20	0,4	0,3
16Г2АФД	580	420	20	0,4	0,3
18Г2АФДпс	600	450	19	0,4	0,3
12ХГН2МФБАЮ (после закалки и отпуска)	850—930	750—870	12	—	0,3

упрочняющих фаз в дисперсной форме при охлаждении.

В связи с тем, что дисперсные частицы повышают не только прочность, но и вязкость (ограничивая рост зерна), нормализованный прокат разной толщины мало различается по ударной вязкости и хладостойкости. Между тем свойства стали в горячекатаном состоянии сильно зависят от толщины листов.

2. Критические температуры хрупкости стали с карбонитридным упрочнением [18]

Сталь	Тип образца	Порог хладноломкости, °С *1
14Г2АФ	I *2	—90÷—100
	IV *2	—30÷—40
16Г2АФ	I	—90÷—100
	IV	—10÷—30
12Г2СМФ	I	—70÷—100
	IV	—30
12ГН2МФАЮ	I	—100÷—110
	IV	—70

*1 Условный порог хладноломкости при ударной вязкости не менее *KCU* = = 0,3 МДж/м² для листовой стали толщиной 12—40 мм.

*2 Типы образцов I и IV — для испытаний на ударный изгиб (с полукруглым и острым надрезом) по ГОСТ 9454—78.

Механические свойства сталей с карбонитридным упрочнением приведены в табл. 1. При поставке таких сталей нормируемой характеристикой является ударная вязкость. Ее значения сохраняются на удовлетворительном уровне до весьма низких температур.

Данные стали имеют низкие критические температуры хрупкости (табл. 2). Повышенной хладостойкостью (от —90 до —100 °С) обладает сталь 14Г2АФ в виде относительно тонких листов. Высокой хладостойкостью (от —100 до —110 °С) характеризуется высокопрочная сталь 12ГН2МФАЮ в виде листов толщиной до 40 мм.

Обработка стали с нитридами ванадия жидким синтетическим шлаком (СШ) или электрошлаковый переплав (ЭШП) способствуют резкому уменьшению содержания серы (до 0,03—0,005 %) и обеспечивают еще большее повышение характеристик вязкости при отрицательных температурах. Например, низкотемпературная ударная вязкость стали 16Г2АФ возрастает в 2,5 раза (табл. 3). Одновременно повышается относительное сужение.

Хорошей свариваемости низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением способствует низкое содержание углерода и легирующих элементов, ограниченная склонность к росту зерна. Пониженная закаливаемость в околошовной зоне определяет меньшую склонность к образованию трещин в сварных соединениях.

Стали типа 14—16Г2АФ свариваются без ограничений при условии практически мгновенного охлаждения (со скоростью 5—30 °С/с) при 600 °С. При сварке сталей 12Г2СМФ и 12ГН2МФАЮ скорость охлаждения составляет 7—30 °С/с. При меньших скоростях охлаждения снижается ударная вязкость и повышается порог хладноломкости в околошовной зоне [18].

Применяют ручную, автоматическую и полуавтоматическую сварку, в том числе в атмосфере защитных газов.

Лучшей свариваемостью и хладостойкостью характеризуются стали 15Г2АФДпс и 18Г2АФпс. Усталостная трещина в них не переходит в хрупкую в условиях низких температур.

Стали с карбонитридным упрочнением легко подвергаются механической обработке и холодной обработке давлением, что определяется их высоким запасом пластичности.

Применение новых сталей дает большую экономию металла: 14—30 % — по сравнению с его расходом на конструкции из обычных низколегированных сталей 10Г2С1 и 14Г2; около 30—50 % — по сравнению с конструкциями из углеродистой стали Ст3 [18].

Особенно перспективны стали 14Г2АФ и 16Г2АФ, широко используемые в виде относительно тонкостенных электросварных труб ∅ 152—420 мм для промышленных строительных сооружений и изделий машиностроения [18].

Низколегированные малоперлитные стали — это низколегированные стали с низким содержанием углерода. Они содержат до 0,1 % С, до 2 % Мп и дополнительно в разных сочетаниях ванадий (~0,1 %), ниобий (~0,06 %), а иногда и молибден (~0,15—0,3 %). В этих сталях может также присутствовать алюминий (до 0,05 %). Благоприятное сочетание свойств получается при содержании легирующих элементов в стали не более 2—3 % [13, 31]. Ванадий, ниобий, алюминий и частично молибден участвуют в образовании упрочняющей фазы на основе углерода и азота (~0,005 %). Азот не вводят в сталь специально; он в таком количестве обычно присутствует в ней. Поставляются малоперлитные стали по техническим условиям.

3. Влияние специальных способов обработки стали 16Г2АФ на ударную вязкость при отрицательных температурах [18]

Способ обработки	*KCU*, МДж/м², при температуре, °С		
	—40	—60	—80
СШ	1,62	1,45	1,40
ЭШП	2,87	—	1,83

Эти стали используют для конструкций различного назначения. Их применяют взамен низколегированных нормализованных и термически упрочненных сталей для изготовления сварных конструкций в судо- и мостостроении, транспортном и химическом машиностроении, строительстве и трубопроводном транспорте для передачи нефти и газа. Высокий комплекс механических свойств, хорошие свариваемость и формуемость позволяют использовать малоперлитные стали для изготовления таких ответственных конструкций, как магистральные газопроводы, эксплуатируемые в районах Севера.

Влияние микролегирования наиболее эффективно реализуется в малоперлитных сталях при контролируемой прокатке [13, 31]. В результате такой обработки высокая прочность сочетается с высоким сопротивлением вязкому и хрупкому разрушению.

Контролируемая прокатка — это высокотемпературная обработка низколегированной стали, технология которой основана на определенном сочетании основных параметров горячей деформации: температуры нагрева и конца прокатки; суммарной степени, кратности деформации и ее величины при различных температурах, скорости охлаждения между проходами и т. д. В процессе прокатки с контролируемым режимом деформации структурные изменения в деформируемом

металле протекают в три стадии. На первой стадии (>950 °С) в процессе деформации происходит рекристаллизация; на второй стадии (<950 °С) сталь упрочняется вследствие измельчения структуры и повышения плотности дислокаций; на третьей стадии (800—700 °С) происходит выделение дисперсных избыточных фаз, обусловленное легированием стали карбидо- и нитридообразующими элементами (Mo, Nb, V, Ti).

Режим нагрева слябов перед прокаткой назначают с учетом химического состава стали и требований к свойствам. Условия нагрева должны обеспечивать максимальное растворение компонентов, вызывающих образование в дальнейшем дисперсных частиц избыточной фазы. Для получения хладостойкого проката из микролегированных марганцовистых сталей температура начала прокатки должна быть 1150—1200 °С. На завершающем этапе обработки деформация проводится в диапазоне температур A_{r3}—A_{r1} при суммарной деформации $\geqslant$66 %.

При контролируемой прокатке листов наиболее значительные степени деформации назначают при относительно невысоких температурах: ниже 800 °С. Заканчивают прокатку при температурах $\leqslant$750—700 °С. На широкополосном стане контролируемую прокатку проводят в области высоких температур, при которых происходит интенсивная рекристаллизация аустенита. При такой обработке важную роль играет скорость охлаждения полосы до температуры превращения аустенита, а также температура смотки полосы в рулон.

Для контролируемой прокатки разработана сталь, содержащая 0,14 % С; 1,4 % Mn; 0,2 % Mo; 0,5 % Cr. После контролируемой прокатки листы толщиной 12—32 мм имеют следующие механические свойства: $\sigma_{0,2}$ = 490 МПа; $\sigma_в$ = 560÷600 МПа; δ = 24 %; KCU = 0,9÷1,0 МДж/м² при 100 % волокна в изломе ударных образцов при 0 °С [13].

Эффективность комплексного микролегирования установлена на малоперлитных сталях, химический состав которых приведен в табл. 4 [15, 19]. Совместное влияние комплексного микролегирования и контролируемой прокатки превосходит сумму раздельных влияний этих факторов на прочностные свойства. Изменение механических свойств микролегированной стали 09Г2ФБ в результате контролируемой прокатки можно видеть в табл. 5.

Свойства малоперлитной стали зависят от ее состава и условий контролируемой прокатки (рис. 1).

Механические свойства листов, полученных контролируемой прокаткой, в значительной степени определяются их толщиной. С увеличением толщины листа прочностные свойства снижаются, причем более интенсивно снижается предел текучести (табл. 6). Повышенная хладостойкость сохраняется в листах толщиной до 32 мм [13].

Влияние режима контролируемой прокатки на механические свойства листовой стали 16Г2АФ толщиной 18 мм показано в табл. 7. Все варианты контролируемой прокатки обеспечили практически одинаковые прочностные свойства, которые несколько превышают эти же показатели для нормализованной стали. Пластические свойства стали после контролируемой прокатки находятся на достаточно высоком уровне (δ = 20 %). Ударная вязкость повышается примерно в 2 раза по сравнению с ее значением после обычной прокатки и приближается к значению, соответствующему ударной вязкости нормализованной стали.

Применение термического упрочнения при изготовлении листового проката из малоперлитных сталей способствует повышению их прочностных свойств, что обеспечивает более экономное расходование проката. Например, упрочнение стали 09Г2ФБ по режиму: контролируемая прокатка с деформацией ϵ = 40 % + закалка в воде от температуры конца прокатки 900 °С + отпуск при 670 °С 1 ч позволяет значительно улучшить ее механические свойства (табл. 8) [26]. Такая технология повышает сопротивление стали хрупкому и усталостному разрушению. Предел выносливости стали возрастает от 300 до 380 МПа. Повышение предела выносливости пропорционально повышению прочностных свойств объясняется созданием

4. Химический состав малоперлитных сталей [15]

Сталь	Содержание элементов, %									
	C	Mn	Si	S	P	Al	N	U	Nb	Ti
09Г2Ф	0,09	1,5	0,15	0,004	0,010	0,04	0,011	0—0,20	—	—
09Г2БФ	0,09	1,5	0,22	0,004	0,010	0,04	0,011	0—0,17	0,036	—
09Г2ТФ	0,10	1,22	0,13	0,002	0,009	0,05	0,011	0—0,17	—	0,035
09Г2Б	0,09	1,4	0,15	0,0045	0,010	0,03	0,010—0,013	—	0—0,1	—
09Г2ФБ	0,05	1,5	0,2	0,0037	0,010	0,04	0,010—0,013	0,085	0—0,07	—
09Г2ТБ	0,08	1,17	0,14	0,003	0,009	0,045	0,010—0,013	—	0—0,07	0,035
09Г2Т	0,065	1,6	0,11	0,004	0,010	0,04	0,011	—	—	0—0,18
09Г2ФТ	0,085	1,45	0,2	0,004	0,010	0,045	0,011	0,085	—	0—0,08
09Г2БТ	0,09	1,4	0,16	0,0035	0,010	0,045	0,011	—	0,02	0—0,10
09Г2ФБТ	0,09	1,47	0,20	0,005	0,009	0,04	0,012	0,08	0,03	0—0,11
09Г2Ю	0,10	1,56	0,35	0,005	0,012	0,01—0,10	0,012	—	—	—
09Г2ФЮ	0,11	1,52	0,31	0,006	0,009	0,01—0,12	0,011	0,11	—	—
09Г2БЮ	0,10	1,49	0,28	0,007	0,010	0,01—0,12	0,013	—	0,05	—

5. Влияние контролируемой прокатки на свойства стали 09Г2ФБ [15]

Обработка	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %	KCV, МДж/м², при —40 °С	T_{50}, °С *1
Прокатка; температура окончания деформации, °С:					
810	560	475	30	0,80	—70
750	590	510	27	0,11	—95
725	625	540	29	0,10	—95
700	680	600	22	0,60	—90
Нормализация от 930 °С, 30 мин	520	400	30	0,75	—15

*1 Температура перехода из вязкого состояния в хрупкое, при котором в изломе доли вязкой и хрупкой составляющих равны между собой.

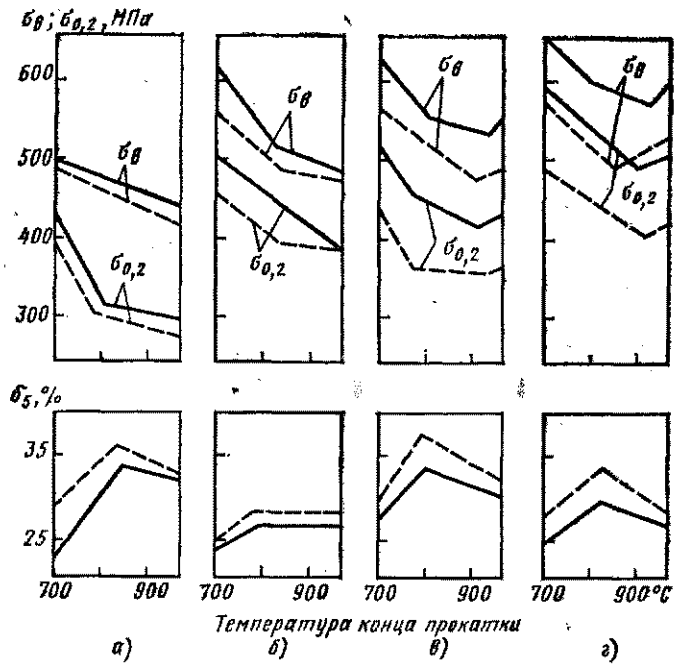


Рис. 1. Зависимость механических свойств малоперлитной стали от температуры нагрева и температуры конца деформации при контролируемой прокатке:
а — сталь с 0,8 % C и 1,4 % Mn; *б* — то же с 0,6 % V; *в* — то же с 0,04 % Nb; *г* — та же сталь с 0,04 % Nb и 0,08 % V [16]; сплошные линии — температура нагрева под прокатку 1200 °С; штриховые линии — 1050 °С

6. Механические свойства стали после контролируемой прокатки в зависимости от толщины листа [13]

Сталь	Толщина листа, мм	Температура конца прокатки, °С	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ, %	T_{50}, °С
			МПа			
0,14 % C; 1,4 % Mn; 0,25 % Mo; 0,5 % Cr	12,7	815	490	582	18	—30
	25,4	835	456	590	22	—20
	31,8	860	425	575	22	—25
0,075 % C; 0,19 % Si; 2,25 % Mn; 0,08 % Nb; 0,027 % P; 0,02 % S	12,5	850	460	560	27	—
	25,5	850	380	500	26	—
	38	850	360	490	24	—

7. Влияние режима контролируемой прокатки на свойства листовой стали 16Г2АФ [0,17 % C; 1,52 % Mn; 0,48 % Si; 0,10 % V; 0,019 % N; 0,031 % S; 0,018 % P (толщина листа 18 мм)] [13]

$T_{сл}$	$T_ч$	$T_{3ч}$	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ_5, %	*KCU*, МДж/м² при температуре, °С	
°С			МПа			—40	—60
2180	1075	1060	550	710	**14**	0,23	0,15
1200	990	970	490	660	**22**	0,35	0,17
1280	1025 (940)	920	530	670	**20**	0,47	0,37
1280	1025	910	540	680	**20**	0,44	0,39

Примечание. Температура металла: $T_{сл}$ — слябa; $T_ч$ — перед чистовой прокаткой; $T_{3ч}$ — перед тремя последними проходами (общее обжатие 40 %); в скобках — после подстуживания.

8. Влияние контролируемой прокатки с термическим упрочнением на механические свойства малоперлитной стали 09Г2ФБ [26]

Температура прокатки, °С		Степень деформации, %	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	*KCV*, МДж/м², при температуре, °С	
начала	конца		МПа		%		+20	—70
1150 *1	740 *1	70 *1	600/—*1	500/—*1	23/—*1	70/—*1	0,8 *1	0,03 *1
920	900	20	570/730	400/650	30/23	71/68	1,3/1,4	0,14/0,4
920	900	40	630/700	400/620	29/21	75/68	1,3/1,2	0,16/**0,3**
920	900	60	520/680	380/560	34/24	74/68	**1,4**/1,1	0,14/**0,2**

*1 Данные завода «Азовсталь».

Примечание. В числителе дроби приведены свойства стали после контролируемой прокатки с охлаждением на воздухе, в знаменателе — после контролируемой прокатки с последующим охлаждением в воде от температуры конца прокатки и отпуска при 670 °С, 1 ч.

устойчивой дислокационной структуры по типу полигонизации.

В результате упрочнения листов толщиной 16—17,5 мм из стали 12Г2ФР (0,11 % C; 1,37 % Mn; 0,44 % Si; 0,009 % S; 0,011 % P; 0,082 % V; 0,005 % B) по режиму: охлаждение от температуры конца контролируемой прокатки 720—740 °С до 600—640 °С со скоростью около 20 °С/с, а затем на воздухе, временное сопротивление разрыву повысилось от 540—560 до 620—630 МПа при высокой пластичности ($\delta_5 = 20 \div 26$ %) [27]. Легирование стали бором в количестве до 0,005 % повышает устойчивость аустенита и обеспечивает более высокую прокаливаемость. Листы из стали 12Г2ФР можно охлаждать при закалке с меньшей скоростью, чем листы из стали 09Г2ФБ, что облегчает реализацию термического упрочнения.

Малоперлитные стали с карбонитридным упрочнением (типа 09Г2ФБ) после контролируемой прокатки среди углеродистых и низколегированных

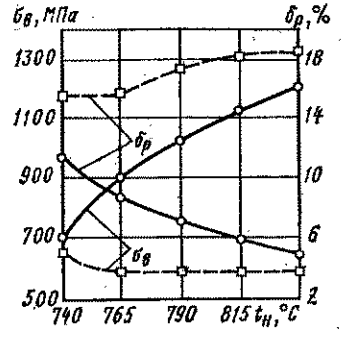


Рис. 2. Влияние температуры нагрева в МКИ на механические свойства ДФМС, полученных при закалке в воде (сплошные линии) и при охлаждении со скоростью около 30 °С/с (штриховые линии). Сталь типа 08Г2СФ [6]

строительных сталей имеют максимальную конструктивную прочность и наиболее низкую температуру полухрупкости (T_{50} = —50÷—70 °С). Получение такого комплекса свойств этих сталей обусловлено их мелкозернистостью (зерно 10—12) и наличием дисперсных карбонитридов V (C, N); Nb (C, N); AlN.

Двухфазные ферритно-мартенситные стали (ДФМС) — это низкоуглеродистые низколегированные стали, структура которых представляет собой мелкозернистую ферритную матрицу с 15—25 % мартенсита в виде отдельных островков [6, 41]. В структуре также может присутствовать небольшое количество остаточного аустенита, бейнита и дисперсных карбидов.

Существует широкий набор ДФМС, различающихся по структуре и свойствам. Базовыми ДФМС являются стали типа 06ХГСЮ (0,05—0,08 % С; 1,1—1,4 % Mn; 0,4—0,7 % Cr; 0,3—0,5 % Si) и 06Г2СЮ (0,05—0,08 % С; 1,4—1,7 % Mn; 0,4—0,6 % Si). Листовые ДФМС с высокой штампуемостью по составу близки к широко распространенным сталям типа 09Г2С; 09Г2; 09Г2Д; 10Г2С1 и т. п. (ГОСТ 19282—73).

Основной вариант термической обработки для получения ферритно-мартенситной структуры — неполная закалка: нагрев до температур межкритического интервала (МКИ) A_{c1}—A_{c3} с последующим охлаждением. Получение необходимого соотношения структурных составляющих ДФМС при термической обработке обеспечивается путем снижения (до 0,08—0,09 %) содержания углерода в стали, что позволяет уменьшить зависимость количества аустенита от температуры нагрева.

Конкретный режим термической обработки для получения ДФМС с требуемыми свойствами назначается в зависимости от состава стали с учетом параметров термического оборудования (скорости и продолжительности нагрева, средств охлаждения нагретой полосы, возможности проведения отпуска и т. д.). В общем случае температура нагрева должна соответствовать A_{c1} + (60÷90 °С); охлаждение от температур МКИ предпочтительно проводить с умеренными скоростями (5—30 °С/с) до 400—500 °С, что обеспечивает стабильность получения 15—25 % мартенсита и лучшую пластичность и вязкость (рис. 2). При этом существует достаточно широкий интервал температур нагрева (40—80 °С), которые, в свою очередь, обеспечивают примерное постоянство структуры и прочностных свойств. Отпуск при 200—250 °С способствует улучшению комплекса механических свойств (табл. 9) [41].

Двухфазные ферритно-мартенситные стали предназначены для изготовления деталей холодной пластической деформацией (штамповкой, высадкой, вытяжкой, гибкой). Их окончательные прочностные характеристики формируются в процессе изготовления деталей — в результате упрочнения при деформации и последующего старения уже готовых деталей, например во время сушки лакокрасочного покрытия при 170—200 °С. Повышение прочности ДФМС в процессе деформации составляет в среднем 10 МПа на 1 % обжатия поперечного сечения. В критическом сечении суммарная (на всех операциях) деформация при изготовлении деталей методами холодной объемной штамповки для гарантированного обеспечения $\sigma_в \geqslant 800$ МПа должна быть порядка 20—25 %. Механические свойства ДФМС после закалки

9. Влияние режима термической обработки на механические свойства двухфазной ферритно-мартенситной стали 10ХIМФ [41]

Структура	Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	KCV, МДж/м²	T_{50}, °С
Мартенсит	Нагрев + охлаждение в воде	1640	1900	0,1	—15
	То же + отпуск	1580	1850	0,1	—30
Феррит + мартенсит	Нагрев + охлаждение на воздухе	285	630	2,15	—15
	Нагрев + охлаждение в воде	305	680	2,0	+20
	То же + отпуск	390	640	2,6	—20

Примечание. Температура нагрева стали 730 °С; отпуск при 250 °С, 1 ч.

и деформационного старения приведены в табл. 10.

Поскольку предел выносливости определяется прочностными характеристиками, то ДФМС имеют определенные преимущества и при циклических испытаниях [6].

Сталь 09Г2 (рис. 3) после обработки на двухфазную структуру имеет повышенный предел выносливости; одновременно примерно в 3—3,5 раза увеличивается число циклов до разрушения в области малоцикловой усталости. Соответствующие механические свойства при растяжении приведены в табл. 11.

Упрочнение ДФМС создают участки мартенсита: каждый 1 % мартенситной составляющей в структуре повышает временное сопротивление разрыву примерно на 10 МПа независимо от прочности и геометрии мартенситной фазы. Разобщенность мелких участков мартенсита и высокая пластичность феррита значительно облегчают начальную пластическую деформацию. Характерный признак ферритно-мартенситных сталей — отсутствие на диаграмме растяжения площадки текучести. При одинаковом значении общего ($\delta_{0бщ}$) и равномерного ($\delta_р$) удлинения ДФМС обладают большей прочностью и более низким отношением $\sigma_{0,2}/\sigma_в$ (0,4—0,6), чем обычные низколегированные стали. При этом сопротивление малым пластическим деформациям ($\sigma_{0,2}$) у ДФМС ниже, чем у сталей с ферритно-перлитной структурой [41].

При всех уровнях прочности все показатели технологической пластичности ДФМС ($\sigma_{0,2}/\sigma_в$, $\delta_р$, $\delta_{0бщ}$, вытяжка по Эриксену, прогиб, высота стаканчика и т. д.), кроме раздачи отверстия, превосходят аналогичные показатели обычных сталей [6].

Повышенная технологическая пластичность ДФМС позволяет применять

10. Механические свойства (в МПа) двухфазных ферритно-мартенситных сталей (ДФМС) [6]

Сталь	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$
06ХГСЮ	250/560	620/650
06Г2СЮ	310/610	650/700

Примечание. В числителе дроби приведены механические свойства сталей после закалки из межкритического интервала температур, в знаменателе — после деформации на 5 % и старения при 200 °С.

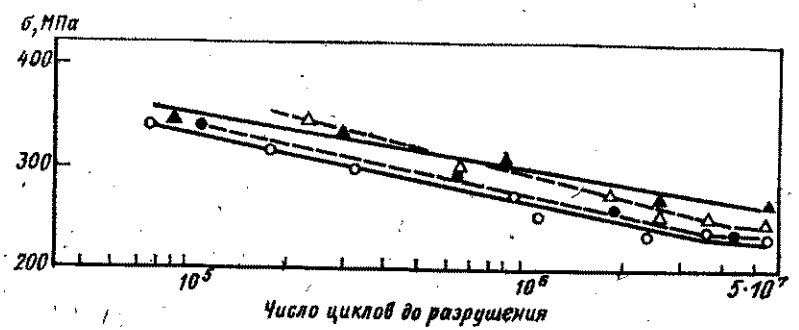


Рис. 3. Кривые усталости горячекатаной (○, ●) и термически обработанной на двухфазную структуру (△, ▲) стали 09Г2. Штриховые линии — в состоянии поставки; сплошные линии — после деформации на 5 % и отпуска на 200 °С, 1 ч. Лист толщиной 4 мм [6]

их для листовой штамповки деталей достаточно сложной конфигурации, что является преимуществом этих сталей перед другими высокопрочными сталями [4].

Сопротивление коррозии ДФМС находится на уровне сопротивления коррозии сталей для глубокой вытяжки [6].

ДФМС удовлетворительно свариваются методом точечной сварки. Предел выносливости при знакоперемеином изгибе составляет для сварного шва и основного металла ($\sigma_в \approx$ $\approx$ 550 МПа) соответственно 317 и 350 МПа, т. е. 50 и 60 % $\sigma_в$ основного металла [6].

В случае применения ДФМС для деталей массивных сечений, когда необходимо обеспечить достаточную прокаливаемость, целесообразно использовать составы с повышенным содержанием марганца или с добавками хрома, бора и т. д. [41].

Экономическая эффективность применения ДФМС, которые дороже низкоуглеродистых сталей, определяется экономией массы деталей (на 20—25 %). Применение ДФМС в некоторых случаях позволяет исключить упрочняющую термическую обработку деталей, например высокопрочных крепежных изделий, получаемых методом холодной высадки.

Среднеуглеродистые низколегированные стали содержат 0,25—0,50 % С и, кроме того, до 1,8 % Mn (стали 30Г, 40Г, 30Г2, 40Г2) и до 1,1 % Cr (стали 30Х, 40Х и др.). Эти стали (ГОСТ 4543—71) используются как

11. Механические свойства стали 09Г2 (0,10 % С; 1,65 % Mn; 0,32 % Si; 0,017 % S; 0,019 % P) [6]

Обработка	Структура	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_в}$	δ_4, %	$\sigma_{0,2}$ *1, МПа
Горячая прокатка	Ферритно-перлитная	410	500	0,82	25	490
Термическая обработка из (α + γ)-области	Ферритно-мартенситная	280	580	0,48	27	570

*1 После деформации на 5 % и нагрева при 200 °С, 1 ч.

конструкционные материалы в машиностроении, а также для металлоконструкций и крепежных деталей. Конкретное назначение, физические, механические и технологические свойства названных сталей подробно рассмотрены в справочной литературе [11, 16, 17, 32].

2. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ

Общая характеристика сталей. К группе среднелегированных высокопрочных сталей относятся стали 30ХГСН2А, 40ХСН2МА, 25Х2ГНТА. Поставляемые полуфабрикаты, рекомендуемые области применения и основные физические свойства этих сталей приведены в табл. 12—14.

Эти стали выплавляются в электродуговых печах с последующим вакуумно-дуговым переплавом. Стали хорошо деформируются в горячем состоянии, свариваются дуговой ручной и автоматической сваркой в среде защитных газов или под флюсом. Сталь 30ХГСН2А сваривается также электронно-лучевой сваркой.

Основной тип сварного соединения — сварка встык. Тавровые соединения допускаются, однако при этом обязательно должно быть утолщение металла обоих «полок» таврового соединения. Утолщение металла в зоне шва рекомендуется и для стыковых соединений. Сварные швы размещаются вне зоны действия концентраторов напряжения, предусмотренных в чертежах. Сварка проводится до закалки и отпуска на заданный уровень прочности. Перед сваркой детали следует нагревать до температуры 200—300 °С; сразу же после сварки необходим отпуск при 200 — 250° С в течение 3 ч во избежание появления трещин.

Среднелегированные высокопрочные стали подвергают механической обработке до закалки. Наилучшая обрабатываемость резанием достигается в состоянии низкотемпературного отжи-

12. Полуфабрикаты, выпускаемые из высокопрочных среднелегированных сталей

Сталь	Полуфабрикаты
30ХГСН2А (ГОСТ 4543—71)	Поковки, штамповки, листы, трубы, прутки
40ХСН2МА (ТУ 14-1-1885—85)	Поковки, штамповки, прутки, трубы
25Х2ГНТА (ТУ 14-1-3238—81)	Прутки, листы, трубы, профили, штамповки

13. Рекомендуемая область применения и температура эксплуатации сталей

Сталь	Область применения	Температура эксплуатации, °С
30ХГСН2А	Высоконагруженные детали (цилиндры, балки, работающие на срез шпильки и оси, групповые болты, нагруженные осевой силой)	—70÷+250
40ХСН2МА	Высоконагруженные детали, не имеющие значительных концентраторов напряжения	—70÷+250
25Х2ГНТА	Балки, болты, оси, нагруженные внутренним давлением сосуды	—

14. Физические свойства среднелегированных высокопрочных сталей при нормальной и повышенной температуре

Сталь	ρ, т/м³	σ_1, мкОм·м	λ, Вт/(м·°С), при температуре, °С			c, кДж/(кг·°С), при температуре, °С			$\alpha \cdot 10^6$, °С⁻¹, в интервале температур, °С			
			25	100	200	100	200	300	20—100	100—200	200—300	300—400
30ХГСН2А	7,77	0,44	28,5	29,4	30,6	31,4	0,503	0,545	0,587	10,6	11,2	13,0	14,9
40ХСН2МА	7,81	0,42—0,44	28,1	28,9	30,2	31,4	0,503	0,545	0,587	11,2	12,7	13,5	14,2
25Х2ГНТА	7,80	—	—	41,9	41,1	40,7	—	—	—	12,0	13,0	13,7	—

га с быстрым охлаждением на воздухе от 680—700 °С. Чистовую обработку проводят после полной термической обработки. При финишной обработке шлифованием должны строго соблюдаться режимы, гарантирующие отсутствие прижогов. После шлифования проводят отпуск при 200—300 °С. После сверления отверстий в отожженной стали необходимо удалять заусенцы и осуществлять развертывание или растачивание отверстий после полной термической обработки, снимая при этом поверхностный слой, окисленный при нагреве под закалку. Толщина окисленного слоя может достигать 20—50 мкм. Значительно более толстый окисленный и обезуглероженный слой (до 300—500 мкм) остается после штамповки. Некоторые поверхности деталей сложной формы после штамповки не подвергаются механической обработке. В этом случае для обеспечения высокой усталостной прочности хорошие результаты дает интенсивное поверхностное пластическое деформирование (ППД), например дробеструйное. Перед ППД на штампованных поверхностях должны быть устранены грубые дефекты в виде запрессованной окалины, заковов и др. Резьбовые участки болтов или шпилек после термической обработки следует подвергать пескоструйной очистке.

В зонах концентрации напряжения параметр шероховатости поверхности должен быть не более Ra = 1,6 мкм, вне зоны действия концентраторов Ra = 3,2 мкм — для растянутых элементов или Ra = 6,3 мкм — для элементов, работающих на сдвиг.

Рекомендуемые режимы упрочняющей термической обработки и свойства сталей. Для достижения высокой прочности среднелегированные стали подвергают обычной закалке на мартенсит и низкому отпуску при 220—250 °С, который улучшает пластичность, вязкость и особенно сопротивление разрушению при сохранении высокого уровня прочности.

Во многих случаях еще более высокий комплекс этих свойств, определяющих конструкционную прочность стали, достигается в результате изотермической закалки на нижний бейнит или низкой изотермической закалки, после которой структура стали состоит из нижнего бейнита и мартенсита. В ряде случаев после изотермической закалки проводят низкий отпуск, что улучшает сопротивление разрушению.

15. Рекомендуемые режимы упрочняющей термической обработки среднелегированных сталей

Сталь	$\sigma_в$, МПа	Режим термической обработки
30ХГСН2А	1600—1800	Закалка при 900 °С, масло; отпуск при 290 °С, 1 ч
	1500—1700	Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 270—300 °С; отпуск при 200—300 °С, 1 ч
	1400—1600	Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 280—330 °С
40ХСН2МА *1	1800—2000	Закалка при 900 °С, масло; отпуск при 200—260 °С
	1800—2000	Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 240—280 °С, 2—3 ч; отпуск при 240—260 °С, 2—3 ч
25Х2ГНТА	1500—1650	Закалка при 860 °С, масло; отпуск при 200—230 °С, 2—3 ч
	1500—1650	Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 200—250 °С, 1 ч; отпуск при 200 —230 °С

*1 Применение изотермической закалки предпочтительнее.

В табл. 15 приведены рекомендуемые режимы упрочняющей термической обработки среднелегированных сталей. Стали имеют повышенную прокаливаемость: сталь 25Х2ГНТА — до 30 мм; сталь 30ХГСН2А — до 80 мм; для стали 40ХСН2МА размеры сечения не регламентируются.

Механические свойства сталей после различных вариантов упрочняющей обработки для различных температур испытаний приведены в табл. 16—18. На рис. 4 представлена диаграмма растяжения одной из сталей, а на рис. 5—8 — их характеристики сопротивления усталостному разрушению в зависимости от вида используемой упрочняющей обработки. Показатели вязкости и трещиностойкости сталей приведены в табл. 19, 20.

Прочность среднелегированных сталей тем выше, чем больше в них содержание углерода, но при этом будет более низким показатель трещиностойкости K_{1c}, в том числе сопротивление коррозии под напряжением. Поверхностное пластическое деформирование затрудняет образование трещины усталости, замедляет скорость роста малых трещин и значительно повышает сопротивление малоцикловой усталости как на воздухе, так и в коррозионной среде. Для защиты от общей коррозии деталей из этих сталей применяют кадмирование, оксидное фосфатирование. Сопротивление коррозии под напряжением можно существенно повысить, применив в качестве финишной операции поверхностное пластическое деформирование: дробеструйное, пневмодинамическое, виброналклеп и др. В ряде случаев эффект ППД тем выше, чем выше уровень достигаемых при этом остаточных напряжений и больше глубина наклепанного слоя. С этих позиций особенно эффективны обкатка, раскатка и алмазное выглаживание. Алмазное выглаживание успешно применяется как операция, предшествующая хромированию поверхностей, от которых требуется высокая износостойкость (например, в паре шток—цилиндр). Малоцикловая усталость ушковых соеди-

16. Механические свойства среднелегированных высокопрочных сталей при нормальной температуре

Сталь	Термическая обработка	E, ГПа	G, ГПа	μ	Растяжение $\sigma_в$, МПа	Растяжение $\sigma_{0,2}$, МПа	Растяжение $\sigma_{пц}$, МПа	Растяжение δ_{10}, %	Кручение $\tau_в$, МПа	Кручение $\tau_{0,3}$, МПа	Сжатие $\sigma_{0,2}$, МПа	Срез $\tau_{ср}$, МПа
30ХГСН2А	Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 290 °С, 1 ч	195	77	0,26	1750	1400	1100	8	1550	900	1500	1150
	Изотермическая закалка с выдержкой при 330 °С	195	77	0,26	1600	1170	900	10	1400	870	—	1000
40ХСН2МА	Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 220 °С	195	77	0,26	2000	1500	1250	8	1700	—	1570	1200
	Изотермическая закалка с выдержкой при 240—260 °С, отпуск при 240—260 °С	195	77	0,26	1900	1440	1180	8	1600	850	1500	1200
25Х2ГНТА	Закалка при 860 °С, отпуск при 200—250 °С	195	76	0,28	1500	1200	1050	8	1350	950	1400	950

17. Механические свойства среднелегированных высокопрочных сталей при повышенных температурах

Сталь	Термическая обработка	Температура испытания, °С	E, ГПа	G, ГПа	μ	Растяжение $\sigma_в$, МПа	Растяжение $\sigma_{0,2}$, МПа	Растяжение $\sigma_{пц}$, МПа	Растяжение δ_{10}, %	Кручение $\tau_в$, МПа	Кручение $\tau_{0,3}$, МПа
30ХГСН2А	Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 290 °С, 1 ч	200	185	—	0,26	1750	1200	850	10	—	—
		300	180	70	0,28	1700	—	—	—	—	—
	Изотермическая закалка с выдержкой при 330 °С	300	180	70	0,28	1500	960	800	11	1400	630
		400	163	65	0,29	1330	930	760	7	1150	600
40ХСН2МА	Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 220 °С	300	180	—	—	1700	1300	—	—	1500	—
		400	—	—	—	1450	1100	—	—	1200	—
	Изотермическая закалка с выдержкой при 240—260 °С, отпуск при 240—260 °С	200	185	—	—	1850	—	—	—	—	—
		300	180	—	—	1750	—	—	—	—	—
25Х2ГНТА	Закалка при 860 °С, отпуск при 200—250 °С	250	—	—	—	1550	1100	—	10	—	—
		300	—	—	—	1300	—	—	14	—	—

18. Механические свойства среднелегированных высокопрочных сталей при температуре —70 °С

Сталь	Термическая обработка	E, ГПа	G, ГПа	μ	Растяжение $\sigma_в$, МПа	Растяжение $\sigma_{0,2}$, МПа	Растяжение $\sigma_{пц}$, МПа	Растяжение δ_{10}, %
30ХГСН2А	Закалка при 900 °С, масло, отпуск при 290 °С, 1 ч	195	77	0,26	1750	1500	—	7
	Изотермическая закалка с выдержкой при 330 °С	195	77	0,26	1700	1250	—	10
25Х2ГНТА	Закалка при 860 °С, отпуск при 200—250 °С	—	—	—	1700	1450	—	—

прочности высокопрочных сталей, заключающийся в имплантации геттерируемых источником высокой энергии ионов азота, бора и других в поверхностные слои стальной детали.

При применении среднелегированных сталей высокой прочности следует учитывать их повышенную чувствительность к концентрации напряжений может быть значительно (в 1,5—2 раза по числу циклов) улучшена путем раскатки поверхности отверстия проушины. Значительнее (до 5—10 раз) увеличивается долговечность в результате запрессовки стальной втулки с натягом 0,4—1,2 %.

Разрабатывается принципиально новый метод повышения усталостной

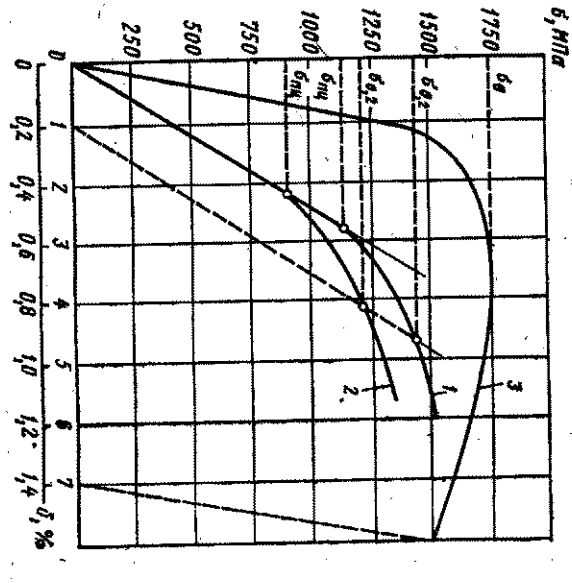


Рис. 4. Диаграммы деформации в упругопластической области ($\delta \leq 1$ %; 1 и 2) и полная диаграмма растяжения (3) стали 30ХГСН2А: 1, 3 — закалка в масло с отпуском при 200 °С, $\sigma_в$ = 1750 МПа; 2 — изотермическая закалка в селитру при 300 °С, $\sigma_в$ = 1600 МПа

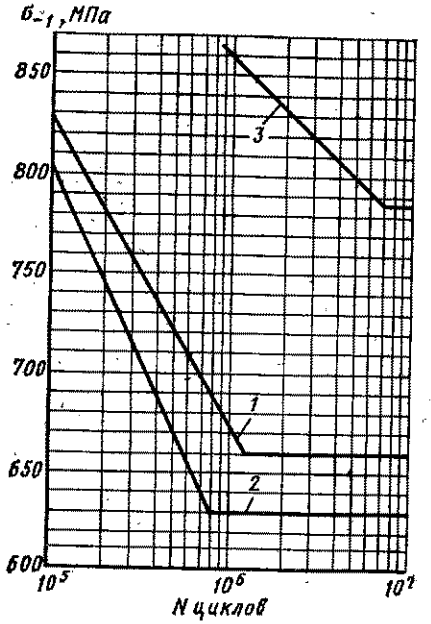


Рис. 5. Кривые усталости стали 30ХГСН2А при знакопеременном изгибе гладких образцов:

1, 2 — шлифованные образцы; *3* — обкатка роликом после шлифования; *1, 3* — закалка в масло с отпуском при 200 °С, $\sigma_в$ = 1720 МПа; *2* — изотермическая закалка в селитру при 300 °С, $\sigma_в$ = 1600 МПа

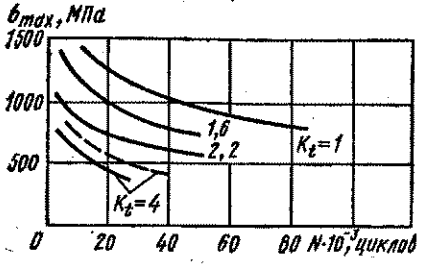


Рис. 6. Влияние концентрации напряжений на малоцикловую усталость при растяжении (R = 0,1; ν = 2 Гц) образцов с круговой выточкой из стали 30ХГСН2А, $\sigma_в$ = 1700 МПа; сплошные линии — закалка в масло; штриховая линии — изотермическая закалка

ний, особенно при цикличских нагрузках и высоких значениях коэффициента формы.

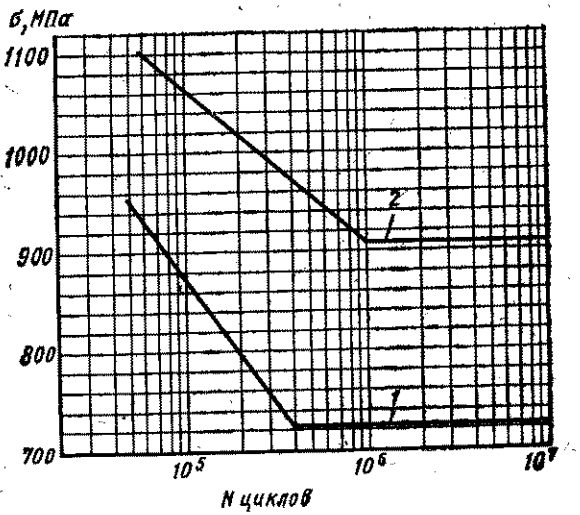
Рекомендации конструктору и технологу. Для деталей из стали 30ХГСН2А необходимы возможно более плавные переходы в местах изменения сечения, отсутствие перекосов при монтаже и сборке. Параметр шероховатости поверхности в зонах концентрации напряжений должен быть не более Ra = 1,6 мкм. В отверстиях проушин требуемое качество поверхности достигается развертыванием или чистовым растачиванием. Нарезание резьбы в деталях из стали 30ХГСН2А рекомендуется проводить до термической обработки; после термической обработки резьбу следует подвергать пескоструйной обработке. При осевой нагрузке усилие затяжки болтов должно вызывать напряжение не выше 450 МПа. Прочность сварных соединений, термически обработанных после

19. Ударная вязкость сталей (*KCU*, МДж/м²) при различной температуре испытаний

Сталь	Режим обработки	Температура испытаний, °С				
		+20	−40	−70	−130	−196
30ХГСН2А	Изотермическая закалка с выдержкой в селитре при 280—330 °С	0,9	—	0,7	0,25	0,13
25Х2ГНТА	Закалка при 860 °С, отпуск при 200—250 °С	0,7	0,6	0,6	—	0,2

Рис. 7. Кривые усталости стали 40ХСН2МА ($\sigma_в$ = 1850 МПа) при знакопеременном изгибе гладких образцов:

1 — шлифование; *2* — шлифование и обкатка роликом



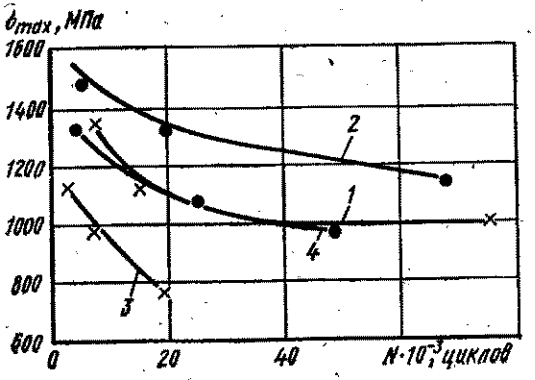


Рис. 8. Малоцикловая усталость стали 40ХСН2МА; $\sigma_в$ = 1850 МПа при пульсирующем растяжении (ν = 0,2 Гц):

1, 2 — воздух; *3, 4* — вода; × — шлифование; ● — наклеп дробью

20. Показатели вязкости и трещиностойкости сталей

Сталь	Термическая обработка	$\sigma_в$, МПа	*KCU*	*KCT*	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$
			МДж/м²		
30ХГСН2А	Закалка при 900 °С, масло; отпуск при 290 °С; 1 ч	1750	0,6	—	250—280 *1
	Изотермическая закалка с выдержкой при 300 °С	1600	0,85	0,12	250—300 *1
40ХСН2МА	Изотермическая закалка с выдержкой при 240—260 °С; отпуск при 240—260 °С	1900	0,5	—	180—210

*1 Внецентренное растяжение компактного образца (t = 25 мм).

сварки, составляет 0,6—0,7$\sigma_в$ основного материала.

Поверхностное упрочнение (дробеметное, дробеструйное, виброналклеп и др.) увеличивает в 2—3 раза ресурс детали при малоцикловом нагружении; повышает предел выносливости при испытании на знакопеременный изгиб в лабораторной атмосфере на 15—20 %, в коррозионной среде — до 1,5—2 раз, увеличивает сопротивление коррозии под напряжением. В ушковых соединениях наибольший эффект достигается путем запрессовки втулки с натягом.

Для деталей, от которых требуется повышенная износостойкость, применяют хромовое покрытие, наносимое на предварительно упрочненную ППД поверхность; для устранения течи в гидросистемах хромированная поверхность подвергается алмазному выглаживанию. Для восстановления изношенного хромового покрытия допускается повторное хромирование (до 5 раз) после зачистки. Защита деталей от коррозии — фосфатирование с последующим нанесением лакокрасочных покрытий.

Более высокая прочность стали 40ХСН2МА по сравнению со сталью 30ХГСН2А обусловлена повышенным (0,37—0,43 %) содержанием углерода, что делает ее более чувствительной к концентрации напряжений и поверхностным дефектам. По этой причине сталь 40ХСН2МА целесообразно применять для деталей простой формы, не имеющих значительных перепадов жесткости и других концентраторов напряжений. Следует предъявлять повышенные требования в отношении параметров шероховатости поверхности, отсутствия рисок от механической обработки, недопустимости монтажных перекосов. В зонах концентрации напряжений рекомендуемый параметр шероховатости поверхности не более Ra = 0,8 мкм. Напряжения при затяжке болтов из стали 40ХСН2МА не должны превышать 300 МПа. При изготовлении деталей из стали 40ХСН2МА, испытывающих при эксплуатации повторные нагрузки, необходимо применять поверхностное пластическое деформирование, которое повышает служебные свойства еще в большей мере, чем у деталей стали 30ХГСН2А. Защита стали от коррозии такая же, как и стали 30ХГСН2А. Требования в отношении концентраторов напряжения, параметров шероховатости поверхности для стали 25Х2ГНТА такие же, как и для стали 30ХГСН2А. При меньшей статической прочности сталь 25Х2ГНТА практически не уступает по пределу выносливости стали 30ХГСН2А. Прочность сварного соединения (встык) 0,5—0,65$\sigma_в$ основного металла. Для выравнивания несущей способности рекомендуется местное усиление сварных швов с плавным переходом. После шлифования требуется отпуск при 200—230 °С в течение 3 ч. Так же как и для других высокопрочных сталей, припуск в отверстиях после термической обработки следует удалять чистовым растачиванием или развертыванием; кромки отверстий должны быть скруглены или иметь фаски. Сварные швы следует располагать вне зоны концентрации напряжений. Сталь 25Х2ГНТА можно применять для цементуемых деталей.

3. ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫЕ (МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩИЕ) СТАЛИ

Стали этого класса обладают уникальным комплексом механических свойств: высокой прочностью при достаточной пластичности и вязкости, высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, хрупкому и усталостному разрушению, что в сочетании с хладостойкостью, теплостойкостью, коррозионной стойкостью и размерной стабильностью определяет такую эксплуатационную надежность изделий из мартенситно-стареющих сталей, которая не достигается при использовании сталей других классов [24].

Мартенситно-стареющие стали — это безуглеродистые комплексно легированные сплавы на железной основе, у которых определенное сочетание легирующих элементов обеспечивает формирование в процессе соответствующей

термической обработки пластичной матричной фазы — мартенсита замещения, армированной дисперсными высокопрочными, равномерно распределенными частицами интерметаллидных фаз.

Основу мартенситно-стареющих сталей составляет безуглеродистый железоникелевый мартенсит (8—20 % Ni). Высокая концентрация никеля обеспечивает устойчивость переохлажденного аустенита сталей этого класса, способствует формированию в них при закалке мартенситной структуры, в том числе и при условии замедленного охлаждения. Никель повышает растворимость многих элементов замещения в аустените и уменьшает их растворимость в мартенсите, благодаря чему закалкой можно зафиксировать сильно пересыщенный α-твердый раствор (мартенсит замещения), способный к интенсивному дисперсионному твердению при старении.

Дисперсионное твердение железоникелевого мартенсита вызывают титан, бериллий, алюминий, марганец, ванадий, молибден, вольфрам, ниобий, тантал, кремний и другие элементы, характеризующиеся ограниченной растворимостью в α-Fe (рис. 9), причем наибольшее упрочнение при старении (в условиях равной атомной концентрации) обеспечивают те из них (титан, алюминий, бериллий), равновесная концентрация которых в мартенсите минимальна.

Никель (а в некоторых сталях и кобальт) способствуют увеличению объемной доли выделяющихся при старении упрочняющих фаз и тем самым повышают эффективность процесса дисперсионного твердения (рис. 10 и 11). Положительное влияние кобальта в мартенситно-стареющих сталях обусловлено также формированием в мартенситной матричной фазе при старении упорядоченных областей, являющихся дополнительным фактором упрочнения. Хром в мартенситно-стареющих сталях способствует повышению их коррозионной стойкости и одновременно вызывает дополнительное упрочнение при старении (рис. 12).

Подробно основные системы легирования мартенситно-стареющих сталей, особенности их фазового состава

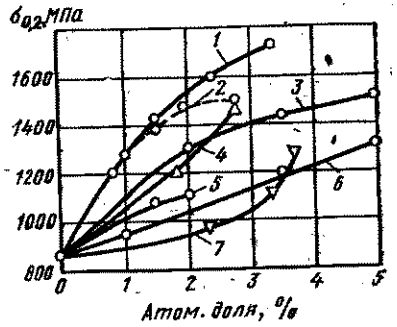


Рис. 9. Влияние концентрации легирующих элементов на упрочнение железоникелевого мартенсита (18 % Ni) при старении [24]: *1* — Ti; *2* — Be; *3* — Al; *4* — Mn; *5* — Nb; *6* — Si; *7* — Mo

и структурного состояния, а также представления о природе высокой прочности сталей этого класса рассмотрены в монографиях [5, 25]. Эти стали содержат, как правило, значительное количество различных легирующих элементов. При их выборе основываются на требованиях строгого баланса компонентов, поскольку при этом необходимо обеспечить не только эффективное дисперсионное твердение мартенсита при старении, но и предот-

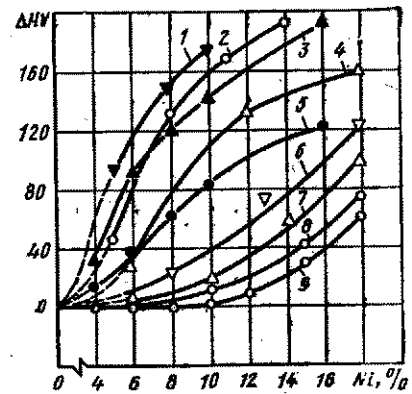


Рис. 10. Влияние содержания никеля на повышение твердости (ΔHV) при старении мартенсита сталей на основе Fe с различным дополнительным легированием [24]: *1* — 5 % Mn; *2* — 4 % Nb; *3* — 1,5 % Ti; *4* — 6 % Ta; *5* — 1,5 % Al; *6* — 3 % Si; *7* — 7 % V; *8* — 10 % W; *9* — 5 % Mo

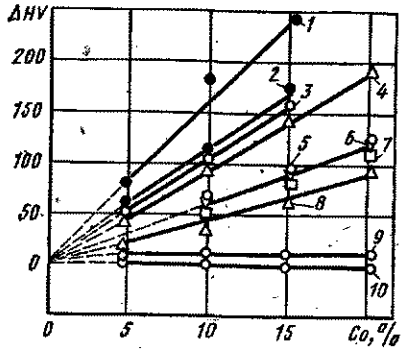


Рис. 11. Влияние содержания кобальта на повышение твердости (ΔHV) при старении железоникелевого мартенсита (14—18 % Ni), содержащего различные элементы замещения [20]:

1 — Н18Ф7; *2* — Н18В10; *3* — Н16М5; *4* — Н16С3; *5* — Н14Б4; *6* — Н18Та6; *7* — Н16Г5; *8* — Н16; *9* — Н16Т; *10* — Н16Ю

вратить появление в структуре стали большого колнчества остаточного аустенита, снижающего прочность, или δ-феррита, уменьшающего пластичность сталей.

Мартенситно-стареющие стали характеризуются высокой технологичностью [11, 24]. Их упрочняющая термическая обработка, заключающаяся в закалке и старении, сравнительно

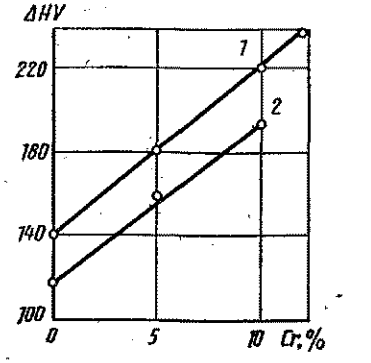


Рис. 12. Влияние содержания хрома на повышение твердости (ΔHV) при старении сталей [24]:

1 — Fe + 11 % Ni + 1,1 % Ti; *2* — Fe + + 11 % Ni + 1,1 % Al

проста. Стали имеют глубокую прокаливаемость, закаливаются на мартенсит практически при любой скорости охлаждения. Изменения размеров при термической обработке этих сталей минимальны, поэтому практически исключены поводки и коробления изделий самой сложной формы. Стали этого класса, как правило, не содержат углерода, поэтому нет опасности их обезуглероживания при термической обработке в обычной среде. Указанные преимущества мартенситно-стареющих сталей позволяют подвергать термической обработке готовые детали и изделия.

В закаленном состоянии указанные стали характеризуются высокой пластичностью и вязкостью, малым коэффициентом деформационного упрочнения; потому при изготовлении проволоки, ленты, труб и других полуфабрикатов эти стали можно деформировать с высокими степенями обжатия (до 90 %), не прибегая к промежуточным разупрочняющим обработкам. Стали хорошо свариваются, а также штампуются в горячем и холодном состоянии; обработка резанием закаленных сталей не вызывает трудностей.

Закаленные мартенситно-стареющие стали имеют структуру мартенсита замещения. Легирующие элементы, вызывающие старение, незначительно влияют на свойства несостаренного мартенсита, поэтому прочность, пластичность и вязкость закаленных сталей разных составов весьма близки и находятся, как правило, в следующих пределах [24]: $\sigma_в = 900 \div 1200$ МПа; $\sigma_{0,2} = 800 \div 1100$ МПа; $\delta = 15 \div 20$ %; $\psi = 50 \div 80$ %; $KCV = 1,5 \div 3$ МДж/м².

Старение мартенситно-стареющих сталей приводит к повышению их прочности, но одновременно снижает вязкость и пластичность. Наиболее высокое упрочнение достигается для всех сталей при старении в интервале температур 480—520 °С (рис. 13); при этом в зависимости от состава сталей временное сопротивление может повышаться на 300—1800 МПа [24]. При более высокой температуре старения развиваются процессы, ведущие к разупрочнению: коагуляция частиц упрочняющих фаз и образование устойчивого аустенита вследствие обратного $\alpha \rightarrow \gamma$ — превращения.

Учитывая диапазон упрочнения, реализуемого в мартенситно-стареющих сталях ($\sigma_в = 1500 \div 3500$ МПа), диапазон размеров изделий (от проволоки до многотонных поковок), комплекс ценных физико-химических свойств и высокую технологичность — область применения этих сталей как конструкционного материала практически не ограничена и непрерывно расширяется. Наиболее целесообразно использовать их прежде всего для изделий, от которых требуется высокая удельная прочность в сочетании с высокой эксплуатационной надежностью.

Разработаны составы мартенситно-стареющих сталей, удовлетворяющие различным требованиям по уровню прочности, пластичности, коррозионной стойкости, по температурной области применения. Большинство сталей создано на базе систем Fe—Ni—Mo, Fe—Ni—Co—Mo, Fe—Cr—Ni—Mo, Fe—Cr—Ni—Co—Mo.

Мартенситно-стареющие стали общего назначения. Составы и свойства. Наиболее распространенные составы мартенситно-стареющих сталей и их свойства (по литературным данным) приведены в табл. 21 в соответствии с принятой классификацией по уровню прочности.

Как конструкционный материал общего назначения наилучшее сочетание прочности, пластичности и вязкости имеют стали, содержащие 17—19 % Ni, 7—12 % Co, 3—5 % Mo, 0,2—1,6 % Ti. Изменением содержания титана в этой системе можно варьировать прочность сталей в широких пределах (1400—2500 МПа) [24]. Наибольшее распространение в технике получила сталь типа Н18К9М5Т (ЭП-637).

Сталь Н18К9М5Т (ТУ 14-1-1531—75) содержит ⩽0,03 % C, 16,7—19,0 % Ni, 8,5—9,5 % Co, 4,6—5,5 % Mo, 0,5—0,8 % Ti, ⩽0,15 % Al. В закаленном состоянии (закалка при 820 °С, охлаждение на воздухе) сталь имеет следующие свойства: $\sigma_в = 1000 \div 1100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 900 \div 1000$ МПа; $\delta \geqslant 15$ %. После закалки и старения при 480—500 °С (3 ч) сталь имеет в среднем следующие механические свойства: $\sigma_в = 1900 \div 2100$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1800 \div 2000$ МПа; $\delta = 8 \div 10$ %; $\psi = 45 \div 55$ %; $KCU = 0,5 \div 0,7$ МДж/м².

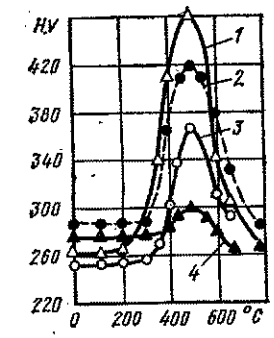


Рис. 13. Влияние легирующих элементов на упрочнение железоникелевого мартенсита при старении [24]:

1 — 17,6 % Ni + 1,2 % Ti; *2* — 17,5 % Ni + 1,1 % Al; *3* — 18 % Ni + 1,5 % Nb; *4* — 16,6 % Ni + 2,1 % Mo

В связи с широким и разнообразным промышленным применением было детально изучено влияние режимов термической обработки на комплекс основных свойств стали Н18К9М5Т.

Перегрев стали Н18К9М5Т при горячей пластической деформации или термической обработке повышает ее чувствительность к трещине (табл. 22). Для измельчения зерна перегретой стали рекомендовано применение перед основной закалкой (820 °С) трехкратной закалки на воздухе или в воде от 900—950 °С с выдержкой 1 ч.

Оценивая возможность использования сталн в виде крупных поковок, прутков и листов толщиной более 25 мм, установили ее склонность к тепловому охрупчиванию при замедленном охлаждении от 1150—1200 °С или при ступенчатом охлаждении в интервале 900—700 °С, связанную с разнозернистостью, но главным образом с образованием зернограничных выделений карбидов и карбонитридов титана. Для устранения явления теплового охрупчивания предложен режим термической обработки, включающий закалку от 1150—1200 °С с охлаждением в воде (для растворения

21. Содержание основных легирующих элементов и механические свойства [1] (средние) мартенситно-стареющих сталей общего назначения [2]

Обозначение стали	Средняя концентрация легирующих элементов (по массе), %	Механические свойства					Источник
		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м²	
		МПа		%			
	$\sigma_в$ = 1500÷2000 МПа						
Н18К3М4Т	18 Ni; 3,2 Co; 4,2 Mo; 0,26 Ti	1550	1500	9	49	0,46	[22]
Н18К7М5Т	18 Ni; 7 Co; 5,5 Mo; 0,5 Ti	1800	1700	8	50	0,5	[23]
Н18К8М3Т	18 Ni; 8 Co; 3 Mo; 0,2 Ti	1450	1400	15	65	0,8	[22]
Н18К8М5Т	18 Ni; 8 Co; 5 Mo; 0,5 Ti	1850	1800	12	60	0,5	[22]
Н18К9М5Т	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,5 Ti	1900	1830	8	50	0,6	[24]
Н18К9М5Т	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,8 Ti	2100	1900	8	50	0,5	[22]
Н18К9М5Т	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 1,2 Ti	2180	1960	8	45	0,6	[10]
Н15К9М5ТЮ	15 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,7 Ti; 0,9 Al	1960	—	6	23	—	[22]
Н16К4М5Т2Ю	16 Ni; 4,5 Co; 4,5 Mo; 2 Ti; 0,3 Al	2050	1980	7,5	40	0,2	[8]
Н12К8М3Г2	12 Ni; 8 Co; 3 Mo; 2 Mn	1500	1480	9,6	57	0,6	[22]
Н12К8М4Г2	12 Ni; 8 Co; 4 Mo; 2,3 Mn	1700	1680	7	50	0,4	[22]
Н18Ф6М3	18 Ni; 6 V; 3 Mo	1650	1600	10	60	0,7	[34]
Н18Ф6М6	18 Ni; 6 V; 6 Mo	1940	1880	10	53	0,45	[34]
	$\sigma_в$ = 2000÷2500 МПа						
Н16К11М3Т2	16 Ni; 11 Co; 3 Mo; 1,6 Ti	2136	2070	11	64	—	[10]
Н16К11М3Т2	16 Ni; 11 Co; 3 Mo; 1,9 Ti	2250	2220	12	60	—	[10]
Н17К11М4Т2Ю	17 Ni; 11 Co; 4,5 Mo; 1,8 Ti; 1 Al	2570	2550	8	46	0,25	[10]
Н18К12М3Т2	18 Ni; 12 Co; 3 Mo; 1,4 Ti	2400	2350	9	50	0,2	[24]
Н17К12М5Т	17 Ni; 12 Co; 5 Mo; 1 Ti	2050	2000	8	45	0,3	[8]
Н18К12М4Т2	18 Ni; 12 Co; 4 Mo; 2 Ti	2450	2350	7	35	—	[8]
Н18К14М5Т	18 Ni; 14 Co; 5 Mo; 1,5 Ti	2400	—	9	35	—	[8]
Н18К4М7ТС	18 Ni; 4,5 Co; 7,7 Mo; 0,6 Ti; 0,7 Si	2180	2060	7	34	0,35	[22]
Н17К10М2В10Т	17 Ni; 10 Co; 1,5 Mo; 10 W; 0,7 Ti	2350	2300	8,5	48	0,3	[24]

Продолжение табл. 21

Обозначение стали	Средняя концентрация легирующих элементов (по массе), %	Механические свойства					Источник
		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м²	
		МПа		%			
	$\sigma_в \geqslant$ 2500 МПа						
Н12К12М10ТЮ	12 Ni; 12 Co; 10 Mo; 0,8 Ti; 1 Al	3000	2950	2	4	—	[10]
Н12К15М10	12 Ni; 15 Co; 10 Mo	2500	2400	6	30	0,2	[22]
Н13К15М10	13 Ni; 15 Co; 10 Mo	2600	2500	6	30	0,2	[24]
Н13К16М10	13 Ni; 16 Co; 11 Mo	2800	2740	8	42	—	[22]
Н12К16М12	12 Ni; 16 Co; 12 Mo	2800	2740	5	40	0,2	[24]
Н8К18М14	8 Ni; 18 Co; 14 Mo	3500	3400	1	3	—	[22]
Н12К12М7В7	12 Ni; 12 Co; 7,8 Mo; 6,7 W	2600	—	6	30	0,25	[10]
Н16К15В9М2	16 Ni; 15 Co; 9 W; 2 Mo	2600	2400	6	30	0,2	[1]

[1] Свойства сталей после старения при температурах 480 — 520 °С.

[2] Освоенные промышленностью марки мартенситно-стареющих сталей поставляются по техническим условиям.

22. Чувствительность образцов стали 00Н18К9М5Т к поверхностной усталостной трещине [37]

Заготовка для изготовления образца	Термическая обработка	Номер зерна	$\sigma_в$ образцов, МПа	
			гладких	с трещиной
Горячекатаный лист (толщиной 2,5 мм)	Закалка при 820 °С, 1 ч + старение при 450 °С, 3 ч	8	1940	1940
		1—3	1860—1950	1500—1720
Перегретый пруток (1100° С, 2 ч), ⌀ 130 мм	Закалка 3 раза при 920° С, 1 ч, + 820 °С, 1 ч, + 450 °С, 3 ч	5—6	1930	1900—1990

пограничных выделений) и последующую трехкратную закалку при 900—950 °С (для измельчения зерна) (табл. 23).

Применительно к стали Н18К9М5Т были опробованы различные комбинированные способы термической обработки, в том числе и термоциклирование, для получения двухфазной ($\alpha + \gamma$)-структуры. Путем стабилизации 18—30 % аустенита (особенно если аустенит получен в результате применения термоциклической обработки) могут быть существенно повышены пластичность, ударная вязкость и вязкость разрушения, сопротивление

23. Влияние режима термической обработки крупных поковок из стали Н18К9М5Т на ее свойства [36]

Термическая обработка	Направление волокна	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	*KCU*, МДж/м²
		МПа		%		
Закалка 820 °С, 1 ч + старение 480 °С, 3 ч	Продольное	1850—2200	1800—2100	6—8	25—50	—
	Поперечное	1850—2200	1800—2100	2—4	5—30	0,07—0,2
1200 °С, 2 ч, вода + 3 раза 970 °С, 1 ч, вода +520 °С, 3 ч	Продольное	1950—2100	1850—2050	6—10	40—58	—
	Поперечное	1950—2100	1850—2050	5—8	25—50	0,2—0,25

ударио-цнклическому нагруженню при иезначительном снижении прочности стали (табл. 24).

Значнтельно влияет на свойства стали Н18К9М5Т и режим старения. Длнтельное (до 40—50 ч) старенне прн 425—450 °С обеспечивает более высокне прочиостные свойства стали, чем старенне прн 480—500 °С при практическн одннаковых показателях пластичности. С помощью комбнннрованного старения (500 °С, 3 ч + 425 °С), сократив время выдержкн вдвое, можно получить ту же прочность стали, что и при длительном низкотемпературном старенни. Отличительной особенностью стали Н18К9М5Т является то, что пластнчность, вязкость разрушения, работа ударного изгиба образцов с трещиной изменяются при возрастанни упрочнения практически независимо от режима старення.

Проведена оценка работоспособностн стали в различиых условнях эксплуатацнн. Параметры, характеризующие конструктнвную прочность стали Н18К9М5Т, свидетельствуют о высоком сопротивленни развитню трещины. После полного цикла упрочняющей обработкн отношение временного сопротивления образцов с надрезом к временному сопротивленню гладких образцов $(\sigma_в^н/\sigma_в)$ существенно больше 1 (1,4—1,6); ударная вязкость образцов с заранее нанесенной трещиной также весьма высока (0,15—0,25 МДж/м²). Вязкость разрушения K_{1c}, хотя и снижается по мере роста предела текучести, однако во всех случаях превышает уровень, достигаемый в углеродсодержащих легированных сталях эквивалентной прочности (табл. 25).

Меньшая чувствительность стали Н18К9М5Т к надрезу проявляется и в условиях усталостного нагружения. По сопротивлению усталости сталь соответствует углеродсодержащим конструкционным сталям равной прочности (рис. 14), а при ударно-усталостном нагружении ее стойкость в 2—4 раза выше [24].

Как и многим другим мартенситно-стареющим сталям, стали Н18К9М5Т свойственно высокое сопротивление развитию малой пластической деформации. Для достижения максимального предела упругости ($\sigma_{0,002} = 1275 \div 1370$ МПа) рекомендуют старенне прн 450 °С, 4 ч [28]. Ступенчатое старение по режиму 480 °С, 30 мин + 425 °С, 8 ч позволяет повысить предел упругости $\sigma_{0,002}$ до 1575 МПа.

При определенных режимах термической обработки благодаря стабилизации некоторого количества аустенита наряду с высокими упругими характеристиками сталь Н18К9М5Т обладает также и элинварными свой-

24. Механические свойства (средние значения) стали Н18К9М5Т при различных способах получения остаточного аустенита [24]

Вариант	Термическая обработка	Количество аустенита, %	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	*KCU*, МДж/м²	K_{1C}, МПа·м$^{1/2}$	Число циклов до разрушения при напряжении σ_{max}, МПа		
			МПа		%				1100	1650	2600
Обычная термическая обработка	Закалка 820 °С, старение 490 °С, 3 ч	0	2100	2050	8	57	0,4	97	48 000	20 000	4600
ТЦО	820 °С, 5 мин (дважды), старение 490 °С, 3 ч	18	1950	1930	10,8	63	0,9	143	60 000	23 000	4400
Нагрев в двухфазной области	Закалка 820 °С, старение 550 °С, 3 ч	28	1800	1750	8,7	60	0,4	115	33 000	13 000	3740
	Закалка 820 °С, старение 600 °С, 30 мин	19	1790	1730	10,7	58	0,6	128	38 000	13 600	3700
	Закалка 820 °С, старение 650 °С, 5 мин	18	1810	1750	10	63	0,7	137	43 000	17 600	4100
Тепловая стабилизация	Нагрев при 820 °С, изотермическая выдержка при 110 °С, 5 мин, старение при 490 °С, 3 ч	30	1860	1800	10	60	0,6	113	50 000	12 000	250

25. Вязкость разрушения стали Н18К9М5Т с различным содержанием титана [24]

Ti, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$
0,2	1400	115—180
0,4	1700	103—170
0,8	1950	93—155

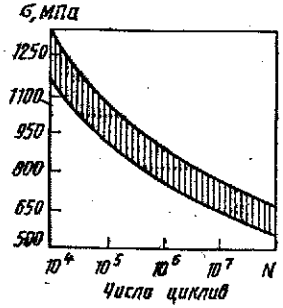


Рис. 14. Кривая усталости образцов из стали Н18К9М5Т [24]

ствами, т. е. малым изменением модуля упругости в климатическом интервале температур (табл. 26).

Оптимальное сочетание элливарных и механических свойств получено на стали Н21К9М5Т с повышенным содержанием никеля (после закалки от 850—900 °С и старения при 575 °С, 3 ч ТКЧ = —30·10^{-6} 1/°С, $\sigma_{0,005}$ = = 1100÷1150 МПа).

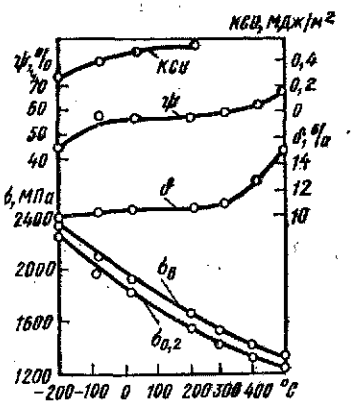


Рис. 15. Зависимость механических свойств стали Н18К9М5Т от температуры испытаний [24]

Сталь Н18К9М5Т сохраняет свою работоспособность в широком интервале температур: от криогенных до +400 °С (рис. 15). Понижение температуры испытания до —196 °С увеличивает временное сопротивление от 2000 до 2400 МПа при незначительном уменьшении пластичности и вязкости (KCU = 0,3÷0,4 МДж/м², δ = 7÷9 %, ψ = 40÷45 %) [24]. При нагреве пропорционально уменьшаются прочностные характеристики, снижается предел упругости $\sigma_{0,002}$ [28] (от 1450 МПа при 20 °С до 1210, 930 и 755 МПа соответственно при 200, 300, 400 °С); тем не менее и при 300 °С сталь отличают достаточно высокие свойства и хорошее сопротивление ползучести.

26. Физико-механические свойства стали Н18К9М5Т после старения при разных температурах [12]

Температура старения, °С	ТКМУ	ТКЧ	γ-фаза, %	$\sigma_{0,005}$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ
	×10^6, 1/°С			МПа			%	
450	—	—175	0	1600	1800	1900	10	62
480	—250	—160	0	1700	2100	2200	8	58
530	—225	—140	15	1300	2000	2080	10	57
600	—	—38	40	980	1750	1850	12	55
630	—65	—30	50	850	1650	1750	14	64
650	—	—80	40	—	—	—	—	—

Примечание. ТКМУ — температурный коэффициент модуля упругости; ТКЧ — температурный коэффициент частоты.

27. Физико-механические свойства стали Н18К9М5Т [24]

Свойства	Значения
Удельное электрическое сопротивление ρ_t, мкОм·м: после закалки	0,60—0,51
после старения при 480 °С, 3 ч	0,38—0,39
Коэрцитивная сила, А/м: после закалки	1750—1910
после старения при 480 °С, 3 ч	2150
Модуль упругости $E\cdot10^{-4}$ при 20 °С, МПа	19
Модуль сдвига $G\cdot10^{-4}$, МПа	7—7,2
Коэффициент Пуассона μ	0,3
Плотность, т/м^3	8
Коэффициент линейного расширения $\alpha\cdot10^6$, 1/°С (20—480 °С)	11,2
Изменение длины $\Delta L/L\cdot100$ после старения при 480—500°С, %	—0,08
Теплопроводность λ, Вт/(м·°С) (100—400 °С)	25,5
Удельная теплоемкость c, кДж/(кг·°С) (100—400 °С)	0,480

Вследствие высокого содержания никеля мартенситно-стареющие стали общего назначения превосходят по кор-

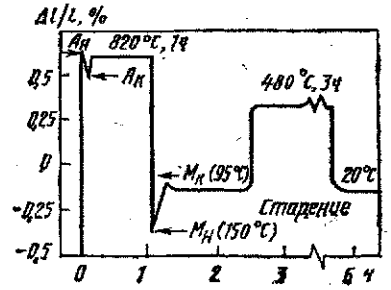


Рис. 16. Относительное изменение длины образцов при отдельных операциях упрочняющей термической обработки стали Н18К9М5Т [24]

Коррозионно-стойкие мартенситно-стареющие стали. Составы и свойства. Вследствие высокого содержания ни-

розионной стойкости (без нагрузки) стойкость высокопрочных конструкционных низколегированных сталей, а по сопротивлению коррозии под напряженнем уступают им [5]. Коррозионная стойкость сталей этого класса повышается прн введении уже 5 % Cr; однако достаточную работоспособность сталей как в атмосферных условиях, так и в некоторых агрессивных средах обеспечнвает введенне не менее 10—12 % Cr.

Легнрование хромом вносит существенные изменения в фазовый состав мартенснтно-стареющих сталей, способствует сохранению в стали значительного колнчества остаточного аустенита, в связи с чем коррозионностойкие мартенситно-стареющие стали фактнчески прнпадлежат к переходному (мартенситно-аустенитному) классу и в цнкле их упрочняющей обработки рекомендуют перед старением проводнть обработку холодом нлн холодную пластическую деформацию. Для мартенснтно-стареющих сталей, содержащнх хром, характерным является рост коэффицнента деформационного упрочнення, что позволяет использовать для них холодную пластическую деформацню перед старением как эффективный дополнительный фактор упрочнения [24].

Коррозионно-стойкие мартенснтно-стареющие стали, содержащие кобальт, отличаются существенно более высокой теплостойкостью, сохраняя работоспособность до 550 °С.

Наиболее распространенные составы коррозионно-стойких мартенснтно-стареющих сталей и нх свойства после полного цикла упрочняющей обработки (по литературным данным) приведены в табл. 28. Отдельно выделены стали, предназначенные для эксплуатации при повышенной температуре.

Стали, нашедшие шнрокое промышленное примененне, условно могут быть разбиты на две группы: низкоуглероднстые слабостареющие (типа 08Х15Н5Д2Т) и безуглероднстые интенснвно стареющне (типа 03Х12Н10Д2ТБ и 03Х11Н10М2Т).

Сталь 08Х15Н6Д2Т (ВНС-2) [5] в закаленном состоянии кроме мартенсита содержит около 10 % остаточного аустенита. Температура закалки составляет 950—1000 °С. Охлажденне прн закалке должно быть ускоренным во избежание образования сетки зернограничных карбидных выделений. Закалка может одновременно сочетаться с обработкой давлением; при этом сталь ведет себя как аустенитная, если деформация заканчивается при температуре выше начала мартеиснтного превращенns. В большинстве случаев после такой термомеханической обработки нет необходимости выполнять обработку холодом.

В закаленном состоянии сталь характернзуется повышенным временным сопротнвлением (1150—1220 МПа) прн очень высоком сопротнвлении удару: $KCU = 1{,}5$—2 МДж/м². Старение при 450 °С способствует достнженню более высокого упрочненns ($\sigma_в = 1350 \div 1450$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1150 \div 1250$ МПа). Прочность стали может достигать ~1600 МПа, если перед старением ее подвергнуть холодной пластической деформацни.

Сочетание высоких механическнх свойств (в том числе и при крногенных температурах) с отличной свариваемостью делает сталь 08Х15Н5Д2Т перспективным материалом для многих отраслей современной техники.

Сталь 03Х12Н10Д2ТБ [5, 28]. Закалка стали проводнтся с температур 870—1150 °С (в завнсимости от содержанns титана соответственно 0,4—1,2 %) и сочетается с обработкой холодом при —70 °С, 2 ч. Прнмущество безуглеродистых сталей (по сравнению с низкоуглеродистыми) — меньшая чувствительность к охрупчнванию при замедленном охлаждении.

Оптимальный режнм старения стали 03Х12Н10Д2ТБ — нагрев при 450 °С, выдержка 6 ч. При этом достигаются следующие свойства: $\sigma_в = 1800$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1700$ МПа, $\sigma_{0,002} = 1260$ МПа, $\delta = 10$ %, HV 460. Проведенне ступенчатого старения по схеме 450 °С + + 400 °С позволяет повысить предел упругости ($\sigma_{0,002} = 1300$ МПа) и особенно релаксационную стойкость стали. Также весьма эффективным является примененне перед старением холодиой пластической деформацни (при $\varepsilon = 80$ % $\sigma_в$ повышается до 2500 МПа).

28. Содержание основных легирующих элементов и механические свойства (средние) коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталей[1]

Обозначение стали	Средняя концентрация легирующих элементов (по массе), %	Механические свойства					Источник
		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м²	
		МПа		%			
Стали для нормальных температур							
Х5Н12М3Т	5 Cr; 12 Ni; 3 Mo; 0,4 Ti	1550	1450	15	61	0,6	[22]
Х11Н10М2Т	11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 0,6 Ti	1500	1400	8	50	0,5	[22]
Х11Н10М2Т	11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 0,9 Ti	1550	1480	12	58	0,5	[24]
Х11Н10М2Т	11 Cr; 10 Ni; 2 Mo; 1,2 Ti	1750	1700	12	50	0,37	[23]
Х12Н8Л	12 Cr; 8 Ni; 0,9 Be	1860	1720	16	6	—	[24]
Х12Н9Д2ТБ	12 Cr; 9 Ni; 2 Cu; 1 Ti; 0,4 Nb	1800	1700	10	—	—	[22]
Х12Н9МД2Т	12,5 Cr; 8,5 Ni; 2,2 Cu; 0,7 Mo; 0,8 Ti	1550	1500	10	50	0,5	[23]
Х12Н10Д2Т	12 Cr; 9 Ni; 2 Cu; 1,2 Ti	1720	1650	10	45	—	[24]
Х14Н5МГ2ТЮ	15 Cr; 5,5 Ni; 2 Mn; 1 Mo; 0,3 Ti; 0,3 Al	1350	1280	16	50	0,45	[33]
Х14Н5Д2МБ	14,5 Cr; 5 Ni; 2,2 Cu; 1,5 Mo; 0,25 Nb	1500	1270	15	63	0,9	[30]
Х15Н5Д2Т	14,5 Cr; 5 Ni; 2 Cu; 0,2 Ti	1450	1350	11	50	0,8	[8]
Теплостойкие стали							
Х5Н12К3М7Т	5 Cr; 12 Ni; 3 Co; 7 Mo; 1,1 Ti	2000	1900	8	45	0,45	[22]
Х9Н6К14М4Д	9 Cr; 6 Ni; 14 Co; 4 Mo; 2 Cu	1700	1600	—	—	0,4	[2]
Х11Н4К7Г3М5Т	11 Cr; 4 Ni; 7 Co; 3 Mn; 5 Mo; 0,3 Ti	1700	1450	15	50	0,2	[3]
Х12Н8К5М2Т	12,5 Cr; 8 Ni; 5,2 Co; 2 Mo; 0,9 Ti	1800	1700	9	40	—	[24]
Х12Н7К7М4	12 Cr; 7 Ni; 7 Co; 4 Mo	1600	1500	16	46	0,5	[14]
Х12Н5К14М5Т	12 Cr; 5 Ni; 14 Co; 5 Mo; 0,3 Ti	1700	1650	—	—	0,4	[38]
Х12Н2К16М4	12 Cr; 2Ni; 16 Co; 4 Mo	1600	1550	12	55	—	[8]
Х13К13М5	13 Cr; 13 Co; 5,5 Mo	1590	1340	15	50	—	[35]
Х13К16М5	13 Cr; 16,4 Co; 8 Mo	1700	1550	14	48	—	[35]
Х14Н6К9М5	14 Cr; 5,5 Ni; 9 Co; 5 Mo	1550	1350	15	55	0,4	[39]
Х14Н4К14М3Т	14,5 Cr; 4 Ni; 14,6 Co; 2,9 Mo; 0,2 Ti	1650	1500	20	62	0,78	[24]

[1] Освоенные промышленностью марки коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталей поставляются по техническим условиям.

29. Физические свойства стали 03Х11Н10М2Т

Параметр	Температура, °С					
	20	100	200	300	400	500
$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$	10,4 (20—100)	11,1 (100—200)	11,7 (200—300)	12,2 (300—400)	12,8 (400—500)	—
λ, Вт/(м·°С)	17,7	18	19,3	20,1	20,9	21,3
c, кДж/(кг × × °С)	—	0,460	0,502	0,544	0,628	0,712

Особенностью стали является высокий предел упругости ($\sigma_{0,002}$) при нагреве: 1100 МПа при 200 °С; 930 МПа при 300 °С; 830 МПа при 400 °С. Упругие элементы из этой стали могут длительно работать при температуре 300—350 °С, а кратковременно — при 400 °С.

Сталь 03Х12Н10Д2ТБ обладает высокой коррозионной стойкостью не только в условиях обычных статических испытаний на коррозию, но и при непосредственном нагружении в таких коррозионно-активных средах, как 60 %-ная HNO_3 и 3 %-ная NaCl. В процессе этих испытаний не наблюдали изменений в значениях предела упругости, упругого последействия, упругого гистерезиса. Благодаря ценному сочетанию технологичности и высоких механических свойств, в первую очередь высокого сопротивления развитию малых пластических деформаций, сталь рекомендуется главным образом для изготовления пружин и других упругих элементов ответственного назначения.

Сталь 03Х11Н10М2Т применяется для изготовления элементов обшивки, емкостей, нагруженных внутренним давлением, пружин. Температура эксплуатации — от криогенных температур до 500 °С. Рекомендуемый режим термической обработки: закалка при 900 °С, охлаждение на воздухе, старение при 500—525 °С, 2 ч. Некоторые физико-механические свойства стали приведены в табл. 29—31 [*1].

Определенные преимущества имеет аустенитизация стали Х11Н10М2Т при пониженной температуре (800—850 °С), особенно при минимальном содержании в ней углерода. В этом случае при равной прочности (при других температурах закалки) сталь имеет существенно более высокую вязкость и одновременно наиболее высокую стойкость против коррозионного растрескивания под напряжением.

В качестве эффективной меры по предотвращению теплового охрупчивания рекомендуется там, где это возможно, вообще отказаться от проведения закалки. При условии завершения горячей пластической деформации изделий при температурах не выше 800—850 °С и ускоренного охлаждения обеспечивается наследование эффекта высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), нет опасности выделения в аустените охрупчивающих фаз и потому оказывается возможным одновременно повысить как прочностные характеристики, так и показатели пластичности и вязкости стали.

Пути совершенствования свойств мартенситно-стареющих сталей. Практика широкого промышленного применения мартенситно-стареющих сталей наряду с преимуществами сталей этого класса по реализуемым механическим и физико-химическим свойствам, по критериям технологичности показала, что ряд явлений, таких, как тепловое охрупчивание, задержанное разрушение, ликвационная неоднородность, трудности исправления перегретой структуры, которые наблюдаются в отдельных сталях, затрудняют и ограничивают их использование. Поэтому при разработке новых эффективных способов улучшения свойств мартенситно-стареющих сталей главное внимание уделяется изысканию возможностей устранения или предотвращения перечисленных явлений. Работы ведутся по двум основным направлениям: по пути совершенствования составов сталей и методов их выплавки, а также по пути изыскания оптимальных условий их термической и термомеханической обработки.

Первое направление включает разработку новых перспективных систем легирования мартенситно-стареющих сталей [9, 20, 33, 34], однако особое внимание уделяется получению точного химического состава сталей по углероду и легирующим элементам, способам выплавки с целью достижения максимальной однородности слитков и минимального содержания неметаллических включений [9]. Увеличение на 1 % содержания молибдена и кобальта в стали типа Н18К9М5Т повышает упрочнение соответственно на 140 и 60 МПа. Аналогичный эффект (60—70 МПа) наблюдается при повышении концентрации титана и алюминия всего на 0,1 % [9]. На пластичность и вязкость влияют даже незначительные колебания содержания примесных атомов (табл. 32), поэтому для выплавки мартенситно-стареющих сталей рекомендуется применять вакуумно-дуговой переплав и использовать шихту повышенной чистоты [9].

В зарубежной периодике имеются данные о применении методов порошковой металлургии для изготовления

[*1] По данным С. И. Кишкиной.

30. Показатели прочности и пластичности листов стали 03Х11Н10М2Т толщиной 2—3 мм

Обработка	Температура испытания, °С	E	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{пц}$	$\delta_{5,65}\sqrt{F}$, %
		МПа				
Закалка с 860 °С, старение при 500 °С, 2 ч	20	196 000	1500	1430	1300	8
	300	165 000	1400	1320	—	5
	400	156 000	1350	1280	—	6
	500	145 000	1100	980	—	10
Закалка с 860 °С на воздухе	20	—	1000	900	—	15
Нагартовка, 50 %-ное обжатие	—	—	1250	1180	—	7
Нагартовка, 50 %-ное обжатие, старение 500 °С, 2 ч	—	—	1800	1650	—	—

31. Влияние низкой температуры на свойства стали 03Х11Н10М2Т

Термическая обработка	Температура испытания, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	KCU, МДж/м^2
		МПа			
Закалка с 860 °С на воздухе	20	1000	900	15	2,2
	—70	1150	1050	13	2,0
	—196	1450	1300	13	1,0
То же, старение при 500 °С, 2 ч	20	1550	1470	10	0,7
	—70	1700	1600	7	0,5

32. Механнческие свойства стали типа Н18К9М5Т, выплавленной из шихты обычной (плавка 1) и повышенной (плавка 2) чистоты [9]

Свойства стали после закалки и старения	Плавка 1 (0,009 % S, 0,003 % P)	Плавка 2 (0,0015 % S, 0,001 % P)
$\sigma_в$, МПа	1596	1600
$\sigma_{0,2}$, МПа	1533	1526
δ, %	11	14
ψ, %	46,9	68,4
Работа разрушения при ударном изгибе, Дж:		
при —70 °С	20,7	62,4
при +40 °С	27,6	128,5

изделий из мартенситно-стареющих сталей разного состава. Порошковые материалы, в том числе и подвергавшиеся горячей экструзии, уступают литым кованым и литым экструдированным как по уровню упрочнения, так и по показателям пластичности [9]. В лучшем случае их пластичность составляла 90 % пластичности литого кованого материала.

Второе направление, связанное с оптимизацией условий термической и термомеханической обработки мартенситно-стареющих сталей, учитывает и использует особенности развития фазовых и структурных превращений в сталях этого класса. Разработаны рекомендации по совершенствованию проведения основных операций упрочняющей термической обработки — закалки и старения, по использованию различных вариантов пластической деформации в общем цикле обработки.

Комбинированная закалка. Эффективным средством воздействия на структурное состояние и свойства мартенситно-стареющих сталей является применение различных комбинированных вариантов закалки. Многократная закалка обеспечивает измельчение зерна и исправляет структуру перегретой стали [37]. В сочетании с предварительной высокотемпературной закалкой такая обработка рекомендована для предотвращения теплового охрупчивания сталей при их замедленном охлаждении (для крупных поковок и полуфабрикатов крупного сечения) [36]. В коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталях для измельчения зерна и рафинирования структуры чаще применяют сочетание двух последовательных закалок при различных температурах. Двойная закалка (750 °С, 4 ч + + 850 °С, 2 ч) обеспечивает измельчение зерна в сталях типа 03Х11Н10М2Т от 0 до 8 балла.

Важным результатом применения термоциклической обработки и других видов комбинированной закалки является сохранение в закаленных сталях некоторого количества остаточного аустенита [24], благодаря чему удается повысить пластичность и вязкость сталей, особенно при криогенных температурах [38], увеличить сопротивление ударно-циклическому нагружению [24].

Термомеханическая обработка. Практически всегда в процессе изготовления либо самих изделий, либо полуфабрикатов мартенситно-стареющие стали подвергаются горячей пластической деформации. Для того чтобы обеспечить формирование мелкозернистой структуры, сохранить развитую полигонизованно-рекристаллизованную субструктуру рекомендуют понижать температуру окончания пластической деформации, соблюдать наиболее оптимальные условия деформирования (степень, скорость, число проходов), использовать ускоренное охлаждение. Наследование эффекта ВТМО позволяет обеспечить достаточную пластичность сталей, характеризующихся особо высокой прочностью, ослабляет зернограничную хрупкость коррозионно-стойких сталей и проявление теплового охрупчивания.

Высокая пластичность закаленных мартенситно-стареющих сталей позволяет применять холодную пластическую деформацию, в том числе и со значительными степенями обжатия, при производстве широкой номенклатуры полуфабрикатов (листов, ленты,

33. Влияние холодной пластической деформации на свойства стали Н18К9М5Т [28]

Режим обработки	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCU, МДж/м²	$\sigma_в^{тр}$, МПа, $l_{тр}$ = 2,5 мм	$\sigma_в^{тр}$, МПа, $l_{тр}$ = 6 мм	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$	$\sigma_{кр}$, МПа
Закалка при 820 °С, старение при 480 °С	1900	1800	5	0,62	1950	1740	132	600
Закалка при 820 °С, деформация 40 %, старение при 480 °С	2100	1970	6	0,56	2120	1720	128	800

проволоки, труб и т. д.). Использование эффекта низкотемпературной термомеханической обработки (НТМО) в цикле упрочняющей обработки сталей этого класса обеспечивает существенное повышение прочностных свойств, в том числе предела прочности образцов с поверхностной трещиной усталости ($\sigma_в^{тр}$), увеличивает напряжение, при котором еще не происходит коррозионное растрескивание в 3 %-ном растворе NaCl ($\sigma_{кр}$) (табл. 33) [28]. Положительное влияние НТМО усиливается при снижении температуры закалки, если в стали нет труднорастворимых частиц упрочняющих фаз. В отдельных случаях хорошие результаты дает применение холодной пластической деформации частично состаренного мартенсита [5, 28].

Для коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталей характерен более высокий коэффициент деформационного упрочнения [15], что повышает эффективность НТМО, особенно если деформирование проводить методом гидропрессования.

Комбинированное старение. Многочисленными исследованиями доказана эффективность применения для мартенситно-стареющих сталей комбинированных схем старения. В том случае, когда при старении выделяется одна упрочняющая фаза или несколько, но имеющих близкий интервал температур образования, целесообразнее использовать ступенчатое старение по схеме (В + Н), когда последовательно выполняют сначала высокотемпературное старение, а затем при более низкой температуре. В результате увеличения объемной доли выделяющейся фазы, более высокой дисперсности части частиц уровень упрочнения сталей может быть повышен при общем сокращении длительности старения. Для гетерофазных коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталей рекомендуется иная схема ступенчатого старения (Н + В), при которой вначале выполняют низкотемпературное, а затем высокотемпературное старение: на первом этапе старения (480 °С) формируются области α-фазы, обогащенные хромом; на втором (500—550 °С) происходит выделение R-фазы [39]. В результате такой обработки достигается более высокий комплекс свойств, в том числе и более высокая теплостойкость.

Применительно к мартенситно-стареющим сталям опробованы различные варианты динамического старения. В частности, достаривание под напряжением (температура 300 °С, напряжение, равное $0{,}7\sigma_{0,2}$) после основного старения при пониженной температуре (при 400 °С) приводит к релаксации микронапряжений и тем самым устраняет опасность задержанного разрушения, проявляющегося в снижении пластичности сталей при малых скоростях нагружения [24]. Важным следствием динамического достаривания является значительное (в 1,5—2 раза) увеличение предела упру-

гости ($\sigma_{0,002}$) мартенситно-стареющей стали (сталь 04Х14К13Н4М3ТВ) и релаксационной стойкости при практически неизменных значениях временного сопротивления и относительного удлинения [21]. Эффективность динамического достарнвания существенно возрастает в том случае, если сталь перед основным старением подвергается НТМО [21]. Динамическое достариваиие может быть реализовано различными способами [21], например путем заневоливания винтовых пружин, и использоваться для улучшения эксплуатационных характеристик различных видов упругих элементов.

Для отдельных видов изделий разрабатываются специальные варианты старения. Применяющуюся при изготовлении волокнистых композиционных материалов армирующую проволоку, которая подвергается холодной пластической деформации с предельными обжатиями (96—99 %), нагревают при высокотемпературном старении 800 °С в течение 1—1,5 с. Такое скоростное старение позволяет реализовать очень высокий предел прочности (4200 МПа при диаметре проволоки 40 мкм) и избежать охрупчивания ($\delta = 4$ %), которое имеет место при обычном старении такой проволоки. Совмещение старения мартенситно-стареющих сталей с процессом азотирования наряду с объемным упрочнением обеспечивает формирование износостойкого поверхностного слоя [24].

Применение мартенситно-стареющих сталей. Стоимость мартенситно-стареющих сталей выше, чем низко- и среднелегированных углеродистых сталей, однако более простая упрочняющая термическая обработка сталей этого класса, их технологичность, высокая конструктивная прочность, надежность и ряд других преимуществ не только компенсируют высокую стоимость, но делают экономически более выгодным их использование в различных отраслях машиностроения, в приборостроении и инструментальной промышленности.

Машиностроение [5, 9, 24]. Как конструкционный материал, отличающийся высокой удельной прочностью и сопротивлением хрупкому разрушению, мартенситно-стареющие стали используют для изготовления конструктивных элементов космической и ракетной техники, в криогенном машиностроении, в авиастроении. Благодаря хорошей сварнваемости их применяют также для топливных баков ракетных двигателей, резервуаров высокой точности. Хорошая коррозионная стойкость позволяет использовать стали для корпусов подводных лодок, ответственных шестерен, гребных винтов, деталей компрессоров и силовых установок, сосудов высокого давления, рабочих колес и валов насосов. Высокая износостойкость в сочетании с размерной стабильностью сталей этого класса определяют их применяемость для деталей высокоточных металлорежущих станков. Более высокая (чем у сталей перлитного класса) радиационная стойкость позволяет использовать безкобальтовые стали в реакторостроении, а также для узлов урановых центрифуг.

Приборостроение [12, 21, 28]. Высокое сопротивление малым пластическим деформациям, значительно более высокий уровень максимальной упругой деформации, определяемой отношением $\sigma_{0,002}/E$, чем у сталей других классов, повышенная малоцикловая выносливость в сочетании с возможностями широкого применения холодной пластической деформации, хорошей свариваемостью и коррозионной стойкостью определяют преимущества мартенситно-стареющих сталей как пружинного материала. При формировании двухфазной структуры ($\alpha + \gamma$) эти стали могут обладать элинварными свойствами в диапазоне климатических температур, что существенно расширяет диапазон использования упругих элементов из этих сталей.

Изготовление инструментов [5, 24]. Преимущества в технологичности, отсутствие поводки при термической обработке, высокая прочность и износостойкость в сочетании с размерной стабильностью и коррозионной стойкостью обеспечивают возможность применения мартенситно-стареющих сталей для различных инструментов, в том числе для медицинских микроинструментов. Благодаря теплостойкости стали нашли применение при изготовлении пресс-форм для обработки резины, пластмасс, для высокоточного латунного и алюминиевого литья под давлением. Стали можно применять для изготовления штампов горячего и холодного деформирования, лезвий и ножей.

Список литературы

1. **А. с.** 423875 СССР, МКИ С 22 С 38/12. Мартенситно-стареющая сталь/ В. М. Кардонский, О. П. Жуков, М. Д. Перкас и др.; Опубл. 15.04.74. Бюл. № 14—1974.

2. **А. с.** 559996 СССР, МКИ С 22 С 38/52. Нержавеющая сталь/Н. А. Сорокина, А. П. Гуляев, Е. А. Ульянин и др.; Опубл. 30.05.76. Бюл. № 20—1977.

3. **А. с.** 1047990 СССР, МКИ С 22 С 38/52. Мартенситно-стареющая сталь/ Л. Г. Цветкова; Опубл. 15.10.83. Бюл. № 38—1983.

4. **Белосевич В. К., Дробинский М. Л., Якубовский О. Н.** Штамповка кузовных деталей автомобиля из новой листовой стали повышенной прочности//Автомобильная промышленность. 1983. № 4. С. 24—25.

5. **Бодяко М. Н., Астапчук С. А., Ярошевич Г. Б.** Мартенситно-стареющие стали. Минск: Наука и техника, 1976. 246 с.

6. **Голованенко С. А., Фонштейн Н. М.** Двухфазные низколегированные стали. М.: Металлургия, 1986. 206 с.

7. **Гольдштейн М. И.** Пути повышения прочности и хладостойкости конструкционных сталей//Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 11. С. 6—11.

8. **Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г.** Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 408 с.

9. **Гузовская М. А., Островская Т. В.** Основные направления развития мартенситно-стареющих сталей за рубежом//Черная металлургия: Бюллетень научно-технической информации. М.: 1982. Вып. 23 (931). С. 17—33.

10. **Еднерал А. Ф., Жуков О. П., Перкас М. Д.** Мартенситно-стареющие стали с прочностью более 200 кг/мм²// Металловедение и термическая обработка металлов. 1971. № 4. С. 9—14.

11. **Журавлев В. Н., Николаева О. И.** Машиностроительные стали: Справочник. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.

12. **Исследование** элинвариых и механических свойств мартенситно-стареющих сталей с двухфазной ($\alpha + \gamma$)-структурой /М. Д. Перкас, Е. М. Струг, В. В. Русаненко и др.//Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 63. Вып. 2. С. 371—380.

13. **Контролируемая** прокатка В. И. Погоржельский, Д. А. Литвиненко, Ю. И. Матросов, А. В. Иваницкий. М.: Металлургия, 1979. 184 с.

14. **Кучерявый В. И., Ульянова Н. В.** Нержавеющие мартенситно-стареющие Со—Мо и Со—Мо—Ti стали//Металловедение и термическая обработка металлов. 1971. № 4. С. 14—18.

15. **Матросов Ю. И.** Комплексное микролегирование малоперлитных сталей, подвергаемых контролируемой прокатке//Металловедение и термическая обработка металлов. 1986. № 3. С. 10—17.

16. **Металловедение** и термическая обработка стали: В 3 т. Справочник: 3-е изд. Т. II. Основы термической обработки/Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1983. 368 с.

17. **Металловедение** и термическая обработка стали: В 3 т. Справочник: 3-е изд. Т. III. Термическая обработка металлопродукции/Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1983. 216 с.

18. **Низколегированные** строительные стали массового назначения с карбонитридным упрочнением/А. В. Рудченко, Л. И. Гладштейн, С. А. Голованенко и др.//Сталь. 1977. № 10. С. 948—952.

19. **Новая** малоперлитная сталь 09Г2ФБ для магистральных газопроводов диаметром 1420 мм/Н. П. Лякишев, С. А. Голованенко, Ю. И. Матросов и др.//Сталь. 1980. № 4. С. 327—330.

20. **О роли** кобальта в упрочнении мартенситно-стареющих сталей/ М. Д. Перкас, А. Ф. Еднерал, О. П. Жуков и др.//Физика металлов и металловедение. 1984. Т. 57, № 2. С. 310—318.

21. **Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г., Каплун Ю. А.** Динамическое старение сплавов. М.: Металлургия, 1985. 222 с.

22. **Перкас М. Д.** Структура и свойства высокопрочных сталей со стареющим мартенситом//Металловедение и термическая обработка металлов. 1970. № 7. С. 12—24.

23. **Перкас М. Д.** Структура, свойства и области применения высокопрочных мартенситно-стареющих сталей//Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 5. С. 23—33.

24. **Перкас М. Д.** Структура, свойства и области применения высокопрочных мартенситно-стареющих сталей. М.: Машиностроение, 1986. 70 с.

25. **Перкас М. Д., Кардонский В. М.** Высокопрочные мартенситно-стареющие стали. М.: Металлургия, 1970. 224 с.

26. **Повышение** качества и надежности строительных сталей в результате субструктурного упрочнения/ В. И. Большаков, И. А. Монгайт, Л. И. Котова, Н. Э. Погребная//Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 8. С. 42—46.

27. **Поздняков Л. Г., Евсюков М. Ф., Чехранов С. В.** Исследование закономерностей распада аустенита малоперлитных сталей при непрерывном охлаждении//Металловедение и термическая обработка металлов. 1985. № 9. С. 32—35.

28. **Рахштадт А. Г.** Пружинные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1982. 400 с.

29. **Романив О. Н.** Вязкость разрушения конструкционных сталей. М.: Металлургия, 1979. 176 с.

30. **Свойства** мартенситно-стареющих сталей ВНС-2 и ЭП817 после старения/ О. Л. Бендрышев, В. В. Алексеев, В. И. Силина и др.//Металловедение и термическая обработка металлов. 1983. № 4. С. 49—51.

31. **Сорокин А. Н., Голованенко С. А., Матросов Ю. И.** Влияние микродобавок ниобия на механические свойства низкоуглеродистых сталей разных систем легирования//Металловедение качественных сталей и сплавов. М.: Металлургия, 1982. С. 5—8.

32. **Справочник** металлиста. В 5 т. 3-е изд. Т. 2/Под ред. А. Г. Рахштадта, В. А. Брострема. М.: Машиностроение, 1976. 720 с.

33. **Стоналова И. А.** Механические свойства и микроструктура мартенситно-стареющей Cr—Ni—Mn стали при совместном легировании титаном и алюминием//Металловедение и термическая обработка конструкционных сталей: Труды ЦНИИМАШ. М.: 1985. № 189. С. 77—80.

34. **Структура** и свойства ванадиевых мартенситно-стареющих сталей/ И. В. Пестов, А. Я. Малолетнев, М. Д. Перкас и др.//Металловедение и термическая обработка металлов. 1983. № 4. С. 38—40.

35. **Структура** и свойства теплостойких мартенситно-стареющих сталей/ С. М. Битюков, С. В. Грачев, Н. В. Звигинцев и др.//Известия вузов. Черная металлургия. 1982. № 6. С. 85—89.

36. **Термическая** обработка крупных штамповок и прутков из стали Н18К9М5Т/О. К. Ревякина, Л. Н. Беляков, В. Л. Никольская и др.//Металловедение и термическая обработка металлов. 1971. № 4. С. 23—30.

37. **Термическая** обработка мартенситно-стареющей стали 00Н18К9М5Т/ С. С. Рыжак, О. К. Ревякина, В. В. Сачков, Я. М. Потак//Металловедение и термическая обработка металлов. 1968. № 6. С. 20—22.

38. **Тихонов Г. В., Шахназаров Ю. В.** Механические свойства нержавеющей мартенситно-стареющей стали 05Х12К14Н5М5Т-ВД//Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. № 9. С. 49—51.

39. **Фазовый** состав, структура и свойства мартенситно-стареющей стали Х14К9Н6М5/Н. Ф. Лашко, Л. В. Заславская, В. Л. Никольская, Г. Г. Соловьева//Металловедение и термическая обработка металлов. 1974. № 10. С. 39—42.

40. **Федюкин В. К.** Метод термоциклической обработки металлов. Изд-во Ленинградского государственного университета. 1984. 189 с.

41. **Фонштейн Н. М.** Факторы, определяющие сопротивление разрушению двухфазных ферритно-мартенситных сталей//Металловедение и термическая обработка металлов. 1987. № 10. С. 10—17.

Глава II МАТЕРИАЛЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЧУГУНОВ ДЛЯ ОТЛИВОК

Чугуны для отливок различаются по структуре, химическому составу, назначению и технологии получения.

В зависимости от того, в каком виде формируется высокоуглеродистая фаза при кристаллизации или термической обработке *по структуре*, различают отливки: 1) из графитизированного чугуна, характеризуемого наличием в структуре свободного графита различной формы; 2) из белого чугуна (БЧ), характеризуемого отсутствием в структуре свободного графита (высокоуглеродистая фаза находится в виде цементита); 3) из половинчатого, отбеленного чугуна (ОЧ). В последнем случае поверхностный слой отливки имеет структуру белого чугуна, а в центре — графитизированного серого чугуна.

Форма графита в графитизированных чугунах разнообразна: пластинчатая (ПГ), вермикулярная — червеобразная (ВГ), хлопьевидная (ХГ) и шаровидная (ШГ). Эти формы графита определяют основные типы чугунов: серый чугун (СЧ), чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), ковкий чугун (КЧ), высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ). При этом структура металлической основы может быть от ферритной до аустенитной. Государственными стандартами регламентировано около 100 марок чугуна.

По химическому составу различают нелегированный и легированный чугун.

По назначению чугуны могут быть разделены на несколько укрупненных групп в зависимости от предъявляемых к отливке требований.

К укрупненным группам относятся отливки:

а) машиностроительные из серого чугуна, у которого наблюдаются характерные механические свойства, хорошая обрабатываемость, улучшенные литейные свойства, облегчающие получение отливок наиболее сложной конфигурации, и наибольшая дешевизна; в пределах данной группы могут быть выделены: отливки для станкостроения, для автомобилестроения, для тяжелого машиностроения, для электрической промышленности и т. д.;

б) с повышенной прочностью и вязкостью из высокопрочного или ковкого чугуна;

в) с повышенной поверхностной твердостью из отбеленного чугуна или подвергаемые поверхностной закалке;

г) с резко выраженными специальными свойствами из легированных чугунов.

По технологии получения различают отливки, получаемые в разовых песчаных формах, в оболочковых формах, в металлических формах (кокиль), в песчаных формах, изготовленных по газифицируемым моделям, в керамических формах, изготовленных по выплавляемым или выжигаемым моделям. Особенность технологического процесса в последних двух вариантах заключается в отсутствии разъема формы и стержней. Модель из формы удаляется либо в процессе заливки формы металлом (газифицируемые модели), либо предварительно выплавляется или выжигается из керамической формы. Газифицируемые и выжигаемые модели изготовляют из полимеров (пенополистирол, полистирол), а выплавляемые — из легкоплавких составов на основе парафина, стеарина, церезина и др. Осваивается производство отливок из черных сплавов (в том числе из чугуна) литьем под давлением.

Целесообразный способ получения отливки зависит от типа производства, массы отливки, ее габаритных размеров и конструктивных особенностей.

Выбранный способ характеризуется определенными точностью и шерохова-

1. Точность и шероховатость поверхности чугунных отливок, получаемых различными способами [3]

Литье	Нормальная точность [1]	Достижимая точность	Rz, мкм
	Класс по ГОСТ 26645—85	Класс по ГОСТ 26645—85	
В разовые песчаные формы:			
ручная формовка	9—14	7—12	80—160
машинная встряхиванием с подпрессовкой	8—13	6—11	80—160
машинная прессованием под высоким давлением	7—12	5—9	40—80
в формы с газифицируемыми моделями	7—12	5—10	40—160
В оболочковые формы	5—11	4—9	20—80
В металлические формы	5—11	4—9	20—80
По выплавляемым моделям	4—9	3—8	10—40

[1] Приведена минимально допустимая точность.

тостью поверхности получаемых отливок.

Наиболее универсальным способом получения отливок, пригодным как для единичного, так и для массового производства отливок массой от десятков граммов до десятков тонн, является литье в разовые песчаные формы. В металлических формах получают разнообразные фасонные отливки массой от долей до 100 кг, хотя в отдельных случаях масса отливки составляет сотни килограммов (например, чугунные трубы, получаемые центробежным способом, и др.). При литье в металлические формы целесообразна серия для мелких отливок св. 400 шт., для крупных отливок св. 20 шт.

Литьем в оболочковые формы получают в основном коленчатые валы и ребристые цилиндры, станины электродвигателей, корпуса токарных патронов, нагревательные комфорки бытовых электроплит, детали различных двигателей, компрессоров, насосов, вентиляторов, текстильных машин, гидроаппаратуры, кондиционеров и т. д. Максимальные размеры отливок до 1000×1000 мм, масса отливок до 200 кг. Учитывая необходимость изготовления нагреваемой металлической оснастки, целесообразна серия не менее 300—500 шт.

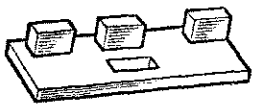
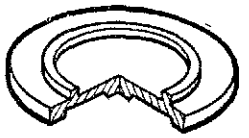
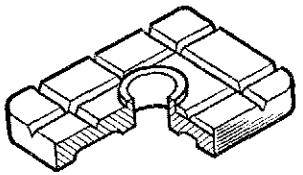
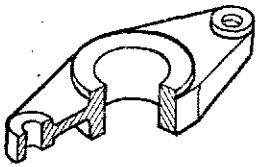
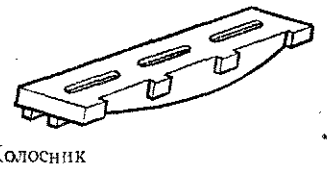
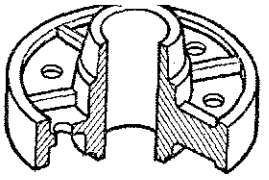
Литьем по выплавляемым моделям изготовляют мелкие отливки сложной конфигурации массой до 1,5—2 кг, реже до 5—6 кг, для которых требуются повышенная точность и малые параметры шероховатости поверхности. При данном способе имеется возможность максимально приблизить заготовку по размерам и конфигурации к готовой детали. При использовании деревянных пресс-форм для изготовления моделей целесообразна серия 50—100 шт., гипсовых — 200 шт., металлических — несколько тысяч.

Точность отливок, получаемых различными способами, приведена в табл. 1 [3].

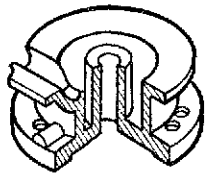
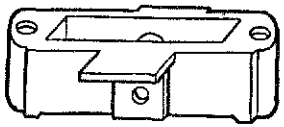
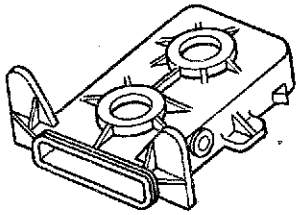
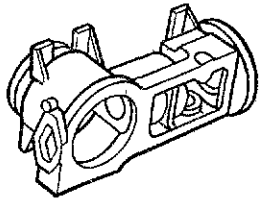
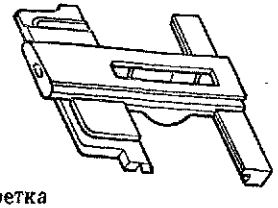
Данные относятся к отливкам II—III группы сложности на размеры до 500 мм включительно, расположенных в одной части формы. Точность размеров, оформляемых в двух и более частях формы, а также отливок повышенной сложности и больших габаритов может быть ниже.

На характеристики точности отливок влияет их сложность, вид модель-

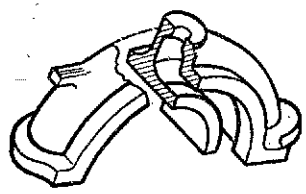
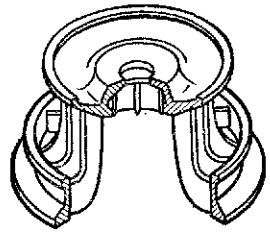
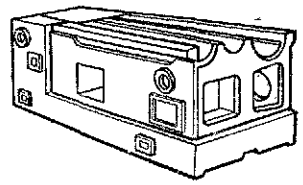
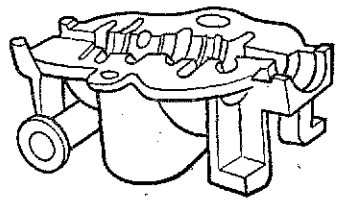
2. Группы сложности отливок, изготовляемых в песчаных формах

Группа сложности	Отливка	Характеристики группы сложности отливок
I	 Плита	Отливки общего назначения. Плоские, цилиндрические, полусферические, без внутренних полостей. Наружные поверхности с наличием невысоких ребер-буртов, бобышек, фланцев и отверстий. Углублений и выступов ⩽30 мм до 5 шт. Отливки без механической обработки или незначительная обработка с одной стороны, в основном сверление
	 Глухая крышка	
	 Смотровая крышка	
II	 Траверса	Отливки общего назначения. Плоские, цилиндрические, полусферические, открытой коробчатой формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные с ребрами, буртами, бобышками, отверстиями и углублениями. Углубления, выступы, отверстия высотой ⩽75 мм до 5 шт. Внутренние полости с прямолинейными поверхностями со свободным широким выходом наружу. Применяется незначительная обработка с двух сторон, включая точение, растачивание
	 Колосник	
	 Ступица барабана	

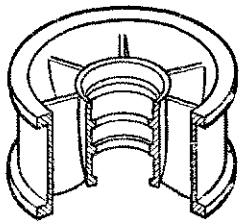
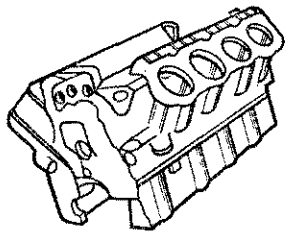
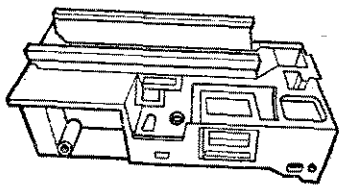
Продолжение табл. 2

Группа сложности	Отливка	Характеристики группы сложности отливок
III	 Корпус  Траверса  Корпус раздаточной коробки	Отливки ответственного назначения. Открытой коробчатой, сферической, цилиндрической формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные с ребрами, бобышками, выступами и углублениями. Углубления, выступы, ребра высотой более 75 мм до 5 шт. Внутренние полости в основном с прямолинейными поверхностями со свободным выходом наружу. Применяется механическая обработка с трех-четырех сторон, включая шлифование
IV	 Корпус  Каретка	Отливки ответственного назначения. Открытой и закрытой коробчатой, цилиндрической и сферической формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные. Углубления, выступы, отверстия, ребра высотой более 75 мм до 10 шт. Внутренние полости средней сложности с прямолинейными и криволинейными поверхностями со свободным и затрудненным выходом наружу. Применяется механическая обработка с четырех-пяти сторон, включая шлифование, притирку, полирование. Предъявляются требования по химическому составу и механическим свойствам, герметичности при давлении $12 \cdot 10^5$ Па

Продолжение табл. 2

Группа сложности	Отливка	Характеристики группы сложности отливок
IV	 Корпус	То же
V	 Рабочее колесо  Станина  Корпус	Отливки особо ответственного назначения. Закрытой коробчатой, цилиндрической, сферической или комбинированной формы. Наружные поверхности прямолинейные и криволинейные с примыкающими патрубками, фланцами. Углубления, выступы, ребра, отверстия высотой до 75 мм до 15 шт. Внутренние полости сложной конфигурации с наличием ленточных и кольцевых каналов со свободным и затрудненным выходом наружу. Применяется механическая обработка с пяти-шести сторон, включая хонингование, полирование. Предъявляются требования по химическому составу, механическим свойствам, микроструктуре. Герметичность при давлении до $30 \cdot 10^5$ Па

Продолжение табл. 2

Группа сложности	Отливка	Характеристики группы сложности отливок
VI	 Выправляющий аппарат  Блок цилиндров  Станина	Отливки особо ответственного назначения. Закрытой коробчатой, цилиндрической или комбинированной формы. Наружные поверхности образуются сопряжением прямолинейных и криволинейных поверхностей. Углубления, выступы, отверстия ребра высотой св. 75 мм более 15 шт. Внутренние полости особо сложной конфигурации с наличием ленточных и кольцевых каналов, расположенных в два и больше ярусов, с затрудненным выходом наружу. Применяется механическая обработка со всех сторон, включая доводку хонингованием. Предъявляются требования по химическому составу, механическим свойствам, микроструктуре, газонасыщенности. Герметичность при давлении св. $30 \cdot 10^5$ Па

иой оснастки. Например, при ручной и машинной формовке с использованием встряхивания и подпрессовки при обычных давлениях можно применить деревянную модельную оснастку, тогда как при прессовании форм с высоким давлением используют металлическую модельную оснастку, что отражается на себестоимости отливок и становится целесообразным лишь при их определенной серии (обычно не меньше нескольких сот штук).

В основу классификации отливок по сложности положена классификация, установленная Прейскурантом оптовых цен № 25-01 [15]. Отливки, получаемые в песчаных формах, по выплавляемым моделям, под давлением делятся на шесть групп сложности, а отливки, получаемые в оболочковых формах, в кокиль или центробежным способом — на пять групп. Основными признаками при классификации являются геометрическая форма, конфигурация наружных поверхностей; конфигурация и характер расположения внутренних полостей отливок; технологические особенности изготовления. В табл. 2 в качестве примера приведены конструктивные

8. Точность чугунных отливок в зависимости от их сложности и наибольшего габаритного размера [3]

Наибольший размер отливки, мм	Точность в условных баллах при группе сложности			Классы точности по ГОСТ 26645—85 при группе сложности		
	I—II	III—IV	V—VI	I—II	III—IV	V—VI
До 50	1,00	1,25	1,6	3—6	3т—6	3т—6
51—200	1,25	1,60	2,0	5т—7т	5т—7т	7т—9
201—500	1,60	2,00	2,5	7т—9т	7т—9т	7т—9т
501—2000	2,00	2,50	3,15	7—9	7—9	9
Св. 2000	до 2,5	до 3,15	до 4,0	7—9	до 10	до 10

Примечание. При оценке точности в условных баллах за единицу принята достижимая точность отливок I—II групп сложности с наибольшим размером до 50 мм.

признаки отнесения отливок, получаемых в песчаных формах, к различным группам сложности.

В табл. 3 приведена ориентировочная точность чугунных отливок, изготовляемых в песчаных формах, в зависимости от группы сложности отливок и наибольшего габаритного размера [3].

Себестоимость отливок, кроме материала, их группы сложности и серии, определяется точностью, зависящей от применяемого способа изготовления, и в общем случае увеличивается с повышением точности отливок. Однако это увеличение может быть перекрыто экономией при дальнейшей механической обработке более точных литых заготовок, в результате уменьшения или ликвидации припусков на механическую обработку.

Изменение стоимости отливок в зависимости от марки чугуна приведено в табл. 4, а от применяемого технологического процесса — в табл. 5 [15]. Приведенный диапазон изменения относительной стоимости охватывает отливки всей группы сложности.

За единицу в табл. 4 принята оптовая цена 1 т отливок массой 0,16—0,25 кг группы сложности I из чугуна СЧ10—СЧ18, изготовляемых в песчаных формах, а в табл. 5 — оптовая цена 1 т тех же отливок, изготовленных из высокопрочного чугуна ВЧ 35—ВЧ 50 в песчаных формах. Эти значения на базе оптовых цен 1979 г. равны соответственно 314 и 376 р.

Цена отливок, получаемых в кокиль, более низкая по сравнению с отливками, полученными в песчаных формах (табл. 5). Однако это зависит от серийности выпуска отливок. С уменьшением серийности цена будет снижаться для отливок, изготовляемых в песчаных формах, и при единичном и мелкосерийном производстве литье в кокиль становится нецелесообразным, даже с учетом возможной выгоды, получаемой при механической обработке вследствие повышения точности отливок.

4. Относительная стоимость 1 т отливок сопоставимой сложности, изготовленных из различных марок чугуна в песчаную форму

Марка чугуна	Масса отливок, кг						
	0,16—0,25	1,0—1,6	6,3—10	63—100	630—1000	6 300—10 000
	Серия отливок, тыс. шт.					
	100—200	20—75	12—30	4—7,5	1,5—3,5	0,18—0,35
ГОСТ 1412—85						
СЧ10, СЧ15	1—1,83	0,81—1,6	0,67—1,39	0,55—1,19	0,48—1,03	0,44—0,9
СЧ20, СЧ30	1,05—1,91	0,86—1,67	0,71—1,45	0,58—1,24	0,51—1,08	0,47—0,95
СЧ35	1,08—1,94	0,88—1,7	0,74—1,48	0,62—1,27	0,54—1,11	0,5—0,98
ГОСТ 7293—85						
ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 45, ВЧ 50	1,2—2,09	0,99—1,83	0,82—1,62	0,69—1,4	0,61—1,23	0,57—1,09
ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100	1,39—2,28	1,18—2,02	1—1,8	0,85—1,56	0,74—1,36	0,66—1,19
ГОСТ 1215—79						
КЧ 30—6÷КЧ 65—3	1,1—2,01	0,91—1,77	0,76—1,6	0,64—1,33	0,57—1,17	0,52—1,04
ГОСТ 1585—85						
АЧС-1—АЧС-3	1,13—2,04	0,93—1,8	0,79—1,58	0,66—1,36	0,58—1,2	0,54—1,06
АЧС-4—АЧК-2	1,23—2,16	1,03—1,91	0,85—1,68	0,73—1,45	0,64—1,29	0,58—1,15
ГОСТ 7769—82						
ЧХ1, ЧХ2, ЧХ3	1,12—2,02	0,92—1,78	0,78—1,56	0,65—1,35	0,58—1,18	0,53—1,05
ЧС5, ЧС5Ш	1,15—2,07	0,96—1,83	0,81—1,61	0,68—1,39	0,61—1,23	0,56—1,05
ЧС15, ЧС17	1,08—1,99	0,89—1,75	0,75—1,47	0,62—1,31	0,54—1,15	0,5—1,02
ЧНХТ	1,16—2,07	1,03—1,88	0,92—1,59	0,78—1,43	0,7—1,24	(0,64—1,15) *1
ЧХ28, ЧХ32	1,59—2,72	1,35—2,39	1,17—2,13	1—1,86	0,89—1,65	0,81—1,47
ЧЮ22Ш, ЧЮ30	1,8—2,93	1,56—2,6	1,38—2,34	1,22—2,08	1,10—1,83	1,03—1,69

*1 Для отливок массой сн. 4000 кг.

Примечание. При увеличении производства отливок по сравнению с указанным в табл. 4 цены за 1 т уменьшаются, а при уменьшении — увеличиваются. Максимальное изменение цен при этом составляет ±25 %.

5. Относительная стоимость 1 т отливок из высокопрочного чугуна марок ВЧ 35—ВЧ 50, изготовленных по различным технологическим процессам

Литье	Масса отливок, кг				
	0,16—0,25	1,0—1,6	6,3—10	63—100	630—1000
	Серия отливок, тыс. шт.				
	100—200	20—75	12—30	4—7,5	1,5—3,5
В песчаную форму	1,0—1,75	0,82—1,53	0,69—1,35	0,58—1,17	0,51—1,03
В оболочковую форму	1,56—2,58	1,4—2,21	1,14—1,78	1,01—1,46	(0,95—1,12) *1
В металлическую форму (кокиль)	0,85—1,49	0,7—1,3	0,59—1,16	0,49—1	0,44—0,88
В облицованный кокиль	1,21—1,81	1,07—1,64	0,97—1,5	0,88—1,35	0,83—1,23
По выплавляемым моделям	4,28—6,09	2,82—4,17	1,96—2,93	(1,7—2,39) *2	—

*1 Для отливок массой св. 250 кг.
*2 Для отливок массой св. 10 кг.

Примечание. При уменьшении серий отливок до пределов, целесообразных для сопоставления всех приведенных в табл. 5 способов получения отливок, цена на отливки, полученные в песчаную форму, возрастает на 10—12 %, литьем по выплавляемым моделям — на 15 %, литьем в кокиль — на 20 %, литьем в оболочковые формы — на 25 %.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧУГУНА

Физические свойства чугуна (плотность, теплофизические и электромагнитные свойства) зависят от состава и структуры, а следовательно, от вида и марки чугуна.

Плотность чугуна. Пренебрегая сравнительно малым влиянием ряда элементов в обычном чугуне, можно рассчитать плотность чугуна [2]

$$\rho = 100 : \left[\frac{100 - 15C_{св} - C_г - 2{,}7S - 14{,}5 \times (P - 0{,}1) - П_о}{7{,}87 - 0{,}05Si - 0{,}065Al} + \frac{15C_{св}}{7{,}67} + \frac{C_г}{2{,}2} + \frac{2{,}7S}{4} + \frac{14{,}5\,(P - 0{,}1)}{7{,}32} \right],$$

где C, S, P — массовые доли элементов, %; $C_г$ — массовая доля графита, %; $П_о$ — пористость, %; 15 $C_{св}$; 2,7 S; 14,5 (P—0,1) — количество карбидов железа, сульфидов марганца и фосфидной эвтектики соответственно.

Приведенная формула дает вполне удовлетворительные совпадения с экспериментальными данными.

В табл. 6 приведена плотность различных групп чугунов [2, 20].

Наибольшей плотностью характеризуются белые чугуны, не содержащие свободных графитовых включений, и

6. Плотность чугуна

Группа чугуна	Марка чугуна	Структура	Плотность, т/м³
Белый	—	Перлит, карбиды	**7,4—7,75**
С пластинчатым графитом	СЧ15, СЧ18	Ферритная, ферритно-перлитная	6,8—7,2
	СЧ20—СЧ25	Перлитная	7,0—7,3
	СЧ30, СЧ35	Перлитная	7,2—7,4
Высокопрочный с вермикулярным или шаровидным графитом	ВЧ 35—ВЧ 45	Ферритная	7,1—7,2
	ВЧ 60—ВЧ 80	Перлитная	7,2—7,3
	ВЧ 100	Бейнитная	7,2—7,35
Ковкий	КЧ 30—6÷КЧ 37—12	Ферритная	7,2—7,24
	КЧ 45—7 ÷КЧ 65—3	Перлитная	7,3—7,5
Легированный	Никелевый с 34—36 % Ni	Аустенитная	7,5—7,7
	Никелевый с медью типа ЧН15Д7Х2 — нирезист	—	7,4—7,6
	Хромовый типа ЧХ28, ЧХ32	—	7,3—7,6
	Хромово-никелевый	—	7,6—7,8
	Кремнистый типа С15, С17	**Ферритная**	6,7—7,0
	Чугун с 12 % Mn	—	7,1—7,3
	Алюминиевый:		
	с 5—8 % Al типа ЧЮ22Ш — чугаль	—	6,4—6,7
		Ферритная	5,6—6,0

Примечание. При увеличении содержания алюминия до 30 % получается чугун под названием пирофераль; его плотность составляет 5,3 т/м³ [6].

некоторые легированные чугуны (хромовые, никелевые, хромоникелевые).

У серых чугунов плотность обычно тем больше, чем выше прочность чугуна.

Высокопрочный чугун при прочих равных условиях (одинаковом содержании кремния, перлита и графита) характеризуется большей плотностью, чем чугун с пластинчатым графитом. Однако во многих случаях эта плотность может оказаться на практике ниже, чем у серых чугунов, вследствие более высокого содержания углерода и кремния или большей ферритизации матрицы.

Большей плотностью также характеризуются аустенитные чугуны, вследствие более плотного строения, особенно при легировании никелем и медью, плотность которых больше, чем у железа.

При легировании марганцем плотность аустенита несколько понижается. Еще меньше плотность ферритных кремнистых и алюминиевых чугунов.

Во всех случаях на плотность отливок влияет пористость (газовая, усадочная), величина которой колеблется обычно от 0,5 до 1,2 % в зависимости от состава чугуна, характера кристаллизации и технологических факторов (эффективности питания, толщины стенки и т. п.), которые, в свою очередь, определяются технологичностью конструкции отливки. Наибольшее значение имеют условия питания, гидростатический напор, под которым происходит затвердевание отливки. Поэтому плотность в верхних частях крупных отливок может быть на 5 % меньше, чем в нижних частях, а в центре — на 10 % меньше, чем на периферии.

Плотность графитизированного чугуна уменьшается также с увеличением толщины стенки отливки вследствие увеличения степени графитизации и укрупнения графита [6]:

Толщина стенки, мм	10	12,5	25	37
Плотность, т/м³	7,23	7,14	7,08	7,02

С увеличением жесткости формы уменьшается предусадочное расширение, а следовательно, и усадочная пористость. Поэтому отливки, полученные в металлические формы, при прочих равных условиях более плотные, чем отливки, изготовленные в песчаных формах.

7. Теплофизические свойства серого чугуна в зависимости от температуры

Температура, °С	$\alpha \cdot 10^6$, 1/°С	c, Дж/(кг × × °С)	λ, Вт/(м × × °С)
60	10,0	502	54,4
160	11,0	523	50,2
260	13,1	553	48,1
360	13,7	586	46,0
510	15,9	620	—

Теплофизические свойства. Коэффициент линейного расширения α, удельная теплоемкость c и теплопроводность λ зависят от состава и структуры чугуна, а также от температуры. Поэтому значения их приводят в соответствующем интервале температур. С повышением температуры значения α и c обычно увеличиваются, а λ уменьшается (табл. 7) [20].

Коэффициент линейного расширения α и удельная теплоемкость c реальных неоднородных структур, в том числе чугуна, может быть определена по правилу смешения:

$$\alpha \text{ или } c = \frac{a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n}{a_1 + a_2 + \cdots + a_n},$$

где $x_1, x_2, \ldots, x_n$ — α или c структурных составляющих (табл. 8); $a_1, a_2, \ldots, a_n$ — количественное содержание их.

Теплопроводность сплавов и смесей в отличие от коэффициента α и теплоемкости c не может быть определена по правилу смешения. Влияние отдельных элементов на теплопроводность расчетным путем можно установить лишь приближенно [6].

На коэффициент α и удельную теплоемкость c влияет главным образом состав чугуна, а на теплопроводность λ — степень графитизации, дисперсность структуры, неметаллические включения и т. п.

Коэффициент линейного расширения определяет не только изменения раз-

8. Теплофизические свойства структурных составляющих чугуна

Структурная составляющая	α_{200}^{100}, 1/°C	c_0^{100}, Дж/(кг·°C)	λ_0^{100}, Вт/(м·°C)
Феррит	12,0—12,6	460—470	72,8—75,5
Аустенит	18—19	502	41,8
Цементит	6,0—6,5	615	49,0
Перлит	10,0—11,6	486	50,3—51,9
Графит	1,4—3,7	795	355,8

меров в зависимости от температуры, но и напряжения, образующиеся в отливках. Уменьшение α является полезным с этих позиций и облегчает условия получения качественных отливок. Но в случае совместной работы чугунных деталей с деталями из цветных сплавов или других материалов, имеющих больший коэффициент линейного расширения, приходится стремиться к увеличению значения α для чугуна.

Теплоемкость и теплопроводность имеют большое значение для таких отливок, как отопительные трубы, изложницы, детали холодильных установок и двигателей внутреннего сгорания и т. д., так как определяют равномерность распределения температуры в отливках и интенсивность отвода теплоты.

В табл. 9 приведены теплофизические свойства чугунов различных групп [6, 9, 20].

Коэффициент линейного расширения α. Наибольшее влияние на коэффициент α оказывает углерод, в особенности в связанном состоянии. Одному проценту углерода соответствует примерно в 5 раз большее количество цементита, чем графита. Поэтому графитизирующие элементы (Si, Al, Ti, Ni, Cu и др.) повышают, а антиграфитизирующие (Cr, V, W, Mo, Mn и др.) уменьшают коэффициент линейного расширения.

Наибольшим значением α отличаются аустенитные никелевые чугуны, а также ферритные алюминиевые чугуны типа чугаль и пирофераль. Поэтому при достаточно высоком содержании Ni, Cu, Mn значение α резко увеличивается. Однако при содержании Ni $\geqslant$ 20 % α понижается и достигает минимума при 35—37 % Ni. Форма графита существенно влияет на коэффициент линейного расширения лишь при низких температурах: α высокопрочного чугуна с шаровидным графитом несколько выше, чем α чугуна с пластинчатым графитом.

Удельная теплоемкость c чугуна, как и железа, увеличивается с повышением температуры (см. табл. 7) и характеризуется скачкообразным повышением при фазовом превращении $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$; затем удельная теплоемкость чугуна резко падает, но с дальнейшим повышением температуры вновь увеличивается [14].

Графитизация понижает удельную теплоемкость чугуна; отсюда c белого чугуна несколько выше, чем серого и высокопрочного (см. табл. 9).

Теплопроводность чугуна в большей мере, чем другие физические свойства, зависит от структуры, ее дисперсности и мельчайших загрязнений, т. е. является структурно-чувствительным свойством.

Графитизация повышает теплопроводность; следовательно, элементы, увеличивающие степень графитизации и размер графита, повышают, а элементы, препятствующие графитизации и увеличивающие дисперсность структурных составляющих, понижают λ [6]. Указанное влияние графитизации меньше для шаровидного графита (см. табл. 9).

Форма графита, его выделение и распределение также влияют на теплопроводность. Например, высокопрочный чугун имеет более низкую теплопроводность, чем серый чугун. Теплопроводность чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ) выше, чем у ЧШГ, и близка к λ серого чугуна с пластинчатым графитом [9].

Высоколегированные чугуны характеризуются, как правило, более низкой теплопроводностью, чем обычные.

9. Теплофизические свойства чугуна

Чугун	$\alpha_{20}^{100} \cdot 10^6$, 1/°C	c_{20}^{100}, Дж/(кг·°C)	c_{20}^{1000}, Дж/(кг·°C)	λ_{20}^{100}, Вт/(м·°C)
Серый с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412—85):				
СЧ10—СЧ18	10—11	502—544	586—628	46,0—54,4
СЧ20—СЧ30	10—11	502—544	586—628	41,8—50,2
СЧ35	11,5—12,0	502—544	628—670	37,6—46,0
Высокопрочный (ГОСТ 7293—85):				
ВЧ 35—ВЧ 45	11,5—12,5	460—502	586—628	37,6—46,0
ВЧ 60—ВЧ 80	10—11	502—523	628—670	33,5—41,9
ВЧ 100	9—10	523—565	628—670	29,3—37,6
Ковкий (ГОСТ 1215—79):				
КЧ 30—6 ÷ КЧ 37—12	10,5—11,0	460—511	586—628	54,4—62,8
КЧ 45—5 ÷ КЧ 65—3	10,3—10,8	527—544	628—670	50,2—54,4
Легированный (ГОСТ 7769—82):				
никелевый ЧН20Д2Ш	17—19	—	460—502	17,4
с 35—37 % Ni	1,5—2,5	—	—	—
хромистый:				
ЧХ16	—	—	—	32,5 *1
ЧХ22	—	—	—	25,5 *1
ЧХ28	9—10	—	—	17,4 *1
ЧХ32	9—10	—	—	19,8 *1
кремнистый:				
ЧС5	14—17 *2	—	—	21,0 *3
ЧС15, ЧС17	4,7 *1	—	—	10,5
алюминиевый:				
ЧЮ22Ш	17,5 *1	—	—	15,1—28,0 *3
ЧЮ30	22—23 *2	—	—	—

*1 В интервале 20—200 °C.
*2 В интервале 20—900 °C.
*3 В интервале 20—500 °C.

Электрические свойства. Удельное электрическое сопротивление ρ_T, максимальная магнитная проницаемость μ_{max}, остаточная индукция (намагничивание) Br и коэрцитивная сила H_c чугуна также определяются его составом и структурой.

Указанные свойства чугуна зависят от температуры. В частности, повышение температуры приводит сначала к медленному, затем к более быстрому понижению степени насыщения, коэрцитивной силы, остаточной индукции. Максимальная магнитная проницаемость при этом увеличивается [6].

Удельное электрическое сопротивление серого чугуна может быть приближенно оценено по уравнению [6]:

$$\rho_T = 10{,}4 + 14{,}4C_r + 3{,}2C_{св} + (10{,}3 \div 15{,}7)\,Si + (5 \div 7{,}2)\,Mn + 11\,P.$$

10. Электромагнитные свойства чугуна [6, 9, 14, 20]

Чугун	$\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м	$\mu_{max} \cdot 10^6$, Гн/м	Вг, Тл	H_c, А/м
Белый	45—70	226—289	0,65—0,75	398—875
Серый с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412—85):				
СЧ10—СЧ18	45—85	565—1256	0,4—0,5	398—796
СЧ20—СЧ30	65—105	440—754	0,4—0,55	398—796
СЧ35	80—120	314—565	0,55—0,7	796—1034
Высокопрочный (ГОСТ 7293—85):				
ВЧ 35—ВЧ 45	40—50	1256—2512	0,35—0,50	119—278
ВЧ 60—ВЧ 80	55—65	377—1256	0,55—0,70	318—796
ВЧ 100	60—75	377—754	0,55—0,75	796—875
Ковкий (ГОСТ 1215—79):				
КЧ 35—6÷КЧ 37—12	30—38	1874—2890	0,55—0,70	127—278
КЧ 45—5÷КЧ—65—3	40—45	377—1005	0,60—0,75	318—796
Легированный никелевый:				
ЧН11Г7Ш	100—110	1,28—1,38	—	—
ЧН15Д7Х2	140—170	1,29—3,77	0,0145—0,0165	—
кремнистый:				
ЧХ16	62—73	—	—	—
ЧХ22	72—83	—	—	—
ЧХ28	87—99	—	—	—
ЧХ32	80—94	—	—	—
кремнистый:				
ЧС5	100—200	—	—	—
ЧС15, ЧС17	60—70	—	—	—
алюминиевый:				
ЧЮ22Ш	130—140	1,26—1,27	—	—
ЧЮ30	150—240 *1	1,26—1,27	—	—
марганцевый ЧГ8Д3	130—160	1,38—3,77	—	—

*1 Чугун с пластинчатым графитом.

Электрическое сопротивление с повышением температуры возрастает.

Средние значения удельного электрического сопротивления структурных составляющих ($\rho_1 \times 10^{-8}$, Ом·м): 10 феррита; 20 перлита; 140 цементита; 30 графита параллельно базису, 4200 перпендикулярно базису. Таким образом, максимальным удельным электрическим сопротивлением обладает графит и цементит. Поэтому сопротивление ρ_1 чугуна увеличивается как при графитизации, особенно заметно для графита пластинчатой формы, так и при увеличении в структуре цементита. Существенно влияет также дисперсность структуры металлической матрицы чугуна. Удельное электрическое сопротивление увеличивается с переходом структуры от феррита к перлиту, сорбиту, трооститу и мартенситу (табл. 10). Высоким удельным электрическим сопротивлением характеризуется и аустенитная структура.

Раковины, межкристаллическая пористость, всякого рода включения также повышают удельное электрическое сопротивление. Поэтому отливки имеют тем меньшее ρ_1, чем больше их плотность. Высоколегированные чугуны также характеризуются большими ρ_1, чем обычные.

Магнитные свойства. В соответствии с требованиями, предъявляемыми и деталям, чугун может применяться в качестве ферромагнитного (магнитно-мягкого) или парамагнитного материала.

Магнитные свойства в большей степени, чем какие-либо другие, зависят от структуры металла, что определяет разделение магнитных свойств на первичные и вторичные. К первичным относятся индукция, насыщение ($4\pi I$), проницаемость в сильных полях и температура магнитного превращения. Эти свойства зависят от количества и состава ферромагнитных фаз и не зависят от их формы и распределения. К вторичным свойствам относятся гистерезисные характеристики: индукция, насыщение и проницаемость в слабых и средних полях, коэрцитивная сила, остаточный магнетизм. Вторичные свойства мало зависят от состава фаз и определяются главным образом формой и распределением структурных составляющих.

Основными ферромагнитными составляющими чугуна являются феррит и цементит, характеризующиеся следующими данными [6] (табл. 11).

Цементит является более жесткой магнитной составляющей, поэтому в качестве магнитно-мягкого материала всегда применяется серый, а не белый чугун. Графитизация приводит к резкому понижению H_c и интенсивному повышению μ_{max}, в особенности при распаде последних остатков карбидов. При этом влияние графита, как и других немагнитных фаз, зависит также от формы и величины включений. Наиболее благоприятной в этом отношении является глобулярная форма. Поэтому ковкий и высокопрочный чугун характеризуются большей индукцией и магнитной проницаемостью и меньшей коэрцитивной силой, чем серый чугун при той же матрице (см. табл. 10).

Таким же образом влияет укрупнение эвтектического и ферритного зерна и уменьшение количества перлита. Поэтому отпуск после закалки способствует улучшению магнитно-мягких свойств.

Немагнитные (парамагнитные) чугуны применяются в тех случаях, когда требуется свести к минимуму потери мощности (крышки масляных выключателей, концевые коробки трансформаторов, нажимные кольца на электромашинах и т. д.) или когда необходимо минимальное искажение магнитного поля (стойки для магнитов и т. п.). В первом случае, наряду с низкой магнитной проницаемостью, требуется высокое электрическое сопротивление; этому требованию чугун удовлетворяет даже в большей степени, чем цветные сплавы. Во втором случае необходима особо низкая магнитная проницаемость. Поэтому в ряде случаев и не удается заменить цветные сплавы аустенитными чугунами для второй группы отливок [6].

В зависимости от состава различают аустенитные немагнитные чугуны:

никелевые типа нирезист с тем или иным количеством хрома;

никельмарганцевые типа номаг с тем или иным содержанием меди и алюминия, превосходящие чугуны первой

11. Характеристика структурных составляющих чугуна

Структурные составляющие	T магнитного превращения, °С	Вг, Тл	H_c, А/м	$\mu_{max} \cdot 10^6$, Гн/м
Феррит	768	0,13	71,6—79,6	6283—12 566
Цементит	212	—	4377	—

12. Классы стойкости металлов

Класс	Характеристика стойкости металла	Уменьшение массы металла при коррозии	
		г/(м²·ч)	мм/год
1	Вполне стойкие	<0,1	<0,12
2	Достаточно стойкие	0,1—1,0	0,12—1,2
3	Относительно стойкие	1,0—3,0	1,2—3,6
4	Малостойкие	3,0—10,0	3,6—12,0
5	Нестойкие	>10,0	>12,0

группы по немагнитности, но уступающие им по жаропрочности, жаростойкости и сопротивлению коррозии;

марганцевые с тем или ным содержанием меди и алюминия, являющиеся наиболее дешевыми, но обладающие более низкими прочностными и физическими свойствами.

Представляют интерес также ферритные высоколегированные алюминиевые чугуны, характеризующиеся особенно низкой магнитной проницаемостью (см. табл. 10).

Коррозионная стойкость чугуна. Коррозионное разрушение чугуна вызывается электрохимическими, реже, чисто химическими процессами. Коррозия может быть равномерной, местной, межкристаллитной избирательной.

В общем случае коррозия оценивается обычно как скорость уменьшения массы материала и выражается в г/(м²·ч) или в мм/год. В зависимости от этих потерь различают классы стойкости при коррозии в сильно- и среднеагрессивных средах (табл. 12).

Сопротивление коррозии зависит как от особенностей металла, так и от внешних факторов — состава и температуры среды, доступа кислорода, движения раствора или газа относительно металла. В частности, повышение температуры и скорости движения среды увеличивает скорость коррозии.

К факторам, связанным с особенностями металла, относятся структура, химический состав, шлаковые и газовые включения, напряжения и состояние поверхности.

По сопротивлению коррозии серые чугуны с пластинчатым и шаровидным графитом в различных средах могут быть отнесены к различным классам стойкости (табл. 13). В сравнительно чистом и сухом воздухе эти чугуны весьма стойки благодаря образованию пассивирующей пленки (скорость коррозии ~0,025 мм/год). Коррозия начинает возрастать при загрязнении атмосферы, главным образом сернистыми газами. При этом состав и тип чугуна, в частности форма графита и характер матрицы, оказывают сравнительно небольшое влияние. Единственным элементом, полезным в этих условиях, является медь.

Роль состава и структуры чугуна также не очень велика при коррозии в природных, промышленных, лечебных и морских водах, хотя чугун марок ВЧ, особенно перлитный, обладает более высокой коррозионной стойкостью в морской воде, чем чугун марок СЧ. Главное влияние в этих условиях, как и при атмосферной коррозии, оказывают состав среды и плотность отливок. Растворы солей, гидраты которых придают воде кислотный характер, значительно ускоряют коррозию, а соли, дающие при гидролизе щелочные растворы, замедляют коррозионный процесс.

В условиях подземной коррозии существенное влияние оказывают такие факторы, как состав и электрическое сопротивление почвы, характер контакта, наличие блуждающих токов и др. В частности, с увеличением электрического сопротивления почвы с 100—200 до 20 000 Ом·см скорость коррози

13. Коррозионная стойкость (скорость коррозии, мм/год) чугуна в различных условиях [4, 6, 12, 20]

Чугун	Условия эксплуатации								
	Промышленная атмосфера	Влажная камера с ежедневной добавкой 0,3 % SO_2	Проточная водопроводная вода при 25 °С	Морская вода *1	10 %-ный раствор соды при 80 °С	3 %-ный раствор NaCl при 10—19 °С	5 %-ная кислота		
							серная	соляная	азотная
Белый	—	—	—	0,045	—	—	—	—	—
Серый	0,141	0,242	0,267	0,03—0,09	0,0185	0,084	30,7	26,7	25,8
Высокопрочный:									
ферритный	0,181	0,285	0,216	0,025—0,105	0,01	0,077	—	—	—
ферритно-перлитный	0,151	0,235	0,257	—	—	0,083	—	—	—
перлитный	0,141	0,220	0,285	0,05—0,07	0,012	0,084	—	—	—
Ковкий	—	—	—	0,045—0,08	—	—	—	—	—
Коррозионно-стойкий типа нерезист 4Н15Д7	—	—	0,049	0,02	—	—	0,152	0,3	21,3
Кремнистый типа ЧС15, ЧС15МЧ	—	—	—	—	—	—	0,125	0,125	—

*1 При испытании в проточной морской воде скорость коррозии превышает аналогичные данные испытаний в простой воде. Скорость коррозии 1 г/(м²·ч) = 1,2 мм/год.

уменьшается в 3 раза [6]. Несколько большее сопротивление коррозии в почве оказывают чугуны марок КЧ и ВЧ, особенно в агрессивной среде.

В общем случае для этих чугунов коррозионная стойкость повышается по мере измельчения графита и уменьшения его количества, при однофазной структуре матрицы, а также при уменьшении содержания Si, S, P. Повышают сопротивление коррозии модифицирование, а также легирование Cu (до 1,4 %), Ni (до 3,0 %), Cr (до 1,0 %). Для работы в щелочной среде рекомендуются чугуны, содержащие 0,8—1,0 % Ni и 0,6—0,8 % Cr или 0,35—0,5 % Ni и 0,4—0,6 % Cr.

Однако при воздействии на металл сильных реагентов, кислот и щелочей следует применять высоколегированные чугуны. В этих случаях основное значение приобретает химический состав чугуна. Роль структуры, особенно формы выделения графита, значительно меньше. При прочих равных условиях наилучшими являются аустенитная или ферритная структура. Компактный или пластинчатый графит мало различаются по своему влиянию, если последний разобщен, сравнительно невелик и равномерно распределен.

Повышение сопротивления чугуна коррозии в агрессивных средах достигается легированием элементами, которые обладают высоким потенциалом (Cu, Ni, Mo) и являются более устойчивыми, либо способны образовать защитные пассивирующие пленки (Cr, Si, Al) в той или иной среде, либо обладают обоими этими свойствами [6].

Химическая стойкость чугуна в кислотах резко увеличивается при содержании кремния ~1,5 %. Сплавы ЧС15, ЧС17 стойки в азотной, фосфорной, уксусной и, что особенно важно, в серной кислоте при любых концентрациях и температуре и в смеси HNO_3 и H_2SO_4. Ферросилиды стойки также в растворах солей, но легко корродируют под воздействием соляной кислоты, крепких щелочей и фтористых соединений. Для повышения стойкости в кислоте HCl сплавы легируют до 4,0 % Mo (ЧС15М4, ЧС17М3). Эти сплавы известны под названием антихлор. Антихлор устойчив в соляной кислоте любой концентрации при всех температурах, в азотной кислоте любой концентрации, в лимонной, пикриновой, серной и фосфорной кислотах, перекиси водорода, четыреххлористом углероде, железном купоросе. Недостатком этих сплавов является большая хрупкость, плохая обрабатываемость и низкие механические свойства. Поэтому применяют ферросилиды только в условиях, когда необходима низкая скорость коррозии, не выше 0,25 мм/год.

В условиях воздействия щелочей используют обычно чугуны, легированные никелем (хромом). Наилучшие результаты достигаются при использовании высоколегированных чугунов типа нирезист (например, ЧН15Д7Х2). Эти чугуны стойки также в холодных разбавленных растворах серной кислоты. В соляной кислоте чугун этого типа менее стоек, а в азотной — нестоек (см. табл. 13).

При большом содержании хрома (12—35 %) чугун оказывается химически стойким во многих средах, кислотах, щелочах, солях и особенно в азотной кислоте благодаря образованию оксидной пассивирующей пленки. В соляной кислоте оксидная пленка на этих сплавах разрушается вследствие воздействия хлоридов.

Жаростойкость характеризует работоспособность чугуна при повышенных и высоких температурах в условиях действия малых нагрузок, когда главной причиной разрушения отливок является образование окалины или трещин. Наблюдается также необратимое изменение размеров отливок, которое принято называть ростом. Жаростойкость оценивается по окалиностойкости — увеличению массы отливки в г/(м²·ч) и ростоустойчивости — уменьшению плотности чугуна или увеличению длины образца за 150 ч выдержки при соответствующей температуре. Для жаростойких чугунов при соответствующей температуре увеличение массы образца не должно превосходить 0,5 г/м², а длины 0,2 %. Рост чугуна возрастает с повышением температуры и продолжительности выдержки, увеличением числа циклов колебаний температуры (особенно при переходе через критический интервал),

скорости изменения температуры и агрессивности среды (рис. 1, *а*). Причинами, вызывающими рост чугуна, являются также графитизация и другие фазовые превращения, протекающие с увеличением объема фаз, окисление основного металла и легирующих элементов, растворение графита и порообразование, релаксация напряжений.

В наиболее неблагоприятных условиях, например при циклическом изменении температуры в агрессивной среде, необратимое увеличение объема может достигать 20, а иногда 50—100 %. Характерными признаками роста являются резкое понижение механических свойств и образование сетки разгара на поверхности отливок.

Измельчение и уменьшение количества графита и размера эвтектического зерна, замена перлита ферритом в структуре повышают окалиностойкость и ростоустойчивость чугунов марок СЧ. Этому способствуют уменьшение содержания C и Si, замена обычного чугуна модифицированным, низкое легирование Cr, Ni и другими элементами. Более высокой окалиностойкостью и ростоустойчивостью обладает высокопрочный чугун (рис. 1, *б*). Ковкий чугун с типичным для него выделением углерода отжига занимает при одной и той же матрице промежуточное положение между чугунами марок СЧ и ВЧ.

На воздухе чугун марки СЧ сохраняет повышеиную стойкость при температурах до 450—500 °С, а в атмосфере печных газов лишь до 350 °С, в атмосфере водяного пара не выше 300 °С. Явление роста в высокопрочном чугуне с шаровидным графитом (ВЧШГ) практически не наблюдается при температурах до 400—500 °С.

При более высоких температурах следует применять специальные легированные чугуны. Наиболее часто для повышения жаростойкости используют легирование Si, Al и Cr.

Влияние Si и Al на окалиностойкость и ростоустойчивость чугуна не однозначно (рис. 2). При небольших добавках этих элементов в обычный чугун с пластинчатым графитом рассматриваемые свойства ухудшаются. Даже незначительное количество Si

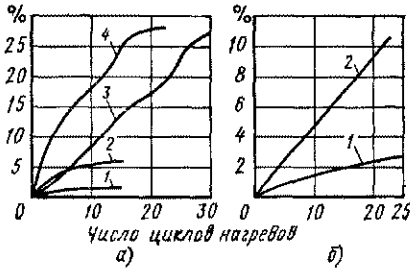


Рис. 1. Изменение объема (*а*) [8] и рост [7] чугуна (*б*) в зависимости от числа циклов нагрева до 900 °С:

а — серый чугун с пластинчатым графитом; нагрев: *1* — в водороде; *2* — в вакууме; *3* — в атмосфере печных газов; *4* — в CO_2; *б* — чугуны с ферритной основой: *1* — марки СЧ состава 3,27—3,43 % C; 2,19—2,23 % Si; 0,47—0,68 % Mn, 0,13—0,20 % P, до 0,15 % S; *2* — марки ВЧ того же состава, кроме того, до 0,01 % S; 0,05—0,077 % Mg; 1,5—1,95 % Ni

в белых чугунах резко понижает их жаростойкость. Однако при достаточно высоком содержании Si и Al стойкость чугуна против окисления и роста резко повышается.

Благоприятные результаты действия высоких концентраций Si на окалиностойкость и ростоустойчивость связаны с получением стабильной структуры графит + кремнеферрит. По мере увеличения содержания Si критические точки располагаются при более высокой температуре. Так, при 6 % Si точка Ac_1 располагается около 950 °С, а при 7 % Si — около 1000 °С. Кремний, входя в твердый раствор, повышает температуру образования непрочной вюститной фазы (Fe_3O_4), т. е. увеличивает стойкость металлической основы против окисления.

Влияние Al на жаростойкость чугуна проявляется прежде всего путем образования им защитных оксидных пленок [1]. Алюминий повышает температуру возникновения вюститной фазы и способствует образованию оксидных пленок с шпинельным типом решетки ($FeO \cdot Al_2O_3$).

На уменьшение роста и окисления отливок хром влияет уже при небольших количествах (0,5—1,5 %; рис. 2, *а*). Ввод хрома в таких количествах тор-

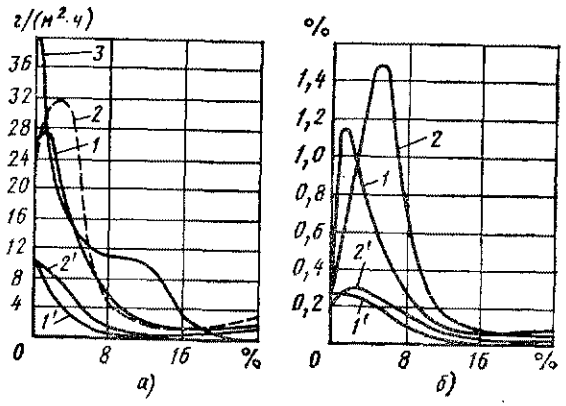


Рис. 2. Влияние содержания легирующих элементов на окисление (увеличение массы) (*а*) и линейный рост (*б*) чугуна при 1223—1273 К [26]:
1, 1' — увеличение содержания Si в обычном и высокопрочном чугуне соответственно; *2, 2'* — увеличение содержания Al; *3* — увеличение содержания Cr

14. Жаростойкость некоторых легированных чугунов (ГОСТ 7769—82) [20]

Чугун	Характеристика условий	Чугун	Характеристика условий
Хромистые чугуны		**Кремнистые чугуны**	
ЧХ1	В воздушной среде до 500 °С	ЧС5	В топочных и генераторных газах, в воздушной среде до 700 °С
ЧХ2	То же, до 600 °С		
ЧХ3	» до 650 °С	ЧС5Ш	То же, до 800 °С
ЧХ16	» до 900 °С	ЧС13	В кислотах, кроме плавиковой и соляной, до 200 °С
ЧХ28	В расплавах солей до 900 °С, в газовых средах до 1100—1150 °С	ЧС15	То же
		ЧС17	»
ЧХ32	То же	**Алюминиевые чугуны**	
ЧХ28П	В цинковых расплавах до 550 °С	ЧЮХШ	В атмосфере воздуха и печных газов до 650 °С
Никелевые чугуны		ЧЮ7Х2	То же, до 750 °С
ЧНМШ	Термостойкость до 500 °С	ЧЮ6С5	» до 800 °С
ЧН19Х3Ш	Жаростойкость до 600 °С	ЧЮ22Ш	В воздушной среде до 1000—1100 °С, повышенная в газовой среде, содержащей S, пары воды
ЧН11Г7Ш	То же	ЧЮ30	В воздушной среде до 1100 °С

Примечание. Х — хром; Н — никель; М — молибден; Г — марганец; С — кремний; Ю — алюминий; П — фосфор; Ш — чугун с шаровидным графитом.

мозит графитизацию эвтектоидного цементита, измельчает включения графита и повышает сопротивляемость окислению металлической основы вследствие повышения температуры образования аустенитной фазы. Максимального уровня эти свойства достигают при Cr > 15 %. Большинство жаропрочных хромистых чугунов (>10 % Cr) относятся к типу белых чугунов.

Никель повышает жаростойкость даже при относительно небольших добавках (до 1,5—2,0). Однако это влияние ощутимо лишь в области относительно низких температур. Жаростойкость непрерывно повышается с ростом концентрации в них Ni. Жаростойкими при 1220 К являются чугуны, содержащие не менее 25 % Ni. При таких концентрациях никеля чугуны имеют однофазную аустенитную структуру металлической основы.

Наиболее эффективно для повышения жаростойкости и сохранения других свойств комплексное легирование, например, Cr и Ni, Cr и Cu, Si и Al и др.

В табл. 14 приведены марки и области применения некоторых жаростойких легированных чугунов.

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧУГУНА

Чугун является своеобразным композитным материалом, механические и эксплуатационные свойства которого зависят от характеристик металлической основы (прочность, пластичность, твердость и др.), а также формы, размеров, количества и распределения графитовых включений. При этом решающее значение в ряде случаев имеет либо графит, либо металлическая основа. Например, модуль упругости чугуна в решающей степени зависит от формы и величины графитовых включений, а твердость в основном определяется свойствами металлической основы. Такие свойства, как временное сопротивление разрыву, ударная вязкость, длительная прочность, зависят как от свойств металлической основы, так и от формы или размеров и количества графитовых включений. Свойства структурных составляющих металлической основы чугуна приведены в табл. 15.

Получение той или иной структуры чугуна в отливках зависит от многих факторов: химического состава чугуна, вида шихтовых материалов, технологии плавки и внепечной обработки металла, скорости кристаллизации и охлаждения расплава в форме, а следовательно, толщины стенки отливки, теплофизических свойств материала формы и др. Структуру металлической основы чугуна можно изменять также термической обработкой отливок, общие закономерности влияния которой аналогичны возникающим при термической обработке углеродистой стали, а особенности связаны с сопутствующими изменениями металлической основы процессами графитизации.

Среди элементов химического состава С и Si определяют формирование структуры чугуна, а при заданной технологии литья приведенный размер стенки отливки $R_{пр}$ характеризует скорость ее охлаждения ($R_{пр}$ — отношение площади сечения стенки к периметру). Тогда различная структура чугуна в отливках при литье в песчаную форму получается при [6, 20]

$$C\,(Si + \lg R_{пр}) = K,$$

где $K \leqslant 4{,}5$ — для перлитно-цементной структуры; $K = 4{,}5 \div 6{,}0$ для перлитно-графитной структуры; $K = 10 \div 14$ для перлитно-ферритно-графитной структуры; $K \geqslant 14$ для ферритно-графитной структуры.

Наряду с Si большое значение как графитизирующий элемент имеет Al, который иногда частично или полностью заменяет Si. Это улучшает свойства чугуна, особенно пластичность. Наиболее благоприятное сочетание характеристик прочности, вязкости и пластичности достигается в алюминиевых чугунах при содержании в них Si $\leqslant 1{,}0$ %.

По влиянию небольших добавок других элементов на структуру чугуна и, следовательно, свойства добавки можно разбить на три группы.

Первая группа элементов (Ni, Co, Cu) аналогично Si оказывает графитизирующее влияние, способствует раз-

15. Свойства основных структурных составляющих чугуна [2, 6, 8, 20]

Структурные составляющие чугуна	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ·10^{-1}, МПа
Феррит	250—400	30—50	110—140
Перлит	800—1000	15—20	200—260
Сорбит	1200—1400	10—15	240—300
Троостит	—	—	280—320
Бейнит	—	—	300—350
Мартенсит	1400—1800	—	350—550
Аустенит	400—800	40—60	140—160
Цементит	30—50	—	750—800
Фосфидная эвтектика	—	—	300—400
Графит	17—35	—	130—180

Примечание. При легировании фаз металлической основы свойства их повышаются. Например феррит, легированный 2 % Si, имеет $\sigma_в$ = 600 МПа.

мельчению выделений графита. Одновременно эти элементы стимулируют получение более дисперсных перлитных игольчатых и мартенситных структур даже при сравнительно медленном охлаждении.

Вторая группа элементов (Cr, Mo, W, V и др.) в противоположность первой препятствует графитизации с интенсивностью, пропорциональной концентрации. При содержании, превышающем предел растворимости их в цементите или феррите, они образуют специальные карбиды.

К третьей группе элементов можно отнести Ti, Zr, Ce, Ca, Mg, B и др. Эти элементы характеризуются высокой химической активностью, почти целиком расходуются на образование тугоплавких карбидов, сульфидов, оксидов, нитридов, которые могут служить зародышами в процессе последующей кристаллизации и повышать дисперсность металлической основы. Более того, элементы этой группы Mg, Ca, Ce и др. редкоземельные металлы (РЗМ) входят в состав лигатур для модифицирования чугуна с целью получения графита вермикулярной или шаровидной формы.

Влияние графитовых включений на различные эксплуатационные свойства чугуна также многообразно и не однозначно.

При нагружении чугуна графитовые включения, являясь «надрезами», снижают его прочность и пластичность. Это происходит, во-первых, вследствие некоторого уменьшения живого сечения металлической основы из-за полостей, занятых графитом, имеющим небольшую прочность на разрыв, и, во-вторых, что наиболее важно, из-за высокой концентрации напряжений, возникающей в местах графитовых включений, особенно при пластинчатой форме графита. Чем длиннее пластинки графита, тем больше коэффициент концентрации напряжений. Все это приводит к резкой локализации пластических деформаций в металлической основе, исчерпанию пластичности материала в этих местах, развитию трещин и в итоге — к квазихрупкому разрушению материала при средних напряжениях и показателях пластичности, более низких, чем прочность и пластичность металлической основы чугуна.

Кроме того, из-за разного коэффициента термического расширения графита и металлической основы (см. табл. 8) при охлаждении отливок в чугуне возникают структурные напряжения II рода, которые, постепенно возрастая, достигают предела упругости материала в местах концентрации напряжений (при пластинчатой форме графита). Поэтому дополнительная внешняя нагрузка любой величины вызывает необратимые пластические деформации в материале, и чугун с пластинчатым графитом в литом состоянии, по существу, не имеет предела упругости [5]. Однако он может приобрести это свойство в результате «тренировки» различными нагрузками, приводящими к упрочнению металлической основы в местах концентрации напряжений. Этой же цели могут служить различные варианты термомеханической или термоциклической обработки [21, 22], что особенно важно для высокоточных деталей прецизионных станков и других подобных машин.

Упрочнение металлической основы в местах концентрации напряжений происходит при естественном старении отливок из чугуна с пластинчатым графитом (вылеживании) даже при отсутствии напряжений I рода, из-за протекания релаксационных процессов высоких напряжений II рода. В результате возрастает сопротивляемость образованию пластических деформаций при нагружении небольшими нагрузками. Указанный процесс интенсифицируется при вылеживании отливок на воздухе, когда добавляется термоциклическое воздействие изменений погодных условий.

Модуль упругости чугуна E из-за графитовых включений ниже, чем у его металлической основы, так как образуются дополнительные обратимые деформации полостей, занятых графитом, особенно заметные при больших нагрузках. Поэтому значение E уменьшается с увеличением нагрузки.

Все отмеченные явления становятся менее заметными при увеличении дисперсности пластинчатого графита до 100—200 мкм и особенно при его компактных формах (вермикулярный, шаровидный графит). Поэтому ковкий и высокопрочный чугуны при одинаковой структуре металлической основы имеют более высокую прочность, модуль упругости, пластичность; у них появляется предел упругости.

Наличие графитовых включений делает чугун, особенно с пластинчатым графитом, практически не чувствительным к надрезам, что позволяет конкурировать ему с более прочной сталью по сопротивлению усталости и пределу выносливости. Включения графита обеспечивают высокую износостойкость чугуна в условиях трения скольжения со смазкой и т. д.

Серый чугун с пластинчатым графитом. В табл. 16 приведены механические свойства и рекомендуемый химический состав серого чугуна по ГОСТ 1412—85, а в табл. 17 — некото-

16. Механические свойства и рекомендуемый состав серого чугуна (ГОСТ 1412—85)

Чугун	$\sigma_в$, МПа	Твердость НВ·10^{-1}, МПа	Мас. доля элементов, %				
			C	Si	Mn	P	S
						не более	
СЧ10	98	143—229	3,5—3,7	2,2—2,6	0,5—0,8	0,3	0,15
СЧ15	147	163—229	3,5—3,7	2,0—2,4	0,5—0,8	0,2	0,15
СЧ18	176	170—241	3,4—3,6	1,9—2,3	0,5—0,7	0,2	0,15
СЧ20	196	170—241	3,3—3,5	1,4—2,2	0,7—1,0	0,2	0,15
СЧ21	206	170—241	3,3—3,5	1,4—2,2	0,7—1,0	0,2	0,15
СЧ24	235	170—241	3,2—3,4	1,4—2,2	0,7—1,0	0,2	0,15
СЧ25	245	180—250	3,2—3,4	1,4—2,2	0,7—1,0	0,2	0,15
СЧ30	294	181—255	3,0—3,2	1,0—1,3	0,7—1,0	0,2	0,12
СЧ35	343	197—269	2,9—3,0	1,0—1,1	0,7—1,1	0,2	0,12

Примечание. Чугуны марок СЧ25 и выше обычно модифицируют FeSi. Для них содержание Si в таблице дано после введения модификатора.

17. *Механические свойства чугуна* [20]

Чугун	При растяжении			При сжатии				
	$E\cdot10^{-3}$, МПа	δ, %	$\sigma_{-1р}$, МПа	$\sigma_с$, МПа	$E\cdot10^{-3}$, МПа	μ	ψ, %	$\sigma_{-1с}$, МПа
СЧ10—СЧ18	60—80	0,2—1,0	50—70	500—800	65—90	0,28—0,29	20—40	70—90
СЧ20—СЧ30	85—125	0,4—0,65	90—115	850—1000	93—130	0,28—0,29	15—30	120—145
СЧ30—СЧ35	125—145	0,65—0,9	115—140	1000—1200	130—155	0,28—0,29	15—20	145—170

Чугун	При кручении		При срезе		φ, %, при вибрации с нагрузкой, равной $1/3\sigma_{0,2}$	$a_н$, кДж/м²	При изгибе	
	$\tau_в$, МПа	τ_{-1}, МПа	$\tau_в$, МПа	$G\cdot10^{-3}$, МПа			σ_{-1}, МПа	$\sigma_и$, МПа
СЧ10—СЧ18	240—320	60—80	150—220	40—44	30—32	40—70	58—66	240—360
СЧ20—СЧ30	280—360	100—120	250—355	45—54	23—30	80—100	67—133	400—500
СЧ30—СЧ35	360—400	120—140	355—400	54—64	23—25	80—90	133—155	500—540

Примечание. φ — циклическая вязкость, характеризующая скорость затухания вибрации, а значит, чувствительность к надрезам.

рые, не предусмотренные этим стандартом свойства чугуна. В общем случае, чем меньше графита, мельче и благоприятнее по распределению его включения, дисперснее перлит, мелкие эвтектическое зерно, тем выше указанные свойства. Однако если $\sigma_в$, τ_{-1}, $\tau_в$, φ зависят как от графита, так и металлической основы, то E — главным образом от графита, а НВ — почти полностью от структуры металлической основы. Малая чувствительность серого чугуна к надрезам иллюстрируется следующими данными по сопротивлению усталости чугуна при вибрации [24]:

$\sigma_в$, МПа	140	175	210	255	300
σ_{-1}, МПа:					
без надреза	65	84	105	140	163
с надрезом	65	80	95	120	130

Влияние легирующих элементов на механические свойства чугуна марок СЧ показано на рис. 3, а изменение прочности серого чугуна в зависимости от толщины стенки отливки, получаемой в песчаной форме, — на рис. 4.

Для различных групп отливок путем варьирования содержания химического состава основных элементов и легирования чугуна небольшими добавками обеспечивают комплекс оптимальных эксплуатационных свойств. Так, для блоков цилиндров карбюраторных двигателей чугун легируют Cr (0,2—0,5 %) и Ni (до 0,2 %), а для автомобильных дизелей дополнительно Cu (0,2—0,4 %). Необходимые свойства для тракторных двигателей обеспечивают повышенным (до 1,4 %) содержанием Mn.

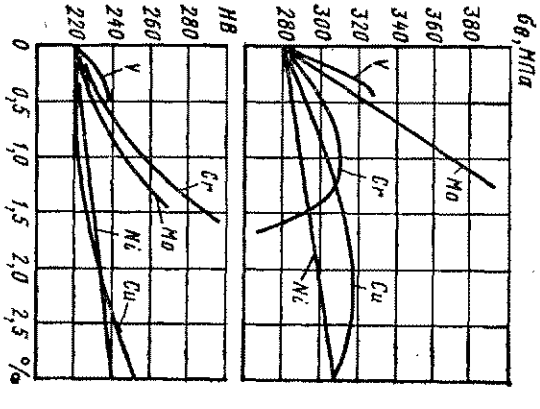


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на прочность и твердость чугуна с пластинчатым графитом состава: 3,2 % C; 1,85 % Si; 0,7 % Mn; 0,14 % P [6]

Гильзы карбюраторных двигателей изготовляют из чугуна СЧ25 с обычным (0,14 %) и повышенным (0,17—0,22 %) содержанием фосфора.

Для ребристых цилиндров двигателей воздушного охлаждения используют чугун, легированный Sb (0,5—0,08 %), Cr (0,4—0,6 %) и Ni (0,1—0,3 %) или Ni (0,65 %) и P (0,65—0,75 %).

В станкостроении для повышения твердости средних по развесу отливок наряду с модифицированием чугуна FeSi и SiCa применяют ковшевое легирование Cu (0,3—0,4 %) и Cr

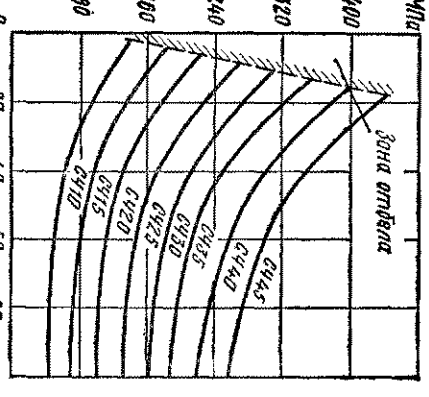


Рис. 4. Изменение прочности серого чугуна различных марок в зависимости от толщины стенки отливки

(0,2—0,3 %). При толщине стенки более 15—20 мм используют легирование Cu (0,8—1,0 %) и Cr (0,3—0,5 %). Для средних и тяжелых отливок, в которых допускается наличие в микроструктуре карбидных включений, применяют комплексное легирование чугуна Mo (0,3—0,8 %), Ni (0,7—1,2 %) и Cr (0,2—0,6 %). В отдельных случаях для повышения твердости применяют легирование B (0,04 %) совместно с Cu (0,4—0,6 %) или Ni (0,5—0,6 %).

Максимальная прочность чугуна при плавке в индукционных печах достигается при отношении $Si/C = 0,85 \div 1,0$ (при постоянной степени эвтектичности). При получении чугунов СЧ30, СЧ35, в случае ваграночной плавки, более низкое отношение $Si/C = 0,6 \div 0,7$ компенсируют повышенным содержанием Mn (1,0—1,5 %).

Герметичность отливок из чугуна зависит как от графитовой, так и от усадочной пористости; при этом, чем ниже эвтектичность серого чугуна, тем большее значение приобретают условия эффективного питания при затвердевании отливок (градиент температур, обеспечивающий направленное затвердевание, достаточный металлостатический напор).

Несмотря на наличие графита, герметичность чугуна достаточно велика, если в отливке отсутствуют литейные дефекты. Так, при испытании водой или керосином при давлении до 10—15 МПа втулки толщиной 2 мм имеют полную герметичность. Чугунные отливки с мелким графитом и низким содержанием P при отсутствии волосяных трещин могут противостоять давлению жидкости до 100 МПа и газов до 70 МПа.

Свариваемость серого чугуна значительно хуже, чем у углеродистой стали; поэтому газовая и дуговая сварка, как и заварка дефектов (особенно крупных) на отливках, проводится по особой технологии.

Обрабатываемость серого чугуна обратно пропорциональна его твердости. Она улучшается по мере увеличения количества феррита в структуре, а также по мере повышения однородности структуры, т. е. при отсутствии в ней включений фосфидной эвтектики, карбидов, обладающих повышенной твердостью. Наличие графита полезно, так как стружка получается крошащейся и давление на инструмент уменьшается.

Высокопрочный чугун с шаровидным или вермикулярным графитом (ВЧШГ, ВЧВГ). Отличительной особенностью ВЧШГ являются его высокие механические свойства (табл. 18, 19), обусловленные шаровидной формой графита, который не оказывает сильного надрезывающего воздействия на металлическую основу, вследствие чего вокруг сфероидов графита в меньшей степени возникает концентрация напряжений. При этом ВЧШГ, как и другие чугуны, можно получать со всеми известными структурами металлической основы, выбирая состав металла, в том числе его легирование, технологию производства и методы термической обработки (табл. 20).

Кроме того, ВЧШГ имеет хорошие коррозионную стойкость (не ниже, чем СЧ, см. табл. 13), жаростойкость (рис. 1, *б*), хладостойкость, антифрикционные свойства, обрабатываемость и может подвергаться сварке и автогенной резке.

ВЧШГ имеет хорошие литейные свойства: высокую жидкотекучесть, незначительную склонность к образованию горячих трещин. Вместе с тем его склонность к образованию усадочных раковин и литейных напряжений выше, чем у СЧ, и находится на уровне этих свойств для стали или ковкого чугуна.

Наиболее существенным для механических свойств ВЧШГ является получение графита правильно шаровидной формы. Шаровидная форма графита зависит от состава металла, условий модифицирования, шихтовых материалов и других условий плавки и от скорости охлаждения отливки. Чем больше скорость охлаждения, тем ближе к шаровидной форме и дисперсней включения графита. Для получения заданных свойств в отливках с большей толщиной стенки уменьшают содержание C и Si в чугуне с повышением их соотношения (табл. 20). Для получения чугуна высоких марок используют легирование небольшим количеством Ni, Cr, Cu, Mo.

18. Механические свойства ВЧШГ (ГОСТ 7293—85)

Чугун	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	НВ
	не менее			
Ферритный чугун				
ВЧ 35	350	220	22	140—170
ВЧ 40	400	250	15	140—202
Перлитно-ферритный чугун				
ВЧ 45	450	310	10	140—225
ВЧ 50	500	320	7	153—245
Перлитный чугун				
ВЧ 60	600	370	3	192—277
ВЧ 70	700	420	2	228—302
ВЧ 80	800	480	2	248—351
Бейнитный чугун				
ВЧ 100	1000	700	2	270—360
Чугун с вермикулярным графитом (не регламентирован ГОСТом) [9]				
Ферритный	330—380	—	3—8	135—170
Перлитный	500—600	—	2	190—250

19. Механические свойства высокопрочного чугуна, не предусмотренные ГОСТ 7293—85 [4, 20]

Чугун	При растяжении		При сжатии			При кручении	
	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	σ_{-1}, МПа	σ_c, МПа	μ	ψ, %	$\tau_в$, МПа	τ_{-1}, МПа
Ферритный ЧШГ	165—175	120—150	1000—1400	0,28—0,29	12—20	400—460	130—160
Перлитный ЧШГ	175—185	160—200	1500—2000	0,28—0,29	4—8	500—780	180—230
Бейнитный ЧШГ	180—190	240—400	1800—2200	0,28—0,29	2—4	700—900	220—300

Чугун	При срезе		φ, %, при вибрации с нагрузкой, равной $1/3\sigma_{0,2}$	$a_н$, кДж/м²	При изгибе	
	$\tau_в$, МПа	$G \cdot 10^3$, МПа			σ_{-1}, МПа	$\sigma_и$, МПа
Ферритный ЧШГ	320—400	65—75	10—14	150—200	235—258	750—900
Перлитный ЧШГ	400—550	75—80	8—10	80—200	—	850—1200
Бейнитный ЧШГ	550—700	80—85	7—10	50—150	—	1200—1400

20. Рекомендуемые химический состав и термическая обработка ВЧШГ [4, 20]

Чугун	Мас. доля элементов, %										Рекомендуемая термическая обработка
	C			Si			Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	
	Толщина стенки, мм						не более						
	до 50	50—100	>100	до 50	50—100	>100							
ВЧ 35	3,3—3,8	3,0—3,5	2,7—3,2	1,9—2,9	1,3—1,7	0,8—1,5	0,2—0,6	0,1	0,02	0,05	—	—	Отжиг
ВЧ 40	3,3—3,8	3,0—3,5	2,7—3,2	1,9—2,9	1,2—1,7	0,5—1,5	0,2—0,6	0,1	0,02	0,1	—	—	»
ВЧ 45	3,3—3,8	3,0—3,5	2,7—3,2	1,9—2,9	1,3—1,7	0,5—1,5	0,3—0,7	0,1	0,02	0,1	—	—	Без обработки
ВЧ 50	3,2—3,7	3,0—3,3	2,7—3,2	1,9—2,9	2,2—2,6	0,8—1,5	0,3—0,7	0,1	0,02	0,15	—	—	» »
ВЧ 60	3,2—3,6	3,0—3,3	—	2,4—2,6	2,4—2,8	—	0,4—0,7	0,1	0,02	0,15	0,3	0,4	Нормализация
ВЧ 70	3,2—3,6	3,0—3,3	—	2,6—2,9	2,6—2,9	—	0,4—0,7	0,1	0,015	0,15	0,4	0,6	»
ВЧ 80	3,2—3,6	—	—	2,6—2,9	—	—	0,4—0,7	0,1	0,01	0,15	0,6	0,6	Двойная нормализация
ВЧ 100	3,2—3,6	—	—	3,0—3,8	—	—	0,4—0,7	0,1	0,01	0,15	0,6	0,8	Закалка и отпуск

Некоторые примеси оказывают вредное влияние на процесс модифицирования, а следовательно, и на свойства ВЧШГ. Поэтому их содержание должно быть ограничено (0,009 % Pb; 0,13 % Sn; 0,026 % Sb; 0,04 % Ti; 0,08 % As; 0,3 % Al).

Получение ШГ в чугуне возможно при обработке расплава сферодизирующими металлами (Mg, Ca, Ce и др.) и их смесями с другими металлами или неметаллами. Чаще всего применяют магниевые лигатуры на основе Ni, Cu, Si или Ca. Чтобы подавить демодифицирующие влияния примесей, всегда имеющихся в чугуне, в лигатуры к магнию дополнительно вводят один или несколько РЗМ.

Способы получения чугуна с вермикулярным графитом принципиально не отличаются от способов получения ВЧШГ, за исключением меньшего количества глобуляризирующих элементов, вводимых в расплав при модифицировании.

Механические свойства чугуна с вермикулярным графитом ближе к свойствам чугуна с шаровидным графитом, а литейные свойства — к чугуну с пластинчатым графитом. ВЧВГ обладает меньшей чувствительностью к изменению толщины стенки отливки, чем чугун с пластинчатым и шаровидным графитом [4, 19], и вследствие этого может более успешно использоваться в качестве конструкционного материала для крупногабаритных массивных деталей.

Изменение механических свойств ВЧШГ и ВЧВГ при повышенных температурах приведено в табл. 21. Прочность до 400—450 °С изменяется незначительно, причем она сначала несколько снижается при 150—200 °С, как у многих железоуглеродистых сплавов, а затем снова возрастает при 350—400 °С.

Модуль упругости у всех типов чугуна монотонно снижается с повышением температуры.

По герметичности высокопрочный чугун значительно превосходит серый вследствие отсутствия графитовой пористости и пригоден для деталей, работающих под давлением до 40 МПа.

Хорошая износостойкость обусловливает частое использование его для деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания и трения при высоких давлениях и затрудненной смазке. Наиболее благоприятной в этом случае металлической основой нелегированного ВЧШГ является перлитная, характеризующаяся меньшим коэффициентом трения f. У перлитного чугуна (НВ 270) $f = 0{,}63$ при давлении $p = 1{,}4$ МПа, $f = 0{,}52$ при $p = 2{,}5$ МПа, а при перлитно-ферритной основе (НВ 207) f соответственно 0,7 и 0,62.

Сила резания ВЧШГ на 50—60 % выше, чем у СЧ той же твердости, но при эквивалентных значениях $\sigma_в$ обрабатываемость ВЧШГ лучше, чем СЧ. Параметры шероховатости обработанной поверхности у ВЧШГ ниже, вследствие обособленности выделений графита в нем.

Ковкий чугун. Отливки из черносердечного ковкого чугуна получают путем графитизирующего отжига отливок из белого чугуна. Они характеризуются повышенными $\sigma_в$ и δ вследствие образования при отжиге хлопьевидного графита, более компактного, чем в СЧ с пластинчатым графитом (табл. 22). Металлическая основа у КЧ, как и у других чугунов, может быть ферритной или перлитной в зависимости от его химического состава (табл. 23) и применяемого режима термической обработки.

Основные преимущества отливок из КЧ заключаются в однородности их свойств по сечению, практическом отсутствии напряжений. КЧ применяется преимущественно для отливок с толщиной стенок 3—50 мм, что связано со стремлением обеспечить безусловное получение структуры БЧ при литье и однородность строения и свойств во всех сечениях отливки. Наибольшую прочность можно получить при высокодисперсном перлите и малом количестве и наибольшей компактности графита, а наибольшую пластичность — при феррите и таком же графите (табл. 24).

Влияние температуры на химические свойства КЧ проявляется главным образом выше 400 °С (см. табл. 21) и выражается в понижении $\sigma_в$ и $\sigma_{0,2}$ и повышении δ. Ферритный КЧ характеризуется более низким порогом хрупкости, чем перлитный КЧ (обычно при —80 °С); с возрастанием твердости перлитного КЧ порог хрупкости повышается.

Если отливки из КЧ не имеют литейных дефектов, они могут быть герметичны при давлениях 20 МПа и выше.

Перлитный КЧ обладает высокой износостойкостью в условиях работы со смазкой при давлении до 20 МПа и быстро изнашивается при трении без смазочного материала. Перлитно-ферритный КЧ имеет сравнительно низкие антифрикционные свойства в условиях работы со смазкой и весьма хорошие при работе без смазочного материала.

Обрабатываемость КЧ примерно такая же, как и высокопрочного чугуна.

Объемная и линейная усадка велики у белого чугуна как при кристаллизации, так и в твердом доперлитном состоянии при сравнительно небольшом предусадочном расширении. Вследствие этого в сложных отливках легко образуются горячие и холодные трещины. Поэтому сложные отливки практически невозможно получать в металлических формах, оказывающих существенное сопротивление усадке. Для

21. Изменение механических свойств чугуна при повышенных температурах [4, 6, 9]

Чугун	Механические свойства	Температура испытаний, °С							
		20	200	350	400	450	500	550	600
ВЧШГ ферритный	$\sigma_в$, МПа	432	—	—	351 *1	—	223	—	130
	δ, %	15,8	—	—	14,6 *1	—	15,2	—	21,9
перлитный	$\sigma_в$, МПа	585	—	—	567 *1	—	362,5	—	—
	δ, %	1,2	—	—	7,2 *1	—	11,1	—	—
	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	17,74	17,05	16,27	15,97	—	15,29	—	14,50
ЧВГ *2	$\sigma_в$, МПа	416	—	416	402	382	335	286	216
	δ, %	3,5	—	3,0	2,0	2,8	4,2	8,0	12,0
ферритный	$\sigma_в$, МПа	387	—	382	372	363	314	269	206
	δ, %	5	—	4,0	3,0	4,5	6,0	10,0	14,0
	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	15,19	14,62	13,76	13,42	—	13,03	—	11,44
перлитный	$\sigma_в$, МПа	480	—	493	470	420	392	309	237
	δ, %	2,6	—	2,0	1,8	1,2	1,5	3,2	7,0
	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	16,46	15,87	15,09	14,89	—	14,11	—	13,42
КЧ 35—10	$\sigma_в$, МПа	333	315	341	312	261	223	169	107,6
	δ, %	12,0	7,7	9,4	9,6	12,2	15,7	23,4	34,6
	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	16,6	14,4	12,6	11,7	11,1	10,2	—	—
СЧ30	$\sigma_в$, МПа	319,7	307	315	323	304,4	276,7	246	212
	δ, %	0,13	0,31	0,64	0,83	1,0	1,18	1,28	1,6
	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	13,9	13,4	12,6	12,2	—	11,8	—	11,6

*1 Температура испытания 425 °С.
*2 ЧВГ в литом состоянии, ферритный после отжига, перлитный после нормализации.

уменьшения склонности чугуна к образованию трещин следует понижать до минимума содержание P, S, снижать содержание N и O в чугуне, использовать оптимальные температуры заливки и т. д.

В сравнении с КЧ высокопрочный чугун обладает лучшими литейными и более высокими механическими свойствами, возможностью во многих случаях обходиться без термической обработки, а также возможностью применения для деталей любых массы и размеров. Поэтому отливки из КЧ в последние годы заметно вытесняются отливками из высокопрочного чугуна, особенно там, где это оказывается экономически целесообразно.

Антифрикционный чугун. Антифрикционные свойства, являющиеся комплексными (учитывают износостойкость, прирабатываемость, износ сопряженной детали и пр.), для ряда чугунов весьма высокие и в некоторых условиях могут быть лучше, чем у бронз. Марки антифрикционного чугуна, предусмотренные ГОСТ 1585—85, и условия их применения приведены в табл. 25. В качестве антифрикционного может быть использована (в зависимости от условий эксплуатации)

22. Механические свойства КЧ по ГОСТ 1215—79

Чугун	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ·10^{-1}, МПа
	не менее		
КЧ 30—6	294	6	100—163
КЧ 33—8	323	8	100—163
КЧ 35—10	333	10	100—163
КЧ 37—12	362	12	110—163
КЧ 45—7	441	7 *1	150—207
КЧ 50—5	490	5 *1	170—230
КЧ 55—4	539	4 *1	192—241
КЧ 60—3	588	3	200—269
КЧ 65—3	637	3	212—269
КЧ 70—2	686	2	241—285
КЧ 80—1,5	784	1,5	270—320

*1 По согласованию изготовителя с потребителем допускается понижение на 1 %.

23. Рекомендуемый состав ковкого чугуна [9, 20]

Чугун	Способ выплавки	Химический состав, %						
		C	Si	Мас. доля C и Si	Mn	P	S	Cr
Ферритного класса								
КЧ 30—6 КЧ 33—8	Вагранка	2,6—2,9	1,0—1,6	3,7—4,2	0,4—0,6	0,18	0,20	0,08
КЧ 35—10	Вагранка — электропечь	2,5—2,8	1,1—1,3	3,6—4,0	0,3—0,6	0,12	0,20	0,06
КЧ 37—12	Электропечь — электропечь	2,4—2,7	1,2—1,4	3,6—4,0	0,2—0,4	0,12	0,06	0,06
Перлитного класса								
КЧ 45—7 КЧ 50—5 КЧ 55—4 КЧ 60—3	Вагранка — электропечь	2,5—2,8	1,1—1,3	3,6—3,9	0,3—1,0	0,10	0,20	0,08
КЧ 65—3 КЧ 70—2 КЧ 80—1,5	Электропечь — электропечь	2,4—2,7	1,2—1,4	3,6—3,9	0,3—1,0	0,10	0,06	0,08

24. Механические свойства КЧ, не предусмотренные ГОСТ 1215—79 [9, 20]

Чугун	При растяжении			При сжатии			При кручении	
	$E \cdot 10^{-2}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{-1}, МП	σ_c, М I	μ	ψ, %	$\tau_в$, МПа	τ_{-1}, МПа
КЧ 30—6	155	190	70	90—120	0,23	10—18	340	110
КЧ 33—8	160	210	80	90—120	0,25	10—18	345	120
КЧ 35—10	166	220	80	90—120	0,27	10—18	350	130
КЧ 37—12	170	230	85	90—120	0,29	10—18	370	130
Перлитный	176—185	300—500	110—140	140—180	0,28—0,29	3,5—6,0	460—720	180—210

Чугун	При срезе		φ, %, при вибрации с нагрузкой, равной $1/3\sigma_{0,2}$	$a_н$, кДж/м²	При изгибе	
	$\tau_{в_{ср}}$, МПа	$G \cdot 10^{-2}$, МПа			σ_{-1}, МПа	$\sigma_и$, МПа
КЧ 30—6	270	63	13—15	120	120	310
КЧ 33—8	290	64	13—15	130	130	330
КЧ 35—10	300	65	13—15	140	140	340
КЧ 37—12	300	70	13—15	160	140	350
Перлитный	360—500	68—75	10—13	50—160	180—220	900—1200

25. Структура и условия применения антифрикционного чугуна по ГОСТ 1585—85

Чугун	НВ·10^{-1}, МПа	Микроструктура		Предельные режимы работы			Термическая обработка вала
		Графит	Металлическая основа	p, МПа	v, м/с	pv, МПа·м/с	
АЧС-1	180—241	Пластинчатый	Перлитная	5,0 14,0	5 0,3	12,0 2,5	Закалка, нормализация
АЧС-2	180—229	То же	»	10,0 0,1	0,3 3,0	2,5 0,3	
АЧС-3	160—190	»	Перлитно-ферритная	6,0	1,0	5,0	Без обработки
АЧС-4	180—229	»	Перлитная	15,0	5,0	40	Закалка, нормализация
АЧС-5	180—290 (литой); 140—180 (закаленный)	»	Аустенитная	20,0 30,0	1,0 0,4	20,0 12,5	
АЧС-6	100—120	»	Перлитная пористая	9,0	4,0	9,0	Без обработки
АЧВ-1	200—260	Шаровидный	Перлитная	1,5 20,0	10 1,0	12,0 20,0	Закалка, нормализация
АЧВ-2	167—197	То же	Перлитно-ферритная	1,0 12,0	5,0 1,0	3,0 12,0	Без обработки
АЧК-1	187—229	Хлопьевидный	Перлитная	20,0	2,0	20,0	Закалка, нормализация
АЧК-2	167—197	То же	Ферритно-перлитная	0,5 12,0	5,0 1,0	2,5 12,0	Без обработки

Примечание. Для некоторых марок чугуна два предельных значения для p и соответственно для v указывают допустимые сочетания значений каждого из этих показателей.

каждая из трех разновидностей чугуна: серый с пластинчатым графитом, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкий. Однако в данном случае ГОСТ регламентирует не механические свойства, а химический состав по легирующим элементам и микроструктуру: форму, размеры и распределение графитовых включений, тип структурных составляющих металлической основы, их количество и дисперсность.

4. ЛЕГИРОВАННЫЙ ЧУГУН СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

По химическому составу различают несколько групп легированных чугунов: хромистые, кремнистые, алюминиевые, марганцевые и никелевые (ГОСТ 7769—82), а по условиям эксплуатации: жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, коррозионно-стойкие и немагнитные. При этом часто один и тот же легирующий элемент придает чугуну одновременно несколько специальных свойств. Жаростойкость, коррозионная стойкость и магнитные свойства легированных чугунов приведены в разделе физические и химические свойства чугуна (см. табл. 10, 13, 14; рис. 1, 2).

Механические свойства легированного чугуна приведены в табл. 26—29.

Хромистые чугуны применяются главным образом как жаростойкие, коррозионно-стойкие и износостойкие материалы. Износостойкость чугуна определяется структурой и твердостью. Большая часть высокохромистых чугунов успешно работают в условиях ударного абразивного изнашивания и истирания. Износостойкие чугуны при НВ 4000 МПа и более могут обрабатываться резцами с пластинами ВК4, ВК6М.

С увеличением содержания Cr увеличивается склонность чугуна к образованию усадочных раковин и холодных трещин. Вследствие этого при высоком содержании Cr необходимо предусматривать установку прибылей для питания отливок и обеспечивать равномерное охлаждение отливок в форме и при термической обработке.

Кремнистые чугуны применяют главным образом как окалино-, рости коррозионно-стойкие материалы. Механические свойства кремнистых чугунов относительно низкие как при нормальной, так и повышенных температурах (см. табл. 26, 27) и понижаются с увеличением содержания Si. Ударная вязкость не превышает 50 кДж/м² (для образцов без надреза). С целью повышения механических свойств кремнистые чугуны иногда легируют Cu. Добавка 8—10 % Cu в чугун ЧС15 повышает его $\sigma_в$ до 200 МПа и $a_н$ до 100 кДж/м², однако коррозионная стойкость при этом понижается.

Литейные свойства низкокремнистых чугунов мало отличаются от свойств СЧ или соответственно ВЧШГ.

Высококремнистые чугуны (>12,0 % Si) имеют повышенную усадку и склонны к образованию усадочных раковин. Для предупреждения образования горячих и холодных трещин в отливках из этих чугунов их удаляют из формы сразу после затвердевания и охлаждают в печи, нагретой до 760—800 °С, или обеспечивают медленное охлаждение в форме. Отливки хрупки и требуют осторожного обращения при механической обработке, транспортировке и монтаже.

Алюминиевые чугуны применяют главным образом как жаростойкие и износостойкие материалы. Увеличение содержания Al до 12 % приводит к непрерывному снижению прочности, которая в дальнейшем стабилизируется. Максимальную твердость имеют чугуны, содержащие 10—17 % Al и св. 26 % Al.

Из всех известных составов алюминиевого чугуна наиболее технологичным является чугун, содержащий 19—25 % Al (ЧЮ22), причем чугун с шаровидным графитом обладает повышенной прочностью и жаропрочностью (см. табл. 27, 28). Чугун с высоким содержанием Al обладает повышенной склонностью к образованию усадочных раковин.

Марганцевые чугуны применяют главным образом как немагнитные и износостойкие материалы. В марганцевых антифрикционных чугунах, как и в высоконикелевых, медленное охлаждение и отпуск способствует выпадению большего количества карбидов и снижению степени легированности аустенита. В структуре антифрикционных марганцевых чугунов содержится 45—55 % аустенита и 10—30 % карбидов в литом состоянии и 80—90 % аустенита и 5—8 % карбидов после закалки. Именно поэтому твердость чугуна в незакаленном состоянии бывает выше, чем в закаленном (1800—2900 и 1400—1800 МПа соответственно).

Обрабатываемость марганцевых чугунов затруднена из-за наличия в структуре карбидов. Эти чугуны имеют повышенную склонность к образованию усадочных дефектов (раковины, трещины и т. п.).

26. Механические свойства легированного чугуна по ГОСТ 7769—82

Чугун	Механические свойства			Чугун	Механические свойства		
	$\sigma_в$, МПа	f^{*2}_{300}, мм	НВ, МПа		$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа
Хромистые чугуны				**Алюминиевые чугуны**			
ЧХ1	170	2,5	2030—2080	ЧЮХШ *1	390	—	1830—3560
ЧХ2	150	2,5	2030—2080	ЧЮ6С5 *1	120	—	2360—2940
ЧХ3	150	3,0	2230—3560	ЧЮ7Х2 *1	120	—	2540—2940
ЧХ3Т *1	200	—	4400—5860	ЧЮ22Ш	290	—	2350—3560
ЧХ9Н5 *1	350	—	4900—6070	ЧЮ30	200	—	3560—5360
ЧХ16	350	3,0	3900—4400	**Марганцевые чугуны**			
ЧХ16М2 *1	170	—	4900—6070	ЧГ6С3Ш *1	490	—	2150—2540
ЧХ22 *	290	3,0	3330—6070	ЧГ7Х4 *1	150	—	4900—5860
4Х22С	290	—	2150—3330	ЧГ8Д3	150	—	1760—2850
4Х28	370	6,0	2150—2640	**Никелевые чугуны**			
4Х28П	200	1,5	2450—3900	ЧНХТ	280	—	1960—2800
4Х28Д2 *1	390	—	3900—6350	ЧНХМД	290	—	1960—2800
ЧХ32	390	—	2450—3330	ЧНМШ	490	2	1830—2800
Кремнистые чугуны				ЧН2Х	290	—	2150—2800
ЧС5	150	—	1400—2940	ЧН4Х2 *1	200	1,5 *2	4600—6450
ЧС5Ш	290	—	2230—2940	ЧН11Г7Ш	390	4	1200—2500
ЧС13	100	—	2940—3900	ЧН15Д3Ш	340	4	1200—2500
ЧС15	60	—	2940—3940	ЧН15Д7	150	—	1200—2500
ЧС17	40	—	3900—4500	ЧН19Х3Ш	340	4	1200—2500
ЧС15М4	60	—	3900—4500	ЧН20Д2Ш	500	25	1200—2200
ЧС15М3	60	—	3900—4500				

*1 Износостойкий чугун.
*2 Стрела прогиба на базе 300 мм.

27. Прочность легированных чугунов при различных температурах

Чугун	$\sigma_в$, МПа, при температуре, °С				
	500	600	700	800	900
ЧХ1	196	147	68	29	—
ЧХ3	167	147	78	29	—
ЧС5	118	98	49	19	—
ЧЮХШ	343	235	130	78	—
ЧЮ6С5	118	98	49	19	—
ЧЮ22Ш	245	275	168	137	78
ЧН19Х3Ш	—	250	221	—	—
ЧН11Г7Ш	—	300	227	—	—

28. Механические свойства легированного чугуна с шаровидным графитом при 600 °С

Чугун	Кратковременные испытания			Длительная прочность		Скорость ползучести, %/ч, при σ = 40 МПа
	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$a_н$, кДж/м²	σ, МПа	Время до разрушения, ч	
	не менее					
ЧН19ЗШ	180	2,0	200	120	1000	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$
ЧН11Г7Ш	180	10,0	200	120	1000	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$
ЧЮ22Ш	—	0,5	50	100	100	$4{,}0 \cdot 10^{-3}$ (700 °С)

29. Изменение модуля упругости с повышением температуры некоторых легированных чугунов [20]

Чугун	$E \cdot 10^{-3}$, МПа, при температуре, °С						
	20	250	450	550	600	700	800
ЧЮ22(П)	97	93	79	—	73	69	—
ЧЮ22Ш	178	169	140	—	128	124	88
ЧН19Х3Ш	163,5	—	—	140	—	127	124
ЧН11Г7Ш	162,9	—	—	134,6	—	123,6	120

Примечание. (П) — чугун с пластинчатым графитом.

Никелевые чугуны применяют как немагнитные, коррозионно-стойкие, жаропрочные и хладостойкие материалы. Прочность и твердость никелевых чугунов возрастает с увеличением содержания Ni, Cr. При получении ШГ механические свойства, особенно пластичность чугуна, заметно возрастают (см. табл. 26). Аустенитный чугун с ШГ обладает высокой жаропрочностью (см. табл. 27, 28). Дополнительное легирование Mo повышает жаропрочность. С целью повышения сопротивления ползучести аустенитные чугуны обычно подвергают гомогенизирующему отжигу при 1020—1050 °С в течение 4 ч с последующим охлаждением на воздухе, а затем низкотемпературному отпуску. Двойная ТО необходима только для высоконикелевого ЧШГ, применяемого в качестве жаропрочного материала. Для других целей используют только низкотемпературный отжиг.

Чугун ЧН20Д2Г является жаропрочным и хладостойким материалом.

5. ЛАТУНИ

Латуни представляют собой двойные или многокомпонентные медные сплавы, в которых цинк является основным легирующим компонентом. По сравнению с медью они обладают более высокой прочностью (в том числе при повышенных температурах), коррозионной стойкостью, упругостью, технологичностью (литье, обработка давлением, резание), трибологическими характеристиками. Это наиболее дешевые и распространенные в машиностроении медные сплавы.

Двойные латуни, содержащие до 20 % Zn, называются томпаком (латуни, содержащие 14—20 % Zn — полутомпаком).

Диаграмма состояния Cu—Zn характеризуется пятью перитектическими реакциями. В результате из жидкого раствора кристаллизуется шесть различных фаз. Практическое значение имеют сплавы, содержащие до 50 % Zn; соответствующая этому содержанию

часть диаграммы состояния включает область α-твердого раствора цинка в меди. Граница растворимости цинка в меди при комнатной температуре равна 39 %; α-твердый раствор имеет гранецентрированную кристаллическую решетку. Фаза β является твердым раствором на основе соединения CuZn с объемно центрированной кристаллической решеткой. Ширина области гомогенности β-фазы меняется в зависимости от температуры: от 37 до 57 % Zn при высоких температурах и от 45 до 49 % Zn при комнатной [7].

В соответствии с диаграммой состояния двойные латуни в зависимости от структуры подразделяются на α-латуни, (α + β)-латуни и β-латуни.

При температуре 454—468 °С происходит упорядочение β-твердого раствора, т. е. ниже этих температур наблюдается определенный порядок в расположении атомов меди и цинка в кристаллической решетке β-фазы. Переход неупорядоченного твердого раствора в упорядоченное состояние сопровождается резким падением пластичности и повышением хрупкости сплавов, что затрудняет их обработку давлением в холодном состоянии.

Таким образом, латуни, содержащие более 39 % Zn, имеют двухфазную структуру α + β или однофазную β и обладают низкой пластичностью, поэтому они хорошо обрабатываются давлением лишь в горячем состоянии, в отличие от α-латуни, которая хорошо обрабатывается в холодном состоянии.

В многокомпонентных (специальных) латунях добавки третьего, четвертого элемента и более могут повышать прочность, твердость, упругость, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства и технологические характеристики. В зависимости от дополнительных легирующих элементов латунь, содержащую Al, называют алюминиевой; Fe и Mn — железомарганцевой; Mn, Sn, Pl — марганцево-оловянно-свинцовой и т. д.

Двойные латуни маркируют буквой Л и числом, характеризующим среднее содержание меди в сплаве в %. В обозначении многокомпонентных латуней после буквы Л указывают легирующие элементы. Числа после букв означают содержание легирующих элементов.

По технологическому признаку латуни подразделяют на литейные и обрабатываемые давлением. Для изготовления литейных латуней могут применяться вторичные литейные латуни.

Двойные латуни, обрабатываемые давлением. Физические и механические свойства этих латуней (ГОСТ 15527—70) приведены соответственно в табл. 30 и 31.

30. Физические свойства двойных латуней, обрабатываемых давлением (твердых) [11, 18]

Латунь	Температура начала плавления, °С	ρ, т/м³	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$		λ, Вт/(м·°С)	c, Дж/(кг·°С)	$\sigma_э \cdot 10^{-6}$, См·м	$T_{Кр}$, 1/°С	E, МПа
			20 °С	20—300°С					
Л96	1055	8,85	17	18	244,92	389,37	0,043	0,00231	111 700
Л90	1025	8,78	17,1	18,4	180,03	397,75	0,045	0,00186	108 900
Л85	990	8,75	18,7	18,7	152,40	397,75	0,047	0,0016	102 900
Л80	965	8,66	18,8	19,1	142,35	399,37	0,054	0,0015	109 800
Л70	915	8,61	18,9	19,9	121,42	376,81	0,069	0,00148	112 700
Л68	909	8,6	19	20	113,04	376,81	0,072	0,0015	112 700
Л63	900	8,44	20,5	20,6	108,86	376,81	0,074	0,0017	113 700
Л60	895	8,4	20,7	21	104,67	376,81	0,075	0,0025	115 600
Л75	980 (Ликвидус)	8,63	—	19,6	—	—	0,057	—	102 900
Л66	905	8,47	—	20,1	119,74	376,81	0,069	—	102 900

31. Механические свойства и температура обработки двойных латуней, обрабатываемых давлением [13, 18, 24]

Латунь	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{ур}$, МПа	$\sigma_т$, МПа	σ_{-1}, МПа	ψ, %	$a_н$, кДж/м²	НВ, МПа	Обрабатываемость резанием (по сравнению с латунью ЛС63—3), %	Температура, °С: прокатки и прессования	Температура, °С: отжига	Температура, °С: низкотемпературного отжига	Температура, °С: начала рекристаллизации	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки
Л96:															
мягкая	216—255	45—55	159	62	—	82	215	490—590	20	750—850	450—600	—	300	—	—
твердая	392—470	1—3	343	380	—	—	—	1270—1420	—	—	—	—	—	—	—
Л90:															
мягкая	235—275	44—52	69	125	При $50 \cdot 10^6$ циклов 83	80	176	490—590	—	750—900	650—720	200	335—370	0,074	0,44
твердая	430—590	2—4	363	295	123	полутвердая 60	—	1270—1420	20	—	—	—	—	—	—
Л85:															
мягкая	235—295	43—55	55	98	При $100 \cdot 10^6$ циклов 104	80	—	490—610	30	—	—	200	350	—	—
твердая	510—570	2—5	412	495	При $300 \cdot 10^6$ циклов 137	80	—	1180—1420	30	—	—	—	—	—	—
Л80:															
мягкая	290—340	45—55	78	120	При $90 \cdot 10^6$ циклов 103	69,5	157	520—640	30	820—870	650—720	260	320—360	0,015	0,71
твердая	550—670	2—10	412	355	При $50 \cdot 10^6$ циклов 151	40	—	1370—1470	30	—	—	—	—	—	—
Л70:															
мягкая	290—340	50—60	98	130	При $50 \cdot 10^6$ циклов 155	77	167	540—640	—	—	—	200	320—360	—	—
твердая	615—690	3—6	490—590	440	151	57	—	1420—1520	—	—	—	200	320—360	—	—
Л68:															
мягкая	290—340	50—60	39	98	При $100 \cdot 10^6$ циклов 117	70	167	540—640	30	750—830	520—650	260—270	300—370	—	—
твердая	510—725	3—12	340—390	412	147	52	—	1420—1520	—	—	—	—	—	—	—
Л63:															
мягкая	350—440	40—50	78	108	При $10 \cdot 10^6$ циклов 118	66	137	1370—1560	40	650—850	600—700	300	350—370	0,012	0,39
твердая	665—735	2—4	412	470	При $300 \cdot 10^6$ циклов 151	60	—	1370—1560	—	—	—	—	—	—	—
Л60:															
мягкая	360—410	40—50	78	147	При $400 \cdot 10^6$ циклов 151	62	78	390—490	45	730—820	600—770	—	350—370	0,012	0,45
твердая	635—735	2—4	390	570	При $500 \cdot 10^6$ циклов 178	40	—	1520—1620	—	—	—	—	—	—	—

32. Физические свойства многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением [10, 17, 18]

Латунь	Температура плавления, °С	ρ, т/м³	α·10⁶, °С⁻¹		λ, Вт/(м·°С)	c, Дж/(кг·°С)	ρ₁·10⁸, Ом·м	E, МПа
			20 °С	20—300 °С				
ЛА85—0,5	1020	8,6	18,6	—	108,8	376,8	—	—
ЛА77—2	930	8,6	18,3	18,5	113	—	0,075	99 960
ЛАЖ60—1—1	904	8,2	21,6	—	75,3	—	0,09	102 900
ЛАН59—3—2	892	8,4	19	—	83,7	—	0,0785	105 840
ЛЖМц59—1—1	885	8,5	22	—	100,4	—	0,093	103 880
ЛН65—5	960	8,6	18,2	—	58,6	—	0,14	109 760
ЛМц58—2	865	8,4	21,2	—	71,2	372,6	0,108	102 900
ЛМцА57—3—1	870	8,1	20,1	—	67	—	0,121	101 920
ЛО90—1	995	8,75	18,4	18,4	125,6	—	0,054	102 900
ЛО70—1	890	8,68	19,7	—	117	—	0,072	103 880
ЛО62—1	885	8,5	19,3	—	108,9	—	0,078	102 900
ЛО60—1	885	8,5	21,4	21,4	100,4	376,8	0,078	102 900
ЛС63—3	885	8,5	20,5	—	117	376,8	0,069	96 040
ЛС74—3	965	8,7	17,5	19,8	121,4	—	0,068	102 900
ЛС64—2	910	8,5	20,3	—	117	—	0,070	102 900
ЛС60—1	900	8,5	20,8	20,8	104,7	376,8	0,065	102 900
ЛС59—1	900	8,5	20,6	18,25	104,7	376,8	0,066	102 900
ЛС59—1В	900	8,5	20,6	18,25	104,7	376,8	0,066	102 900
ЛЖС58—1—1	895	8,4	20,4	—	108,9	—	0,07	103 880
ЛК80—3	890	8,2	17,0	17,0	87,9	401,9	0,20	101 920
ЛМш68—0,05	937	8,6	19,1	20	113	—	0,075	98 980
ЛАМш77—2—0,05	985	8,7	19,2	18,5	134	376,8	0,068	99 960
ЛОМш70—1—0,05	949	8,6	19,0	—	117	—	0,71	101 920
ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5:								
закалка	940	8,6	18,3	—	92,1	—	0,137	112 700
старение	—	—	—	—	125,6	—	0,105	—

Полуфабрикаты латуней, обрабатываемых давлением, поставляются в виде горяче- и холоднокатаных, протянутых и прессованных изделий (проволока, полосы, листы, ленты, трубы и др.) в мягком (отожженном), полутвердом (степень обжатия 10—30 %), твердом (30—50 %) и особо твердом (более 60 %) состоянии.

Многокомпонентные латуни, обрабатываемые давлением. Основными легирующими компонентами в многокомпонентных латунях (ГОСТ 15527—70) являются алюминий, железо, кремний, марганец, мышьяк, никель, олово и свинец. Алюминий, никель, олово и кремний повышают прочность, коррозионную стойкость и улучшают антифрикционные характеристики. Железо, измельчая зерно, повышает температуру рекристаллизации и твердость латуни. Марганец повышает ее жаростойкость. Мышьяк предохраняет латуни от обесцинкивания в агрессивных пресных водах. Добавки свинца в латуни улучшают ее обработку резанием.

Физические и механические свойства многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением, приведены в табл. 32, 33. Механические свойства латуней при низких температурах

представлены в табл. 34. Эти латуни упрочняются деформационным наклепом, за исключением латуни ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5. Эта латунь является дисперсионно-твердеющим сплавом, который упрочняется не только при деформационном наклепе, но и в результате закалки и старения. Она обладает высокой пластичностью в закаленном состоянии и высокими прочностными и упругими свойствами после старения. Упрочнение сплавов обеспечивается холодной деформацией после закалки.

Все двойные латуни обладают достаточной прочностью и отлично обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии (за исключением латуни Л60, которая хорошо обрабатывается в горячем состоянии).

Кроме высоких механических и литейных свойств латунь Л96 отличается высокой коррозионной стойкостью и не склонна к обесцинкиванию и коррозионному растрескиванию. Ее применяют для изготовления радиаторных, конденсаторных и капиллярных трубок.

Латуни Л90, Л85, Л80 обладают хорошими механическими и коррозионными свойствами. Они применяются для изготовления змеевиков, сильфонов, деталей теплотехнической и химической аппаратуры.

Латунь Л90 хорошо сваривается со сталью при совместной прокатке, в связи с чем успешно применяется для плакировки и изготовления биметалла. Отличаясь красивым золотистым цветом, латунь Л90 применяется для изготовления фурнитуры и украшений. Из латуни Л85 изготовляют гибкие шланги, детали холодильного оборудования, конденсаторные трубки.

Латунь Л80 идет на изготовление проволочных сеток в целлюлозно-бумажной и шиферной промышленности.

Латунь Л70 в основном применяется для химической аппаратуры. Латунь Л68 применяется для изготовления деталей холодной штамповкой и глубокой вытяжкой. Из латуней Л68 и Л63 изготовляют полосы, листы, ленты, прутки, трубы, проволоку, фольгу и профили различных размеров. Латунь Л63 используется для изготовления крепежных изделий, деталей автомобилей и конденсаторных труб. Латунь Л60 устойчива к общей коррозии и применяется в основном для толстостенных патрубков, шайб, деталей машин.

Алюминиевые латуни обладают повышенными механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Они хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии (за исключением латуни ЛАН59—3—2, которая обрабатывается давлением только в горячем состоянии). Латунь ЛА85—0,5 отличается высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и может обрабатываться волочением. Она служит заменителем золота при изготовлении знаков отличия, фурнитуры и украшений. Латунь ЛА77—2 устойчива к ударной коррозии и применяется в морском судостроении для изготовления конденсаторных труб. Латунь ЛАН59—3—2 применяется в морском судостроении, в электрических машинах и в химическом машиностроении для высокопрочных и химически стойких изделий, работающих при комнатной температуре.

Из латуни ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5 изготовляют цельнотянутые круглые трубы для производства манометрических трубок и пружин в приборах повышенного класса точности. Из латуни ЛЖМц59—1—1, обладающей повышенной коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и в морской воде, а также хорошими антифрикционными свойствами, изготовляют детали для авиации и морского флота и вкладыши для подшипников. Латунь ЛН65—5 обладает повышенными механическими и коррозионными свойствами, обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии. Кроме различных видов проката из нее изготовляют манометрические и конденсаторные трубки в морском судостроении, сетки для бумажной промышленности и другие детали.

Марганцевые латуни кроме хороших механических и технологических свойств (обрабатываются давлением в холодном и в горячем состоянии) обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде, хлоридах и перегретом паре. Латуни ЛМц58—2 и ЛМцА57—3—1 в основном приме-

33. Механические свойства и температуры обработки многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением [17, 18, 24]

Латунь	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{уп}$, МПа	$\sigma_т$, МПа	σ_{-1}, МПа	ψ, %	$a_н$, кДж/м²	НВ, МПа	Обрабатываемость резанием	Температура, °С: прокатки и прессования	Температура, °С: низкотемпературного отжига	Температура, °С: начала рекристаллизации	Температура, °С: отжига	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки
ЛА85—0,5:															
мягкая	295—390	60	—	Литая 73,5	—	50	—	Литая 530	—	800—850	—	400	650—700	—	—
твердая	490—690	3—10	—	—	—	—	—	1470	—	—	—	—	—	—	—
ЛА77—2:															
мягкая	340—440	45—52	7,5	—	—	58	—	440—540	—	720—770	—	400	600—650	—	—
твердая	550—650	7—11	54	—	—	—	—	1470—1570	30	—	300	—	—	—	—
ЛАЖ60—1—1:															
мягкая	390—440	45—55	—	Литая 19,6	—	Литая 30	—	440—785	—	600—800	—	400	600—650	—	—
твердая	690—745	7—10	—	—	—	—	—	1620—1720	25	—	—	—	—	—	—
ЛАН59—3—2:															
мягкая	440—540	40—50	—	Литая	—	Полутвердая 20	Полутвердая 40,2	1080—1180	15	700—750	350	350—400	600—650	0,01	0,32
твердая	635—735	7—11	—	255—345	—			1720—1820	—	—	—	—	—	—	—
ЛЖМц59—1—1:															
мягкая	412—470	45—55	—	165	—	58	118	735—930	25	650—750	—	400	600—650	0,012	0,39
твердая	590—735	5—10	—	Литая 175	При $100 \cdot 10^6$ циклов 125	15	—	1520—1620	—	—	—	—	—	—	—
ЛН65—5:															
мягкая	370—440	45—65	10	137	—	—	—	1570—1670	—	750—870	300—400	400	600—650	0,008	0,20
твердая	655—785	3—6	52	637	—	—	—	540—640	—	—	—	—	—	—	—
ЛМц58—2:															
мягкая	370—440	36—45	Литая 88	Литая 153	При 150 000 циклов 125	52,5	Литая 1180	785—880	—	650—750	—	300—400	600—650	0,012	0,32
твердая	590—735	5—10	—	—	—	—	—	1180—1760	22,1	—	—	—	—	—	—
ЛМцА57—3—1:															
мягкая	390—490	40—50	—	—	—	—	—	830—930	22	650—750	—	350	600—650	—	—
твердая	685—735	4—8	—	—	—	—	—	1710—1810	—	—	—	—	—	—	—
ЛО90—1:															
мягкая	245—304	42—50	—	89	При $60 \cdot 10^6$ циклов 110	55	—	490—590	30	700—900	—	350—370	550—720	0,013	0,45
твердая	470—550	3—6	—	—	При $300 \cdot 10^6$ циклов 206	—	735	1370—1470	—	—	—	—	—	—	—
ЛО70—1:															
мягкая	314—370	55—65	Полутвердая 186	159	—	70	610	470—640	—	650—750	—	300	550—650	0,0082	0,3
твердая	568—735	3—10		—	Литая при $10 \cdot 10^6$ циклов 104	28	—	1370—1520	—	—	—	—	—	—	—
ЛО62—1:															
мягкая	370—420	55—65	105	147	—	56	Полутвердая 550	735—830	30	700—780	—	300—350	550—650	—	—
твердая	668—735	3—5	265	372	Полутвердая при $100 \cdot 10^6$ циклов 142	—	—	1370—1470	40	—	—	—	—	—	—

Латунь	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{уп}$	$\sigma_т$	σ_{-1}	ψ, %
			МПа			
ЛО60—1:						
мягкая	353—390	38—44	137	176	—	4[illegible]
твердая	55[illegible]—610	3—10	353	412	—	
ЛС63—3:						
мягкая	295—390	40—50	78	89	—	
твердая	540—640	3—6	412	440	—	
ЛС74—3:						
мягкая	295—390	40—55	60—120	98	При $50 \cdot 10^6$ циклов 118	
твердая	590—685	2—5	390—440	510—610	167	
ЛС64—2:						
мягкая	310—375	55—65	59—98	78—120	—	
твердая	570—660	4—6	390—460	440—490	—	—
ЛС60—1:						
мягкая	340—390	45—55	103	120	—	—
твердая	570—640	3—6	412	550	—	—
ЛС59—1:						
мягкая	290—412	36—50	98	140	—	6[illegible]
твердая	590—690	4—6	412	412	При $50 \cdot 10^6$ циклов 159	5[illegible]
ЛЖС58—1—1:						
мягкая	340—440	35—45	—	—	—	
твердая	640—735	2—5	—	—	—	
ЛК80—3:						
мягкая	275—335	53—60	—	Литая 105	—	[illegible]
твердая	570—640	3—5	—	—	—	—
ЛМш68—0,05:						
мягкая	310—375	50—60	39	98	При $100 \cdot 10^6$ циклов 120	70
твердая	660—735	3—5	—	412	147	52
ЛАМш77—2—0,05:						
мягкая	245—340	40—55	74	—	—	58
твердая	490—590	3—5	470—530	—	—	—
ЛОМш70—1—0,05:						
мягкая	310—375	50—60	Полутвердая 190	160	Литая при $10 \cdot 10^6$ циклов 104	70
твердая	670—690	2—4	—	—	—	28
ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5:						
закалка	530	48,4	—	220	—	61,4
старение	690	25,5	—	456	—	41,4
деформация 50 %	865	8	—	835	—	38,5
деформация 50 % + старение	1010	3,5	—	990	—	10,9

Примечание. Режим термической обработки латуни ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5: температура закалки 780 °С (выдержка 30 мин); старение закаленных образцов при 500 °С; старение закаленных и деформированных на 10% образцов при 450 °С; старение закаленных и деформированных на 50 % образцов при 350 °С.

Продолжение табл. 33

$a_н$, кДж/м²	НВ, МПа	Обрабатываемость резанием	Температура, °С: прокатки и прессования	Температура, °С: низкотемпературного отжига	Температура, °С: начала рекристаллизации	Температура, °С: отжига	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки
Литая 760	705—805	—	700—800	—	350—400	550—650	—	—
—	1420—1520	40	—	—	—	—	—	—
—	390—490	100	760—820	—	300—370	600—650	—	—
—	1270—1370	—	—	—	—	—	—	—
—	390—490	80	—	—	400	600—650	—	—
—	1270—1370	—	—	—	—	—	—	—
—	490—590	90	—	—	300—350	620—670	0,1	0,22
—	1370—1470	—	—	—	—	—	—	—
—	590—680	—	780—820	—	350—400	600—650	0,1	0,22
—	1470—1570	75	—	—	—	—	—	—
490	680—785	—	640—820	285	360	600—650	0,0135	0,17
590	1470—1570	60	—	—	—	—	—	—
—	735—835	70	—	—	—	600—650	—	—
—	1570—1670	—	—	—	—	—	—	—
Литая 390	930—1030	30	750—850	—	350	500—600	0,084	0,22
—	1670—1860	—	—	—	—	—	—	—
1670	490—590	30	700—850	260—270	300—370	550—650	—	—
—	1420—1520	—	—	—	—	—	—	—
—	590—680	25	720—770	300	350	600—700	—	—
—	1570—1670	—	—	—	—	—	—	—
610	490—590	30	700—850	—	300—350	550—650	0,0082	0,3
—	1370—1470	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	20	800—850	—	—	—	—	—
—	2840—2940	—	—	—	—	—	—	—

34. Изменение механических свойств латуней при низких температурах [17, 18]

Латунь	Температура испытания, °С	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	
		МПа		%	
Л70 деформированная и отожженная	20	351	194	49	77
	—10	365	197	49	77
	—40	375	185	58	77
	—80	392	188	60	79
	—120	420	192	55	78
	—180	505	185	75	73
Л72 деформированная и отожженная	18	285	65,7	82,6	76,4
	0	294	67,6	79,7	78,7
	—30	297	71,5	75,9	79,7
	—80	334	78,4	74,5	80,0
Л68:					
отожженная при 550 °С, 2 ч	20	392	270	50,4	72
	—78	420	300	49,8	76,0
	—183	524	392	50,8	70,5
деформированная на 40 %	20	589	580	6,3	66,5
	—78	635	630	7,8	71,5
	—183	706	698	10,1	66,5
Л59:					
деформированная на 25 %	20	547	391	19,8	65,5
	—78	569	412	21,0	67,7
	—183	675	550	24,4	64,1
отожженная при 550 °С, 2 ч	20	376	137	51,3	75,5
	—78	420	155	53,0	74,6
	—183	520	196	55,3	71,0
ЛС59—1:					
отожженная при 550 °С, 2 ч	20	362	141	50,2	62,5
	—78	374	169	49,8	64,0
	—183	475	198	50,6	62
холоднокатаная, 12 %	22	437	314	28,2	57
	—78	483	371	27,0	59
	—183	594	480	30,8	57
полосы	17	431	—	37	—
	—40	441	176	39	35
	—196	578	—	34	38
	—253	666	—	35	35
ЛМц58—2 горячекатаная отожженная	20	412	176	41	—
	0	431	147	38	—
	—40	431	186	39	—

няют в судостроительной промышленности, а также для изготовления крепежных изделий и арматуры.

Оловянные латуни (кроме латуни ЛО62—1) хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии, обладают высокой коррозионной стойкостью в пресной и морской воде. Из латуней ЛО90—1, ЛО70—1, ЛО62—1, ЛО60—1, ЛОМш70—1—0,05 изготовляют конденсаторные трубки, теплотехническую аппаратуру и детали для морского судостроения.

Свинцовые латуни отлично обрабатываются резанием и обладают высокими антифрикционными свойствами. Латуни ЛС74—3, ЛС63—3, ЛС64—2 применяют в часовой и автотракторной промышленности, латунь ЛС64—2 используют также в типографском деле. Латуни ЛС60—1, ЛС59—1, ЛС59—1В применяют для изготовления крепежных изделий, зубчатых колес, втулок.

Кремнистые латуни обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии (ЛК80—3) и применяются для коррозионно-стойких деталей машин.

Полуфабрикаты из латуней, обрабатываемых давлением, поставляются в виде круглого и плоского проката. Характеристики полуфабрикатов приведены в табл. 35 и 36.

Коррозионная стойкость латуни Л90 (снижение массы) под действием морской воды, влажного пара при 100 °С, морского тумана соответственно равна 0,50; 0,48; 0,24 г/(м²·сутки).

Предел выносливости латуни Л80 в холоднотянутом, отожженном состоянии равен соответственно 154 МПа при $100 \cdot 10^6$ циклов; 117 МПа при $90 \cdot 10^6$ циклов, а при испытаниях в растворах хлористого натрия и углекислых щелочей 96 МПа при 80×10^6 циклов и 103 МПа при $60 \cdot 10^6$ циклов соответственно.

Предел выносливости латуни Л70 после деформации и отжига при 220 и 230 °С, 3 ч равен соответственно 92 МПа при $30 \cdot 10^6$ циклов и 96 МПа при $80 \cdot 10^6$ циклов, а в соленой воде он равен соответственно 62 МПа при $50 \cdot 10^6$ циклов и 85 МПа при $60 \cdot 10^6$ циклов.

Коррозионная стойкость латуни Л63 под действием морской воды 0,61 г/(м²·сутки), под действием 10 %-ной H_2SO_4 — 1,46 г/(м²·сутки). Предел выносливости на воздухе и в морской воде составляет соответственно 168 и 113 МПа при $50 \cdot 10^6$ циклов.

Отожженная при 650 °С латунь Л60 имеет временное сопротивление $\sigma_в$ = = 370 МПа, относительное удлинение и сужение соответственно $\delta = 56$ %; $\psi = 61$ %, предел выносливости σ_{-1} = = 151 МПа при $400 \cdot 10^6$ циклов. При испытании в растворе хлористого натрия $\sigma_в = 382$ МПа; $\delta = 48$ %; ψ = = 69 %; $\sigma_{-1} = 172$ МПа при $10 \times \times 10^6$ циклов.

Коррозионная стойкость латуни ЛАН59—32 в г/м² за 1000 ч составляет: 0,09 под действием щелочи (мягкая латунь); 0,04 под действием морской воды (мягкая латунь); 1,15 под действием 10 %-ной H_2SO_4 (полутвердая латунь).

Коррозионная стойкость латуни Л63, отожженной при 650 °С и холоднокатаной и отожженной при 200 °С, составляет: 0,476 и 0,532 г/(м²·сутки) в морской воде; 1,37 и 1,208 г/(м²·сутки) в 1 %-ном растворе H_2SO_4; 15,18 и 26,60 г/(м²·сутки) в 1 %-ном растворе HWO_3; 0,0682 и 0,0562 г/(м²·сутки) в дистиллированной воде; 0,0031 и 0,0031 г/(м²·сутки) в атмосфере (98 % влажности), 1,46 г/(м²·сутки) в 10 %-ной H_2SO_4.

Коррозионная стойкость латуни ЛАНКМц75—2—2,5—0,5—0,5, состаренной после закалки и после холодной прокатки, составляет: 0,0758 и 0,0693 г/(м²·сутки) в морской воде соответственно; 0,768 и 1,174 г/(м²·сутки) в 1 %-ном растворе H_2SO_4; 7,43 и 7,60 г/(м²·сутки) в 1 %-ном растворе HWO_3; 0,0206 и 0,0206 г/(м²·сутки) в дистиллированной воде; 0,00169 и 0,00113 г/(м²·сутки) в атмосфере (98 % влажности).

Коррозионная стойкость мягкой латуни ЛЖМц59—1—1 составляет: 0,22 г/(м²·сутки) под действием морской воды; 1,77 г/(м²·сутки) в 10 %-ном растворе H_2SO_4; 0,58 г/(м²·сутки) в 2 %-ном растворе щелочи.

Коррозионная стойкость латуни ЛМц58—2 составляет 0,40 г/(м²·сутки) в морской воде; 0,70 г/(м²·сутки) в сухом паре при 250 °С; 1,59 г/(м²·сутки) в 10 %-ном растворе H_2SO_4;

35. Плоский прокат из латуни [11, 17, 18, 23]

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
	не менее	
Полосы прямоугольные латунные (ГОСТ 6688—75)		
Прессованные (5×20÷25×60):		
Л63	294	30
ЛЖМц59—1—1	431	31
ЛМц58—2	421	25
ЛО62—1	343	25
ЛС59—1	372	21
Тянутые (3×6÷10×18)		
ЛС59—1	—	—
Листы и полосы латунные (ГОСТ 931—78)		
Горячекатаные листы (при толщине 5,6÷21, 22, 25: 600×1500 и 1000×2000):		
Л63	294	30
ЛО62—1	343	20
ЛС59—1	363	18
Холоднокатаные листы (при толщинах 0,4; 0,5; 1,2; 1,3; 1,35; 1,4; 1,5; 1,6; 1,65; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,75; 3,0; 3,5; 4,0÷7,5; 8,0; 9,0; 10,0; 11,0; 12,0: 600×1500; 800×2000; 1000×2000)		
Холоднокатаные полосы (при толщине 0,4—10,0, ширина 40—500)		
Л90:		
мягкая	235	35
полутвердая	294	10
твердая	353	3
Л85:		
мягкая	255	38
полутвердая	323	12
твердая	393	3
Л80:		
мягкая	265	40
полутвердая	333	15
твердая	392	3
Л68:		
мягкая	294	42
полутвердая	343	20
твердая	431	10
особо твердая	519	—
Л63:		
мягкая	294	38
четвертьтвердая	343	20
полутвердая	412	10
твердая	490	4
особо твердая	588	—

Продолжение табл. 35

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
	не менее	
ЛС59—1:		
мягкая	343	25
твердая	461	5
ЛМц58—2:		
мягкая	382	30
полутвердая	421	15
твердая	588	3
ЛО62—1 твердая	392	5
Лента латунная (ГОСТ 2208—75)		
Толщина 0,14—0,22 | *Ширина* 10—200 | *Толщина* 0,25—0,45 | *Ширина* 10—250 | *Толщина* 0,5—2,0 | *Ширина* 20—600		
Л90:		
мягкая	235—245	35
полутвердая	392—421	10
Толщина 0,1—0,22 | *Ширина* 10—600 | *Толщина* 0,25—0,45 | *Ширина* 10—600 | *Толщина* 0,5—2,0 | *Ширина* 20—600		
Л90 твердая	>353	3
Л85:		
мягкая	255—363	38
полутвердая	323—431	12
твердая	>392	3
Л80:		
мягкая	265—372	40
полутвердая	333—431	15
твердая	>392	3
Л68:		
мягкая	234—372	42
полутвердая	343—441	20
Толщина 0,05—0,09 | *Ширина* 10—175 | *Толщина* 0,1—0,22 | *Ширина* 10—300		
Толщина 0,25—0,45 | *Ширина* 10—600 | *Толщина* 0,5—2,0 | *Ширина* 20—600		
Л68:		
твердая	431—539	10
Толщина 0,14—0,22 | *Ширина* 10—300 | *Толщина* 0,25—0,45 | *Ширина* 10—600 | *Толщина* 0,5—1,0 | *Ширина* 20—600		
Л68 особо твердая	>519	—
Л63:		
мягкая	294—412	38
полутвердая	412—539	10
твердая	539—617	4
особо твердая	>587	—
Толщина 0,14—0,22 | *Ширина* 10—200 | *Толщина* 0,25—0,45 | *Ширина* 10—250 | *Толщина* 0,5—2,0 | *Ширина* 20—600		

Продолжение табл. 35

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
	не менее	
Л63:		
четвертьтвердая	343—470	20
Толщина 0,14—0,40 | *Ширина* 10—175 | *Толщина* 0,45—1,4 | *Ширина* 20—280 | *Толщина* 1,5—2,0 | *Ширина* 20—600		
ЛС59—1 мягкая	343—490	25
Толщина 0,1—0,4 | *Ширина* 10—175 | *Толщина* 0,45—1,4 | *Ширина* 20—280 | *Толщина* 1,5—2,0 | *Ширина* 20—180		
ЛС59—1 твердая	461—587	
Толщина 0,35—1,2 | *Ширина* 20—300		
ЛС59—1 особо твердая	⩾587	3
ЛМц58—2:		
мягкая	382—490	30
твердая	587	4
Толщина 0,14—0,4 | *Ширина* 10—175 | *Толщина* 0,45—1,4 | *Ширина* 20—280		
ЛМц58—2 полутвердая	421—587	15
Лента латунная радиаторная (ГОСТ 20707—80)		
Толщина 0,05—0,75 | *Ширина* 10—200		
Л63; Л90:		
мягкая	—	
полутвердая	—	
твердая	—	
Л63 четвертьтвердая	—	
Ленты и полосы из свинцовой латуни (ГОСТ 4442—72)		
Ленты толщиной 0,1—2,0, шириной 10—150		
ЛС63—3:		
мягкая	⩾294	25
полутвердая	343—441	—
Полосы толщиной 1,5—8,0, шириной 20—180		
ЛС63—3 особо твердая	627	5
Ленты и полосы томпаковые для плакирования (ГОСТ 2205—71)		
Ленты:		
толщиной 0,7; 0,9; 1,0; 1,1; 1,5; 1,6; 1,7; 2,0 шириной 100—500		
Полосы:		
толщиной 2,5; 2,6; 3,0; 3,6; 4,0 шириной 100—500		
Л90	—	—

36. Круглый прокат из латуни [13, 23]

Продолжение табл. 36

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Прутки латунные. Круглое, квадратное и шестигранное сечение (ГОСТ 2060—73)		
Диаметр 10—160		
Л60:		
прессованная	294	30
тянутая	294	30
Диаметр 3—50		
Л60 мягкая	333	30
Диаметр 3—40		
Л60 полутвердая	392	17
Диаметр 3—12		
Л60 твердая	470	9
Диаметр 10—160		
Л63:		
прессованная	294	30
тянутая	294	40
Диаметр 3—50		
Л65 мягкая	334	30
Диаметр 3—40		
Л63 полутвердая	372	15
Диаметр 3—12		
Л63 твердая	441	10
Диаметр 10—160		
ЛС59—1 прессованная	363	18
Диаметр 3—50		
ЛС59—1 мягкая	333	22
Диаметр 3—40		
ЛС59—1 полутвердая	392	15
Диаметр 3—12		
ЛС59—1 твердая	490	5
Диаметры 3—9,5; 10—14; 15—20		
ЛС63—3 тянутая твердая	490—588	1

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Диаметр 10—20		
ЛС63—3 полутвердая	353	12
Диаметр 10—160		
ЛО62—1 прессованная	363	20
Диаметр 3—50		
ЛО62—1 тянутая полутвердая	392	15
Диаметр 10—160		
ЛЖС58—1—1 прессованная	294	20
Диаметр 3—50		
ЛЖС58—1—1 тянутая полутвердая	441	10
Диаметр 10—160		
ЛМц58—2 прессованная	392	25
Диаметр 3—12		
ЛМц58—2 тянутая полутвердая	441	20
Диаметр 12—50		
ЛМц58—2 тянутая полутвердая	412	20
Диаметр 10—160		
ЛЖМц59—1—1 прессованная	431	28
Диаметр 3—12		
ЛЖМц59—1—1 тянутая полутвердая	490	15
Диаметр 12—50		
ЛЖМц59—1—1 тянутая полутвердая	441	17
Диаметр 10—160		
ЛАЖ60—1—1 прессованная	441	18
Проволока латунная (ГОСТ 1066—80)		
круглая *диаметром 0,1—12*; квадратная и шестигранная со *стороной 3—12*:		
Л80; Л68; Л63; ЛС59—1: мягкая, полутвердая, твердая	—	—

Продолжение табл. 36

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Проволока латунная для холодной высадки (ГОСТ 12920—67; ГОСТ 1066—80)		
Диаметры 1; 1,2; 1,32; 1,4; 1,45; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,16; 2,2; 2,35; 2,4; 2,5; 2,6; 2,64; 2,85; 3,0; 3,26; 3,35; 3,48; 3,5; 3,6; 3,85; 4,0; 4,1; 4,38; 4,43; 4,8; 5,0; 5,2; 5,28; 5,8; 6,0; 7,0; 7,1; 7,8; 8,0; 8,3; 8,85; 9,0; 10,0		
Л63:		
полутвердая	363	18
твердая	—	—
Проволока из свинцовой латуни (ГОСТ 19703—79)		
Диаметр 0,45—12		
ЛС63—3:		
мягкая	⩾294	32
полутвердая	392—510	3
твердая	510—617	—
Диаметр 0,45—6,5		
ЛС63—3 особо твердая	617—715	—
Диаметр 7,0—8,0		
ЛС63—3 особо твердая	617—686	—
Трубы латунные (ГОСТ 494—76)		
Диаметр 3—100; толщина стенки 0,5—10		
Л63; Л68 тянутая и холоднокатаная	—	—

Продолжение табл. 36

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Диаметр 21—195; толщина стенки 1,5—42,5		
Л60; Л63; ЛС59—1; ЛЖМц59—1—1 прессованная	—	
Трубы латунные для теплообменных аппаратов (ГОСТ 21646—76)		
Наружный диаметр 10—50; толщина стенок 0,8—3		
ЛО70—1 мягкая	294	40
ЛОМш70—0,05; Л68; ЛМш68—0,05; ЛА77—2 мягкая	323	35
Л68; ЛО70—1 полутвердая	343	35
Трубы латунные тонкостенные (ГОСТ 11383—75)		
Диаметр 1,5—28; толщина стенки 0,15—0,7		
Л63 тянутая:		
мягкая	294	38
твердая	392	10
Л96 тянутая:		
мягкая	206	35
твердая	294	20

0,55 г/(м²·сутки) в 2 %-ном растворе щелочи.

Коррозионная стойкость латуни ЛО90—1 в морской воде составляет 0,4—0,5 г/(м²·сутки), а мягкой латуни ЛО70—1 — 0,55 г/(м²·сутки); в 10 %-ном растворе H_2SO_4 — 1,65 г/(м²·сутки).

Коррозионная стойкость полутвердой латуни ЛО62—1 в морской воде составляет 0,55 г/(м²·сутки), а твердой латуни под действием 10 %-ного раствора H_2SO_4 — 1,51 г/(м²·сутки).

Коррозионная стойкость мягкой латуни ЛС59—1 в морской воде составляет 0,35 г/(м²·сутки), под действием 10 %-ного раствора H_2SO_4 — 1,42 г/(м²·сутки); предел выносливости этой латуни на воздухе и в морской воде составляет соответственно 190 и 100 МПа при $50 \cdot 10^6$ циклов, а латуни ЛЖМц59—1—1 на воздухе и в морской воде — соответственно 140 и 80 МПа при $50 \cdot 10^6$ циклов.

37. Физические и технологические свойства литейных латуней [10, 17, 18, 24]

Латунь	ρ, г/м³	λ, Вт/(м·°С)	α·10⁻⁶, °С⁻¹	Температура плавления, °С	ρ·10⁸, Ом·м	Литейная усадка, %	Жидкотекучесть, см	Коэффициент трения в паре со сталью: со смазкой	Коэффициент трения в паре со сталью: без смазки	Коррозионная стойкость, г/(м²·ч): морская вода	Коррозионная стойкость, г/(м²·ч): пар	Обрабатываемость резанием, %
ЛЦ16К4	8,3	83,7	17	900	0,2	1,7	80	0,01	0,19	0,068	0,312	30
ЛЦ14К3С3	8,6	83,7	17	900	0,2	1,7	60	0,009	0,15	—	—	50
ЛЦ23А6Ж3Мц2	8,5	50,2	19,8	900	—	1,8	—	—	—	—	—	25
ЛЦ30А3	8,5	113	—	995	0,08	1,25	—	—	—	—	—	30
ЛЦ40АЖ	8,5	113	21,6	904	0,09	1,7	—	—	—	—	—	30
ЛЦ38Мц2С2	8,5	46	20,6	885	0,11	2	22	0,016	0,24	0,05	—	60
ЛЦ35Н2ЖА	8,4	—	—	916	—	1,7	—	—	—	—	—	20
ЛЦ40С	8,5	108,8	20,1	885	0,068	2,2	51	0,013	0,17	0,059	0,02	80
ЛЦ36Мц2ф2С2	8,5	50,2	—	890	0,12	1,8	—	—	—	—	—	35
ЛЦ40Мц1,5	8,4	71,2	21,2	880	0,108	1,45	83	0,012	0,32	—	—	22
ЛЦ40Мц3Ж	8,5	100,5	22	870	0,12	1,6	60	—	—	0,047	—	25
ЛЦ25С2	8,5	100,5	—	920	0,09	1,8	—	—	—	—	—	60

38. Механические свойства и область применения литейных латуней [11, 17, 23]

Латунь	Литье	$\sigma_в$, МПа	δ, %	σ_{-1}, МПа	$\sigma_т$, МПа	НВ, МПа	$a_н$, кДж/м²	Область применения
ЛЦ16К4	П	245—343	15	При $20 \cdot 10^6$ циклов 100	115—195	980—1080	1180	Детали, работающие в морской воде, при протекторной защите арматуры до 250 °С
	К	295—490	15	—	—	—	—	
	Ц	295—490	—	—	—	—	—	
ЛЦ14К3С3	П	245—295	7	—	135	880	390	Подшипники, втулки
	К	295—390	15	—	—	980	—	
	Ц	345—390	—	—	—	—	—	
ЛЦ23А6Ж3Мц2	П	540—635	7	—	295—345	1570	—	Гайки винтов, массивные червячные винты, работающие в тяжелых условиях
	К	585—685	7	—	—	1570	—	
	Ц	635—735	7	—	—	—	—	
ЛЦ30А3	П	275—335	12	—	145—175	780	—	Коррозионно-стойкие детали
	К	345—440	15	—	—	880	—	
ЛЦ40АЖ	П	335—930	20	—	245	780	—	Арматура, втулки, подшипники
	К	390—470	18	—	—	880	—	
ЛЦ35НЖА	П	345	20	—	175—195	980	—	Арматура без притираемых поверхностей, работающих в воде, на воздухе, масле, жидком топливе до 250 °С
	К	370—450	18	—	—	830	—	
ЛЦ40С	К	345—390	—	—	145	780	255	Арматура, втулки, сепараторы для подшипников качения. Литье под давлением
	Ц	200	20	При $50 \cdot 10^6$ циклов 185	—	—	—	
ЛЦ40Сд	Д	200	6	В морской воде 100	—	690	—	
ЛЦ36Мц2С2	П	295—390	6	—	225—285	880	85	Зубчатые колеса
	К	295—345	4	—	—	980	—	
ЛЦ38Мц2С2	П	295—390	10	—	215—275	690	685	Антифрикционные детали, армировка вагонных подшипников
	К	345—440	8	—	—	780	—	
ЛЦ40Мц1,5	П	345	20	При $20 \cdot 10^6$ циклов 90	155	980	1180	Авиадетали, несущие силовую нагрузку, неответственные подшипники и арматура, детали, подвергающиеся лужению, заливке баббитом
	К	345	20	—	—	980	—	
	Ц	345	20	—	—	980	—	
ЛЦ40Мц3Ж	П	390—540	18	—	165—235	880	1760	Несложные по конфигурации детали ответственного назначения и арматура для морского судостроения, работающие при температуре до 300 °С, массивные детали (гребные винты, лопасти, сепараторы)
	К	540—635	10	При $20 \cdot 10^6$ циклов 135	—	980	—	
	Д	390	10	При $50 \cdot 10^6$ циклов в морской воде 80	—	880	—	
ЛЦ25С2	П	245—295	8	—	—	690—780	—	Штуцера гидросистем автомобилей
ЛЦ40Мц3А	К, Ц	441	15	—	—	1130	—	Для деталей несложной конфигурации

Обозначения. П — литье в песок; К — литье в кокиль; Ц — центробежное литье.

Литейные латуни. Согласно ГОСТ 17711—80 существует 10 марок литейных латуней. Литейные латуни в виде чушек (ГОСТ 1020—77) содержат те же элементы, что и латуни, обрабатываемые давлением; от последних литейные латуни отличает, как правило, большее легирование цинком и другими металлами. Вследствие малого интервала кристаллизации литейные латуни обладают хорошими литейными характеристиками. Свойства литейных латуней приведены в табл. 37, 38.

6. БРОНЗЫ

Бронзами называют сплавы меди, в которых цинк или никель не являются основными легирующими элементами.

По химическому составу бронзы подразделяются на две группы: оловянные, в которых основным легирующим элементом является олово, и безоловянные, не содержащие олово в качестве легирующего компонента.

По технологическому признаку бронзы делятся на литейные и деформируемые. Литейные бронзы предназначены для фасонных отливок. Деформируемые бронзы хорошо поддаются обработке давлением.

Бронзы по сравнению с латунью обладают лучшими механическими, антифрикционными свойствами и коррозионной стойкостью. В качестве легирующих элементов в бронзе используют олово, алюминий, никель, марганец, железо, кремний, свинец, фосфор, бериллий, хром, цирконий, магний и другие элементы.

Оловянные бронзы. Бронзы, в которых олово является основным легирующим элементом, называются оловянными.

Наибольшее практическое значение имеют сплавы, содержащие до 20 % Sn. Эта часть диаграммы состояния Cu—Sn представляет собой α-твердый раствор олова в меди, имеющий гранецентрированную кристаллическую решетку. Растворимость олова в меди меняется от 15,8 % при 586 °С до 1 % при 200 °С. Причем в реальных условиях затвердевания и охлаждения (в песчаных и металлических формах) область α-твердого раствора значительно сужается (примерно до 6 %). В равновесии с α-твердым раствором по мере понижения температуры находятся β-, γ-, δ-, ε-твердые растворы: β — на основе соединения Cu_5Sn с объемно центрированной кубической решеткой; γ и δ — на основе $Cu_{31}Sn_8$ со сложной кубической решеткой; ε — на основе Cu_3Sn с гексагональной плотноупакованной решеткой.

К числу однофазных сплавов относятся бронзы с содержанием до 5—6 % Sn. В бронзах с более высоким содержанием олова при кристаллизации образуются α- и β-фазы. При охлаждении при 586 °С β-фаза распадается с образованием эвтектоида (α+γ), при 520 °С γ-фаза распадается с образованием эвтектоида α+δ. На этом обычно заканчиваются фазовые превращения в бронзах.

Механические свойства оловянных бронз достаточно высоки. С увеличением содержания олова возрастает твердость и прочность сплавов, но при этом снижается пластичность.

Оловянные бронзы слабо чувствительны к перегреву и газам, свариваются и паяются, не дают искры при ударах, не магнитны, морозостойки и обладают хорошими антифрикционными свойствами.

Добавки фосфора к оловянным бронзам значительно улучшают их механические, антифрикционные и литейные характеристики. Для механических свойств оптимальное содержание фосфора ~0,5 %. При содержании фосфора выше 0,5 % бронзы охрупчиваются, особенно при горячей прокатке. Однако в литейных антифрикционных бронзах может содержаться до 1,2 % P.

Небольшие добавки Zr, Ti, Nb и B улучшают механические свойства и обрабатываемость давлением в холодном и горячем состоянии. Никель при его содержании ~ до 1 % повышает механические свойства, коррозионную стойкость и измельчает зерно. Свинец значительно повышает антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием, но снижает механические свойства. Цинк, почти не оказывая влияния на механические свойства, улучшает технологические характеристики

39. Физические свойства оловянных бронз, обрабатываемых давлением [10, 17, 18]

Бронза	Температура плавления, °С		ρ, т/м³	$\alpha \cdot 10^{-6}$, °С$^{-1}$, при		λ, Вт/(м × × °С)	$\rho_1 \cdot 10^{-6}$, Ом·м	E, МПа
	Ликвидус	Солидус		20 °С	20—300 °С			
БрОФ6,5—0,4	—	995	8,8	17,1	19,1	71,2	0,176	109 800
БрОФ6,5—0,15	—	995	8,8	17,1	19	71,2	0,176	109 800
БрОФ7—0,2	—	900	8,6	17,0	—	41,9	0,17	112 700
БрОФ8—0,3	—	880	8,6	17,0	—	41	0,175	115 600
БрОФ4—0,25	—	1060	8,9	17,6	19,4	83,7	0,091	98 000
БрОЦ4—3	—	1045	8,8	18	—	83,7	0,087	121 600
БрОЦС4—4—2,5	1018	887	9	18,2	—	83,7	0,087	73 500
БрОЦС4—4—4	1015	—	9,1	18,1	—	83,7	0,09	70 600

оловянных бронз. Железо повышает механические свойства и температуру рекристаллизации, однако повышенное содержание железа ухудшает технологические и коррозионные характеристики бронз.

Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением — деформируемые, подразделяются на следующие группы (ГОСТ 5017—74): оловянно-фосфористые бронзы БрОФ8,0—0,3; БрОФ6,5—0,4; БрОФ6,5—0,15; БрОФ7—0,2; БрОФ4—0,25; оловянно-цинковые бронзы БрОЦ4—3; оловянно-цинково-свинцовые бронзы БрОЦС4—4—2,5 и БрОЦС4—4—4.

Физические и механические свойства бронз приведены в табл. 39, 40. Механические свойства оловянных бронз при низких температурах приведены в табл. 41.

Бронзы БрОФ8—0,3 и БрОФ6,5—0,4 применяют для сеток целлюлозно-бумажной промышленности. Бронза БрОФ6,5—0,4 также используется для пружин, деталей машин и подшипников. Бронза БрОФ6,5—0,15 применяется для изготовления лент, полос, прутков, деталей подшипников, биметаллических изделий; бронза БрОФ7—0,2 — для прутков, шестерен, зубчатых колес, втулок и прокладок высоконагруженных машин; бронза БрОФ4—0,25 — для трубок контрольно-измерительных и других приборов, для манометрических пружин; бронза БрОЦ4—3 — для лент, полос, прутков, применяемых в электротехнике, для токоведущих пружин, контактов, штепсельных разъемов, для пружинной проволоки в химической промышленности, точной механике, для арматуры, шаберов в бумажной промышленности; бронзы БрОЦС4—4—2,5 и БрОЦС4—4—4 — для втулок и подшипников в автотракторной и автомобильной промышленности.

Оловянные бронзы, обрабатываемые давлением, могут поставляться, так же как и латуни, в мягком (отожженном), полутвердом, твердом и особо твердом состоянии.

Бронзы БрОФ6,5—0,4, БрОФ6,5—0,15 и БрОЦС4—4—2,5 обрабатываются обычно в холодном состоянии (прокатка, волочение), а в горячем состоянии — лишь прессованием. Бронза БрОЦ4—3 хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии. Виды и свойства плоского и круглого проката из оловянных бронз приведены в табл. 42 и 43.

Литейные оловянные бронзы. Жидкотекучесть литейных оловянных бронз ниже, чем у других бронз, однако они имеют незначительную объемную усадку, что позволяет получать из этих сплавов фасонные отливки бронзы.

Оловянные шихтовые литейные бронзы в чушках (ГОСТ 614—73) служат

40. Механические свойства и технологические характеристики оловянных бронз, обрабатываемых давлением [17, 18, 23, 24]

Бронза	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	σ_{-1}, МПа	$a_н$, кДж/м²	ψ, %	НВ, МПа	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки	Температура, °С: горячей обработки	Температура, °С: отжига	Температура, °С: начала рекристаллизации	Температура, °С: низкотемпературного отжига	Обрабатываемость резанием, %
БрОФ6,5—0,15; БрОФ6,5—0,4:														
литая	245—345	140	15—30	При $10 \cdot 10^6$ циклов 265—335	490—590	—	—	—	—	—	—	—	—	—
мягкая	295—440	195—245	60—70	—	—	80	685—820	0,01	0,12	700—800	600—650	350—370	260	20
твердая	685—785	580—640	7—12	—	—	61	1570—2160	—	—	—	—	—	—	—
БрОФ7—0,2:														
мягкая	370—440	—	55—65	При $10 \cdot 10^6$ циклов 165	1745	—	835—930	0,011	0,33	—	600—650	—	—	16,1
твердая	880—1080	540	1—2	—	—	—	1720—2250	—	—	—	—	—	—	—
БрОФ8—0,3:														
мягкая	390—490	—	55—65	—	—	—	880—980	—	—	—	600—650	—	—	—
твердая	980—1180	—	1—2	—	—	—	1760—2350	—	—	—	—	—	—	—
БрОФ4—0,25:														
мягкая	295—375	—	40—58	При $5 \cdot 10^6$ циклов 151	—	85	540—685	—	—	700—800	600—650	350—370	250	20
твердая	590—685	530	6—10	245	—	60	1570—1670	—	—	—	—	—	—	—
БрОЦ4—3:														
литая	195—295	65	15	—	390	—	590—685	—	—	700—800	600—650	400	250	—
мягкая	295—390	—	35—45	—	—	—	590—685	—	—	—	—	—	—	—
твердая	490—590	—	3—6	—	—	—	1570—1670	—	—	—	—	—	—	—
БрОЦС4—4—2,5:														
литая	185	100	11	—	—	13	660	0,016	0,26	—	550—650	400	—	90
мягкая	295—345	130	35—45	—	390	34	480—685	—	—	—	—	—	—	—
твердая	540—640	275	2—4	—	—	—	1470—1760	—	—	—	—	—	—	—
БрОЦС4—4—4:														
мягкая	315—335	130	30—40	—	360	34	610	0,016	0,26	—	—	—	—	90
твердая	490—590	—	1—2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

41. Механические свойства оловянных бронз при низких температурах [16, 17, 18]

Температура, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, МПа
БрОФ6,5—0,4				
17	615	12	61	—
—196	825	29	54	—
—253	930	29	51	—
БрОЦ10—2				
20	245	8	36	175
—190	305	15	24	205
—253	390	18	38	315

42. Плоский прокат из оловянных бронз [11, 17]

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Полосы, ленты (ГОСТ 1761—79)		
Толщина *Ширина*		
1—10 40—300		
0,1—2 10—300		
БрОФ6,5—0,15:		
мягкая	295	34—38
полутвердая	440	8—10
твердая	665	3—5
особо твердая	745	—
термообработанная	590	10
Ленты		
БрОЦ4—3:		
мягкая	295	38
полутвердая	440	4—8
твердая	620	2—4
особо твердая	685	—
Полосы и ленты (ГОСТ 15885—77)		
Толщина *Ширина*		
1,53—3 50—300		
0,5—2 100—200		
БрОЦС4—4—2,5:		
мягкая	295	35
полутвердая	440	10
твердая	540	5

43. Круглый прокат из оловянных бронз [11, 17]

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Прутки круглые (ГОСТ 10025—78)		
Диаметр 6—40		
БрОФ6,5—0,15 тянутая	410	15
Диаметр 40—110		
БрОФ7—0,2 прессованная	440	15
Заготовки для изготовления проволоки, сеток и поясов поршневых колец		
БрОФ6,5—0,15 мягкая	345	55
БрОФ7—0,2 мягкая	355	55
БрОФ8—0,3 мягкая	380—480	55
БрОФ6,5—0,4 твердая	530	—
Проволока		
Диаметр 0,115—2		
БрОФ6,5—0,4 твердая	880	0
Диаметр 0,5—2		
БрОФ6,5—0,4 мягкая	295	40
Прутки круглые, квадратные, шестигранные (ГОСТ 6511—60)		
Диаметр 5—12		
БрОЦ4—3 тянутая	430	10
Диаметр 13—15		
БрОЦ4—3 тянутая	370	15
Диаметр 26—35		
БрОЦ4—3 тянутая	335	16
Диаметр 36—40		
БрОЦ4—3 тянутая	315	16
Диаметр 42—120		
БрОЦ4—3 прессованная	275	25
Проволока круглая, квадратная (ГОСТ 5221—77)		
Диаметр 0,1—12		
БрОЦ4—3 тянутая	765	—

шихтой: БрО3Ц8С4Н1 — для литейной бронзы; БрО3Ц7С5Н; БрО3Ц13С4 — для бронзы БрО3Ц12С5; БрО4Ц7С5 — для бронзы БрО3, 5Ц7С5; БрО5Ц6С5 — для бронзы БрО5Ц5С и БрО4Ц4С17. Перечисленные литейные бронзы (ГОСТ 613—79) применяются для литья антифрикционных деталей. Кроме того, бронзы БрО3Ц12С5 и БрО3Ц7С5Н применяются для арматуры, работающей в воде и водяном паре (БрО3Ц7С5Н в морской воде и маслах) давлением до 245 МПа.

Литейные нестандартные бронзы БрО10; БрО19 ответственного назначения применяются для арматуры и фасонных отливок; бронза БрО10Ф1 — для подшипников шестерен и втулок ответственного назначения; бронза БрО10Ц2 — для арматуры, подшипников, фасонных отливок; бронза БрО8Ц4 — для частей насосов и арматуры; бронза БрО6Ц6С3 — для паровой и водяной арматуры; бронза БрО8С12 — для ответственных подшипников, работающих при высоких давлениях; бронзы БрО5С25 и БрО1С22 — для изготовления подшипников и втулок, работающих при малых нагрузках и больших скоростях, малоуплотнительных колец; бронза БрО6Ц6С3 — для паровой и водяной арматуры. Бронзы БрО5С25, БрО1С22, БрО8С12 относятся к группе свинцовистых бронз, к которым относятся сплавы БрС30 (для подшипников, сальников), БрС60Н2,5 (для подшипников, фасонных отливок). Вследствие невысоких механических свойств двойные свинцовистые бронзы применяют для втулок и подшипников в виде тонкого слоя на стальной основе. Свинцовистые бронзы с повышенным содержанием олова (БрО8С12, БрО10С10, БрО10С2Н3) характеризуются более высокими механическими свойствами, чем двойная свинцовистая бронза. Поэтому из этой бронзы изготовляют втулки и вкладыши подшипников без стальной основы. Физические и механические свойства литейных оловянных бронз приведены в табл. 44, 45.

Коррозионная стойкость оловянных бронз в атмосферных условиях хорошая. В сельской местности скорость коррозии бронз БрО5 и БрО8 равна 0,00015—0,0008 мм/год, в морской атмосфере 0,0001—0,0002 мм/год, в городской 0,0015—0,0018 мм/год. В водяном паре при малых скоростях истечения скорость коррозии оловянных бронз меньше (0,0025 мм/год), при высоких скоростях истечения — 0,9 мм/год. В перегретом до 250 °С водяном паре оловянные бронзы устойчивы до давления 2 МПа.

В морской воде оловянные бронзы более стойки, чем медь и латуни. Быстрому разрушению подвергаются оловянные бронзы под действием рудничных вод, содержащих окислительные соли.

Сильное воздействие на оловянные бронзы оказывают соляная и азотная кислоты; менее активной является серная кислота.

В растворах NaOH скорость коррозии составляет 0,25 мм/год, в растворах аммиака 1,27—2,54 мм/год, в водных растворах этилового спирта <0,0025 мм/год. Скорость коррозии оловянных бронз в сухом четыреххлористом углероде или в хлористом этиле <0,0025 мм/год, а в этих же средах в присутствии влаги 1,27 мм/год.

При комнатной температуре кислород и сухие сернистый газ, газы-галогены или их водородные соединения практически не влияют на оловянные бронзы. При высоких температурах коррозия в газах-галогенах значительно возрастает. Скорость коррозии в сернистом газе при наличии влаги достигает 2,5 мм/год. Значительна (1,3 мм/год) и скорость коррозии оловянных бронз во влажных парах сероводорода при 100 °С. Скорости коррозии оловянных бронз в различных средах приведены в табл. 46.

Безоловянные бронзы по своим свойствам не уступают, а часто превосходят оловянные бронзы; поэтому их широко применяют в машиностроении.

Безоловянные бронзы, обрабатываемые давлением, выпускаются в соответствии с ГОСТ 18175—78.

Алюминиевые бронзы (двух- и многокомпонентные) имеют большое распространение в машиностроении. Алюминий растворяется в меди, образуя α-твердый раствор замещения с пре-

44. Физические свойства и технологические характеристики литейных оловянных бронз [10, 17, 18]

Бронза	Температура плавления, °С	ρ, т/м³	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$ при 20 °С	λ, Вт/(м·°С)	c, Дж/(кг·°С)	E, МПа	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м	Температура, °С: литья	Температура, °С: низкотемпературного отжига	Линейная усадка, %	Жидкотекучесть, см	Обрабатываемость резанием, %
БрО3Ц7С5Н	1022	8,7	17,61	62,8	364,3	83 300	—	—	—	—	50	—
БрО3Ц12С5	998	8,7	—	—	—	82 300	—	—	—	—	60	—
БрО4Ц4С17	970	8,9	—	—	—	—	—	—	—	—	40	—
БрО5Ц5С5	—	8,8	19,1	—	393,6	92 600	—	1250—1300	—	1,4—1,6	30	90
БрО3,5Ц7С5	—	8,7	—	—	—	—	—	—	—	—	30	90
БрО10	1020	8,8	18,5	48,1	368,4	103 900	—	1150	200	1,44	20	20
БрО19	880	8,6	18,8	—	—	96 000	—	—	—	—	—	—
БрО10Ф	934	8,7	17,3	49	427	100 900	0,16	1150	200	1,44	—	—
БрО10Ц2	1015	8,5	17,3	55,3	381	98 000	0,155	1120—1150	—	1,45—1,51	7	—
БрО8Ц4	1000	8,8	16,6	68,2	355,9	98 000	0,135	1100—1150	—	1,40—1,54	54	—
БрО8С12	940	9,1	17,1	—	—	73 500	—	1150	—	1,4	45	—
БрО5С25	940	—	17,6	58,6	—	68 600	—	1150	—	1,5	40	—
БрО6Ц6С3	967	8,82	17,1	75,4	—	88 200	0,09	1150	—	1,6	40	—
БрО8Н4Ц2	810	8,86	17,61	—	—	—	—	—	—	—	—	—

45. Механические свойства литейных оловянных бронз [17, 18, 23, 24]

Бронза	Способ литья	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, МПа	σ_{-1}, МПа	$a_н$, кДж/м²	НВ, МПа	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки	Коэффициент трения: в морской воде
БрО3Ц7С5Н	П	175	8	—	—	—	—	590	—	0,24	0,38
	К	205	5	—	176	При $20 \cdot 10^6$ циклов 115	—	590	0,028	—	—
БрО3Ц12С5	П	175	8	—	—	—	—	590	—	—	—
	К	205	5	—	—	—	—	590	—	—	—
БрО17Ц4С4	П	145	5	—	—	—	—	590	—	—	—
	К	145	6	—	—	—	—	590	—	—	—
БрО5Ц5С5	П	145	6	—	—	—	—	590	0,016	0,26	—
	К	175	4	—	—	—	205	590	—	—	—
БрО3,5Ц7С5	П	145	6	—	—	—	—	590	—	—	—
	К	175	4	—	—	—	—	590	—	—	—
БрО10	П	215	3—10	10—14	175	—	90	685—785	0,0056	0,17	—
	К	295	3—10	10	—	185	295	1080	—	—	—
БрО19	К	295	0,5	—	175	—	41	1570	0,005	0,4	—
БрО16С5	К	245	0,5	—	—	—	—	1180	—	—	—
БрО10Ф1	П	195	3	3	135	—	59	785—980	0,008	0,15	0,37
	К	245—295	3—10	10	195	—	88	880—1180	—	—	—
БрО10Ц2	П	195—245	8	10—14	175	При $20 \cdot 10^6$ циклов 110	98	685	0,008—0,06	0,16—0,20	—
	К	195—245	5	—	—	—	147	880	—	—	—

Продолжение табл. 45

Бронза	Способ литья	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, МПа	σ_{-1}, МПа	$a_н$, кДж/м²	НВ, МПа	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки	Коэффициент трения: в морской воде
БрО8Ц4	П	195	6—15	8—12	115	—	186	640	0,006	0,3	—
	К	245	4—10	—	—	—	245	735—835	—	—	—
БрО8С12	П	145—175	3—8	—	100	—	98—137	685—980	0,005	0,1	—
	К	145—195	—	—	115	—	—	785—1180	—	—	—
БрО5С25	П	115—135	4—6	7	80—	—	78	440—540	0,004	0,14	—
					100						
	К	135—175	6—8	12	—	—	98—196	540—640	—	—	—
БрО6С6Ц3	П	145—195	8—12	—	—	—	225	590	0,009	—	—
	К	175—215	4—8	8	80—	—	294	640—735	—	0,16	—
					195						
БрС30	К	74	5	34	45	—	—	⩾245	—	—	—
БрС60Н2,5	К	⩾29	⩾5	—	—	—	—	⩾135	—	—	—
БрО8Н4Ц2	П	265	14	—	175	При $20 \cdot 10^6$ циклов 150	—	785	—	—	—
	К	345	16	—	—	—	—	785	—	—	—
БрО10С12Н3	К	245	5	—	—	—	—	735	0,02	0,38	—

Обозначения: П — литье в песок; К — литье в кокиль.

46. Скорость коррозии оловянных бронз в различных средах [17, 18]

Бронза	Морская вода (в мм/год)	Раствор H_2SO_4, г/(м²·сутки) при 20 °С, 10 %-ный	при 20 °С, 55 %-ный	при 80 °С, 10 %-ный	при 80 °С, 45 %-ный	при 80 °С, 55 %-ный	Морской туман, г/(м²·сутки)	Сухой пар при 250 °С, г/(м²·сутки)	Влажный пар при 100 °С, г/(м²·сутки)
БрО10	0,016	4,1	1,26	23,8	8,5	7,1	—	—	—
БрО5	0,02	—	—	—	—	—	—	—	—
БрО10Ц2	0,18	3,5	0,53	15,6	7,8	4,6	0,06	0,02	0,02
БрОС10—15	0,076	—	—	—	—	—	—	—	—
БрОФ6,5—0,4	0,04	5,1	0,97	17,9	8,6	5,2	—	—	—
БрОФ4—0,25	0,03	—	—	—	—	—	—	—	—
БрОЦ4—3	0,022	—	—	—	—	—	—	—	—
БрО4Ц4С2,5	0,028	—	—	—	—	—	—	—	—
БрО6Ц6С3	0,028	4,9	0,4	17,6	7,0	5,6	—	—	—
БрО6Ц3Н6	0,005	—	—	—	—	—	—	—	—

делом растворимости 9,4 %. Двойные алюминиевые однофазные бронзы (БрА5; БрА7; БрА10) отличаются высокой прочностью и пластичностью. Они хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Предназначены для упругих элементов — пружин, мембран, сильфонов, деталей, работающих в морской среде. Алюминиевые бронзы морозостойки, не магнитны, не дают искры при ударах. По коррозионной стойкости они превосходят латуни и оловянные бронзы. Вместе с тем эти сплавы трудно поддаются пайке и неустойчивы в условиях перегретого пара. Понижая электро- и теплопроводность меди, алюминий повышает ее жаростойкость.

Железо значительно улучшает механические свойства алюминиевых бронз, измельчая зерно; оно способствует задержке рекристаллизации. Алюминиевожелезные бронзы (БрАЖ9—4) для улучшения прочностных характеристик подвергают старению при 250—300 °С 2—3 ч после закалки при 950 °С. Они применяются для шестерен, червяков, втулок, седел клапанов, гаек нажимных винтов в основном в авиационной промышленности.

Никель повышает механические свойства, жаростойкость, температуру рекристаллизации и коррозионную стойкость алюминиевых бронз, антифрикционные свойства и устойчивость при низких температурах. Алюминиево-железоникелевые бронзы используются для направляющих втулок, клапанов, шестерен и для других деталей ответственного назначения в основном в авиационной промышленности.

В алюминиевых бронзах марганец повышает технологические и коррозионные свойства. Эти бронзы хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Применяются для червячных винтов, шестерен, втулок, в морском судостроении для деталей, работающих при температуре до 250 °С.

Бериллиевые бронзы, являясь дисперсионно-твердеющими сплавами, обладают высокими механическими, упругими и физическими свойствами. Отличаются высокой коррозионной стойкостью, жаропрочностью, циклической прочностью; они устойчивы при низких температурах, не магнитны, не дают искры при ударах. Закалку бериллиевых бронз осуществляют с температуры 750—790 °С, старение — при 300—325 °С. Добавки никеля, кобальта или железа способствуют замедлению скорости фазовых пре-

вращений при термической обработке, что значительно облегчает технологию закалки и старения. Кроме того, никель повышает температуру рекристаллизации, а марганец может частично заменить дорогой бериллий. Бериллиевые бронзы применяются для пружин, мембран, пружинящих деталей, в часовой промышленности.

Сплавы меди с марганцем отличаются высокими механическими свойствами, обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии. Они обладают повышенной жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Применяются для топочной арматуры.

Кремниевые бронзы обычно содержат никель или марганец. Эти сплавы отличаются высокими механическими, упругими и антифрикционными свойствами; при этом не теряют своей пластичности при низких температурах. Кремниевые бронзы хорошо паяются, обрабатываются давлением при низких и высоких температурах. Они не магнитны и не дают искры при ударах. Применяются для антифрикционных деталей, пружин, подшипников, в морском судостроении, для сеток, решеток, испарителей, направляющих втулок. Механические и физические свойства безоловянных бронз, обрабатываемых давлением, приведены в табл. 47—49. Виды и свойства круглого и плоского проката из безоловянных бронз приведены в табл. 50, 51.

Литейные безоловянные бронзы (ГОСТ 493—79) характеризуются высокой прочностью и хорошими антифрикционными и коррозионными свойствами. Они применяются для изготовления деталей, работающих в особо тяжелых условиях (зубчатые колеса, втулки, клапаны, шестерни для мощных кранов и турбин, червяки, работающие в паре с деталями из упрочненных сталей, подшипники, работающие при высоких давлениях и ударных нагрузках). Свойства литейных безоловянных бронз приведены в табл. 52.

7. МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ

К медно-никелевым сплавам относятся сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом является никель. Легирование меди никелем значительно повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, термоэлектрические характеристики. Промышленные медно-никелевые сплавы можно условно разделить на две группы: конструкционные и электротехнические. К первой группе относятся коррозионно-стойкие и высокопрочные сплавы типа мельхиор, нейзильбер и куниаль. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляют марганец, алюминий, цинк, железо, кобальт, свинец, а также хром, церий, магний, литий.

Мельхиоры имеют высокую коррозионную стойкость в различных средах — в пресной и морской воде, в органических кислотах, растворах солей, в атмосферных условиях. Добавки железа и марганца увеличивают стойкость медно-никелевых сплавов против ударной коррозии. Являясь твердыми растворами, мельхиоры обрабатываются давлением в горячем и холодном состоянии.

Сплавы на основе меди, в которых основными легирующими компонентами являются никель и цинк, называются нейзильберами. Они представляют собой твердые растворы на основе меди. Легирование цинком приводит к повышению механических свойств медно-никелевых сплавов и приданию им красивого серебристого цвета и удешевлению. Нейзильберы отличаются высокой коррозионной стойкостью: не окисляются на воздухе, сравнительно устойчивы в органических кислотах и растворах солей. Нейзильберы обрабатываются давлением в горячем (за исключением свинцовистого нейзильбера) и в холодном состоянии. Небольшое количество свинца вводится для улучшения обработки резанием.

Сплавы на основе тройной системы Cu—Ni—Al называют куниалями. Эти сплавы отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчивостью при низких температурах. Обрабатываются давлением в горячем состоянии.

Согласно диаграмме состояния предел растворимости α-твердого раствора на основе меди резко уменьшается

47. Физические свойства и технологические характеристики безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [10, 13, 23]

Бронза	Температура плавления, °С	ρ, т/м³	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$, при 20 °С	λ, Вт/(м·°С)	$\rho_1 \cdot 10^{-8}$, Ом·м	E, МПа	c, Дж/(кг×°С)	Температура, °С: горячей обработки	Температура, °С: отжига	Температура, °С: низкотемпературного отжига	Относительное удлинение, %
БрА5	1056	8,2	18,2	88—104,7	0,099	102 900	—	750—880	600—700	—	20
БрА7	1040	7,8	17,8	79,5	0,11	117 600	—	750—880	600—750	275	20
БрАЖ9—4	1040	7,5	16,2	58,6	0,123	110 700	423	750—850	700—750	—	20
БрАЖМц10—3—1,5	1045	7,5	16,1	58,6	0,189	98 000	—	750—850	650—750	—	20
БрАЖН10—4—4	1040	7,5	17,1	75,4	0,193	112 700	—	800—900	700—750	—	20
									Старение 400		
БрАМц9—2	**1060**	**7,6**	**17,0**	**71,2**	**0,11**	90 200	461	800—850	650—750	—	20
БрБ2:											
мягкая	955	8,2	16,6	83,7	0,1	114 700	419	750—800	530—650	—	20
состаренная	955	8,23	16,6	104,7	0,068	128 400	—	750—800	Закалка 760—780	—	20
деформированная	955	8,23	16,6	75,4	—	—	—	750—800	Старение 320, 10 ч	—	20
БрБНТ1,9	**860**	8,3	16,5	100,5	0,09	127 000	—	780—800	530—650	—	20
									Закалка 760—780;		
									старение 310—320		
БрБНТ1,7	865	8,2	17,0	96,3	0,09	125 400	—	780—800	650—700	—	20
									Закалка 755—775;		
									старение 320—330		
БрКМц3—1	970	8,4	18	37,7	0,15	112 700	377	800—850	600—750	275	30
БрКН1—3	1050	8,6	16,1	104,7	0,046	140 100	—	890—910	—	Закалка 850,	—
после деформации и старения										старение 450	—
БрМц5	1007	8,6	20,4	41,9	0,143	102 900	—	800—850	—	700—750	20

48. Механические свойства безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [13, 17, 18, 24]

Бронза	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, МПа	σ_{-1}, МПа	НВ, МПа	$a_н$, кДж/м²	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки
БрА5:									
литая в кокиль	275	55	48	68	—	640	1570	0,0070	0,30
мягкая	370	65	70	155	—	590	1080	—	—
твердая	785	4	—	490	При $100 \cdot 10^6$ циклов 130	1960	—	—	—
БрА7:									
литая в кокиль	295	45	—	245	—	690	1470	0,012	—
мягкая	410—490	65—75	75	—	—	690	—	—	—
твердая	970	2—10	40	—	При 10^6 циклов 153	1570—2200	—	—	—
горячекованая	410—490	60—70	70—75	—	153	690—780	—	—	—
БрАЖ9—4:									
литая в кокиль	295—390	10—20	30	195	—	1200—1370	620	0,004	0,18
мягкая	390—490	35—45	—	—	—	980—1200	—	—	—
твердая	490—689	4—6	—	345	При $40 \cdot 10^6$ циклов 206	1570—1960	—	—	—
БрАЖМц10—3—1,5:									
литая	490	20	25	155	—	—	590—780	0,012	—
мягкая	390—490	20—30	55	—	—	1230—1370	—	—	0,21
твердая	590—690	9—12	—	185	При $15 \cdot 10^6$ циклов 275	1570—1960	—	—	—

Продолжение табл. 48

Бронза	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, МПа	σ_{-1}, МПа	НВ, МПа	$a_н$, кДж/м²	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки
БрАЖН10—4—4:									
литая	750	10	12	295	—	1960	295—390	0,011	0,23
мягкая	440—590	35—45	45	—	—	1420	410	—	—
твердая	735—815	9—15	11	—	При $50 \cdot 10^6$ циклов 345	1760—2250	—	—	—
БрАМц9—2:									
мягкая	390—490	20	—	195	—	880—1180	685	0,006	0,18
твердая	700	4—5	—	490	При 10^6 циклов 206	1670	—	—	—
прессованная	390	25	—	235	—	1570	—	—	—
БрБ2:									
мягкая	390—590	30—50	65	245—349	—	1270—1470	—	—	—
твердая	785	2—4	—	860	При $100 \cdot 10^6$ циклов 185	—	—	—	—
закаленная, состаренная	1370	1—2	—	1250	—	3430—3920	685—1123	0,05	—
литая	—	—	46	—	—	1370	655	0,016	—
БрБ2,5:									
литая	440	30	42	—	—	1130	—	—	—
состаренная	1220	2	—	1080	—	3900	—	—	—
БрБНТ1,9:									
мягкая	390—590	30—50	70	—	—	830	—	—	—
твердая	590—880	1—3	—	—	—	1270	—	—	—
состаренная	1225	2,5	—	980	—	3330	—	—	—

Продолжение табл. 48

Бронза	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, МПа	τ_{-1}, МПа	НВ	$a_н$, кДж/м²	Коэффициент трения: со смазкой	Коэффициент трения: без смазки
БрБНТ1,7: мягкая	390—490	50	75	—	—	835	—	—	—
твердая	590—880	—	—	—	—	—	—	—	—
состаренная	1130	3,5	—	—	—	3530	—	—	—
БрКМц3—1: литая	340	25	—	100	При 10^8 циклов 108	930	1470	0,013	0,4
мягкая	340—390	55—60	—	155	98	785	—	—	—
твердая	685	6—13	—	410	206	1900	—	—	—
БрКН1—3: мягкая	340	30	70	145	—	735	—	—	—
твердая	610	6	50	590	При $20 \cdot 10^8$ циклов 206	1670	—	0,017	0,45
состаренная	885	8	20	540	—	1760	—	—	—
деформированная и состаренная	835	10	30	785	285	2160	390—980	—	—
БрМц5: литая	245	30	—	145	—	690	1960	0,013	0,7
мягкая	295—350	35—45	50	—	—	750	—	—	—
твердая	490—590	2	—	490	—	1570	—	—	—

49. Механические свойства безоловянных бронз при низких температурах [17, 18]

Температура, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, МПа	$a_н$, кДж/м²
БрА5					
17	412	61	70	—	—
—196	568	81	76	—	—
—253	637	83	72	—	—
БрА7					
20	529	26	29	182	—
—10	529	33	30	184	—
—40	539	35	36	185	—
—80	566	31	30	186	—
—120	607	32	31	190	—
—180	662	29	30	201	—
БрБ2,5					
Закалка с 800 °С в воду:					
20	524	36	50	167	—
—80	598	48	54	201	—
—180	769	41	57	343	—
БрБ2,5					
Закалка с 800 °С в воду и старение при 300 °С, 2 ч:					
20	1282	2,6	5	865	—
—10	1303	0,8	9	872	—
—40	1293	0,4	5	813	—
—80	1392	0,4	5	1015	—
—120	1372	0,4	4	960	—
—180	1470	3	6	1370	—
БрКМц3—1					
Пруток холодиотянутый:					
25	519	39,8	75,1	—	—
0	523	31,2	70,4	—	—
—80	568	31,7	72,4	—	—
—190	690	36,2	72,5	—	—
БрАМц9—2					
Пруток прессованный, отожженный:					
20	529	51	—	147	129
—20	539	45	—	196	129
—40	549	48	—	196	129
БрАЖ9—4					
Пруток прессованный, отожженный:					
20	602	31	—	255	32,3
—20	622	27	—	274	29,4
—40	632	27	—	284	26,5

50. Круглый прокат из безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [11, 23]

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа
Прутки круглые (ГОСТ 1628—78)			
Диаметр 16—160; 5—40			
БрАЖ9—4 прессованная	≥539	≥15	1078—176
БрАМц9—2:			
тянутая	≥539	≥12	—
прессованная	≥470	≥15	—
Диаметр 30—100			
БрАЖМц10—3—1,5 прессованная	≥588	≥12	1274—1960
Прутки квадратные и шестигранные (ГОСТ 1628—78)			
Размер сечения 5—36			
БрАЖН10—4—4 прессованная	≥637	≥5	1670—1960
БрКМц3—1:			
прессованная	≥343	≥20	—
тянутая	≥470	≥15	—
катаная	≥392	≥15	—
БрКН1—3 прессованная	≥490	≥10	—
Прутки (ГОСТ 15835—70)			
Диаметр 5—40; 42—100			
БрБ2:			
мягкая (после закалки или отжига)	392—588	≥25	980—147
тянутая твердая (холоднодеформированная, закалка)	637—882	≥1	1470
прессованная	≥441	≥20	—
тянутая и состаренная после закалки	1078	≥2	3136
состаренная после закалки и холодной деформации	1176	≥2	3332
Проволока круглая, квадратная (ГОСТ 5222—72)			
Диаметр 0,1—10			
БрКМц3—1 твердая	>833	≥1	—
Проволока (ГОСТ 15834—77)			
Диаметр 0,06—12			
БрБ2:			
мягкая (после закалки)	392—637	≥20	—
твердая (после закалки и старения)	735—1176	—	—

51. Плоский прокат из безоловянных бронз, обрабатываемых давлением [11, 17, 18]

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа
Полоса, ленты (ГОСТ 1789—70)			
Толщина 0,02—6; ширина 10—300; длина 2000			
БрБ2:			
мягкая (после закалки)	392—588	30	≤1274
твердая (деформированная после закалки на 30—40 %)	588—931	2,5	≤1670
состаренная после закалки	1078—1470	2	≤3234
состаренная после деформации на 30—40 %	1127—1568	1,5	≤3528
БрБНТ 1,9:			
мягкая (после закалки)	392—588	30	≤1176
твердая (деформация после закалки на 30—40 %)	588—931	2,5	1568
состаренная после закалки	1078—1470	2	3234
состаренная после деформации на 30—40 %	1127—1568	1,5	3528
БрБНТ 1,7:			
твердая (деформация после закалки на 30—40 %)	588—931	2,5	1470
состаренная после деформации на 30—40 %	1078—1470	2	3332
Ленты			
БрА5:			
мягкая	≥274	≥33	—
полутвердая	≥480	≥10	—
твердая	≥588	≥2,5	—
Ленты для пружин (ГОСТ 1048—79)			
Толщина 3,1; ширина 200—300			
БрА7:			
мягкая	392	35	—
термообработанная	≥539	10	—
твердая	539—735	5	—
особо твердая	>735	—	—
Полосы, ленты (ГОСТ 1595—71)			
Толщина 1—22; ширина 10—300; длина 1000—1500			
БрАМц 9—2:			
горячекатаная	≥441	≥15	—
мягкая	≥441	≥18	—
твердая	≥588	≥5	—
Полосы и ленты (ГОСТ 4748—70)			
Толщина 0,05—10; ширина 10—300; длина 500—5000			
БрКМц 3—1:			
мягкая	≥343	≥35	—
полутвердая	470—588	≥10	—
твердая	588—784	≥5	—
особо твердая	≥784	—	—

52. Свойства литейных безоловянных бронз [10, 17, 18, 24]

Бронза	ρ, г/м³	Температура плавления, °С	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$	λ, Вт/(м·°С)	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м	E	$\sigma_в$	$\sigma_т$
						МПа		
БрА10Ж3Мц2	7,5	1045	16	58,6	0,189	98 000	490	157
БрА10Ж4Н4Л	7,5	1040	17,1	75,4	0,193	112 700	590	294
БрА9Мц2Л	7,6	1060	17	71,2	0,11	90 280	440	196
БрА10Мц2Л	—	—	—	—	—	—	490	—
БрА9Ж4	7,6	1040	16,32	58,6	0,123	110 700	390	196
БрА7Ж1,5С1,5	—	—	—	—	—	—	290	—
БрА11Ж6Н6	—	—	—	—	—	—	590	—
БрС30	9,54	954	18,4	142,4	—	75 500	74,5	39
БрС60Н2,5	—	—	—	—	—	—	—	—
БрА9Ж3Л	7,6	1040	16	58,6	0,11	120 500	490	196
БрСу6С12Ф0,3	8,0	—	17,8	46	—	78 400	147	—
БрСу6Н2	8,7	1065	17,9	62,8	—	93 100	255	—
БрСу6Ф1	8,5	—	17,3	4,6	—	93 100	216	—
БрСу3Н3Ц3С20Ф	9,1	—	17,4	54,4	—	73 500	167	—
БрА9Ж4Н4Мц1	—	—	—	—	—	—	587	—
БрА7Мц15Ж3Н2Ц2	—	—	—	—	—	—	607	—

σ_{-1}	δ	ψ	$a_н$, кДж/м²	НВ, МПа	Линейная усадка, %	Жидкотекучесть, см	Обрабатываемость резанием, %	Коэффициент трения		Коррозионная стойкость, г/(м²·сутки)	
	%							со смазкой	без смазки	10 %-ная H_2SO_4	морская вода
В морской воде при $15 \cdot 10^6$ циклов 275	20	25	686	980	2,4	70	20	0,012	—	2,7	1,0
В морском тумане при $50 \cdot 10^6$ циклов 343	10	12	490	1670	1,8	66—85	20	0,011	0,23	0,58	0,18
При $20 \cdot 10^6$ циклов 137. В морской воде при $40 \cdot 10^6$ циклов 98	20	—	686	982	1,7	48	20	0,006	0,18	—	0,001—0,009 мм/год
—	12	—	—	1078	—	—	—	—	—	—	—
При $20 \cdot 10^6$ циклов 137; при $40 \cdot 10^6$ циклов в морской воде 108	10—20	30	588	980	2,49	85	20	0,004	0,18	0,40	0,25
—	18	—	—	980	—	—	—	—	—	—	—
—	2	—	—	2450	—	—	—	—	—	—	—
—	5	7	76,5	275	—	—	—	0,009	0,165	—	—
При 10^6 циклов 27,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
При $20 \cdot 10^6$ циклов в морской воде 127; при $40 \cdot 10^6$ циклов 108	10—12	—	196	980	—	—	—	0,004	0,18	—	—
—	2	—	—	588	1,3	—	—	—	—	—	—
—	6	—	—	804	—	22	—	0,013	—	—	—
—	5	—	—	784	1,3	35	—	—	—	—	—
—	2	—	—	637	1,25	30	—	—	—	—	—
—	12	—	—	1568	—	—	—	—	—	—	—
—	18	—	—	637	—	—	—	—	—	—	—

53. Физические свойства, технологические характеристики и области применения

Сплав	Температура плавления, °С		ρ, т/м³	λ, Вт/(м·°С)	c, Дж/(кг·°С)	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м	$TK\rho_1$, °С$^{-1}$	$\alpha \cdot 10^{-6}$, °С$^{-1}$
	Ликвидус	Солидус						
Мельхиор:								
МНЖМц30—1—1	1230	1170	8,9	37,3	—	0,42	0,0012	16
МН19	1190	1130	8,9	38,5	—	0,287	0,00029	16
Нейзильбер МНЦ15—20	1080	—	8,76	27,2—35,6	397,7	0,256	0,0002	16,6
Свинцовый нейзильбер МНЦС16—29—1,8	1120	965	8,82	—	—	—	—	—
Куниаль А МНА13—3	1183	1120	8,5	—	—	—	—	—
Куниаль Б МНА6—1,5	—	1145	8,7	—	—	—	—	—
МН95—5	1120	1086	8,7	100,5	376,8	0,08	0,0015	16,4
МНЖ5—1	1120	—	8,7	129,8	—	0,07	0,0015	16,4
МН10	—	—	—	—	—	—	—	—

конструкционных медно-никелевых сплавов [13, 17, 18, 23]

E, МПа	Температура, °С				Обрабатываемость резанием, %	Область применения
	горячей обработки	отжига	низкотемпературного отжига	рекристаллизации		
142 100	860—950	750—810	250—300	450	20	Теплообменные аппараты в морском судостроении (конденсаторные трубы и термостаты), медицинский инструмент, детали точной механики и химической промышленности, штампованные детали
137 200	900—1030	600—780	—	420	—	
137 200	800—970	700—750	250—300	400—450	20	Детали приборов в электротехнике, радиотехнике, медицине, арматуре, посуда, точная механика
124 500	—	700—750	250	400	50	Детали часовой промышленности и приборов
—	900—1000	—	Закалка 900; старение 500	600	—	Изделия повышенной прочности
—	850—900	—	Закалка 900; старение 500	600	—	Пружины ответственного назначения, изделия электротехнической промышленности
—	950—1000	650	—	350	—	Изделия машиностроения
—	900—1000	800—850	—	350	—	Конденсаторные трубы, сварные конструкции в судостроении
—	—	—	—	400	—	То же

54. Механические свойства и коррозионная стойкость конструкционных медно-никелевых сплавов [10, 13, 17, 18, 24]

Сплав	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, МПа	σ_{-1}, МПа	$a_н$, кДж/м²	НВ, МПа	Коррозионная стойкость (скорость коррозии), мм/год: Пресная вода	Морская вода	Водяной пар	Морская атмосфера	Сельская атмосфера	50 %-ная азотная кислота, мм/сут	10 %-ная серная кислота
Мельхиор:														
МНЖМц30—1—1:	—	—	—	—	При $40 \cdot 10^6$ циклов:	—	—	0,03	0,03—0,13	0,0025	0,0011	0,00035	6,4	0,08
мягкий	343—441	25—40	50	—	176	Литой	588—686	—	—	—	—	—	—	—
твердый	539—637	3—9	—	—	216	882	980	—	—	—	—	—	—	—
МН19:														
твердый	490—784	3—5	—	392—588	—	—	1176	0,03	—	—	0,001	0,00035	—	0,1
мягкий	294—392	35—40	76	—	При $100 \cdot 10^6$ циклов 118	—	686	—	—	—	—	—	—	—
Нейзильбер МНЦ15—20:														
мягкий	372—441	35—50	—	137	При $100 \cdot 10^6$ циклов 118—137	—	686	—	—	—	—	—	—	—
твердый	588—784	2—4	5,2	—	—	—	1568—1715	—	—	—	—	—	—	—
литой	—	—	32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Свинцовый нейзильбер МНЦС16—29—1,8:														
мягкий	343—441	40—45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
твердый	588—686	2—4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Куниаль А:														
МНА13—3:						490	—	—	—	—	—	—	—	—
мягкий	372—461	10—15	—	—	—	—	2548	—	—	—	—	—	—	—
твердый	882—931	2—5	—	—	—									
Куниаль Б:						1176	—	—	—	—	—	—	—	—
МНА6—1,5:						—	2058	—	—	—	—	—	—	—
мягкий	343—441	28—40	80	78,4		—	862	—	—	—	—	—	—	—
твердый	637—735	4—7	50	—		—	—	—	—	—	—	—	—	—
МН95—5:						—	—	—	—	—	—	—	—	—
мягкий	245—294	30—50	70	196		—	—	—	0,01	—	—	—	—	—
твердый	441—490	2—6	—	343—392		—	882—980HV	—	—	—	—	—	—	—
МНЖ5—1:						—	372	—	—	—	—	—	—	—
мягкий	216—255	50—60	—	—										
твердый	390—490	5—10	—	—										
МН16:														
мягкий	245—294	44—50	40	98—196										
твердый	490	2—8	—	294—392										

с понижением температуры. Поэтому куниали относятся к дисперсионно-твердеющим сплавам. Они упрочняются после термической обработки, заключающейся в закалке с 900—1000 °С в воду и старении при 500—600 °С, 1—2 ч. При старении происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием двух- или трехфазной структуры с мелкодисперсными выделениями θ-фазы, представляющей собой соединение NiAl, или одновременно θ- и β-фазы, представляющей собой соединение $NiAl_2$.

К конструкционным медно-никелевым сплавам также относятся сплавы МН95—5 и МНЖ5—1, обладающие высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью, они не склонны к коррозионному растрескиванию.

Физические и механические свойства, технологические характеристики, области применения и полуфабрикаты медно-никелевых сплавов приведены в табл. 53—57.

Были предложены новые группы дисперсионно-твердеющих сплавов на основе системы Cu—Ni. Это сплавы для токоведущих пружин, работающих при высоких температурах (до 250 °С) состава: 1) Ni (15—20) %, Cr (3,5—4) %, Mn (2,1—3) %, V (0,01—0,5) %, Ce (0,01—0,05) %, остальное Cu; после термической обработки (закалка + старение) сплав имеет следующие свойства: 370HV; $\sigma_в$ = 1250 МПа; δ = 3 %; 2) Ni (4—4,5) %, Si (0,8—1,2) %, Cr (0,4—0,6) %, Al (0,7—1,1) %, Mg (0,3—0,6) %, Li (0,005—0,04) %; остальное Cu; после термической обработки (закалка + старение): 310 HV; $\sigma_в$ = 1000 МПа; $\sigma_{0,2}$ = 930 МПа; E = = 130 ГПа; $\sigma_{упр}$ = 825 МПа; электропроводность составляет 20 % электропроводности меди.

Разработана принципиально новая группа сплавов типа нейзильбер с двухфазной (α + β) структурой, например сплав Cu—15 % Ni — 37,5 % Zn. К этим сплавам применяется обработка «микродуплекс», заключающаяся в закалке с последующей холодной деформацией с заданной степенью обжатия, определяющей возможность прохождения рекристаллизации при старении с одновременным выделением β-фазы.

55. Механические свойства медно-никелевых сплавов при низких температурах [11, 17, 18]

Температура, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	ψ, %
Мельхиор МН19				
20	354	190	26	78
—10	386	197	28	77
—40	410	199	29	77
—80	423	200	29	76
—120	455	200	28	75
—180	506	201	36	72
Нейзильбер МНЦ15—20				
Холоднокатаный				
20	507	476	21,5	54,3
—183	643	553	35,5	62,6
Отожженный				
20	446	203	46,8	62,3
—183	572	263	56,8	69,5
Куниаль Б МНА6—1,5				
20	256	78	42	80
—10	341	94	40	80
—40	383	111	41	80
—80	394	113	43	79
—120	423	103	44	82
—180	462	158	49	82
Термообработанный (закалка + старение)				
20	625	—	24	50
—10	687	377	22	48
—40	711	423	25	57
—80	692	354	23	57
—120	740	435	26	63
—180	735	377	26	67

56. Плоский прокат из медно-никелевых сплавов [11, 18, 23]

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Полоса горячекатаная, холоднокатаная (ГОСТ 5063—73)		
Толщина 0,5—20; ширина 40—600; длина 400—2000		
МНЖМЦ30—1—1:		
мягкий	294	30
твердый	392	3
МН19:		
мягкий	294	30
твердый	392	3
МНЦ15—20:		
мягкий	343	35
твердый	539	1
особо твердый	637	1
Лента (ГОСТ 5187—70)		
Толщина 0,1—2; ширина 6—300; длина 5000		
МН19:		
мягкий	294	25
твердый	392	2,5
МНЦ15—20:		
мягкий	343	30
полутвердый	441—539	4
твердый	539—686	2
особо твердый	686	—
Полосы		
МНЦС16—29—1,8:		
мягкий	—	—
полутвердый	—	—
твердый	—	—
Куниаль Б:		
МНА6—1,5		
термообработанный	539	3
Листы		
Толщина 4,5—22		
МНЖ5—1:		
холоднокатаный	245	30
мягкий		
горячекатаный	245	30

57. Круглый прокат из медно-никелевых сплавов [11, 18, 23]

Полуфабрикат (размеры, мм)	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Трубы (ГОСТ 10092—75)		
Диаметр 10—35; толщина стенок 0,8—4		
МНЖМц30—1—1:		
тянутый мягкий	372	23
полутвердый	490	10
Трубы (ГОСТ 17217—79)		
Диаметр 6—275; толщина стенок 1—60		
МНЖ5—1:		
тянутый	255	30
прессованный	225	25
Трубы		
Диаметр 25—168		
МН95:		
мягкий	216	33
твердый	284	—
Прутки		
МНЦ15—20 тянутый и катаный мягкий диаметром:		
6—50	294	30
6—22	441	5
23—30	392	7
32—50	343	8
Куниаль А диаметром 60:		
МНА13—3:		
прессованный	686	7
МНЖ5—1:		
прессованный	196	30
Проволока (ГОСТ 5220—78)		
Диаметр 0,1—0,5		
МНЦ15—20:		
мягкий	343	20
полутвердый	441	4
твердый	686—1078	—
Проволока твердая		
плющенная	637	1
твердая	539—784	—

Выделение β-фазы облегчает зарождение рекристаллизованных зерен вследствие обеднения пересыщенного твердого раствора и тормозит их рост благодаря снижению энергии их границ. В результате такой обработки образуются сверхмелкие зерна и мельчайшие выделения второй фазы, что приводит к росту механических свойств, особенно предела усталости, а при старении приобретается сверхпластичность [13].

Список литературы

1. **Бобро Ю. Г.** Легированные чугуны. М.: Металлургия, 1976. 288 с.
2. **Бунин К. П., Малиночка Я. Н., Таран Ю. Н.** Основы металлографии чугуна. М.: Металлургия, 1969. 416 с.
3. **Воробьев Ю. А., Рябов С. П.** Повышение точности отливок. ЦП НТО Машпром. М.: Машиностроение, 1980. 32 с.
4. **Высококачественные** чугуны для отливок/В. С. Шумихин, В. П. Кутузов, А. И. Храмченков и др. М.: Машиностроение, 1982. 222 с.
5. **Гини Э. Ч.** К вопросу о пластических свойствах серого чугуна//Машины и автоматизация литейного производства. Труды МВТУ № 187. М.: 1975. С. 102—129.
6. **Гиршович Н. Г.** Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М.—Л.: Машиностроение, 1966. 562 с.
7. **Двойные** и многокомпонентные системы на основе меди: Справочник/М. Е. Дриц, Н. Р. Бочвар, Л. С. Гузей и др. М.: Наука, 1979. 248 с.
8. **Колотило Д. М., Челядинов Л. М.,** Углеродные литейные формы. Киев: Наукова думка, 1971. 163 с.
9. **Криштал М. К., Титенский Э. Г.** Свойства ковкого чугуна. М.: Металлургия, 1967. 231 с.
10. **Мальцев М. В.** Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1970. 364 с.
11. **Машиностроительные** материалы: Справочник/Под ред. В. М. Раскатова. М.: Машиностроение, 1980. 512 с.
12. **Отливки** из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом/Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко и др. Киев: Наукова думка, 1986. 248 с.
13. **Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г.** Пружинные сплавы цветных металлов. М.: Металлургия, 1984. 364 с.
14. **Пивоварский Е.** Высококачественный чугун. Т. 1. М.: Металлургия, 1965. 650 с.
15. **Прейскурант № 25-01.** Оптовые цены на отливки, поковки и горячие штамповки. М.: Прейскурантиздат, 1981. 463 с.
16. **Розенберг В. М., Иеднинская З. М., Черникова А. В.**//Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Труды института Гипроцветметобработка. М.: Металлургия, 1978. Вып. 55. С. 47—49.
17. **Рубин М. Б., Бахарева В. Е.** Подшипники в судовой технике. Л.: Судостроение, 1987. 344 с.
18. **Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.** Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургия, 1974. 488 с.
19. **Солнцев Л. А., Зайденберг А. М., Малый А. Ф.** Получение чугунов повышенной прочности. Харьков: Вища школа, 1986. 152 с.
20. **Справочник** по чугунному литью/Под ред. Н. Г. Гиршовича, Л.: Машиностроение, 1978. 758 с.
21. **Федюкин В. К.** Термоциклическая обработка сталей и чугунов. Л.: Ленинградский университет, 1977. 144 с.
22. **Чугунное** литье в станкостроении/Г. И. Клецкин, Г. Г. Абрамов, И. М. Воловик и др. М.: Машиностроение, 1975. 320 с.
23. **Шпичинецкий Г. Е., Шпичинецкий Е. С.** Медь, никель и их сплавы//Справочник металлиста. М.: Машиностроение. Т. 2, 1976. С. 415—453.
24. **Шпагин А. И.** Антифрикционные сплавы. М.: Металлургиздат, 1956. 320 с.

Глава III МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

1. ПРОЦЕСС ИЗНАШИВАНИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Повышение надежности узлов трения машин — важная проблема современного машиностроения. Самая совершенная по замыслу и конструкции машина может оказаться неработоспособной из-за неудовлетворительного функционирования узлов трения — подшипников, подпятников, шарниров, направляющих, кулачковых механизмов, тормозных устройств и т. п. Трение и изнашивание при контакте деталей машин и инструмента с обрабатываемым материалом и внешней средой (почвой, дорогой, рудой, углем, строительными материалами, металлами и сплавами и т. п.) определяют эффективность выполнения ими рабочих функций.

Явления и процессы, происходящие в зоне взаимодействия поверхностей при трении и изнашивании в присутствии различных жидких и газообразных сред, многообразны и сложны [69]. На участках фактического контакта шероховатых поверхностей действуют громадные удельные нагрузки, определяемые в пределе твердостью материалов, находящихся в контакте. При граничной смазке давления перераспределяются незначительно. Лишь при условиях гидродинамической или эластогидродинамической смазки нагрузка в трущемся сопряжении распределяется более равномерно по номинальной площади контакта.

В зоне контакта вершин поверхностных неровностей при трении неизбежны громадные деформации сдвига и при тяжелых режимах трения (высокие скорости и нагрузки) возникают температуры (температурные вспышки), могущие достигать точки плавления материалов, находящихся в контакте. В результате материал поверхностных неровностей, непосредственно участвующих в трении, а также оксидные и адсорбированные пленки и «зажатая» между поверхностями смазка находятся в своеобразных миниатюрных химических реакторах с экстремальными параметрами (по нагрузкам, температурам и сдвиговым деформациям). В этих короткоживущих (при больших скоростях скольжения) микрореакторах осуществляются различные физические и химические процессы в весьма неравновесных условиях с образованием новых веществ и состояний материалов трущихся тел.

Проблемы трения, изнашивания и смазки сложны. В них тесно переплелись интересы разных фундаментальных и прикладных наук: механики, физики, физической химии, химии, материаловедения, теории прочности и пластичности и т. п. Процессы на участках фактического контакта, в том числе и разрушения, приводящие к отделению частиц, происходят при весьма быстро изменяющихся неравновесных условиях.

В соответствии с ГОСТ 27674—88 изнашивание классифицируется как процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела. В результате изнашивания возникает износ, определяемый в абсолютных или относительных единицах. В абсолютных единицах износ определяется по потере массы путем взвешивания, уменьшению линейных размеров, изменению объема детали. Износ, отнесенный к пути трения, объему выполненной работы, работе трения и т. д., является показателем интенсивности изнашивания. Износ, отнесенный ко времени процесса трения, определяет скорость изнашивания.

Различают износ при трении без смазки, граничной смазке и при наличии абразива. Износ по характеру деформирования поверхностей трения подразделяют на износ при упругом контакте, упругопластическом контакте и при микрорезании.

Работа трущегося сопряжения характеризуется тремя стадиями процесса изнашивания: приработкой, установившимся процессом изнашивания и периодом катастрофического износа.

Процесс приработки занимает короткий период времени и характеризуется повышенными активацией поверхностей, интенсивностью изнашивания и тепловыделения, что приводит к физико-химическим изменениям поверхностных слоев и созданию равновесной шероховатости. В результате приработки в системе вырабатывается комплекс выгодных свойств, определяющий максимальную несущую способность трущегося сопряжения.

Виды и характеристики изнашивания определены ГОСТ 23.001—77. Различают: механическое изнашивание, происходящее в результате механических воздействий; коррозионно-механическое, когда помимо механических действуют химические или электрические воздействия, и абразивное. Абразивное (механическое) изнашивание происходит в результате режущего или царапающего действия твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Разновидностями механического изнашивания являются также усталостное изнашивание, начальные стадии фреттинг-коррозии и др. При воздействии жидкой или газовой среды и абразива различают гидроабразивное или газоабразивное изнашивание, а без определяющего действия абразивных частиц — эрозионное изнашивание.

Нередко детали машин работают в условиях кавитации. Изнашивание в этом случае, получившее название кавитационного [36], происходит при захлопывании вблизи поверхности детали пузырьков газа или пара (каверн), что создает местное повышение давления или температуры, приводящее к отделению частиц износа и разрушению поверхностных слоев.

Большое количество трибосопряжений работает в условиях токосъема. В этом случае возникает электроэрозионное изнашивание поверхностей трения в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.

Закономерности процесса изнашивания зависят от условий эксплуатации конкретных трущихся узлов, режимов трения, материалов трущихся поверхностей, конструктивного исполнения и др.

Наибольший урон сельскохозяйственным машинам, горнодобывающему оборудованию, дорожностроительным машинам и т. д. наносит абразивное (и коррозионно-абразивное) изнашивание. Закономерности абразивного изнашивания (рис. 1) установлены фундаментальными исследованиями М. М. Хрущова и М. А. Бабичева [91, 92]. От естественного абразива (главным образом частиц SiO_2) с твердостью HV 10 000 МПа избавиться нельзя, можно только защищаться от него, используя уплотнения и, что более эффективно, применяя для трущихся сопряжений материалы с высокой твердостью (желательно превышающей твердость абразива). Как правило, такие материалы хрупки и непригодны для изготовления динамически нагруженных деталей машин. Решением этой проблемы является нанесение износостойких слоев. Повышение износостойкости в некоторых случаях достигается термической обработкой стальных деталей (объемной или поверхностной), различными химико-термическими методами модифицирования поверхностных слоев, дополнительным наклепом поверхностных слоев. Эффективно применение высоколегированных сталей (содержащих большое количество твердых карбидов), твердых сплавов, керамических материалов (например, корундовой керамики).

Одной из основных причин износа металлических материалов является схватывание трущихся поверхностей (по существу, твердофазная сварка). Среди различных предположений о механизме образования химических (или физических) связей между твердыми поверхностями наиболее широкое признание получили представления о необходимости преодоления для образования прочных связей между контактирующими поверхностями некоторого энергетического порога (энергии активации) [72, 73].

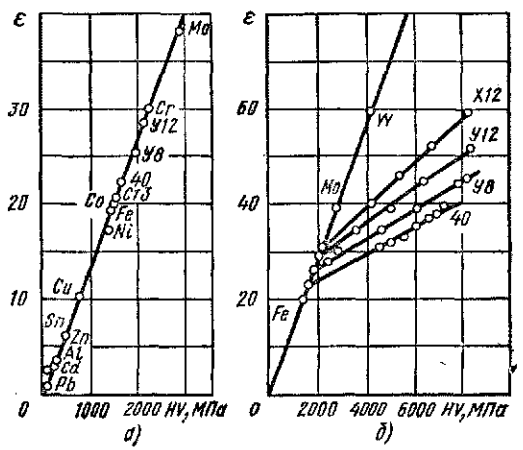


Рис. 1. Зависимости относительной износостойкости ε при абразивном изнашивании (испытания при трении о шлифовальную шкурку) от твердости:

а — чистых металлов и сталей в отожженном состоянии; *б* — термически обработанных сталей

Явление схватывания при неблагоприятном соотношении механических свойств, находящихся в контакте твердых тел, приводит к образованию наростов («узлов схватывания»), задиров, заеданию, катастрофическому повреждению поверхностей трения и изнашиванию. Оно лежит также в основе так называемой фреттинг-коррозии [22] сопряжений, работающих при вибрации или относительном перемещении поверхностей с малой амплитудой (первая стадия представляет собой микросхватывание трущихся поверхностей).

Средством борьбы со схватыванием является применение смазочных материалов (жидких, пластичных и твердых). Однако смазочные пленки могут разрушаться и в этом случае неизбежен непосредственный контакт чистых (ювенильных) поверхностей.

Для предотвращения схватывания или снижения вызываемых повреждений до приемлемого уровня осуществляют следующие мероприятия:

а) для трущихся пар выбирают сочетание материалов с минимальной способностью к схватыванию;

б) легируют металлы с целью снижения способности к схватыванию и повышения противозадирных свойств;

в) повышают твердость сталей термической обработкой (закалкой);

г) изменяют состав и состояние поверхностных слоев химико-термической (цементация, азотирование, сульфидирование и т. д.) и поверхностной термической (закалка ТВЧ, лазерная и электронно-лучевая закалка) обработкой;

д) на поверхности трения наносят пленки мягких металлов и сплавов (индия, кадмия, олова, серебра, меди, латуни и т. п.);

е) вводят мягкие составляющие (свинец, олово) в антифрикционные сплавы (свинцовистые бронзы, алюминиево-оловянные сплавы);

ж) используют материалы, выполняющие функции твердой смазки (графит, дисульфид молибдена и другие халькогениды *d*-переходных металлов V—VI групп периодической системы элементов, фторопласт-4 и т. п.), или наносят соответствующие покрытия;

з) в пористую металлическую основу вводят жидкие или пластичные смазки (пористые самосмазывающиеся подшипники);

и) для изготовления деталей трущихся сопряжений применяют материалы, обладающие относительно материала контртела низкой адгезионной способностью (полимерные материалы, естественная и модифицированная древесина, углеграфитовые антифрикци-

1. Виды повреждений подшипников скольжения [12]

Жидкостный режим трения	Смешанный или граничный режим трения	Без смазки
Усталостные повреждения (трещины, выкрашивание, разрушения)	Усталостные повреждения (трещины, выкрашивание, разрушения)	Износ вследствие схватывания, сопровождаемый вырывами и переносом металла с одной поверхности на другую
Износ в результате абразивного воздействия частиц, попадающих со смазкой	Износ в результате абразивного воздействия частиц и схватывания на отдельных участках поверхностей	Образование глубоких и широких борозд, приводящих к задиру трущихся поверхностей
Кавитационные повреждения вкладышей (местные и общие по всей или большей части поверхности)	Образование глубоких и широких борозд, приводящих к задиру трущихся поверхностей	
Коррозионные повреждения (общие или отдельных структурных составляющих)		Износ из-за смятия (пластической деформации трущихся поверхностей)

онные материалы, рубин и другие оксидные керамики, алмаз).

Эффективность действия смазочных материалов (жидких и пластичных) в предотвращении проявления схватывания трущихся поверхностей может быть повышена: введением в смазки поверхностно-активных, химически активных и полимерообразующих присадок, способствующих образованию на поверхностях прочных защитных пленок непосредственно в процессе трения; введением в смазки тонкодисперсных твердых веществ (графита, халькогенидов, металлов, полимеров и др.), предотвращающих непосредственный контакт поверхностей трения; обеспечением конструктивными мерами гидродинамических или гидростатических условий трения (поверхности при этом разделены слоем смазочного материала). Последнее относится также и к случаю газовой (газодинамической и газостатической) смазки. В некоторых случаях проявление схватывания может быть устранено применением газовых химически активных сред, образующих или способствующих образованию на поверхностях защитных пленок, препятствующих схватыванию (в значительной мере такую роль выполняет кислород воздуха).

Закономерности изнашивания некоторых трибосистем рассмотрим на примере подшипников скольжения коленчатых валов различных двигателей. Износ и повреждаемость таких подшипников определяются с учетом режима и рабочих температур (табл. 1).

В условиях жидкостной смазки интенсивность изнашивания незначительна и износ большей частью происходит вследствие попадания абразивных частиц. Для трущихся узлов характерен режим смешанного трения, когда имеются участки как жидкостной, так и граничной смазки. Такой режим часто возникает вследствие повышения давления и температуры, а иногда в связи с изменением геометрической формы подшипника в результате его износа, что, в частности, наблюдается у безвазорных подшипников скольжения грузовых вагонов.

Несущая способность таких подшипников с учетом износа баббитового слоя и условий работы определяется по критериям толщины масляного слоя, давления и произведения pv [11]. Результаты расчетов позволяют установить допустимые нормы эксплуатации вагонных подшипников по износу баббитового слоя (И), определяемому по изменению его толщины в зависимости от нагрузки, скорости и первоначального диаметрального зазора Δ.

При обнаружении повышенного износа шеек валов и подшипников и определении с помощью расчетов и соответствующих экспериментов наличия смешанного режима смазки изыскивают пути перевода на жидкостной режим смазки. В соответствии с диаграммой Герси—Штрибека (рис. 2) образование такого режима (участок *3*) возможно вследствие повышения вязкости смазки, угловой скорости и снижения давления. Смягчить условия работы трибосистемы иногда удается с помощью конструктивных изменений трущихся деталей. Например, бесканавочная конструкция подшипников коленчатого вала дизелей тепловозов позволила перевести работу таких подшипников в жидкостный режим смазки, устранить случаи задиров шеек коленчатых валов и существенно поднять долговечность трущегося узла [30].

В тех случаях, когда не удается перевести работу трибосистемы в условия жидкостной смазки, приходится изыскивать пути обеспечения устойчивой работы и при смешанном режиме смазки. Это достигается подбором смазочных материалов (и присадок к ним), антифрикционных материалов и материалов цапф. При выборе смазочного материала надо ориентироваться на смазки, у которых переход из гидродинамического режима в режим нарушения сплошности происходит при более высокой температуре. Последнее достигается введением в смазку определенного количества и состава поверхностно-активных веществ (присадок), а также добавок различных металлических частиц (металлоплакирующие смазки), позволяющих в определенных условиях реализовать эффект избирательного переноса, и добавок других частиц, увеличивающих при контактировании поверхностей в режиме смешанной смазки долю участков с твердой смазкой. Области рационального использования различных антифрикционных сплавов и материалов цапф представлены в табл. 2 [12]. Рекомендации по использованию различных металлов составлены с учетом технологических и конструктивных факторов. При этом учитывались показатели совместимости трущихся поверхностей.

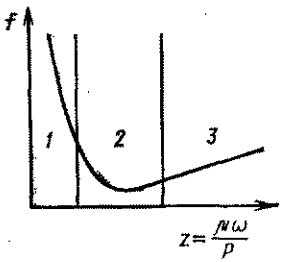


Рис. 2. Изменение коэффициента трения от комплексного параметра Зоммерфельда $z = \mu\omega/P$ (кривая Герси—Штрибека):
1 — зона граничной смазки; *2* — зона полужидкостной смазки; *3* — зона жидкостной смазки

В ряде случаев осуществляется работа подшипников в режиме трения без смазки. Это диктуется соответствующими конструктивными параметрами агрегатов и условиями работы (вакуум, высокий уровень нагрева и др.). Иногда трение без смазки является следствием аварийного состояния трибосистемы, возникающего при резком увеличении нагрузки, прекращении поступления смазки и по другим причинам. При трении без смазки сравнительно устойчивая работа достигается использованием антифрикционных материалов, содержащих твердые смазки и мягкие структурные составляющие и обладающих свойствами самосмазывания (например, металлофторопластового материала, алюминиево-оловянного сплава и т. п.).

2. ИЗНОСОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ

Материалы высокой твердости используются главным образом в трибосистемах, подверженных абразивному изнашиванию. Основным показателем, определяющим износостойкость при изнашивании закрепленным абразивом, имеющим твердость, намного превышающую твердость изнашиваемого материала, является твердость (микро-

2. Области рационального применения антифрикционных сплавов для подшипников скольжения [12]

Сплавы	Условия работы			Рекомендуемые технологические и конструктивные факторы			Способ крепления сплава с корпусом
	p, МПа	v, м/с	t масла, °С	Толщина слоя сплава, мм	Точность пригонки подшипника, мм	Твердость шейки НВ, МПа	
Баббиты всех марок	1—5	2—5	50	3,0	Десятые доли	—	Механический (в пазах)
	1—5	5—10	60	3,0	То же	—	Металлургический (приглуживание)
Баббиты: Б83, Б16, БН, БТ, Б6, БС1	5—10	5—10	75	3,0	Сотые доли	—	То же
БК2, СОС6-6, БС2, Б92	5—12	10	80	1,0	То же	—	»
БК2, Б92	8—15	15	100	0,1—0,3	Тысячные доли	—	»
Цинковые, нанесенные на сталь	15—25	15	100	1,0	То же	3000	Металлургический (прокатка или заливка)
Алюминиевые без мягкой составляющей, нанесенные на сталь	15—25	15	100	0,5	»	3000	Металлургический (прокатка)
Цельнолитые алюминиевые с мягкой фазой	15—20	15	100	—	»	2000	—
Свинцовистая бронза, нанесенная на сталь	15—25	15	110	0,5	»	4000	Металлургический (заливка или напекание)
Алюминиевые с мягкой фазой, нанесенные на сталь	20—30	20	120	0,5	»	3000	Металлургический (прокатка или заливка)

твердость) поверхностного слоя [91, 92]. Определенная корреляция установлена и между износостойкостью материалов и модулем упругости. Если твердость материала близка или тем более намного превышает твердость абразива, показатели износостойкости резко возрастают. Условия, при которых в реальных случаях происходит абразивное изнашивание, разнообразны. Все это не позволяет однозначно ранжировать материалы по износостойкости (как это сделано, например, для прочности).

Сведений об износостойкости материалов высокой твердости, испытанных по какой-либо единой методике, нет. Приведенные в опубликованных работах данные, полученные по различным методикам и при несопоставимых условиях испытаний, не могут дать объективной оценки износостойкости твердых материалов. К тому же и свойства таких материалов зависят от технологии их получения, пористости и т. п.

Наиболее объективную информацию об относительной износостойкости рассматриваемых материалов, твердость которых существенно выше твердости основного природного абразива (оксида кремния), дают значения твердости и модуля упругости, указанные далее в таблицах. В значительной мере от этих характеристик зависят и противозадирные свойства материалов [73], важные для деталей машин, работающих в контакте не с абразивом, а друг с другом.

Из простых веществ высокой твердостью обладают лишь алмаз (углерод) и бор. Подавляющее большинство веществ с высокой твердостью — тугоплавкие химические соединения [51, 63, 65, 66, 101].

Представляют интерес металлоподобные карбиды, нитриды, бориды, силициды тугоплавких d-переходных металлов IV—VI групп Периодической системы. Большие перспективы у неметаллических бескислородных тугоплавких соединений — карбидов и нитридов бора и кремния, а также у твердых тугоплавких оксидов (алюминия, циркония и др.), ситаллов, нитрида алюминия, интерметаллидов и других соединений. Полезным комплексом триботехнических свойств должны также обладать соединения f-переходных металлов (лантаноидов и актиноидов) с легкими элементами первых двух периодов (B, C, N, O, Si). Однако эти металлы более дороги и дефицитны, чем металлы «большой девятки».

Сложные тугоплавкие твердые соединения, содержащие несколько металлов и (или) металлоидов, изучены недостаточно и вследствие этого развитие материаловедения тугоплавких соединений требует серьезного внимания.

Из-за высокой хрупкости твердых соединений и трудности их обработки изготовление деталей из тугоплавких соединений в большинстве случаев нецелесообразно или экономически невыгодно. Основная область их применения — твердые составляющие композиционных материалов (например, твердых сплавов) и покрытия, наносимые самыми различными способами.

Сверхтвердые материалы. К сверхтвердым материалам (микротвердость которых превышает 50 000 МПа) относятся кубические модификации углерода (алмаз) и нитрида бора, свойства которых приведены в табл. 3 и 4.

Синтетические алмазы в виде порошков и плотных поликристаллических образований типа баллас и карбонадо используют для приготовления абразивного инструмента и абразивных паст. Баллас и карбонадо применяют для изготовления волок, резцов, выглаживателей, а в дробленом виде — для производства абразивного инструмента. Спеканием смеси микропорошков синтетических и природных алмазов получают плотные поликристаллические образования алмаза (в виде цилиндриков диаметром 3—4,5 мм и высотой 4 мм) с мелкозернистой структурой — СВ и дисмит. Прочность их при одноосном сжатии достигает 5000 МПа. Алмазы марки СВ предназначены для буровых коронок и долот, а также пил, применяемых при резке неметаллических материалов. Дисмит применяют для изготовления горнобурового инструмента, а также режущего инструмента (резцов, сверл и др.), используемого при обработке цветных металлов и сплавов, пластмасс, стеклопластиков.

Кубический нитрид бора получают только синтетическим путем из гексагональной модификации [101]. Приме-

3. Характеристики алмаза и кубического нитрида бора [66, 101]

Характеристика	Алмаз	Кубический нитрид бора
Кристаллическая решетка	Кубическая	Кубическая
Период решетки, нм	0,35675	0,36165
Минимальное расстояние между атомами, нм	0,154	0,156
Плотность, т/м³:		
теоретическая	3,51	3,48
пикнометрическая	3,49—3,54	3,44—3,49
Теплостойкость, °С	850	1200
Микротвердость по Кнупу, МПа	150 000	60 000
Режущая способность при шлифовании корунда порошком зернистостью 10/7	3,2	0,8
Модуль Юнга, МПа	$9 \cdot 10^5$	$(8{,}09—9{,}73) \cdot 10^5$

няется главным образом для изготовления абразивного инструмента. По твердости кубический нитрид бора уступает алмазу, но существенно превосходит его по теплостойкости. Кроме того, он значительно менее адгезионно и химически активен по отношению к материалам на основе железа, никеля и кобальта [17]. В США кубический нитрид бора выпускается под названием боразон, в СССР — эльбор и кубонит [101]. Марки эльбора и кубонита: ЛО и КО обычной прочности, ЛР и КР повышенной. Разновидности поликристаллического материала (созданные на основе эльбора, кубонита, вюрцитоподобного и гексагонального нитрида бора) — эльбор-Р, гексанит-Р, исмит, ПНТБ, композит и др. — выпускаются в виде пластин различной формы и цилиндрических вставок массой от 0,5 кар. до нескольких каратов. Изготовляют из них металлорежущий инструмент, применяемый при обработке труднообрабатываемых закаленных сталей, чугунов и сплавов с твердостью $HRC > 40$. Стойкость такого инструмента в 10—20 раз больше стойкости твердосплавного (при этом обеспечивается повышение производительности в 2—4 раза).

К композиционным сверхтвердым материалам относится «славутич», не уступающий природным алмазам по износостойкости, но значительно превышающий их по прочности [101]. Изготовляют его в виде цилиндров и пластин различных размеров (до 25 мм). Применяют славутич для буровых долот, кругов (карандашей, брусков, роликов) и т. п.

4. Износостойкость алмаза, поликристаллических твердых материалов и твердых сплавов при трении о прослойку карбида бора № 8 (испытания по ГОСТ 5744—85) [93]

Материал	Основа материала	Износостойкость, км/мм
Алмаз — монокристалл (природный)	Алмаз	50,0
Поликристаллические твердые материалы:		
СВСП	»	10,0
СКМ	»	10,0
Исмит	BN	10,0
СВА	Алмаз	7,7
АСПК	»	6,6
Гексанит-Р	BN	2,5
Композит-05	BN	0,2
ВК6-ОМ	WC	0,3
ВК6	WC	0,2

5. Структура и свойства металлоподобных карбидов переходных металлов [63, 67, 101]

Карбид	Кристаллическая решетка	ρ, т/м³	$T_{пл}$ (разл.), °С	H, МПа	$\rho \cdot 10^8$, Ом·м	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	$-\Delta G^\circ_{298}$, кДж·моль$^{-1}$
TiC	Кубическая	4,94	3067	29 000	52,2	4,94±0,1	205,55
$ZrC_{0,97}$	»	6,56	3420	26 000	50,0	4,01±0,8	193,26
$HfC_{0,99}$	»	12,76	3828	27 000	45,0	4,8±0,1	205,61
$VC_{0,97}$	»	5,71	2648	29 000	65,0	4,95	99,02
$NbC_{0,99}$	»	7,80	3600	24 000	51,1	4,79±0,09	137,59
$TaC_{0,98}$	»	14,50	3983	25 000	42,1	5,5±0,11	143,30
$Cr_{23}C_6$	»	6,96	1500	9 700	127	—	600,43
Cr_7C_3	Гексагональная	6,90	1780	13 800	109	—	209,75
Cr_3C_2	Ромбическая	6,60	1810	13 300	75	3,698	98,90
Mo_2C	Гексагональная	9,18	2400	15 000	71	5,307	46,93
WC	То же	15,67	2776	21 000	19,2	7,37±0,15	38,79
W_2C	компактная	17,23	2700	19 900	80,0	—	—

Металлоподобные соединения. Высокой твердостью и износостойкостью обладают металлоподобные карбиды переходных металлов с незаполненными *d*-электронными оболочками [51, 63, 65, 66, 67, 101]. Они представляют собой фазы внедрения или близкие к ним структуры, в которых атомы углерода занимают октаэдрические или тетраэдрические пустоты плотноупакованных металлических подрешеток (табл. 5).

Порошки карбидов применяют для обработки металлов. Некоторые детали из карбидов изготовляют методами порошковой металлургии (прессование с последующим спеканием или горячее прессование). Карбиды широко используют в качестве основного компонента твердых сплавов, наплавочных материалов, поверхностных покрытий (наносимых газофазным, детонационным и другими методами). Карбиды служат в качестве упрочняющей фазы легированных сталей и поверхностных слоев, образующихся при цементации, нитроцементации, карбонитрации и др. Упрочняющая карбидная фаза образуется также при диффузионном насыщении углеродистых сталей активными карбидообразующими элементами (например, хромом), а также при контактном эвтектическом плавлении с углеродом (графитом) сталей и никелевых сплавов, содержащих карбидообразующие легирующие элементы [68].

Эффективным новым технологическим способом получения карбидов, а также и других тугоплавких соединений является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

Высоким сопротивлением абразивному изнашиванию обладают металлоподобные *нитриды* переходных металлов с незаполненными *d*- и *f*-оболочками (табл. 6) [1, 51, 63, 64, 65, 67, 101].

Металлоподобные нитриды — металлические проводники с высокой теплопроводностью — представляют собой фазы внедрения с кубической и гексагональной структурами. Пластичность их выше, чем других тугоплавких соединений (карбидов, боридов, силицидов). Характерным для металлоподобных нитридов является широкая

6. Структура и свойства металлоподобных нитридов [63, 67, 101]

Нитрид	Кристаллическая решетка	Область гомогенности, ат. доли N, %	ρ, т/м³	$T_{пл}$, °С	H, МПа	$\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	$-\Delta G^\circ_{298}$, кДж·моль$^{-1}$
TiN	ГЦК	37,5—50,0	5,43	3200	20 000	25	3,9—5,0	294,34
ZrN	ГЦК	46—50	7,09	2980	18 500	21	3,0—4,5	342,96
HfN	ГЦК	—	13,84	3000	21 500	33	4,8	345,45
V_2N	ГПУ	25—33	5,97	—	19 000	123	—	—
VN	ГЦК	41—50	6,04	2050	15 200	85	3,5—4,6	192,01
Nb_2N	ГПУ	28,5—33,5	8,23	2420	17 200	142	—	—
NbN	ГПУ	50,0—50,6	8,40	2300	16 500	78	4,0—4,836	194,83
Ta_2N	ГПУ	28,5—31,0	15,81	2050	12 200	263	—	242,36
TaN	ГПУ	44,5—47,3	15,46	3087	10 800	128	5,758	223,85
Cr_2N	ГПУ	32—33	6,51	1650	15 700	84	3,10	—
CrN	ГЦК	—	6,14	1500	10 930	640	3,198	—
Mo_2N	ГЦК	32—33	9,44	895	6 300	20	—	—
WN	ГЦК	—	—	Разлагается при $T >$ > 700 °С	—	—	—	—

область гомогенности. Применяются в виде упрочнителей пластичной металлической матрицы в композиционных материалах, а также в виде покрытий, наносимых газофазными и вакуумными ионно-плазменными методами. Твердость нитридных покрытий, получаемых этими способами, существенно превышает твердость компактных материалов. Создаются твердые сплавы с использованием нитридов в качестве твердой составляющей.

Высокой твердостью и износостойкостью обладают *бориды* переходных металлов IV—VI групп Периодической системы элементов (табл. 7) и редкоземельных металлов.

Структура низших боридов (богатых металлом) определяется металлической подрешеткой. В высших боридах (богатых бором) структуру определяют атомы бора, образующие жесткие подрешетки с ковалентными связями бор — бор в виде сеток.

Образование взаимных твердых растворов боридов, как правило, приводит к улучшению свойств по сравнению с исходными боридами. Например, двойной борид титана — хрома (твердый раствор TiB_2 и CrB_2) имеет более высокие твердость, износостойкость и жаростойкость, чем одинарные.

С ростом отношения бор/металл уменьшается удельное электрическое сопротивление и коэффициент термического расширения, увеличиваются температура плавления, микротвердость и улучшаются другие механические характеристики. Это свидетельствует об упрочнении межатомных связей в решетке при переходе от низших боридов к высшим.

При переходе от диборидов металлов IV группы к диборидам V и затем к VI группе температура плавления, микротвердость и модуль упругости уменьшаются, а коэффициент термического расширения увеличивается.

Бориды применяют для изготовления сопл установок, распыляющих жидкие металлы, лодочек, тиглей, в качестве защитных покрытий на тугоплавких металлах (бориды титана, циркония, ниобия и хрома), а также обладающих высокой износостойкостью покрытий и наплавок на сталях и чугунах (бориды титана, хрома и их сплавы).

7. Структура и свойства боридов [63, 67, 101]

Борид	Кристаллическая решетка	ρ, т/м³	$T_{пл}$, °С	H, МПа	$\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	$-\Delta G^\circ_{298}$, кДж·моль$^{-1}$
TiB_2	Гексагональная	4,45	2980	34 800	9,0	4,5	5,405	319,5
ZrB_2	»	6,17	3200	21 900	9,7	5,9	4,958	323,62
HfB_2	»	10,5	3250	29 000	10,6	6,3	4,797	325,50
VB_2	»	5,1	2400	28 000	22,7	7,9	3,404	—
Nb_3B_2	Ромбическая	7,6	2300	22 000	40,0	12,9	—	—
NbB_2	Гексагональная	6,97	3000	26 000	25,7	7,7	6,376	—
TaB_2	»	11,7	3037	26 000	32,5	7,9	6,867	188,25
Cr_2B	Ромбическая	6,5	1870	13 500	107,0	14,2	4,101	—
CrB	»	6,2	2100	21 000	45,5	12,3	3,606	77,04
CrB_2	Гексагональная	5,6	2200	22 000	30,0	10,5	4,503	123,23
MoB	Тетрагональная	8,8	2600	23 000—24 500	—	—	—	70,74
WB	»	16,0	2800—2920	—	—	—	—	71,11

Силициды переходных металлов IV—VI групп Периодической системы элементов [62, 63, 65, 67, 101] находят применение в самолетостроении, атомной, ракетной и космической технике, главным образом в качестве жаропрочных и жаростойких материалов, а также защитных покрытий. Свойства дисилицидов металлов «большой девятки» тугоплавких металлов приведены в табл. 8.

Наибольшее применение получил дисилицид молибдена благодаря тому, что он обладает хорошей электропроводностью и высокой стойкостью к окислению. Из него изготовляют элек-

8. Свойства дисилицидов [63, 67, 101]

Материал	Плотность, т/м³	$T_{пл}$, °С	H, МПа	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$ (в интервале 20—1000 °С)	$-\Delta G^\circ_{298}$, кДж·моль$^{-1}$
$TiSi_2$	4,13	1540	8 920	3,551	10,3	132,15
$ZrSi_2$	4,86	1700	10 630	2,599	8,37	149,36
$HfSi_2$	9,03	1750	9 120	—	—	225,94
VSi_2	4,66	1660	8 900—9 600	—	12,0	148,47
$NbSi_2$	5,66	2100	10 820	2,551	10,6 (20—1100 °С)	123,32
$TaSi_2$	9,1	2200	14 070	—	10,2	116,01
$CrSi_2$	5,0	1500	9 960—11 500	—	12,9 (20—700 °С)	98,77
$MoSi_2$	6,24	2030	12 000—13 500	4,405	8,3	118,49
WSi_2	9,25	2165	13 000—14 000	5,307	7,35	91,86

9. Свойства карбида кремния [63, 67, 101]

Модификация	ρ, т/м³	Твердость		Температура диссоциации, °С	α·10⁶, °С⁻¹	E·10⁻³, МПа	−ΔG°298, кДж·моль⁻¹
		по Моосу	Н, МПа				
Гексагональная	3,214	9,0—9,3	21 300—29 500	2780	4,2—4,7 (при 427 °С)	4,08	69,49
Кубическая	3,166	9,2—9,8	26 100—37 400	2830	3,8 (при 200 °С)	4,013—4,324	—

трические нагревательные элементы, эксплуатирующиеся на воздухе при температурах до 1600 °С.

Неметаллические бескислородные соединения. Карбид кремния SiC (или карборунд) представляет собой соединения кремния с углеродом [21, 63, 67, 101]. Кроме модификации с гексагональной кристаллической решеткой (α - SiC) имеется модификация с кубической структурой типа алмаза (β - SiC). Карбид кремния отличается высокой твердостью, теплопроводностью, огнеупорностью, специфическими электрическими и полупроводниковыми свойствами (табл. 9).

Карбид кремния химически стоек (на него действует только смесь азотной и плавиковой кислот, а также фосфорная кислота при температуре 230 °С). При нагреве в воздушной среде на поверхности образуется тонкий слой оксида кремния SiO_2, защищающий карбид кремния от дальнейшего окисления.

Из карбида кремния изготовляют изделия методами керамической или порошковой технологии. Известны пористые материалы, в которых зерна карбида кремния сцементированы кремнеземистыми, глиноземистыми и нитридкремниевыми связками. Беспористые поликристаллические материалы, получаемые горячим прессованием или реакционным спеканием, отличаются от пористых более высокими механическими свойствами, тепло- и электропроводностью, химической стойкостью.

Из пористых поликристаллических карбидкремниевых материалов (со связующими) изготовляют абразивный инструмент (применяемый для обработки твердосплавного инструмента), огнеупорные материалы, изделия электротехнического назначения (электрические нагреватели, поджигатели игнитронов и т. д.). Беспористые материалы на основе карбида кремния применяют в качестве специальных огнеупоров, высокотемпературных нагревателей («силитовые» и «глобаровые» стержни), торцовых уплотнений, для изготовления деталей, подвергающихся интенсивному коррозионному и абразивному воздействию.

Карбид кремния является составной частью силицированного графита, выпускаемого в соответствии с ТУ 48-01-77—71 [101].

Приведенные в табл. 10 неметаллические нитриды отличаются высокой износостойкостью (кроме гексагонального BN), высокой стойкостью в агрессивных средах, значительной термостойкостью при быстрых теплосменах и высокой огнеупорностью. Применяются они для футеровки металлургических устройств, сопл для распыления металлов, тиглей для получения чистых металлов, а также для изготовления конструкционных элементов в газотурбостроении, энергетике, космической технике. Широкое применение получили кубический и вюрцитоподобный (гексанит или исмит) нитрид бора в качестве инструментальных материалов. В качестве высокоэффективного

инструментального материала применяют и нитрид кремния. Существенное улучшение свойств достигается введением в нитрид кремния различных оксидов (алюминия, магния, иттрия и др.), углерода, карбидов, нитридов [1]. Перспективным материалом является композиция Si_3N_4—Al_2O_3, получившая название «сиалон». Горячепрессованная композиция Si_3N_4—Al_2O_3—TiC имеет торговую марку «силинит» [66].

Нитрид кремния также является перспективным материалом для изготовления деталей так называемых «адиабатных» двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок.

Бескислородное соединение — карбид бора B_4C—отличается высокими твердостью (HV 37,8 ГПа) и модулем упругости (483,4 ГПа), что предопределило его использование в качестве абразивного материала. Высокая износостойкость компактного карбида бора позволила использовать его в качестве деталей точных приборов. Имеются сообщения о том, что карбид бора был успешно применен для изготовления деталей газодинамических подшипников гироскопических приборов.

Керамикк и ситаллы. Высокой твердостью и износостойкостью обладают керамические материалы. К ним, в частности, относятся тугоплавкие оксиды (алюминия, бериллия, циркония, хрома и др.) [88, 101].

В качестве твердого износостойкого материала наибольшее распространение получил оксид алюминия. Устойчивая модификация α - Al_2O_3 встречается в природе в виде простых (обыкновенный корунд, наждак и др.) и полудрагоценных (лейкосапфир, сапфир, рубин и др.) разновидностей. Цвет зависит от содержания других оксидов. Чистый оксид алюминия, кристаллизующийся в гексагональной системе, имеет твердость по Моосу 9 (Н $2 \cdot 10^4$ МПа), модуль Юнга порядка $3{,}5 \cdot 10^5$ МПа, плотность 3,95—4,02 т/м³, температуру плавления 2050 °С. Основным сырьем для получения чистого оксида алюминия являются бокситы, содержащие от ~ 50 до 100 % Al_2O_3.

Порошки корунда (природного и особенно синтетического) широко при-

10. Свойства неметаллических нитридов и нитрида алюминия [63, 67, 101]

Нитрид	Кристаллическая решетка	ρ, т/м³	$T_{пл}$ (или диссоциация), °С	Н, МПа	E·10⁻³, МПа	$\rho_v \cdot 10^8$, Ом·м	α·10⁶, °С⁻¹	−ΔG°298, кДж·моль⁻¹
AlN	Гексагональная плотноупакованная	3,12—3,27	2400 (разлагается)	12 300	—	$>10^{13}$ (при 20 °С)	4—6	288,01
α-BN	Гексагональная	**2,29**	**3000** (под давлением азота)	**1—2** (по Моосу)	0,865—0,344	10^{13} (при 20 °С)	0,5—1,7	224,61
β-BN Si_3N_4	Кубическая Гексагональная	3,45 3,18	— 1900 (разлагается)	60 000 33 000 ± 1200	8,09—9,73 3,2	Диэлектрик 10^{13}—10^{14}	— **2,75**	— 675,93

меняют для изготовления разнообразного абразивного инструмента. Компактные поликристаллические корундовые материалы (минералокерамики), например микролит ЦМ-332, характеризуются высокими твердостью (HRA 90—93), теплостойкостью, химической стойкостью и износостойкостью. Кроме оксида алюминия эта керамика содержит в качестве модификатора (позволяющего получать однородную мелкозернистую структуру) некоторое количество оксида магния.

Минералокерамический материал применяют с целью изготовления резцов (режущих пластин) для получистовой и чистовой обработки углеродистых и легированных сталей и чугуна. Пластинки из этого материала существенно дешевле твердосплавных и позволяют обрабатывать металлы и сплавы при более высоких скоростях резания. Корундовая керамика применяется также в нефтяной промышленности (износостойкие насадки гидромониторных долот, горловины насосов пескоструйных аппаратов, штуцера фонтанной арматуры), для изготовления нитеводителей ткацких станков и т. п. Используется она также в приборостроении (например, для изготовления деталей газодинамических подшипников гироскопов), электротехнике и в других отраслях промышленности. Перспективно применять корундовую керамику в сельскохозяйственном машиностроении (сопла для разбрызгивания ядохимикатов и жидких минеральных удобрений, элементы почвообрабатывающих орудий). Свойства минералокерамики регламентирует ГОСТ 6912—87.

Синтетический, окрашенный в красный цвет прозрачный монокристаллический оксид алюминия (легированный оксидом хрома в количестве 2—3 %) — рубин применяют для изготовления часовых камней, некоторых деталей точных приборов и т. п. Монокристаллические стержни рубина применяют в лазерной технике. Возрос интерес к стабилизированному оксиду циркония, являющемуся перспективным материалом для изготовления деталей, предназначенных для работы при высоких температурах, в частности в адиабатных двигателях (плотность 5,6 т/м³, твердость по Моосу 7, модуль Юнга порядка $1{,}7 \cdot 10^5$ МПа).

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) представляют собой поликристаллические материалы, получаемые регулируемой кристаллизацией стекол [101]. Состоят из кристаллов (размером менее 1 мкм) и остаточной стекловидной фазы, содержание которой, как правило, менее 50 % по объему. Существует много разновидностей ситаллов, различающихся входящими в них окислами. Твердость ситаллов достигает высоких значений (до 10 000 МПа). Высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью обладают петроситаллы (на основе габро-норитовых, базальтовых и других горных пород), пироксеновые ситаллы ($CaO—MgO—Al_2O_3—SiO_2$) и шлакоситаллы (получаемые из стекол, сваренных на основе металлургических и топливных шлаков). Из них изготовляют детали пар трения (плунжеры, части насосов и т. п.), применяемые в химическом машиностроении, футеровку мельниц и мелющие тела, нитеводители текстильных машин, точные калибры, фильеры для синтетических волокон и другие детали, работающие в условиях интенсивного абразивного изнашивания.

Твердые сплавы. Высокими твердостью и износостойкостью обладают композиционные материалы — твердые сплавы (ГОСТ 3882—74; ГОСТ 26530—85), состоящие из частиц тугоплавких соединений (главным образом карбидов) переходных металлов и связки (чаще всего кобальтовой) [83, 95, 101]. Сведения о составе и свойствах твердых сплавов приведены в гл. VIII, об износостойкости при различных видах абразивного изнашивания — в табл. 11—13.

Твердые сплавы применяют для изготовления горнобурового и режущего инструмента, а также для инструмента с целью обработки металлов давлением и быстроизнашивающихся деталей машин, приборов и приспособлений. Для горнобурового инструмента эффективно использовать сплавы WC—Co с крупными карбидными зернами. Из более мелкозернистых марок твердых сплавов WC—Co изготовляют инструмент для обработки резанием чугунов и других материалов, не образующих сливных стружек. Инструмент из сплавов марок

11. Износостойкость твердых сплавов при трении по электрокорундовой шлифовальной шкурке (ГОСТ 5009—82) с зернистостью абразива 10 [93]

Твердый сплав	Твердость HRA (не менее)	Износостойкость, км/мм
ВК4	89,5	1,2
ВК6	88,5	1,0
ВК8	87,5	0,8
ВК10	87,0	0,6
ВК15	86,0	0,4
ВК20	84,0	0,2
ВК25	82,0	0,1
Вольфрам	—	0,055
Т30К4	92,0	0,2
Т15К6	90,0	0,3
Т5К10	88,5	0,2
ТТ7К12	87,0	0,2
ТН-20	90,0	0,2
КХН-15	85,0	0,1
КНТ-16	89,0	0,1
Кобальт	—	0,021

12. Износостойкость твердых сплавов при изнашивании о прослойку различных абразивных материалов [94]

Абразивный материал	Н, ГПа	Износостойкость твердых сплавов, км/мм	
		ВК6	ВК15
Синтетический алмаз АС2	100	0,2	0,2
Карбид бора	37—43	0,2	0,2
Карбид кремния (зеленый)	30—33	0,4	0,2
Электрокорунд	20—24	1,7	0,8
Кварц	11—12	6,6	3,1

13. Износостойкость твердых сплавов при изнашивании об абразивную прослойку (СТП ИСМ 610—81) из электрокорунда зернистостью 8 (ГОСТ 3647—80) [93, 94]

Сплав	Твердость HRA (не менее)	Износостойкость, км/мм
ВК3	89,5	1,2
ВК3-М	91,0	2,0
ВК4	89,5	1,3
ВК4-В	88,0	0,9
ВК6	88,5	1,7
ВК6-М	90,0	3,3
ВК6-ОМ	90,5	10,0
ВК6-В	87,5	0,8
ВК8	87,5	1,4
ВК8-В	86,5	1,1
ВК8-ВК	87,5	3,3
ВК10	87,0	1,1
ВК10-М	88,0	2,0
ВК10-ОМ	88,5	5,0
ВК10-КС	85,0	1,1

ТК и ТТК применяют для обработки резанием сталей и труднообрабатываемых сплавов.

Инструмент для обработки давлением и износостойкие детали изготовляют обычно из средне- и высококобальтовых твердых сплавов типа ВК. Безвольфра-

Продолжение табл. 13

Сплав	Твердость HRA (не менее)	Износостойкость, км/мм
ВК11-В	86,0	1,1
ВК11-ВК	87,0	1,2
ВК15	86,0	0,8
ВК20	84,0	0,6
ВК20-КС	82,0	0,4
ВК20-К	79,0	0,4
ВК25	82,0	0,4
Т30К4	92,0	0,6
Т15К6	90,0	1,7
Т14К8	89,5	1,1
Т5К10	88,5	1,1
Т5К12	87,0	0,8
ТТ7К12	87,0	0,9
ТТ8К6	90,5	3,3
ТТ10К8-Б	89,0	3,3
ТТ20К9	89,0	1,7
ТН-20	90,0	0,3
КНТ-16	89,0	0,3
КХН-15	85,0	0,2
Кобальт	—	0,14

мовые сплавы применяют для изготовления инструмента (режущего, для обработки давлением, измерительного), пресс-форм и деталей, от которых требуется высокая износостойкость.

Наплавочные материалы. Износостойкие материалы высокой твердости часто применяют в виде толстых слоев (единицы и десятки миллиметров), наплавляемых на поверхности деталей различными методами. Применяемые для этой цели материалы (электроды, проволоки, порошки) получили название наплавочных. Используются они для восстановления изношенных деталей (восстановительная наплавка) и для повышения надежности деталей (износостойкая и антикоррозионная наплавка). Наиболее распространенный вид наплавочных материалов — покрытые металлические электроды, применяемые для ручной дуговой наплавки. Восстановительную и антикоррозионную наплавку осуществляют сварочными электродами, износостойкую — наплавочными электродами.

Для маркировки электродов применяют в основном буквенно-цифровую систему обозначения, стандартизованную для сталей [32, 43, 48, 97, 101].

Стали, используемые для изготовления сварочной проволоки по ГОСТ 2246—70, дополнительно маркируются буквами Св, а наплавочной проволоки по ГОСТ 10543—82 — буквами Нп.

Электроды для дуговой сварки обозначаются буквой Э и следующими за ней буквами и цифрами. Первые две или три цифры обозначают содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, следующие за буквенными обозначениями элементов, указывают среднее содержание элемента в процентах (если содержание элемента менее 1,5 %, цифра не ставится). При среднем содержании кремния до 0,8 % и марганца до 1,0 % буквы С и Г не ставятся.

Прутки для наплавки обозначают индексом ПрН, гранулированные порошки из сплавов — индексом ПГ. Далее следуют буквы и цифры, указывающие среднее содержание элементов сплава, из которого изготовлен порошок. Порошковые проволока и лента обозначаются соответственно ПП и ПЛ, а спеченная из порошков — ЛС.

Кроме того, применяются электроды и порошки, с названиями, не отвечающими изложенным выше правилам.

Марки, составы и свойства наплавочных материалов, а также флюсов, применяемых в СССР и других странах — членах СЭВ, приведены в каталоге [1].

Состав *наплавочных электродов*, применяемых для повышения износостойкости, приведен в табл. 14.

Электроды группы I применяют для наплавки деталей, эксплуатируемых при обычной температуре. Металл, наплавленный электродами группы II, имеет структуру бейнита или мартенсита с остаточным аустенитом (при высоком содержании углерода образуются также и карбиды). Наплавленные слои обладают высокой красностойкостью, благодаря чему эти материалы можно применять с целью повышения износостойкости штампов для горячей обработки металлов давлением. Электроды группы III позволяют наносить слои, хорошо обрабатывающиеся в отожженном состоянии. После закалки и отпуска твердость наплавленного металла высокая (до *HRC* 54—62). Для наплавки деталей из высокомарганцовистой стали марки 110Г13Л (эксплуатируемых при больших ударных нагрузках) применяют электроды группы IV. Электроды группы V предназначены для наплавки металлорежущего инструмента и штампов для горячей обработки металлов давлением. Электроды групп VI—VIII служат для наплавки деталей, работающих при различных сочетаниях ударного и абразивного воздействия, соответственно при максимальной, средней и минимальной ударных нагрузках. Структура наплавок с твердостью HRC 48—62 состоит преимущественно из мартенсита и избыточного карбида хрома. Металл, наплавленный при использовании электродов группы IX, обладает высокими противозадирными свойствами при трении без смазки, а также высокими антиэрозионными и антикоррозионными свойствами и высокой износостойкостью при обычных и высоких температурах.

[1] Наплавочные материалы СЭВ. Киев: МЦНТИ. 1979. 622 с.

14. Наплавочные электроды [48, 101]

Группа	Тип электрода	Марка электрода	Наплавка
I	Э-10Г2 Э-11Г3 Э-12Г4 Э-15Г5	ОЗН-250У ОЗН-300У ОЗН-350У ОЗН-400У	Деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивного изнашивания, сопровождающегося ударами
II	Э-30В8Х3 Э-35Х12В3СФ	ЦШ-1, ИН-1 Ц-16	Горячих штампов
III	Э-37Х9С2 Э-70Х3СМТ Э-100Х12М	ОЗШ-3 ЭН-60М ЭН-Х12М	Холодных штампов
IV	Э-65Х11Н3 Э-65Х25Г13Н3	ОМГ-Н ЦНИИН-4	Изношенных деталей из стали 110Г13Л
V	Э-90В10Х5Ф2 Э-105В6Х5М3Ф3 Э-08К15В7М5Х3СФ	ЦИ-2У И-1 ОЗИ-4	Металлорежущего инструмента, вытяжных и прошивных горячих штампов
VI	Э-95Х7Г5С Э-30Х5В2Г2СМ	12АН/ЛИВТ ТКЗ-Н	Деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания
VII	Э-300Х28Н4С4 Э-110Х14В13Ф2	ЦС-1 ВСН-6	Деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивного абразивного изнашивания с ударными нагрузками
VIII	Э-320Х23С2ГТР Э-320Х25С2ГР	Т-620 Т-590	Деталей, эксплуатируемых в условиях преимущественно абразивного изнашивания
IX	Э-08Х17Н8С6Г Э-13Х16Н8М5С5Г4Б Э-190К62Х29В5С2	ЦН-6М ЦН-6Л, ЦН-12М УН-12Л, ЦН-2	Уплотнительных поверхностей трубопроводной арматуры для энергетики и нефтеаппаратуры

15. Порошковая проволока [48, 101]

Марка проволоки	Наплавляемый металл	Дополнительная защита	HRC наплавленного металла	Назначение (наплавляемые изделия)
ПП-АН105	100Г13Н4	—	20—25	Железнодорожные крестовины, отливки из стали 110Г13Л
ПП-АН106	10Х14Т	—	42—48	Уплотнительные поверхности арматуры для температуры ⩽450 °С
ПП-АН125	200Х15СТР	—	50—58	Зубья и козырьки ковшей экскаваторов, лопатки дымососов
ПП-АН170	70Х20Р3Т	—	60—65	Рабочие колеса и улитки грунтовых насосов
ПП-3Х2В8	35Х2В8Ф	Флюс АН-20	44—50	Валки горячей прокатки, ножи блюмингов
ПП-25Х5ФМС	25Х5ФМС	То же	40—46	Обжимные валки горячей прокатки

Состав в свойства покрытых электродов регламентируются следующими документами [48]: ГОСТ 10051—75; ТУ 14-4-(317—73), (633—75), (779—76);
ТУ 5.965-(4027—72), (4034—73), (4040—73), (4048—73), (4051—73), (11032—75); ТУ ВНИИСТ; нормалью ЛК.0386-ООПОК3.

Стальную наплавочную проволоку (из углеродистой, легированной и высоколегированных сталей) используют в качестве плавящегося электрода при восстановительной и износостойкой наплавке под флюсом, в среде углекислого газа и в смесях защитных газов. Холоднокатаную электродную ленту из коррозионно-стойких сталей используют для антикоррозионной наплавки в химическом, нефтяном и атомном машиностроении.

Стальная наплавочная проволока марок Нп выпускается по ГОСТ 10543—82, стальная сварочная для наплавки марок Св — по ГОСТ 2246—70. Твердость слоев, наплавленных проволоками марок Нп, колеблется в пределах НВ 1600—3400 МПа (после наплавки) и HRC 32—56 (после закалки); проволоками марок Св в пределах НВ 1200—3000 МПа (после наплавки) и HV 5500—6000 МПа (после закалки).

Для наплавки материалов с повышенным содержанием углерода и легирующих компонентов применяют обычно *порошковые проволоки*, представляющие собой оболочку из пластичного металла, заполненную смесью легирующих, газо- и шлакообразующих материалов (табл. 15).

Аналогичное строение имеют *порошковые ленты* (шириной 10—30 мм, толщиной 3—4 мм) ПЛ-АН101 (для наплавки высокохромистого чугуна типа 300Х25Н3С) и ПЛ-АН102 (для наплавки сплава типа 250Х20С3Ф). Порошковые ленточные электроды используют, в частности, для наплавки деталей засыпного аппарата доменных печей и т. п. Состав и свойства порошковых проволок регламентируются следующими документами: ГОСТ 26101—84; ТУ 14-4-(247—72), (344—73), (484—74); ТУ 14-4-609 (610, 683, 684, 770)—76; ТУ 14-4-799 (800, 802, 840)—77; ТУ 48-21-(49—72); ТУ 19-4206-35—75; ТУ 86 УССР 085.137—76; ТУ ИЭС 18—75 (41—78); ТУ ВНИИСТ. Порошковые ленты выпускаются в соответствии с ГОСТ 26467—85, ТУ ИЭС 89—73, (107—75), (108—75), (164—77); ТУ 48-19-43—73.

Спеченные электродные ленты изготовляют прокаткой смеси порошка пластичного металла (железа, никеля, меди) и порошков легирующих материалов с последующим спеканием ленты в защитной среде. При наплавке под флюсом АН-60 спеченной ленты ЛС-70Х3МН получают износостойкий наплавленный слой твердостью HRC 58—62. Наплавленный спеченной электродной лентой ЛС-5Х4В3ФС металл обладает высокой термостойкостью (применяют для наплавки валков горячей прокатки металлов). Спеченные ленты применяются в автомобильной промышленности, в металлургическом и химическом машиностроении и др. [48, 101].

Для защиты наплавляемого металла используются флюсы. Эти неметаллические материалы, расплавляясь при наплавке, защищают расплавленный металл от окисления, обеспечивают стабильность дуги и получение наплавленного металла заданного состава.

Применяют также спеченные *прутки и присадочные кольца*. Присадочные кольца марок ПК-НХ35С3 (ТУ ЛЗЛК) и ПК-ХН60ВУ (ТУ 37.311.017—74) из жаростойких хромоникелевых сплавов используют для плазменной наплавки клапанов автомобильных двигателей и других двигателей внутреннего сгорания [48]. Спеченные электроды из карбидохромовых керметов КХН-15, КХН-20 и КХН-30 (на основе карбида хрома с никелевой связкой) применяют для наплавки слоев, обладающих высокими твердостью, износостойкостью и стойкостью к окислению и коррозии [101].

Для наплавки износостойких и жаростойких слоев газопламенным и дуговым (неплавящимся электродом) способами применяют литые *присадочные прутки* из сормайта, стеллита и релита [Пр-С1, Пр-С2, Пр-С27, Пр-В3К, Пр-В3К-Р (ГОСТ 21449—75); Релит-3, Релит-Т3 (ТУ 48-42-34—70), АН-Л3 (ТУ 26-02-769—77)]. Литые кольца марок ЭП (ТУ 14-131-133—73, ТУ 14-131-344—77) используют для плазменной наплавки клапанов автомобильных двигателей [48].

В табл. 16 приведен химический состав сормайтов и их свойства.

Сормайт № 1 — заэвтектический сплав, близкий по составу и структуре к высокохромистым чугунам; сормайт

16. Химический состав и свойства сормайтов (ГОСТ 21449—75) [48, 101]

Сормайт	Содержание элементов, %									Свойства				
	Fe	Cr	Ni	C	Si	Mn	S	P	$\sigma_{и}$, МПа	$\alpha, 10^6$, $°C^{-1}$	$T_{пл}$, °С	ρ, т/м³	HRC
№ 1 (Пр-С1)	Основа	27—31	3—5	2,5—3,3	2,8—3,5	0,4—1,5	До 0,07	До 0,06	700	12	1275	7,4	⩾50
№ 2 (Пр-С2)	Основа	13—17	1,5—2,5	1,5—2,0	1,5—2,2	0,4—1,0	До 0,07	До 0,06	1100	13	1300	7,6	⩾44

17. Химический состав и свойства стеллитов [46, 101] (Fe остальное)

Сплав	Содержание элементов, %										ρ, т/м³	$T_{пл}$, °С	$\sigma_в$, МПа	HRC
	Cr	W	Co	Ni	C	Si	Mn	P	S					
В2К	27—33	13—17	47—55	2,0—2,2	1,8—2,5	1,0—2,0	1,0—1,2	≤0,008	≤0,07		—	1260	600—700	46—48
В3К	28—32	4—5	58—62	2,0—2,2	1,0—1,5	2,3—2,5	—	—	—		8,55	1275	600—700	42—43

№ 2 — доэвтектический сплав, близкий к высокохромистым сталям. Структура сормайтов состоит из сложных карбидов хрома и железа и эвтектики. Сормайты наплавляют на детали, подверженные абразивному изнашиванию (плужные лемеха, ножи бульдозеров и грейдеров, шнеки цементных насосов и т. п.), на инструменты для обработки металлов давлением, на детали, работающие в среде агрессивных газов при повышенных температурах (засыпных аппаратов доменных печей и др.). Выпускаются сормайты в виде прутков (диаметром 6—7 мм) и крупных (с размерами частиц до 1,25 мм) и мелких (0,02—0,04 мм) порошков. Прутковый сормайт обычно наплавляют дуговым методом или с помощью газовой горелки, порошковый сормайт — с помощью токов высокой частоты.

Высокой износостойкостью и стойкостью против коррозии обладают хромовольфрамокобальтовые наплавочные сплавы — стеллиты. В СССР изготовляют и применяют стеллиты В2К, В3К (табл. 17) и В3К-Р.

Основой сплава является вязкий аустенит, обусловливающий высокую ударную стойкость и прочно удерживающий карбидные зерна. Содержание карбидной фазы составляет 30—45 %. Для повышения пластичности в стеллиты вводят редкоземельные элементы. Стеллиты выпускаются в виде стержней диаметром 4—7 мм. Их наплавляют на изнашиваемые поверхности деталей и режущие кромки инструментов дуговым, электрошлаковым, газопламенным или индукционным способом в два-три слоя. Износостойкость повышается в 3—5 раз. Твердость и соответственно износостойкость наплавленных слоев мало изменяются до температуры 700 °С. Широкому применению стеллитов препятствует дефицитность основных компонентов (кобальта, вольфрама).

Рэлит — эвтектическая смесь карбидов вольфрама (WC и W_2C). Содержит 95—96 % W и 3,6—4,0 % общего углерода (свободного не более 0,1 %). Обладает более высокой твердостью (Н 24 000—30 000 МПа), чем монокарбид вольфрама. Выпускают рэлит в виде крупки марки З (зериовой) и в виде электродов марки ТЗ (трубчато-зерновой), представляющих собой заполненные крупкой трубочки из низкоуглеродистой стали. Применяется рэлит для армирования бурового инструмента, для наплавки режущего инструмента машин, разрабатывающих мерзлые грунты, щек дробилок, зубьев ковшов экскаваторов и других деталей машин, подверженных интенсивному абразивному изнашиванию.

Гранулированные порошки, получаемые распылением струи жидкого металла водой высокого давления или азотом, применяют при индукционной, плазменной и газопорошковой (газопламенной) наплавке. По гранулометрическому составу различают порошки крупные (размер частиц 1,25—0,8 мм), средние (0,8—0,4 мм), мелкие (0,40—0,16 мм) и очень мелкие (менее 0,16 мм). Крупные порошки применяют для наплавки токами высокой частоты, средние и мелкие — для плазменной наплавки, очень мелкие — для газопламенной наплавки.

Достаточно широко применяются порошки на железной и никелевой основах (табл. 18).

Для наплавки применяют также различные смеси порошков, приготовляемые механическим смешиванием размолотых ферросплавов, углеродистых материалов, а также карбидов и боридов. Предназначаются для дуговой наплавки износостойких слоев неплавящимся (обычно графитовым) электродом на детали, подвергающиеся интенсивному абразивному изнашиванию: ножи бульдозеров и грейдеров, ковши экскаваторов (смесь С-2М); лопасти глиномешалок, детали земснарядов (смесь БХ); пресс-форм для брикетирования угли, лопаток дробеметов (смесь КБХ и т. п.).

Промышленностью выпускаются следующие гранулированные порошки на железной и никелевой основах (главным образом высокохромистые) ПР (ГОСТ 21448—75), СНГН (ТУ 48-19-212—76), ВСНГН (ТУ 48-19-214—76), НПЧ (ТУ 48-19-40—73), а также наплавочные смеси С-2М, БХ, КБХ, ФБХ6-2 (ГОСТ 21448—75), ПС (ТУ 48-19-122—74) [8, 101].

18. Химический состав и назначение гранулированных порошков [101]

Марка порошка	Средний химический состав, %							HRC наплавленного металла, не менее	Назначение (наплавляемые изделия)
	C	Si	Mn	Cr	Ni	B	Fe		
ПГ-С1	2,9	3,5	1,2	28,0	4,0	—	Основа	51	Детали металлургического оборудования, сельскохозяйственных машин
ПГ-УС25	4,9	2,1	1,2	38,0	1,4	—	Основа	55	Лемехи плугов и детали, подвергающиеся абразивному изнашиванию без ударов
ПГ-СР2	0,35	2,5	—	13,5	Основа	1,8	≤5,0	35	Уплотнительные поверхности арматуры тепловых и атомных электростанций для температур до 600 °С
ПГ-СР3	0,55	3,0	—	15,0	Основа	2,4	≤5,0	45	

3. ИЗНОСОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ И МОДИФИЦИРОВАННЫЕ СЛОИ

Твердые износостойкие тугоплавкие соединения хрупки. По этой причине, а также из-за технологических трудностей и высокой стоимости они, как правило, не могут быть использованы в качестве основных материалов для изготовления деталей машин. Удовлетворить противоречивые требования к поверхностным (высокая твердость и износостойкость, высокие антифрикционные свойства) и объемным (высокие прочность и ударная вязкость) свойствам можно путем создания композиций с послойным расположением материалов, выполняющих различные функции. В связи с тем, что допускаемый износ деталей машин мал (обычно не более нескольких десятых долей миллиметра), толщина поверхностного слоя с заданным комплексом триботехнических свойств может быть небольшой.

Нанесение покрытий на те или иные материалы не просто улучшает их свойства, а приводит к образованию нового композиционного материала с присущим ему комплексом свойств, который должен учитываться при разработке конструкций машин и механизмов.

Существует много традиционных способов создания поверхностных слоев с повышенной износостойкостью [15, 27, 65, 68]. Наиболее широко применяются методы поверхностной закалки, поверхностного наклепа, различные химико-термические способы обработки (в первую очередь цементация и азотирование) и т. д. Все шире применяются методы, основанные на воздействии на поверхностные слои деталей потоков частиц (ионов, атомов, кластеров) и квантов с высокой энергией. К ним следует отнести в первую очередь вакуумные ионно-плазменные методы [26, 33, 34, 45, 71, 104] и лазерную обработку [16, 23, 38, 104]. Существенно развились также способы осаждения покрытий из газовой фазы при атмосферном давлении и в разряженной атмосфере [1, 42, 54, 105]. Мощный импульс получило применение газотермических методов нанесения покрытий в связи с развитием плазменных [8, 40, 90] и детонационного [5, 55, 76, 90] способов напыления порошкообразных материалов различного состава. Значительный интерес представляет возможность создания поверхностных слоев с использованием метода контактного эвтектического плавления [68].

Предшественниками вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий и модифицирования поверхностных слоев являются методы химического осаждения из газовой фазы [4, 42, 54, 105] и термовакуумные методы [61].

Покрытия, получаемые методами химического осаждения из газовой фазы. Методы химического осаждения из газовой фазы (или газофазные методы) основаны на осаждении покрытий на нагретую подложку в результате разложения относительно нестойких газообразных веществ или взаимодействия двух или более газообразных веществ (или переведенных в паровую фазу твердых веществ) с образованием на поверхности слоя химического соединения [4, 42, 54, 105].

Наибольшее распространение получил метод осаждения покрытий из карбида титана на нагретых до высокой температуры (1000—1100 °С) деталях и инструменте в результате химической реакции двух находящихся в газообразном состоянии веществ:

$$TiCl_4 + CH_4 \rightarrow TiC + 4HCl.$$

Получаемые таким образом покрытия в несколько раз повышают стойкость неперетачиваемого инструмента из твердых сплавов.

Из-за высоких температур, необходимых для прохождения реакции и образования прочного соединения с подложкой, этот метод непригоден для закаленных углеродистых и быстрорежущих сталей. Однако [105] можно наносить покрытия из других износостойких соединений при значительно более низких температурах (табл. 19) или закаливать детали сразу после нанесения покрытий.

Существенным усовершенствованием процессов газофазного осаждения покрытий явилось создание установок, работающих по замкнутому циклу без выброса вредных веществ в атмосферу [4].

19. Твердые тугоплавкие соединения, получаемые химическим осаждением из газовой смеси [105]

Материал покрытия	Н, МПа	Исходные вещества	Температура основы при осаждении, °С
VC	20 000—30 000	$VCl_4 + C_6H_5CH_3 + H_2$	1500—2000
Si_3N_4	25 000—30 000	$SiCl_4 + NH_3$	1200—1600
SiC	25 000—40 000	$CH_3SiCl_3 + H_2$	~1400
B_4C	30 000—35 000	$BCl_3 + CH_4 + H_2$	~1300
HfC	18 000—25 000	$HfCl_4 + CH_4 + H_2$	1000—1300
Al_2O_3	20 000—25 000	$AlCl_3 + H_2 + CO_2$	800—1300
TiN	20 000—27 000	$TiCl_4 + N_2 + H_2$	650—1700
TiC	>32 000	$TiCl_4 + CH_4$	800—1100
WC	~17 000	$WCl_6 + CH_4$	900—1100
W_2C	20 000—25 000	$WF_6 + C_6H_6 + H_2$	325—600

Покрытия, получаемые термовакуумным напылением. Термовакуумный метод нанесения покрытий [45, 61] основан на конденсации на поверхностях деталей пленки металла или химического соединения, переведенного в парообразное состояние нагревом наносимого вещества (от нагревателя сопротивления, электронным лучом, индукционным методом, взрывом проволочки и, наконец, лазерным лучом). Энергия атомов или молекул в образующейся паровой фазе невелика, поэтому для образования качественного покрытия с хорошей адгезией к основе требуется нагревать ее до температур, обеспечивающих прохождение диффузионных процессов на границе покрытие — основа. Термовакуумные методы могут быть реализованы в высоком вакууме. Производительность этих методов может быть достаточно высокой. К их недостаткам относятся: изотропный разлет наносимых веществ при их испарении (что приводит к высоким непроизводительным потерям напыляемых материалов); невозможность нанесения недостаточно стабильных веществ; трудность нанесения сплавов заданного состава при различной упругости паров компонентов; необходимость нагрева деталей (подложки) до высоких температур.

Вакуумные ионно-плазменные покрытия и модифицированные слои. Для образования качественного покрытия при более низких температурах деталей необходимо повысить энергию конденсирующихся на них частиц. При соударении с твердой поверхностью частиц с достаточно высокой энергией в микрообъемах создаются условия, при которых обеспечивается образование химических связей без объемного нагрева деталей (что лежит в основе всех вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий). В образовании покрытия при этих методах участвуют нейтральные и возбужденные частицы (атомы, молекулы и кластеры) с высокой энергией (превышающей в десятки и сотни раз энергию тепловых атомов и молекул) и ионы, энергию которых можно варьировать в широких пределах изменением ускоряющего напряжения.

Вакуумные ионно-плазменные процессы нанесения покрытий характеризуются следующими основными этапами: генерацией атомарного или молекулярного потока вещества, его ионизацией, ускорением и фокусировкой и, наконец, конденсацией на поверхности деталей или подложки. Для генерации потока вещества используются разогрев потоком электронов и различные формы газовых разрядов (тлеющий, дуговой с нерасходуемым термоэмис-

20. Влияние режимов ионного азотирования на толщину и твердость износостойкого слоя [42]

Сталь	Температура, °С	Длительность азотирования (в ч) для получения слоя толщиной, мм					HV, МПа
		0,15—0,2	0,2—0,25	0,25—0,3	0,3—0,35	0,35—0,4	
40Х	520	4—5	7—9	9—12	12—15	15—18	5000—5500
40ХФА	520	4—5	6—8	8—10	12—15	15—18	5100—5600
18ХГТ	550	3—4	4—5	6—8	9—12	15—18	5300—6000
30Х3МФ	530	4—5	6—8	9—12	15—18	—	7000—7600
38Х2МЮА	550	4—5	5—7	7—9	9—12	15—18	9000—9500

сионным катодом, дуговой с термоавтоэмиссионным расходуемым катодом) [26, 45, 71].

Применительно к нуждам машиностроения вакуумные ионно-плазменные методы нанесения покрытий и создания модифицированных поверхностных слоев можно условно разделить на четыре группы: а) ионно-диффузионные методы, осуществляемые в тлеющем разряде; б) методы, основанные на явлении катодного распыления в разряде постоянного тока и в высокочастотном разряде; в) ионное осаждение; г) ионное легирование и внедрение (имплантация).

Примером методов первой группы является ионное азотирование [4, 42], которое может проводиться при более низких температурах и со значительно большей скоростью (табл. 20), чем традиционное (в результате радиационного стимулирования скорость диффузии азота многократно увеличивается). Ионно-диффузионные методы могут быть также применены для насыщения поверхностных слоев кремнием, углеродом и другими элементами, получения карбонитридных слоев и т. п.

При использовании методов, основанных на явлении катодного распыления [61, 71], покрытие образуется в результате конденсации главным образом нейтральных частиц, выбиваемых из мишени бомбардировкой ионами инертного газа (аргона, криптона), имеющими высокую энергию. Энергия частиц наносимого материала по крайней мере на порядок выше, чем энергия частиц, образующихся при испарении в термовакуумных методах. Методы позволяют наносить самые тугоплавкие и недостаточно стабильные соединения с сохранением их стехиометрического состава, нанесение которых термовакуумными методами невозможно. Находят применение системы с автономными ионными источниками. Системы распыления на постоянном токе используются для нанесения покрытий из проводящих электрический ток материалов, системы высокочастотного распыления — из диэлектриков.

Наиболее полно преимущества методов, основанных на явлении катодного распыления, реализуются в системах магнетронного распыления [25], в которых разряд осуществляется в скрещенных электрических и магнитных полях. Благодаря этому производительность магнетронных распылительных систем одного порядка с производительностью установок, работающих по методу КИБ (с электродуговым испарителем). К преимуществам их относится отсутствие капельной фазы, что позволяет наносить покрытия практически без искажения исходного качества поверхности.

При использовании методов ионного осаждения [26, 71] частицы наносимого материала, переведенного тем или иным способом в газообразное или парообразное состояние, ионизируются и ускоряются в электрическом поле. Адгезия и служебные характеристики покрытий повышаются при увеличении энергии частиц, задаваемой ускоряющим напряжением. В нашей стране применяются методы КИБ (конденсация при ионной бомбардировке), РЭП (реактивное электронно-плазменное напыление) и др. В табл. 21 приведены сведения об износостойкости покрытий, нанесенных методом КИБ.

Ионное легирование, или имплантация [33, 106], основано на том явлении, что при больших энергиях ионы проникают в кристаллическую решетку на большую глубину (легируя таким образом поверхностный слой детали). Этому способствует радиационно-стимулированная диффузия, благодаря которой легируется слой, толщина которого во много раз превышает глубину начального проникновения ионов. Механические свойства и износостойкость модифицированных таким способом поверхностных слоев повышаются также и в результате искажений кристаллической решетки, возникающих при «вбивании» в нее ионов легирующего компонента.

Ионные методы нанесения покрытий осуществляются с участием как физических (состав наносимого материала не изменяется), так и химических процессов (образуются новые соединения). При таких методах, именуемых реактивными, происходят плазмохимические реакции с ионами рабочего газа или специально вводимых в камеру добавок. Таким образом можно получать покрытия из самых разнообразных материалов и в самых невероятных комбинациях. Освоено получение чистых металлов, карбидов, нитридов, силицидов, халькогенидов, оксидов и т. п. Можно получать покрытия сложного состава (например, оксикарбиды), многослойные или переменного по толщине состава.

Разработаны методы нанесения алмазоподобных пленок с очень высокой твердостью [31]. Образование покрытий при использовании реактивных (плазмохимических) процессов происходит в неравновесных условиях. Благодаря этому в тонких слоях могут образовываться химические соединения, по составу, структуре и свойствам сильно отличающиеся от наблюдаемых для объемных материалов (получаемых в условиях, близких к равновесным).

Ряд разработанных методов ионного нанесения покрытий уже находит применение в промышленности. Успешно используется ионное азотирование. Стойкость неперетачиваемого инструмента из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, а также штампового инструмента и оснастки повышается в

21. Триботехнические характеристики покрытий TiN, нанесенных на сталь Р6М5 методом КИБ, при трении со смазкой М14В2 по разным материалам (линейный контакт) [34]

Материал контртела	H_{200} материала контртела, ГПа	Удельный объемный износ, мм³/мм		Коэффициент трения
		контртела ($\times 10^9$)	покрытия ($\times 10^{11}$)	
Медь М1	0,9	16 000/600	58/5,4	0,11/0,09
Техническое железо Э	1,6	9 000/140	110/80	0,12/0,08
Серый чугун	3,2	70/2,1	40/3,5	0,13/0,03
Сталь 45	5,6	2 100/1,4	17/2,7	0,11/0,08
Сталь 20Х2Н4А (цементованная)	9,4	140/2,8	6,7/1,3	0,14/0,03
Сталь 38ХМЮА (азотированная)	11,1	340/4,9	11/2,0	0,12/0,09

Примечание. В числителе — значения для покрытия в исходном состоянии, в знаменателе — после полирования.

22. Относительная износостойкость плазменных покрытий (при истирании по шлифовальной шкурке в течение 1 мин при скорости скольжения 8 м/с и давлении 1,7 МПа) [90]

Материал покрытия	Износ, мг	Относительная износостойкость
Сталь:		
низкоуглеродистая, легированная молибденом	900	1
коррозионностойкая	711	1,27
хромомолибденовая	509	1,77
Стеллит:		
№ 66	486	1,85
№ 33	289	3,11
№ 11	66,3	13,57
Колмоной:		
№ 4	142,1	6,33
№ 5	111,3	8,09
№ 6	35,5	25,35

несколько раз при ионном реактивном нанесении тонких слоев (до 10 мкм) некоторых тугоплавких веществ (карбидов, нитридов, оксидов, оксикарбидов). Высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия из MoS_2 без связующего, наносимые с помощью катодного распыления [18].

Газотермические покрытия. Часть газотермических методов — газопламенных и электродуговой металлизации — хорошо известна и достаточно широко применяется. Плазменное и детонационное нанесение покрытий является одним из наиболее перспективных направлений порошковой металлургии. Сопротивление износу и коррозии деталей из обычных конструкционных материалов может быть многократно увеличено при незначительном расходе порошковых материалов.

При плазменном нанесении покрытий [8, 40, 90] материал плавится и распыляется струей дуговой низкотемпературной плазмы, состоящей из электронов, положительных ионов и нейтральных атомов. Ионизированный поток газа характеризуется высокими температурами (5000—10 000°С) и относительно невысокими скоростями (до 250—600 м/с). В качестве рабочего газа чаще всего применяют аргон. Поскольку струя плазмы захватывает воздух, напыление активных по отношению к кислороду материалов осуществляется в камерах, предварительно заполняемых инертным газом. Получили развитие и другие методы нанесения покрытий в «динамическом» вакууме.

Плазменные покрытия имеют сложную ячеистую структуру. Пористость покрытий колеблется в пределах 2—15 %. Плазменными методами можно наносить покрытия практически из всех материалов. Плакированные порошки позволяют включать в состав покрытий даже недостаточно стабильные при нагреве материалы (например, MoS_2).

Высокая температура и энергия плазмы позволяют с успехом использовать плазменный метод для нанесения покрытий из всех тугоплавких материалов (за исключением сублимирующихся и интенсивно разлагающихся при температуре нанесения), отличающихся высокой энергией связи в кристаллической решетке и вследствие этого высокой твердостью. Наносимые покрытия отличаются высокой износостойкостью (табл. 22).

При детонационном способе нанесения покрытий [5, 55, 76, 90] в канал открытого с одного конца ствола через смеситель подается порция газовой смеси, способной детонировать при зажигании, и порция порошка наносимого материала. С помощью запального устройства инициируется взрыв газовой смеси. Напыляемый материал нагревается, ускоряется и выбрасывается на поверхность детали. В результате взрыва смеси горючего газа (обычно ацетилена) и кислорода введенные в газ частицы напыляемого материала разогреваются (не выше 2850 °С) и разгоняются до очень высоких скоростей (примерно до 1000 м/с). При ударе частиц, обладающих высокой кинетической энергией, о твердую поверхность освобождается большое количество теплоты и их температура может достигать 4000 °С.

Плазменный способ обеспечивает нагрев частиц до более высоких температур, чем детонационный. Ограничения по температуре при детонационном способе нанесения покрытий компенсируются более высокой кинетической энергией частиц, что позволяет наносить и тугоплавкие материалы. Благодаря высоким скоростям напыляемых частиц детонационные покрытия по сравнению с плазменными и тем более обычными газопламенными имеют более высокие плотность (98—99 %) и прочность сцепления с основой. Существенным преимуществом детонационного метода по сравнению с газопламенным и плазменным является его дискретность, а вследствие этого и меньшая теплонапряженность. Нагрев обрабатываемой детали в процессе напыления может не превышать 200 °С.

Освоено нанесение детонационным методом покрытий самого разнообразного состава: твердосплавных с использованием различных карбидов (вольфрама, хрома) и связок (Co, Ni, Ni+Cr); оксидных (из оксидов алюминия, титана и хрома), металлических. Это позволяет многократно повышать износостойкость деталей машин и инструмента.

Детонационные покрытия за рубежом нашли широкое применение, особенно в авиации. Фирмой Юнион Карбайд, являющейся монополистом в капиталистических странах по нанесению покрытий детонационным методом, разработаны покрытия, состав и свойства которых приведены в табл. 23.

Нанесение детонационных покрытий позволяет многократно увеличивать износостойкость деталей машин (табл. 24).

Лазерные методы модифицирования и легирования поверхностных слоев. Значительные возможности повышения износостойкости поверхностей появились с разработкой промышленных лазеров [16, 23, 38, 104]. Благодаря высокой плотности энергии в луче лазера (до 10^9 Вт/см^2) возможен быстрый нагрев тонкого поверхностного слоя металла, вплоть до его расплавления. Последующий быстрый отвод теплоты в объем металла приводит к закалке поверхностного слоя с приданием ему высокой твердости и износостойкости. (Процессы, происходящие в поверхностном слое, а следовательно, и его свойства определяются мощностью и длительностью действия лазерного луча.) Можно также осуществлять легирование поверхностного слоя [38] предварительным нанесением каким-либо способом слоя легирующего компонента на поверхность с последующим расплавлением лучом лазера, а также наносить покрытия введением порошка напыляемого материала в луч лазера.

Накоплен достаточно большой опыт лазерного упрочнения деталей из сталей и чугунов. В табл. 25 и 26 приведены сведения о повышении износостойкости сталей в результате лазерной закалки (в сопоставлении с другими методами упрочнения).

Электроискровые покрытия. Метод электроискрового легирования основан на переносе материала электрода (преимущественно материала анода) при импульсном искровом разряде в газовой среде на обрабатываемую поверхность [100]. Для нанесения электроискровых покрытий применяют вибрирующие электроды. В Болгарии был разработан способ упрочнения вращающимся электродом. В СССР для нанесения покрытий применяют ручные и механизированные установки (типа ЭФИ и др.).

При нанесении металлических покрытий в материале основы сохраняется исходный фазовый состав. При легировании соединениями (металлоподобными) происходит, как правило, химическое взаимодействие с материалом основы с образованием химических соединений элементов, входящих в наносимый материал, с элементами основы. Нанесение электроискровых покрытий существенно повышает износостойкость и антифрикционность поверхностей. В табл. 27 и 28 приведены значения относительной износостойкости электроискровых покрытий [100], установленные при испытаниях по методике М. М. Хрущова и М. А. Бабичева [91] (изнашивание по электрокорундовой шкурке).

При гидроабразивном изнашивании в результате электроискрового легирования существенно повышается износо-

23. Основные свойства наиболее широко применяемых за рубежом детонационных покрытий [76]

Свойства покрытий	Марка и состав покрытия								
	LW-1 (WC+9 % Co)	LW-1N30 (WC+13—15 % Co)	LW-5 (25 % WC + + 5 % Ni + + смесь карбидов W и Cr)	LC-1C (Cr_3C_2 + +15 % Ni-Cr)	(Cr_3C_2+ +35 % Ni-Cr)	LCN-1 (Cu+41 % Ni+4 % In)	LC-4 (99 % Cr_2O_3)	LC-5 (Cr_2O_3+ +20 % Al_2O_3)	LA-2 (99 % Al_2O_3)
Твердость по Виккерсу, МПа	12 500—14 000	11 000—12 500	10 000—12 000	10 000—12 000	7000	3000	13 500	9250	11 000—12 000
Максимально допустимая температура в окислительной среде, °С	540	540	760	980	980	—	540	870	650—980
Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6$, $°C^{-1}$	2,2 (при 20—540 °С)	2,5 (при 20—540 °С)	2,6	3,6	—	—	6—7 (при 20—540 °С)	—	2,2 (при 20—1000 °С)
Временное сопротивление при растяжении, МПа	560	560—630	280	530	—	—	140	105	150
Прочность сцепления с базовым материалом, МПа	175,7	175,7	140,6	—	126,5	77,3	—	—	70,0
Пористость, %	0,5	0,5—1	0,5—1	0,5—1	1	0,5—1	—	0,75—1,5	1—2
Rz, мкм:									
после нанесения	—	3		—	4	6	—	—	4
после обработки	—	0,025		—	0,05	—	—	—	0,05
Плотность, $т/м^3$	14,2	13,4	10,1	6,5	6,5	8,4	5	4,77	3,45
Обеспечиваемые параметры	Высокая износостойкость	Высокая износостойкость, повышенная стойкость к механическим и термическим воздействиям	Сопротивление коррозии	Износостойкость при высоких температурах и в коррозионных средах, стойкость в струе пламени	Сопротивление при повышенных температурах износу и ударным нагрузкам	Антифрикционные свойства	Стойкость против окисления, пониженная стойкость к ударам	Сопротивление износу, химическому воздействию и высоким температурам	Сопротивление износу, химическому воздействию и высоким температурам

Примечание. Состав всех покрытий указан в мас. долях, кроме покрытия Cr_3C_2 + 35 % Ni-Cr, состав которого указан в об. долях.

24. Относительная износостойкость детонационных покрытий [1] из твердых сплавов на титановом сплаве ВТ3-1 (нагрузка 29,4 МПа; температура 300 °С; амплитуда виброперемещений 110 мкм; число циклов $5 \cdot 10^5$) в одноименном сочетании [55]

Материал покрытия	Относительный износ	Относительная износостойкость
ВТ3-1 без покрытия	1	1
ВК8	0,553	1,81
ВК15	0,35	2,86
ВК20	0,282	3,55

[1] Толщиной 150—200 мкм.

стойкость сталей (табл. 29). Разгаростойкость поверхностей после электроискрового легирования также значительно возрастает (табл. 30).

Области целесообразного применения электроискрового легирования достаточно многообразны. Однако дискретность и пористость покрытий, небольшая толщина, низкая производительность, высокая шероховатость обработанных поверхностей, остаточные напряжения растяжения препятствуют широкому их внедрению.

Электроискровое легирование применяется для увеличения надежности деталей машин, приборов и механизмов, инструмента (режущего и деформирующего), кокилей для литья металлов, а также для размерного восстановления деталей машин.

Гальванические покрытия. Гальваническими методами можно наносить покрытия из металлов, сплавов и композиционных материалов [9, 24, 101, 104].

Введение в состав покрытий на основе хрома, железа и никеля частиц других материалов (КЭП) существенно повышает их триботехнические свойства [9, 24]. Введение порошков карбидов, оксидов, боридов, алмаза и т. п. позволяет существенно повысить износостойкость покрытий; введение халькогенидов, графита, полимеров — антифрикционность покрытий. Технология электролитического осаждения позволяет получать покрытия с содержанием частиц до 40 % и толщиной до 100 мкм.

В покрытия вводят карбиды (WC, TiC, ZrC, HfC, SiC, B_4C), бориды (TiB_2, ZrB_2, HfB_2, TaB_2), силициды ($TaSi_2$), нитриды (BN, Si_3N_4), оксиды (Al_2O_3, Cr_2O_3, SiO_2, ZrO_2, ThO_2), сульфиды (MoS_2, WS_2).

25. Износ образцов из сталей, упрочненных разными методами (трение на машине МИ-1М по сферическому образцу из стали ШХ15 со смазкой маслом И-12) [23]

Сталь	Метод упрочнения	Н, МПа	Линейный износ, мкм		Износ по массе, мг		Суммарный износ	
			образца	сферы	образца	сферы	линейный, мкм	по массе, мг
40Х	Лазерная закалка	7300—9800	2,45	52,51	1,74	0,27	54,96	2,0
3Х2В8	Азотирование	—	2,66	110,20	2,79	1,16	112,86	3,9
20	Цементация	—	10,50	52,17	3,75	0,26	62,67	4,0
40Х	Закалка, отпуск	4370	23,00	23,43	12,74	0,05	46,43	12,7
40Х	То же	2500	70,00	31,25	40,44	0,09	101,25	40,53

26. Триботехнические характеристики образцов из стали 45 после лазерной закалки (трение по бронзе БрОФ10-1 с пластичной смазкой ЦИАТИМ-201) [16]

Схема испытания	Состояние стального образца	Линейная интенсивность изнашивания	Коэффициент трения
Вал — частичный вкладыш	Исходное	$0{,}18 \cdot 10^{-9}$	0,040
	После обработки лазером	$0{,}98 \cdot 10^{-10}$	0,033
Вал — плоский образец	Исходное	$1{,}15 \cdot 10^{-8}$	0,189
	После обработки лазером	$0{,}40 \cdot 10^{-8}$	0,072

Примечание. Длительность испытаний для первой схемы 3 ч, для второй — 8 ч.

При одновременном введении в покрытие частиц с высокой твердостью и частиц твердой смазки износостойкость и антифрикционные свойства повышаются. Наилучшими триботехническими свойствами обладают композиционные покрытия на основе никеля. В табл. 31 приведены значения износо-

27. Относительная износостойкость стали 45, упрочненной тугоплавкими соединениями [100]

Материал электрода	Относительная износостойкость
Сталь 45 в исходном состоянии	1,0
TiB_2	8,0
ZrB_2 + 5 % Mo	7,6
Cr_3C_2 + 15 % Ni	6,6
B_4C	5,6
Cr_3C_2	5,5
TiC	5,0
TiC + 30% 1Х18Н9Т	4,7
Т15К6	4,7
ZrC	4,0
ZrN	3,3
NbC	3,5

28. Твердость и относительная износостойкость стали Ст3, упрочненной переходными металлами и их карбидами [100]

Материал электрода	Толщина слоя, мкм	Н, МПа	Относительная износостойкость ε
Ti	280—300	11 000—12 000	1,2
Zr	300—350	13 000	1,4
V	230	9 300—12 000	1,66
Nb	200—250	13 000—13 700	1,7
Ta	200	15 000—16 000	2,4
Cr	300	10 130—12 500	1,7
Mo	150—200	17 000—19 000	1,9
W	150—200	21 000—29 000	3,4
TiC	80—120	30 400	9,9
ZrC	70—120	26 500	7,8
NbC	80—150	16 600	5,0
Cr_3C_2	120—160	16 000	4,0
Mo_2C	100—180	14 000	1,4
WC	110—180	17 000 и 32 000	2,0
Сталь Ст3	—	—	1

29. Свойства и относительная износостойкость стали 45, упрочненной электроискровым легированием, при гидроабразивном изнашивании [1] [100]

Материал электрода	Н, МПа	Относительная износостойкость ε
Сталь 45 в исходном состоянии	3 800	1
TiC	19 500	5,22
Cr_3C_2	14 500	4,07
TiB_2	29 000	3,76
ZrB_2	21 000	3,62
ZrC	20 500	3,08
NbC	18 500	3,05

[1] Испытания в течение 4 ч, диаметр струи 6 мм, окружиая скорость образцов, закрепленных на диске, 60 м/с.

30. Относительная разгаростойкость [1] стали 5ХНВ, упрочненной электроискровым легированием [100]

Материал электрода	Количество циклов до образования сетки трещин	Относительная разгаростойкость
Сталь 5ХНВ в исходном состоянии	100—150	1
Феррохром	600—700	5,2
93 % TiC+7 % Fe	600—700	5,2
Ta	550—700	5,0
14 % B+86 % Fe	700—800	6,0
Mo	600—700	5,2
Cr	600—700	5,2

[1] Циклическнй нагрев ТВЧ до 650 °С и охлажденне в проточиой воде до 30—40 °С.

31. Состав и свойства никелевых композиционных покрытий [9]

Основа покрытия	Объемное содержание MoS_2, %	Н, МПа	Относительная износостойкость ε [*1]
Ni-WC	6,4	3900	1,1
Ni-TiC	8,6	4500	5,5
$Ni-Al_2O_3$	7,3	3800	2,7
$Ni-ZrO_2$	6,2	3800	1,1
$Ni-ZrB_2$	6,2	3800	1,5
$Ni-HfB_2$	4,0	4000	2,7

[*1] Износостойкость дана в сравнении с основой покрытия (без MoS_2).

стойкости для ряда композиционных никелевых покрытий. Значения коэффициента трения существенно снижаются при введении в состав покрытия даже небольшого количества твердой смазки (около 1 % MoS_2).

Химико-термические методы модифицирования поверхностных слоев [27, 42, 54, 81, 101, 107] металлов и сплавов сочетают в себе одновременное термическое и химическое воздействия с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя. Осуществляются они в результате диффузионного насыщения металла или сплава неметаллами C, N, B, Si и др. или металлами Al, Cr, Zn и др. (раздельного и в ряде методов совместного) в определенном температурном интервале в активной (или специально-активируемой) среде.

Для повышения износостойкости и долговечности деталей из сталей широко применяется цементация (науглероживание), нитроцементация (цианирование, карбонитрация) и азотирование. В меньшей степени применяется насыщением бором и кремнием, а также металлами (Cr, Al и др.). Выбор того или иного способа насыщения и диффундирующего элемента (элементов) осуществляется с учетом требований, предъявляемых к свойствам модифицированной поверхности, вида производства, размеров обрабатываемых

32. Сравнительная абразивная износостойкость [1] отдельных фаз диффузионных слоев, полученных при различных видах химико-термической обработки (p = 1 МПа, v = 30 м/с) [42]

Вид обработки	Сталь	Фазовый состав слоя	Относительная износостойкость ε
Борирование двухфазное (в расплаве карбид бора + $Na_2B_4O_7$)	45	FeB Fe_2B	6,75 2,24
	10	FeB Fe_2B	5,00 2,07
	У8	FeB Fe_2B	6,10 1,76
Борирование однофазное (в расплаве карбид кремния + $Na_2B_4O_7$)	20 У8	Fe_2B Fe_2B	2,65 2,49
Хромирование	20 У8	$Cr_{23}C_6 + Cr_7C_3$ $Cr_{23}C_6 + Cr_7C_3$	4,48 5,60
Силицирование	10	α′-фаза α-фаза	1,56 0,98
Хромосилицирование	45 У8	$Cr_{23}C_6 + Cr_7C_3$ $Cr_{23}C_6 + Cr_7C_3$	5,17 6,75
Алюмосилицирование	У8	Fe_3 (Al, Si)	1,56
Титаноалитирование	У8	(Fe, Ti) Al + (Fe, Ti)$_3$ Al	2,17
Ванадийалитирование	У8	(Fe, V)$_3$ Al	1,68

[1] В качестве эталона использовалась закаленная сталь 45.

деталей, требуемой толщины получаемого слоя и т. п.

В табл. 32 в качестве примера приведены значения относительной износостойкости сталей 45, 10 и У8 после различных видов химико-термической обработки.

4. МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ИЗНАШИВАНИЮ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ДАВЛЕНИЙ И УДАРНЫХ НАГРУЗОК

При повышенных нагрузках, и особенно при ударном ее приложении, износ и повреждения поверхностей трения будут определяться не только видом материала и его свойствами, но и специфическими условиями работы: теплонапряженностью, уровнем динамических воздействий, агрессивностью среды, наличием абразива и др. При ударном контактировании поверхностей различают [14] следующие виды изнашивания: ударно-абразивное, ударно-гидроабразивное, ударно-усталостное и ударно-тепловое.

Разрушение металла при ударно-абразивном изнашивании осуществляется в результате малоцикловой усталости микрообъемов металла вследствие циклического приложения нагрузки

при упругопластическом контакте. Ударно-абразивное изнашивание связано с внедрением в металл твердой частицы. Критерием износостойкости, как правило, являются значения твердости. Чем выше твердость, тем выше сопротивляемость изнашиванию.

При ударно-гидроабразивном изнашивании соударение металлических поверхностей происходит при наличии жидкости и твердых частиц. При этом изнашивание происходит путем прямого внедрения частиц, связанного с ударом, и относительного их перемещения, что приводит к микрорезанию.

Ударно-усталостное изнашивание происходит при многократном соударении поверхностей в отсутствии абразивных частиц. В основе механизма изнашивания этого вида лежит многократная деформация поверхностного слоя, приводящая к наклепу, охрупчиванию и последующему отделению частиц. Износостойкость существенно снижается с увеличением энергии удара.

Ударно-тепловое изнашивание происходит при соударении поверхностей, которые по условиям работы испытывают значительный объемный нагрев. При таком виде износа отделение частиц происходит в результате многократного пластического деформирования или среза объемов металла при внедрении твердых частиц.

К материалам, устойчивым при работе в условиях больших давлений и ударных нагрузок, предъявляются следующие требования: а) повышенная твердость и одновременно определенный запас по пластичности; б) повышенная теплостойкость; в) высокая коррозионная стойкость.

В СССР и за рубежом основными материалами для эксплуатации в условиях высоких давлений и ударных нагрузок являются инструментальные стали [20]. В результате термической обработки они приобретают высокую твердость, прочность и износостойкость. Многие инструментальные стали обладают также теплостойкостью.

Износостойкость материалов, работающих в условиях больших нагрузок, при ударном их приложении зависит от многих факторов [14, 39, 47, 80, 81, 91].

При ударно-абразивном и ударно-гидроабразивном изнашивании основным критерием интенсивности изнашивания является твердость [81]. М. М. Тененбаум [80] оценивает способность абразивных частиц внедряться в поверхностный слой и разрушать его при перемещении по соотношению значений микротвердости испытуемого материала H и абразива $H_а$:

$$K_т = \frac{H}{H_а}. \qquad (1)$$

При критическом значении коэффициента $K_т = 0{,}5 \div 0{,}7$ возможно разрушение металла при однократном воздействии абразивной частицы (микрорезание); при $K_т > 0{,}7$ процесс изнашивания переходит в многоцикловый (частицы износа отделяются в результате многократного деформирования металла) с резко снижающейся интенсивностью изнашивания по мере увеличения коэффициента $K_т$. При микрорезании интенсивность изнашивания обратно пропорциональна твердости, а при многоцикловом разрушении зависимость интенсивности изнашивания от твердости не является линейной.

При одинаковой твердости стали интенсивность изнашивания уменьшается по мере увеличения содержания остаточного аустенита [80]. По существу, это стали с метастабильным аустенитом. В процессе разрушения микрообъемов металла происходит превращение аустенита в мартенсит; при этом достигается определенное упрочнение поверхностного слоя, создаются сжимающие внутренние напряжения, выделяются мелкодисперсные карбиды по плоскостям скольжения.

При ударно-абразивном изнашивании линейная связь между износостойкостью и твердостью сохраняется до определенного значения энергии удара [80]. При увеличении энергии удара наблюдается либо увеличение темпа интенсивности изнашивания при возрастании твердости, либо твердость в определенном интервале вообще не влияет на износостойкость. При ударно-гидроабразивном изнашивании в зависимости от энергии удара повышение содержания углерода и соответственно

твердости оказывает неоднозначное влияние на интенсивность изнашивания.

При ударно-усталостном изнашивании выбор износостойких материалов устанавливается не только исходя из твердости. Динамический характер приложения нагрузок не дает возможности использовать инструментальные стали, обладающие высокой твердостью. Стали высокой твердости (HRC 60—63) обладают малой пластичностью, в том числе ударной вязкостью, и плохо перераспределяют напряжения на участках их концентраций. Поэтому сопротивляемость изнашиванию, связанная с накоплением повреждений при циклическом нагружении, будет снижаться у сталей, не обладающих определенным запасом пластичности. В связи с этим работа на зарождение трещины, а главное работа, затрачиваемая на ее развитие, у сталей, имеющих высокую твердость, но малый запас пластичности, невелика.

Для сталей с мартенситной структурой и твердостью выше HRC 52—54 не наблюдается прямой зависимости между твердостью и прочностью. При перегреве в процессе закалки, несмотря на высокую твердость, прочность резко падает (рис. 3) [20]. При термической обработке необходимо достичь благоприятного сочетания высокой твердости и прочности и необходимой пластичности.

Снижение твердости с HRC 68 до HRC 55 мало изменяет показатели пластичности. Существенное возрастание этих показателей происходит при снижении твердости HRC до 45—48 из-за коагуляции карбидов. Пластичность возрастает в большей степени у сталей, содержащих меньшее количество карбидов с большей способностью к коагуляции (карбиды M_3C, $M_{23}C_6$), и в меньшей степени для более легированных сталей с карбидами типа M_6C.

Рекомендуются следующие интервалы значений твердости для сталей различного назначения: высокий (св. HRC 59—66) для металлорежущих инструментов и штампов холодного деформирования (твердость, близкую к верхнему пределу, устанавливают для инструментов чистового резания и для

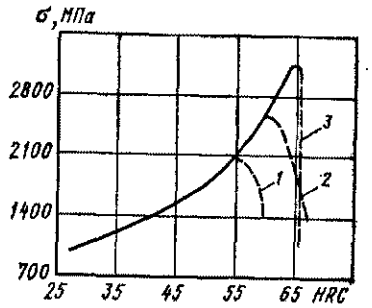


Рис. 3. Предел прочности инструментальных сталей в зависимости от твердости. Прочность определена при растяжении (для HRC до 52—53) и при изгибе (HRC > 54—55). Штриховые линии указывают зависимости, полученные в результате перегрева при закалке:
1 — сталь с 0,5 % C; 1,5 % Cr и 2,5 % W; *2* — сталь с 1,2 % C; 1,7 % W; 0,7 % Cr и 1 % Si; *3* — быстрорежущая сталь типа Р6М5

штампов для прессования и вытяжки); умеренный (HRC 42—50) для штампов горячего деформирования, в первую очередь для создания высокой сопротивляемости термической усталости, штампов холодного деформирования (высадочных и др.), работающих в условиях ударных нагрузок, некоторых деревообрабатывающих и слесарно-монтажных инструментов. Износостойкость сталей по мере увеличения температуры отпуска (рис. 4) снижается [14]. Темп снижения износостойкости у сталей одинаков, хотя общий уровень износа существенно ниже у стали У8.

Разрушение в условиях ударно-усталостного изнашивания проявляется наиболее полно при работе штампового инструмента при холодной деформации металла. Износ легированных и углеродистых сталей при одинаковой твердости различен [14]. Легированные стали оказываются более износостойкими, чем углеродистые. Так, сталь У12 имеет в 2—3,2 раза меньшую износостойкость, чем сталь Х12М [14]. Сложные карбиды в легированной стали положительно влияют на износостойкость при малой энергии удара (5 Дж/см^2). С увеличением энергии удара до 14 Дж/см^2 карбидная фаза

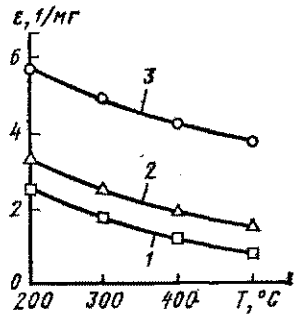


Рис. 4. Влияние температуры отпуска на износостойкость углеродистых сталей:
1 — сталь 45; *2* — сталь У12; *3* — сталь У8

способствует ускорению изнашивания. Она является своеобразным концентратором напряжений и способствует выкрашиванию отдельных микрообъемов.

Для штамповых сталей содержание углерода ограничивается 0,3—0,5 %. Чем меньше углерода, тем допускается большее содержание легирующих элементов.

При ударно-тепловом изнашивании надежность инструментов определяется прежде всего сопротивляемостью термической усталости. Эта характеристика определяется теплостойкостью — способностью сплавов при нагреве рабочей части, возникающем в эксплуатации, сохранять структуру и свойства, необходимые для прохождения рабочего процесса (резание, деформирование и др.). Теплостойкость сталей с карбидным упрочнением связана больше всего со свойствами твердого раствора. Чем выше температура фазового превращения, тем больше теплостойкость стали.

У сталей с интерметаллидным упрочнением теплостойкость определяется выделяющимися частицами фаз — упрочнителей, которые могут эффективно задерживать общее разупрочнение стали вследствие большой дисперсности, отличий типа кристаллических решеток и большой сопротивляемости к коагуляции при нагреве.

Сопротивление термической усталости характеризуется также разгаростойкостью — сопротивляемостью стали образованию поверхностных трещин при многократном нагреве и охлаждении. Особенно это существенно для штамповых сталей — теплостойких и полутеплостойких. На разгаростойкость влияет структурное состояние, запас пластичности, чувствительность к окислению и др.

При твердости стали в готовом штампе HRC 45—50 структура трооститная. Слабыми участками в таких сталях являются отдельные включения феррита и карбиды. При содержании феррита более 10—15 % сопротивление разгаростойкости снижается весьма существенно. Карбиды или интерметаллиды сильно снижают разгаростойкость при содержании более 5—8 % и при неравномерном их распределении [20].

Для основной группы штамповых сталей, чем выше пластичность (вязкость), тем выше и разгаростойкость. Для сталей, используемых в пресс-формах и для жидкой штамповки, влияние пластичности на разгаростойкость сказывается в меньшей мере. Возникновение трещин является следствием активного воздействия жидких металлов (эффект П. А. Ребиндера [60]), коррозии и эрозии.

Для изготовления деталей, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, широко применяются высокомарганцовистые стали [85] — в частности, аустенитная сталь марки 110Г13 (1—1,3 % C и 11—14 % Mn, до 0,3 % Si, не более 0,03 % P и 0,03 % S). В литом состоянии структура ее представляет аустенитную матрицу и карбиды. Для повышения прочности и пластичности ее закаливают в воде от температуры 1100—1150 °C (этим достигается растворение карбидов и получение более однородного аустенита). Термически обработанная таким образом сталь в результате деформирования и ударного воздействия в процессе эксплуатации наклепывается и приобретает высокую износостойкость. Из стали 110Г13 изготовляют звенья гусениц (траки) тракторов и других гусеничных машин, шары дробильных мельниц, щеки камнедробилок и другие изделия, работающие при ударно-абразивном изнашивании.

Высокой износостойкостью при высоких давлениях и ударных нагрузках обладают высококобальтовые (20—30 % Co) твердые сплавы типа В и КС. Их применяют для оснащения бурового инструмента и штампового инструмента, работающих при значительных ударных нагрузках.

5. КАВИТАЦИОННО-СТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Выбор кавитационно-стойких материалов определяется особенностями их работы в условиях кавитации. В движущемся потоке жидкости при уменьшении давления до уровня меньшего, чем упругость насыщенных паров, возникает нарушение сплошности, образуются полости, каверны, пузыри. При движении они сокращаются и исчезают — захлопываются. При смыкании полостей материал, контактирующий с жидкостью, испытывает гидродинамические удары, в результате которых происходит разрушение и эрозия. Давление при этом достигает 126—250 МПа, а температура 230—720 °C.

В кавитационном разрушении материала определенное значение имеет абразивное изнашивание, так как в потоке жидкости в том или ином количестве всегда имеются абразивные частицы [37]. На разрушение влияет и электрохимическая коррозия, которая сказывается в большей степени при малых скоростях потока. Наиболее весомым процессом, определяющим разрушение материала в процессе кавитации, является механическое силовое воздействие, приводящее к разрушению при контактировании. При таком воздействии разрушение может произойти вследствие усталости либо хрупкого или вязкого отделения частиц. Кавитация вызывает пластическую деформацию поверхностных слоев. При этом создается определенная степень деформационного упрочнения металла с возможным последующим разупрочнением. Однако, как правило, в процессе кавитации наблюдается повышение твердости, что указывает на преобладание процессов упрочнения. При увеличении кавитационного воздействия свойства металла (прочность, пластичность, твердость и др.) непрерывно изменяются. Энергия деформации расходуется на разрушение; большая же ее часть превращается в теплоту, идет на накопление дефектов, а другая часть расходуется на фазовые превращения, если они могут протекать в сплаве.

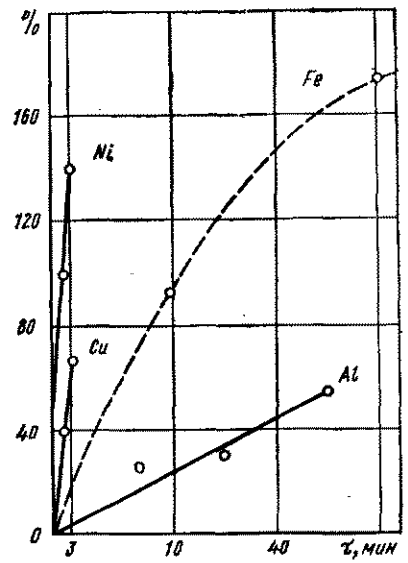


Рис. 5. Кинетика упрочнения разных металлов при микроударном нагружении (относительное изменение микротвердости)

В инкубационный — начальный период энергия удара в основном расходуется на пластическую деформацию. При этом металл наклепывается. При кавитационном разрушении деформационное упрочнение и кинетика изменения твердости у металлов с одинаковой решеткой разнятся весьма существенно (рис. 5) [7].

Никель и медь упрочняются очень быстро и для них достигается предельное насыщение за короткий промежуток времени. Иначе ведут себя железо и золото. Они имеют большую кавитационно-эрозионную стойкость.

В развитии кавитационно-эрозионного разрушения большая роль отводится структурному фактору. Так, стали ферритного класса сопротивляются кавитационному разрушению хуже, чем аустенитные (рис. 6) [7].

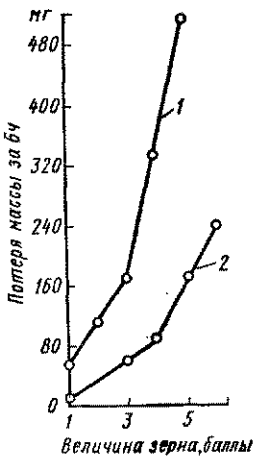


Рис. 6. Влияние величины зерна на сопротивление разрушению феррита (*1*) и аустенита (*2*)

Кавитационная стойкость обратно пропорциональна величине зерна. Увеличивает кавитационную стойкость легирование. У сталей ферритного класса более положительный эффект наблюдается при легировании хромом, чем кремнием. Еще больший эффект достигается при легировании молибденом.

Легирование в значительно большей степени влияет на сопротивление кавитационному разрушению у аустенитных сталей. В качестве легирующих компонентов используют марганец и никель. По продолжительности инкубационного периода и кавитационной стойкости марганцовые стали существенно превосходят никелевые. Кавитационная стойкость резко повышается при распаде аустенита с образованием мартенситной структуры. Мартенсит, не содержащий углерод, обладает малой кавитационной стойкостью. Максимальная кавитационная стойкость достигается при содержании углерода 0,4 %. Дальнейшее повышение углерода не приводит к повышению кавитационной стойкости. Мартенситная структура обеспечивает большую кавитационную стойкость не только в сталях, но и в медных и титановых сплавах [7].

Стали аустенитного класса относят к сплавам с нестабильным твердым раствором. Под влиянием деформации от воздействия захлопывающихся пузырьков при кавитации аустенит превращается в мартенсит. У мартенсита, образованного вследствие деформации, субзерна имеют малые размеры, а искажения решетки проявляются в большей степени. Поэтому твердость его выше, чем твердость мартенсита, образованного в результате закалки. Такие стали хорошо сопротивляются разрушению при кавитации.

Реализованы два способа получения мартенситной структуры, обладающей высокой кавитационной стойкостью [7]:

1) использование сталей, легированных хромом и марганцем, образующих нестабильные твердые растворы, способные упрочняться при деформации во время эксплуатации, вследствие образования мартенсита;

2) образование безуглеродистого мартенсита с последующим его старением, приводящим к упрочнению.

К сплавам первой группы относятся аустенитные стали. Типичным представителем такого сплава является сталь 30Х10Г10 [7] (табл. 33). В структуре литой стали карбиды расположены по границам зерен и двойников. После закалки от 1100 °С и ковки структура стали полностью аустенитная. Распад аустенита проходит очень интенсивно при пластической деформации; при этом достигается высокая степень упрочнения. Стойкость этой стали к кавитационным разрушениям, по сравнению с другими сталями, применяемыми в гидротурбостроении, существенно выше.

Нередко в рабочих условиях детали должны сочетать высокую кавитационную стойкость с коррозионной и абразивной стойкостью. С этой целью в хромомарганцовые стали, содержащие до 0,1 % С, 13—17 % Cr, 10—15 % Mn, добавляют 0,1—0,3 % N_2.

Ко второму типу относятся стали с высоким содержанием никеля и низким — углерода (0,03—0,05 %), что позволяет при закалке получать безуглеродистый мягкий мартенсит. Легирующие элементы подбираются с учетом того, чтобы при отпуске происходил распад пересыщенного твердого раствора с образованием интерметаллидов.

33. Состав, свойства и кавитационная стойкость некоторых сталей, используемых в гидротурбостроении [7]

Сталь	Содержание компонентов [1], %				$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	Потеря массы за 6 ч испытаний, мг
	C	Mn	Cr	Ni	МПа			
30Л (1414—75)	0,14—0,22	0,3—0,65	—	—	400	225	25	1456
20Х13 (5632—72)	0,14—0,22	—	12,0—14,0	—	600	400	20	870
17Х18Н9 (5632—72)	0,13—0,20	—	17,0—19,0	8,0—10,0	570	210	40	890
30Х10Г10	0,3—0,4	9,0—11,0	9,0—11,0	—	700	400	16	15

[1] Остальное Fe.

К таким легирующим элементам относят Al и Ti, которые в сочетании с никелем могут давать интерметаллиды типа Ni_3Ti, Ni_3Al и Ni_3 (Ti, Al).

Разработан новый класс сталей, названных трипсталями, т. е. сталями, в которых превращение инициируется деформацией (*Transformation Induced Plasticity*). В таких сталях высокая прочность и пластичность, а также кавитационная стойкость достигаются выбором определенного состава стали, режима термической обработки и температурной деформации. Состав трипстали следующий: 0,3 % С, 9 % Cr, 8 % Ni, 4 % Mo, 2 % Mn, 2 % Si или 0,25 % С, 25 % Ni, 4 % Mo, 1,5 % Mn. Трипстали считают сплавами, сочетающими самую высокую прочность и вязкость. Поэтому они являются самыми надежными конструкционными материалами.

Кавитационная стойкость чугунов, как правило, ниже стойкости сталей. Наиболее слабыми участками микроструктуры, подверженными разрушению от кавитации, являются графитовые включения. Серый чугун с пластинчатым графитом обладает низкой кавитационной стойкостью. Чугун с шаровидным графитом имеет более высокую сопротивляемость кавитационным разрушениям. В отличие от серых белые чугуны обладают значительно большей кавитационной стойкостью. Кавитационная стойкость чугунов зависит не только от формы графита, но и от прочности металлической основы на границах раздела с графитом. С целью увеличения прочности основы чугуна его легируют чаще всего никелем или молибденом. Например, легированный серый чугун с 1 % Ni и 0,28 % Mo имеет в 2 раза большую кавитационную стойкость, чем нелегированный [7].

Нередко в условиях воздействия кавитации работают детали, изготовляемые из цветных сплавов [101]. Наиболее распространенными являются медные сплавы. Различие в кавитационной стойкости медных сплавов определяется фазовым составом. Медные сплавы имеют мягкую, пластичную α-фазу и твердую, хрупкую β-фазу. Разрушение сплава от микроударов при кавитации начинается на границах и распространяется в сторону менее прочной α-фазы. С увеличением количества β-фазы и более равномерным ее распределением кавитационная стойкость возрастает. В бронзах в α-фазном состоянии повышение кавитационной стойкости достигается легированием твердого раствора. В табл. 34 это прослеживается на примере различных бронз [7], легированных кремнием, бериллием, марганцем и др.

34. Сравнительная стойкость бронз в α-фазном состоянии [7]

Бронза	Режим термической обработки	Потеря массы, мг, через каждый час					НВ, МПа
		1	2	3	4	5	
БрОЦ4—3	Закалка 800 °С, вода	215	446	958	1154	1640	650
БрКМц3—1	То же	170	351	608	962	1200	570
БрБ2	Закалка 850 °С, вода	150	214	470	545	700	1170
БрАЖМц10—3—1,5	Нагрев 700 °С, охлаждение с печью	84	188	356	451	580	1500
БрАМц9—2	Закалка 1000 °С, вода, отпуск 480 °С, 2 ч, воздух	29	57	119	240	34	1150
БрАЖМц6—2—3	Закалка 800 °С, вода	10	28	42	96	12	24

35. Сравнительная стойкость бронз в α- и β-фазном состоянии [7]

Бронза	Структурное состояние	Потеря массы, мг, через каждый час									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
БрАЖМц6—2—4	α-фаза	10	28	42	96	120	192	256	301	359	418
БрАМц9—2	β-фаза	6	18	24	33	45	53	65	73	82	90

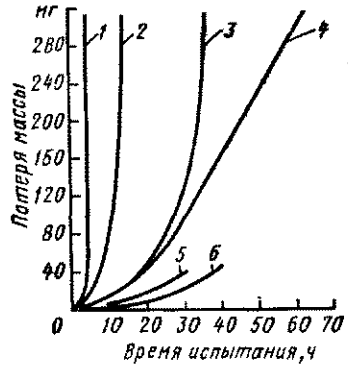


Рис. 7. Кавитационная стойкость титановых сплавов в зависимости от фазового состава:

1) α-фаза; *2*) α + Ti_2Me (40 % β-фазы + + 60 % α-фазы); *3*) 40 % β-фазы + 60% α (высокодисперсная фаза); *4*) β-фаза; *5*) β-фаза + ω-фаза; *6*) 70 % β-фазы + 30 % α (высокодисперсная фаза)

Еще в большей степени легирование повышает кавитационную стойкость в бронзах, находящихся в β-фазном состоянии (табл. 35).

Существенно влияет на кавитационную стойкость форма структурных составляющих. Предпочтительной является зернистая форма, а не пластинчатая. Зернистая форма способствует меньшей концентрации напряжений и распределяет энергию удара на большую площадь.

В качестве кавитационностойких получают распространение титановые сплавы. Наиболее высокой стойкостью обладают сплавы на основе β-фазы (до 70 %) с мелкодисперсными выделениями α-фазы [7] (рис. 7). В титановых сплавах, так же как и в медных, кавитационная стойкость во многом определяется фазовым составом.

36. Химический состав титановых сплавов [101] (основа титан)

Сплав	Содержание легирующих элементов, %						
	Al	Mo	Cr	Fe	Si	V	Nb
Альфа + бета-сплавы							
ВТ6С	5,0	—	—	—	—	4,0	—
ВТ6	6,0	—	—	—	—	4,5	—
АТ-6	6,0	—	1,5	1,5	1,5	—	—
ВТ3-1	6,0	2,5	2,0	0,5	0,3	—	—
ВТ14	4,5	3,0	—	—	—	1,0	—
ВТ16	2,5	5,0	—	—	—	5,0	—
ВТ22	5,0	5,0	1,0	0,6	—	4,5	—
ВТ23	4,5	2,0	1,0	0,6	—	4,5	—
Псевдобета-сплавы							
ВТ15	3,0	7,5	11,0	—	—	—	—
ТС6	3,0	5,0	11,0	—	—	6	—
Бета-сплавы							
4201	—	33,0	—	—	—	—	—
НТ-50	—	—	—	—	—	—	50

Химический состав сплавов, содержащих β-фазу, приведен в табл. 36 [100]. Альфа + бета-сплавы подразделяются на твердеющие при закалке и мягкие после закалки. Высокопрочные титановые сплавы — термически упрочняемые (марок ВТ6, АТ-6, ВТ3-1, ВТ14, ВТ16, ВТ22, ВТ23, ВТ15) — содержат β-фазу в широких пределах (4—85 %).

6. АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Антифрикционные материалы предназначены для использования в различных подшипниках скольжения, применяемых чаще, чем подшипники качения. К числу таких подшипников относятся: гидродинамические и гидростатические, газодинамические и газостатические, самосмазывающиеся с твердой смазкой, самосмазывающиеся пористые (пропитанные жидким или пластичным смазочным материалом) и др.

К антифрикционным материалам предъявляются определенные требования. Они должны обладать: 1) по возможности низкими значениями коэффициента трения (для снижения потерь на трение); 2) высокой износостойкостью; 3) способностью быстро прирабатываться и легко приспосабливаться к ужесточению условий работы трибосистемы (вторичная приработка); 4) повышенной сопротивляемостью к заеданию и задиру; 5) хорошими свойствами совместимости трибосистемы; 6) достаточной прочностью и сопротивляемостью усталостным, кавитационным, коррозионным и абразивным повреждениям.

Различают антифрикционные материалы металлические, неметаллические (полимерные, древесные, графитовые и др.) и комбинированные (металлополимерные, графитометаллические и др.).

Металлические материалы. Наиболее распространенными являются сплавы на основе свинца и олова (баббиты), медные сплавы (бронзы и

латуни), алюминиевые и цинковые сплавы. В меньшей мере используются чугуны и стали.

Баббиты. Наиболее давними подшипниковыми материалами являются мягкие сплавы на оловянной и свинцовой основах [81]. Баббиты обладают низкой твердостью (НВ 130—320 МПа), имеют невысокую температуру плавления (240—320 °С), повышенную размягчаемость (НВ 90—240 МПа при 100 °С), отлично прирабатываются и обладают высокими антифрикционными свойствами. В то же время они обладают низким сопротивлением усталости, что влияет на работоспособность подшипников.

В СССР стандартизованы две группы сплавов (табл. 37).

В 1981 г. литейные сплавы на основе свинца и олова для многослойных подшипников регламентированы международным стандартом (Рег. № ИСО 4381—81).

Наиболее распространенные в зарубежной практике баббиты приведены в табл. 38 и 39. Химический состав и свойства сплавов на основе свинца приведены в табл. 38, а на основе олова — в табл. 39.

Выбор подшипниковых сплавов должен осуществляться с учетом толщины слоя баббита.

Гетерогенное микростроение сплавов типа Б83 с крупными твердыми кубическими кристаллами химического соединения SnSb (β-фазы) не способствует удовлетворительной сопротивляемости усталостным повреждениям под действием циклических нагрузок в тонкослойных подшипниках (толщина слоя менее 1 мм) [10].

Для тонкослойных вкладышей баббит должен удовлетворять следующим требованиям:

не иметь резко выраженной неоднородной структуры; для них возможно использование однофазных сплавов при достаточном сопротивлении металла смятию;

поскольку работа тонкослойных прецизионных вкладышей должна протекать в основном в условиях жидкостного трения, меньшее значение имеют антифрикционные свойства материала, более важно повышенное сопротивление усталости;

баббитовый антифрикционный слой желательно применять с пониженной твердостью до НВ 150—200 МПа; при этом улучшается прирабатываемость; сопротивляемость смятию в тонком слое повышается под влиянием подложки;

для обеспечения надлежащей долговечности подшипников существенное значение имеет прочность соединения баббита с корпусом, определяемая способностью слоя полуды сопротивляться разрушению.

В СССР для тонкослойных подшипников применяют сплавы СОС6-6, БК2 с добавкой переплава (табл. 40).

Подшипники с толщиной баббитового слоя ~3 мм используют при сравнительно легких условиях работы. Баббитовый слой таких подшипников (Б83, Б16, БН, БКА) обладает хорошей способностью прирабатываться и является своеобразным компенсатором всякого рода неточностей, образованных при обработке и монтаже трущихся деталей и возникающих в процессе эксплуатации. К такому типу относятся подшипники скольжения вагонов, вкладыши тихоходных мощных судовых двигателей, компрессоров и др.

Сплавы на медной основе, употребляемые в качестве антифрикционных, известны как бронзы (оловянные и безоловянные) и латуни. Подшипники изготовляют из бронзы в монометаллическом и биметаллическом исполнении. Монометаллические подшипники (вкладыши, втулки и др.) изготовляют из бронз, обладающих достаточной прочностью и твердостью. Бронзы, употребляемые в таких подшипниках, подразделяют на сплавы с высоким содержанием олова (до 10 %) и низким (до 3 %). ГОСТ 613—79 определяет состав малооловянистых бронз; с высоким содержанием олова бронзы используют в ответственных случаях. Составы и свойства наиболее употребительных оловянных бронз приведены в гл. II.

Для изготовления свертных втулок, торцовых дисков и других антифрикционных деталей применяют деформируемые оловянные бронзы.

Для биметаллических подшипников в качестве антифрикционного слоя употребляются бронзы, содержащие

37. Составы (в %) баббитов, используемых в СССР [81]

Баббиты (ГОСТ 1320—74)

Баббит	Sn	Sb	Cu	Cd	Ni	As	Pb
Б88	Основа	7,3—7,8	2,5—3,5	0,8—1,2	0,15—0,25	—	—
Б83		10,0—12,0	5,5—6,5	—	—	—	—
Б83С		9,0—11,0	5,0—6,0	—	—	—	1,0—1,5
Б16	15,0—17,0	15,0—17,0	1,5—2,0	—	—	—	Основа
БН	9,0—11,0	13,0—15,0	1,5—2,0	0,1—0,7	0,1—0,5	0,5—0,9	
БС6	5,5—6,5	5,5—6,5	0,1—0,3	—	—	—	

Сплавы [ГОСТ 1209—78 (свинец остальное)]

Сплав	Sn	Ca	Na	Mg	Al
БКА	—	0,95—1,15	0,7—0,9	—	0,05—0,20
БК2	1,5—2,1	0,30—0,55	0,2—0,4	0,01—0,05	—
БК2Ш	1,5—2,1	0,65—0,90	0,7—0,9	0,03—0,09	—

38. Литейные сплавы на основе свинца (международный стандарт ИСО 4381)

Химические элементы	Химический состав, %			
	PbSb15SnAs	PbSb15Sn10	PbSb14Sn9CuAs	PbSb10Sn6
Pb	80,0—84,0	71,0—77,0	70,0—78,0	80,0—86,0
Sb	13,5—15,5	14,0—16,0	13,0—15,0	9,0—11,0
Sn	0,9—1,7	9,0—11,0	8,0—10,0	5,0—7,0
Cu	0,7	0,7	0,7—1,5	0,7
As	0,8—1,2	0,6	0,3—1,0	0,25
Cd	0,02	0,05	0,3—0,7	0,05
Ni	—	—	0,2—0,6	—
Bi	0,1	0,1	0,1	0,1
Fe	—	0,1	0,1	0,1
Al	0,005	0,005	0,005	0,005
Другие элементы	0,2	0,2	0,2	0,2
Свойства материалов испытуемого прутка				
Твердость *1 НВ, МПа, при температуре, °С:				
20	180	210	220	160
50	150	160	220	160

Продолжение табл. 38

Химические элементы	Химический состав, %			
	PbSb15SnAs	PbSb15Sn10	PbSb14Sn9CuAs	PbSb10Sn6
120	140	140	160	140
150	100	100	100	80
$\sigma_{0,2}$, МПа, при температуре, °С:				
20	39	43	46	39
50	37	32	39	32
100	25	30	27	27
Прочность связи между подшипниковым материалом (предельные величины, см. стандарт ИСО 4386/2) и сталью с содержанием 0,1 % С (толщина подшипникового материала св. 6 мм), МПа	60	70	67	65
Усталость при изгибе 10^7 циклов, МПа	±24	±25	±26	±21
Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$	25	24	24,7	25,3
Температурный интервал плавления, °С	240—350	240—270	240—420	240—260
Температурный интервал литья, °С	450—500	480—520	480—520	480—520
Плотность, т/м^3	9,7	9,9	9,7	10,3

*1 Для испытания на твердость см. стандарт ИСО 4384, части 2 и 3.
*2 Температура жидкой фазы металла будет 380 °С, если содержание меди выше 0,5 %.

повышенное количество свинца без олова (БрС30) или с 1 % Sn. Для монометаллических подшипников иногда используется свинцовистая бронза БрОС5—25 (5 % Sn и 25 % Pb).

Помимо оловянных бронз сравнительно широко используют сплавы, не содержащие олово (безоловянные). Некоторые из сплавов по свойствам не уступают, а иногда и превосходят оловянные бронзы.

В тяжелонагруженных трущихся деталях (дорожные машины, тяжелое станочное оборудование, скользящие соединения теплопередаточного оборудования и др.) применяют высокопрочные алюминиевые бронзы [102].

В качестве антифрикционных используются так называемые кремнистые и марганцовистые латуни [81] и находят применение алюминиево-железные латуни.

39. Литейные сплавы на основе олова (международный стандарт ИСО 4381)

Химические элементы	Химический состав, %		
	SnSb12Cu6Pb	SnSb8Cu4	SnSb8Cu4Cd
Sn	79,0—81,0	88,0—90,0	88,0—90,0
Sb	11,0—13,0	7,0—8,0	7,0—8,0
Cu	5,0—7,0	3,0—4,0	3,0—4,0
Cd	—	—	0,8—1,2
Pb	1,0—3,0	0,35	0,35
As	0,1 *1	0,1 *2	0,5
Ni	—	—	0,1—0,5
Bi	0,08	0,08	0,08
Fe	0,1	0,1	0,05
Al	0,005	0,005	0,005
Zn	0,005	0,005	0,005
Другие элементы	0,4	0,2	0,2
Свойства материалов испытуемого прутка			
Твердость НВ, МПа, при температуре, °С:			
20	250	220	280
50	200	170	250
120	120	110	190
150	80	80	130
$\sigma_{0,2}$, МПа, при температуре, °С:			
20	61	47	62
50	60	44	44
100	36	27	30
Прочность связи между подшипниковым материалом (предельные величины, см. стандарт ИСО 4386/2) и сталью с содержанием 0,1 % С (толщина подшипникового материала св. 6 мм), МПа	40	80	90
Усталость при изгибе 10^7 циклов, МПа	±28	±31	±34
Коэффициент теплового расширения $\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$	22,7	23,9	23,9
Температурный интервал, °С:			
плавления	183—400	233—360	233—360
литья	480—520	440—460	440—460
Плотность, т/м^3	7,4	7,3	7,3

*1 В отдельных случаях допускается максимальное значение 0,8 %.
*2 В отдельных случаях допускается максимальное значение 0,5 %.

40. Состав (в %) баббитов [1], используемых для тонкослойных подшипников [10]

Баббит	Sn	Sb	As	Ca
СОС6-6	5,5—6,5	5,5—6,5	—	—
БС2	1,5—2,5	9,0—10,0	0,5—0,8	—
БК2 с добавкой переплава	1,5—2,1	0,15—0,3 Na	0,04—0,09 Mg	0,08—0,3

[1] Основа — свинец.

Сплавы на медной основе широко распространены во всем мире. Для примера в табл. 41 приведены составы стандартных бронз, применяемых в ФРГ и США.

Сплавы на алюминиевой основе обладают достаточным сопротивлением усталости, коррозионной стойкостью в маслах, имеют сравнительно высокую задиростойкость и хорошие антифрикционные свойства. Эти свойства определили тенденцию к замене ими антифрикционных сплавов на свинцовой и оловянной основе, а также свинцовистой бронзы.

41. Составы (в %) бронз, применяемых за рубежом [81]

Бронза	Стандарт	Cu	Pb	Sn	Zn	Прочие элементы
Бронзы, применяемые в ФРГ						
GCuPb22Sn	DIN 1716	84	22	1	—	—
GCuPb10Sn	DIN 1716	80	10	10	—	—
GCuSn7ZnPb	DIN 1705	83	6	7	4	—
GCuSn10	DIN 1705	90	—	10	—	—
GCuSn8	DIN 17662	92	—	8	—	—
CuZn31Si	DIN 17660	68	—	—	31	1As
CuAl19Mn	DIN 17665	88	—	—	—	3Mn
Бронзы, применяемые в США						
Свинцовистая медь	SAE 480	65	35	—	—	—
То же	SAE 48	70	30	—	—	—
Свинцовисто-оловянистая бронза	AMS 4840	70	25	5	—	—
Полупластичная бронза	SAE 67	78	16	6	—	—
Свинцовистая красная бронза	SAE 40	85	5	5	5	—
Бронзовые подшипники	SAE 660	83	7	7	3	—
Фосфористая бронза	SAE 64	80	10	10	—	1,0 P
Пушечная бронза	SAE 620	88	2	—	2	—
То же	SAE 620	88	4	—	4	—
Свинцовистая пушечная бронза	SAE 65	88	2	10	—	—
Алюминиевая бронза	AST MB 148-52-9C	85	—	—	—	4 Fe, 11 Al

42. Состав [1] (в %) алюминиевых антифрикционных сплавов (ГОСТ 14113—78)

Группа	Сплав	Ni	Mg	Sb	Cu	Si	Sn	Ti
I	АН-2,5	2,7—3,3	—	3,5	—	—	—	—
	АСМ	—	0,3—0,7	3,5—6,5	—	—	—	—
II	АО9-1	—	—	—	1,0	—	9,0	—
	АО3-1	0,4	—	—	1,0	1,85	3,0	—
	АО9-2	1,0	—	—	2,25	0,5	9,0	—
	АО9-2Б	—	—	—	1,75	—	9,0	0,02—0,10
	АО20-1	—	—	—	1,0	—	20,0	0,02—0,10

[1] Остальное — алюминий.

Алюминиевые сплавы употребляют для изготовления монометаллических деталей (втулок, подшипников, шайб и др.) и биметаллических подшипников. Последние изготовляют штамповкой из биметаллической полосы или ленты со слоем алюминиевого сплава, соединенного со сталью в процессе совместного пластического деформирования при прокатке. Для монометаллических подшипников употребляются сравнительно твердые сплавы, а слой биметаллических вкладышей изготовляют из менее твердого пластичного металла.

Алюминиевые сплавы классифицируют преимущественно по микроструктурному признаку [10]. Эта классификация отражает антифрикционные свойства сплавов, так как общепризнанной является роль мягких структурных составляющих в уменьшении износа и увеличении сопротивляемости задиру трущейся пары. К группе I относятся сплавы, имеющие включения твердых структурных составляющих ($FeAl_3$, Al_3Ni, $CuAl_2$, Mg_2Si, AlSb, кремний и др.) в пластичной основе металла. В сплавах группы II наряду с твердыми составляющими имеются мягкие включения. Применяемые в СССР антифрикционные сплавы на алюминиевой основе представлены в табл. 42 [56, 102, 103].

Наиболее употребляемые сплавы вошли в международный стандарт ИСО 4383 (табл. 43).

С появлением тяжелонагруженных двигателей в автомобилестроении, тракторостроении, транспортном машиностроении и других появилась острая необходимость в материалах подшипников, обладающих повышенной задиростойкостью. В связи с этим в СССР, Японии, Англии и Америке разрабатываются алюминиево-оловянные сплавы, содержащие до 30 и даже 40 % Sn, и отрабатывается технология изготовления сплавов, содержащих свинец. Такие сплавы обладают [102] способностью хорошо сопротивляться задиру при ультратонких смазочных слоях, однако эта особенность достигается наиболее полно при содержании $\geqslant$14 % Pb. В СССР разработан метод получения алюминиево-свинцовых (до 30 % Pb) сплавов из гранул [56]. Гранулы отливаются во вращающийся стакан с круглыми отверстиями при частоте вращения 1500 $мин^{-1}$. Струя разбивается на капли, которые через отверстия попадают в воду и кристаллизуются со скоростью 10^2—10^4 °С/с. Последующее прессование гранул осуществляется различными способами.

43. Сплавы [*1] на основе алюминия (ИСО 4383)

Химические элементы	Химический состав, %				
	AlSn20Cu	AlSn6Cu	AlSi4Cd	AlCd3CuNi	AlSi11Cu
Cu	0,7—1,3	0,7—1,3	0,05—0,15	0,7—1,3	0,7—1,3
Sn	17,5—22,5	5,5—7,0	—	—	0,2
Ni	0,1	1,3	—	0,7—1,3	0,1
Cd	—	—	0,8—1,4	2,7—3,5	—
Si	0,7 [*2]	0,7 [*2]	3,5—4,5	0,7 [*2]	10,0—12,0
Fe	0,7 [*2]	0,7 [*2]	0,35	0,7 [*2]	0,3
Mn	0,7 [*2]	0,7 [*2]	0,2	0,7 [*2]	0,1
Ti	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
Другие элементы	0,5	0,5	0,25	0,15	0,3

[*1] Основа — алюминий.
[*2] Общее содержание Si + Fe + Mn не должно превышать 1 %.

Сплавы на цинковой основе, обладая низкой температурой плавления (~400 °С), в большей степени, чем бронзы и алюминиевые сплавы, размягчаются при нагреве, благодаря чему легче прирабатываются. По этой причине подшипники из цинковых сплавов меньше изнашивают сопряженные поверхности цапфы при попадании абразивов.

Цинковые сплавы являются весьма технологичными при изготовлении как монометаллических, так и биметаллических трущихся деталей. Соединение цинкового сплава со сталью легко достигается литьем и совместной прокаткой [10]. Соединение жидкого цинкового сплава со сталью достигается с помощью слоя жидкого цинка, наносимого способом горячего цинкования.

Подшипники и другие детали из цинковых сплавов употребляются в литом и обработанном давлением (прокатка, прессование) состояниях. Составы стандартных сплавов (ГОСТ 21437—75) и их свойства приведены в табл. 44.

После горячей обработки давлением (250—300 °С) прочность и пластичность цинковых сплавов повышаются. Это сказывается и на показателях сопротивлению усталости. Например, для литого сплава ЦАМ9-1,5 предел выносливости при переменном изгибе вращающихся круглых образцов 50 МПа, а для прессованного сплава—100—110 МПа [10].

Состав наиболее употребительных цинковых сплавов приведен в табл. 45.

Сплавы на железной основе. В качестве антифрикционных материалов стали используют в очень легких условиях работы при небольших давлениях и невысоких скоростях скольжения. Будучи твердыми и имея высокую температуру плавления, стали плохо прирабатываются, сравнительно легко схватываются с сопряженной поверхностью цапфы и образуют задиры. Обычно используют так называемые медистые стали, содержащие малое количество углерода, либо графитизированные стали, имеющие включения свободного графита. Состав некоторых сталей, рекомендуемых к использованию взамен бронз в легких условиях работы, приведен в табл. 46.

Чугуны применяют для подшипников и других трущихся деталей в большем количестве и ассортименте, чем стали. Антифрикционные свойства чугунов определяются в значительной степени строением графитовой составляющей. Чугун с глобоидальной формой графита и с толстыми пластинками

44. Состав (в %) отечественных стандартных сплавов на цинковой основе [81]

Сплав	Al	Cu	Mg	Свойства сплавов					
				литых			обработанных давлением		
				$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	НВ, МПа
				не менее					
ЦАМ9-1,5	9,0—11,0	1,0—2,0	0,03—0,06	250	1,0	950	300	10,0	850
ЦАМ10-5	9,0—12,0	4,0—3,5	0,03—0,06	250	0,4	1000	350	4,0	900

45. Состав [1] (в %) зарубежных цинковых сплавов [81]

Сплав	Al	Cu	Mg	Mn
1010 (ФРГ)	9—11	0,6—1,0	0,02—0,05	—
410 (ФРГ)	3,7—4,3	0,6—1,0	0,02—0,05	—
(Япония)	10	2	—	0,2
Алцен 305 (Австрия)	30	5	—	—

[1] Основа — цинк.

46. Состав [1] (в %) антифрикционных сталей [81]

Сталь	Cu	Al	C	Si	Mn	S	P
Медистая	32	2,5	0,1	—	—	—	—
Графитизированная	—	—	1,6	1,0	0,3	0,03	0,03

[1] Основа — железо.

более износостоек, чем чугун с тонкими пластинками. В структуре антифрикционного чугуна желательно иметь минимальное количество свободного феррита (не более 15 %) и должен отсутствовать свободный цементит [52, 98]. Область использования антифрикционных чугунов ограничивается легкими условиями работы (см. гл. II).

Сплавы, изготовляемые методом порошковой металлургии. Прессованием или прокаткой порошков на железной и медной основах и последующим спеканием удается изготовить различные пористые антифрикционные детали [46, 87]. Такие детали перед установкой пропитывают маслом. Как правило, их используют при работе в условиях недостатка смазки, хотя они устойчиво работают и при обильной смазке (трение со смазочным материалом) [87]. В качестве добавки к железным и медным пористым изделиям используют порошки твердых смазок: графита, дисульфида молибдена, нитрида бора и др. Композицию на железной основе обычно составляют с графитом, причем от его сорта в значительной степени зависят механические и антифрикционные свойства. Составы наиболее распространенных пористых сплавов на железной, алюминиевой и медной основах и некоторые свойства их приведены в [81].

Для определения границ использования антифрикционных сплавов необходимо знать сопротивление усталости, прирабатываемость, сопротивляемость изнашиванию, совместимость и задиростойкость [10, 12, 102].

Антифрикционные материалы на основе полимеров предназначены, как правило, для работы с жидкостями, не обладающими смазочными свойствами (водой и др.), и без смазки (в том числе в вакууме). Для повышения антифрикционности, механических свойств и износостойкости, а в ряде случаев и теплопроводности, в исходные полимеры вводят различные наполнители. Часто полимеры используют в качестве составной части антифрикционных материалов, заполняющей поры конструкционной основы (металлической, углеграфитовой, древесной).

Полимеры являются также существенной частью (связующим) большинства твердосмазочных покрытий, нашедших применение главным образом в вакууме и некоторых газовых средах, в которых использование жидких и пластичных смазок по ряду причин недопустимо.

Антифрикционные самосмазывающиеся пластмассы (АСП). Применение подшипников скольжения из антифрикционных самосмазывающихся пластмасс вместо традиционных (металлических) смазываемых подшипников скольжения и подшипников качения предпочтительнее вследствие упрощения конструкции подшипниковых узлов, снижения трудоемкости при изготовлении и эксплуатации, уменьшения габаритов и массы, экономии нефтяных смазочных материалов и т. д.

По составу АСП можно разделить на несколько групп [84].

Первая группа — композиции, содержащие в полимере главным образом антифрикционные добавки (одну или несколько): наполнители со слоистой анизотропной структурой (графит, дисульфид молибдена и другие халькогениды металлов V—VI групп Периодической системы элементов, нитрид бора и т. п.), антифрикционные полимеры (полиэтилен, фторопласт-4 и другие фторполимеры) и жидкие или пластичные смазочные материалы (АСП типа «маслянитов»). Выбор типа и количества наполнителя проводится с учетом назначения АСП и условий его работы: температуры, нагрузки, скорости скольжения, внешней среды и т. д.

При работе на воздухе и в газах с нормальной влажностью в качестве наполнителя применяют графит, в осушенных газах (в том числе инертных) и в вакууме — дисульфид молибдена и другие халькогениды. В зависимости от требований к АСП, природы и дисперсности наполнителя оптимальное его содержание колеблется в широких пределах.

Механические и теплофизические свойства АСП с антифрикционными добавками мало отличаются от соответствующих свойств наполненных полимеров (им присущи многие недостатки исходных полимеров: низкая теплопроводность, высокие и нестабильные значения коэффициента термического расширения, повышенное водопоглощение и др.).

Вторая группа — композиции с комплексными наполнителями; наряду с антифрикционными содержат также жесткий прочный наполнитель (например, кокс; стеклянные, углеродные, металлические или полимерные волокна; ткани; древесную крошку и шпон; металлические или минеральные порошки). Форма частиц наполнителя может быть различной. Применяют мелкие и крупные порошки (до 1300 мкм), короткие и непрерывные волокна, а для намоточных изделий и листовых материалов — ленты и ткани.

Введение комплексных наполнителей существенно улучшает физико-механические и триботехнические свойства АСП.

Третья группа — комбинированные материалы (типа металлофторопластовой ленты [75]) совмещают в себе преимущества составных частей: прочность и теплопроводность металлической (стальной) основы; высокие теплопроводность, прочность и противоадгезионные свойства напеченного пористого слоя из сферических частиц антифрикционного сплава; антифрикционные свойства заполняющей поры и образующей поверхностный слой смеси полимера с наполнителем. В СССР выпускаются комбинированные материалы для работы без смазки (с фторопластом-4) и со смазкой (фторопласт-4 заменен полиформальдегидом). Семейство таких материалов, удачно объединяющих и усиливающих свойства разных групп материалов, будет расширяться.

В качестве основы (связующего) АСП применяют термопластичные [2, 6, 19, 35, 57, 77, 82, 84, 89] и термореактивные полимеры. Из термопластичных наиболее часто используют высокопрочные кристаллические полиамиды (П6, П12, П66, П610, ПА610), капрон, нейлон, сополимеры формальдегида, поликарбонат, теплостойкие полиамиды, полиакрилаты, а также полиэтилен (главным образом высокомолекулярный), фторопласт-4 и другие фторполимеры.

Из термореактивных связующих применяют почти все известные полимеры этого типа: фенолформальдегидные, эпоксидные, фурановые, эпоксикремнийорганические и др.

По методу переработки в изделия АСП делятся на литьевые, прессовочные, экструзионные, намоточные. Изделия изготовляют из листовых и стержневых материалов механической обработкой или предварительной намоткой пропитанной ткани с последующим прессованием. Из ленточных материалов типа металлофторопластовой ленты втулки и подшипники другой формы (в том числе сферические «ШН») изготовляют штамповкой. АСП применяют для изготовления втулок подшипников скольжения, уплотнений, поршневых колец, сепараторов шарикоподшипников, направляющих, мелкомодульных зубчатых колес и т. п.

Важным показателем АСП является теплопроводность. Наибольшей теплопроводностью, приближающейся к теплопроводности металлов, обладают графитопласты, содержание углеродного наполнителя в которых достигает 75—85 %. Однако такие материалы обладают малой сопротивляемостью ударным разрушениям, что ограничивает их применение в узлах трения, подверженных вибрациям и ударам. Для работы в этих условиях используют низконаполненные термопласты и материалы с волокнистыми или ткаными наполнителями (типа текстолита).

Возможность использования АСП в конкретных узлах приборов и машин в значительной мере определяется такими свойствами, как водопоглощение, химическая стойкость в агрессивных средах, коэффициент термического расширения. Наиболее водостойкими являются АСП на основе сополимеров формальдегида, поликарбоната, фторопласта-4, фторопласта-40, эпоксидных связующих, фурановых смол. АСП характеризуются более низкими значениями коэффициента термического расширения по сравнению с исходными полимерами. Для всех АСП характерна достаточно высокая химическая стойкость (наибольшей обладают АСП на основе фторопласта-4),

Разработано большое количество АСП разнообразных составов [2, 6, 19, 35, 57, 77, 82, 84, 89]. Результаты исследований (значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания), как правило, трудно сопоставимы, так как они в большинстве случаев получены по разным методикам на лабораторных испытательных машинах, различающихся схемами трения, значениями коэффициента взаимного перекрытия, нагрузками, скоростями скольжения.

Наиболее просто и достаточно точно для практики работоспособность АСП оценивается по допустимым значениям произведения pv [p — нагрузка, МПа; v — скорость скольжения, м/с] для заданного ресурса работы.

Так как в большинстве случаев значения коэффициента трения зависят от скорости скольжения, то долговечность можно оценивать по произведению fpv, представляющему собой мощность трения (работу сил трения в единицу времени). Учитывая, что практически вся работа сил трения превращается в теплоту, в некоторых случаях ожидаемую долговечность можно оценивать по произведению pv и возникающей в зоне трения температуре [29, 75].

Наполненные фторполимеры. Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) обладает «врожденными» антифрикционными свойствами [35, 89]. При трении без смазки по самому себе, металлам и другим твердым телам для него характерны (при малых скоростях скольжения) значения коэффициента трения порядка нескольких сотых. При повышении температуры коэффициент трения снижается, в диапазоне отрицательных температур — растет. Эмпирически полученная зависимость коэффициента трения фторопласта-4 от температуры и скорости скольжения описывается (при температурах от комнатной до +150 °С и скорости скольжения до 1 м/с) формулой $f = (824 - 3{,}1t)\,v^{0{,}3} \cdot 10^{-4}$, где t — температура, °С; v — скорость скольжения, см/с. В отличие от большинства других материалов значения коэффициента трения фторопласта-4 по самому себе и другим материалам с повышением скорости скольжения не снижаются, а растут. Благодаря этому фторопласт-4 обладает высокими антискачковыми и демпфирующими свойствами. Но он обладает низкими механической прочностью, износостойкостью и теплопроводностью и высоким коэффициентом термического расширения. Введение наполнителей во фторопласт, не изменяя коэффициента трения, существенно повышает его износостойкость (в сотни и даже тысячи раз) и механические свойства [35].

В нашей стране выпускаются композиционные антифрикционные материалы на осиове фторопласта-4 с различными наполнителями (мас. доля, %): Ф4Г21М7 (21 % графита с 7 % дисульфида молибдена); Ф4Г20М5С10 (20 % графита, 5 % дисульфида молибдена и 10 % рубленого стекловолокна); Ф4К20 (20 % кокса); Ф4Г3 (3 % графита); Ф4Г10 (10 % графита); Ф4С15 (15 % стекловолокна); Ф4К15М5 (15 % кокса и 5 % дисульфида молибдена) [35, 57, 84, 89]. Материалы 7В-2А и АФГ-80ВС (ОСТ 48-75—73) содержат в качестве наполнителя графит, а АФГМ (ОСТ 48-75—73) содержит 35 % графита и 15 % дисульфида молибдена [35].

В табл. 47 приведены свойства графитофторопластовых материалов.

Разработаны и другие композиционные материалы на основе фторопласта-4 (наполненные фторопласты) [84, 89]: ФН-202, ФН-3 (10 % порошка никеля, 3 % нитрида бора и дисульфида молибдена); МС-13 (добавки меди и дисульфида молибдена); АМИП-15М (15 % ситалла и 3—5 % дисульфида молибдена).

Износостойкость приведенных выше композиционных материалов на два-три порядка выше, чем исходного полимера. Значения коэффициента трения приблизительно такие же, как у чистого фторопласта-4.

Композиционные материалы на основе фторопласта-4 могут работать без смазки при нагрузке до 14 МПа. Обычно их применяют при скоростях скольжения не более 0,5—1,0 м/с. Допустимые значения произведения pv при работе без смазки не больше 0,1—0,2 МПа·м/с (для 1000 ч работы).

47. Свойства графитофторопластовых материалов [35]

Свойство	7В-2А	АФГМ	АФГ-80ВС
Плотность, т/м³	1,9—2,0	2,1—2,3	2,05—2,15
Водопоглощение, %	0—0,1	0—0,02	0—0,05
Предел прочности, МПа:			
при сжатии	35—38	15—26	11—19
при изгибе	20—30	10—15	—
НВ, МПа	85—129	67—143	60—95
λ, Вт/(м·°С)	8,2—17,4	1,16—1,74	0,58—1,16
$\alpha \cdot 10^5$, °С$^{-1}$	1,5—2,5	4,0—7,0	8,0—13,0
$E_{сж}$, МПа	900—1200	700—1000	600—900
Допустимая рабочая температура, °С	250	180	200

Металлофторопластовые материалы [28, 29, 70, 75] предназначены для подшипниковых узлов машин и приборов, работающих в широком диапазоне условий.

Подшипники скольжения, изготовляемые штамповкой из ленточного металлофторопластового комбинированного материала [29, 70, 75], способны успешно работать без смазки в различных газовых средах (в том числе и химически активных) и в вакууме, а также при недостаточной смазке в диапазоне температур от −200 до +300 °С (при кратковременной работе до +350 °С). Выдерживают удельные нагрузки до 150 МПа. Металлофторопластовый материал состоит из стальной основы (сталн 08кп, 10кп), тонкого напеченного пористого слоя из высокооловянистой бронзы (0,3 мм), поры которого заполнены смесью фторопласта-4 с дисульфидом молибдена (рис. 8). Ленточный материал (ТУ 27-01-01-1—75) изготовляют на линиях непрерывного действия с использованием порошковой металлургии, а подшипники (сверные втулки, упорные шайбы, сферические подшипники) из него — штамповкой. Обработка резанием сведена к минимуму. Исходные материалы расходуются экономно. Технологические процессы изготовления ленты и подшипников практически безотходные. Наружный диаметр металлофторопластовых подшипников в 2 раза, а масса в 10—15 раз меньше, чем у соответствующих подшипников качения. Кроме того, при применении металлофторопластовых подшипников материалоемкость машин и конструкций снижается с уменьшением габаритов и массы корпусных деталей.

Разработана методика выбора подшипников для работы без смазки по значениям произведения нагрузки на скорость pv (МПа·м/с) и температуры в зоне контакта, определяемой расчетным методом или экспериментально. Номограмма для определения длительности работы подшипников без смазки приведена на рис. 9. Задаваясь долговечностью узла и его температурой, можно определить допустимые

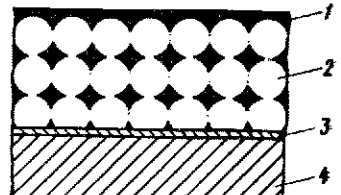


Рис. 8. Металлофторопластовый материал: *1* — фторопласт-4 с наполнителем; *2* — сферические частички бронзы; *3* — медный подслой; *4* — стальная основа

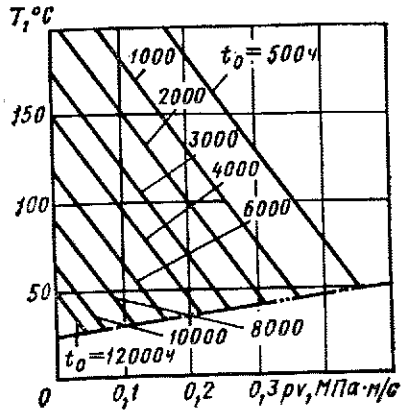


Рис. 9. Номограмма для определения длительности работы металлофторопластовых подшипников по значению произведения *pv* и температуре

значения произведения и в конечном счете размеры подшипника.

Работоспособность подшипников в жидких средах, не обладающих смазочным действием (воде, бензине, керосине, спирте), а тем более при наличии смазок, существенно выше, чем при работе без смазки. При наличии смазок высокие противозадирные свойства материала обеспечивают работу подшипников при пусковых режимах и перегрузках. Несущая способность определяется из условий образования слоя гидродинамической смазки. Проведенными испытаниями доказана достаточно высокая радиационная стойкость металлофторопластовых подшипников (до 75 Мрад) [35].

Подшипники скольжения из металлофторопластового материала применяются с большим экономическим эффектом в авиации, машиностроении для легкой и пищевой промышленности, автомобилестроении, электротехнической промышленности (в погружных двигателях насосов для добычи нефти). Перспективно их применение в сельхозмашиностроении (в том числе в конструкции зерноуборочных комбайнов), в станкостроении взамен игольчатых подшипников качения и монометаллических бронзовых подшипников, для высоковольтной аппаратуры. Они успешно применяются в аксиально-поршневых насосах гидроприводов кузнечно-прессового оборудования. Перспективно их использование в роботостроении. Это обусловлено их малыми габаритами и массой, абсолютной фреттингоустойчивостью, отсутствием скачков при трении и низким статическим трением. Вследствие аномальной зависимости коэффициента трения от скорости скольжения (с увеличением скорости коэффициент трения растет) металлофторопластовые подшипники обладают высокими демпфирующими свойствами, что подтверждается их многолетней эксплуатацией в несущей системе соосных вертолетов.

Перспективно применение металлофторопластовых подшипников в машинах, узлы трения которых работают при низких и криогенных температурах. Безграничны возможные области перспективного применения металлофторопластовых подшипников в сельскохозяйственном машиностроении и машиностроении для животноводства и кормопроизводства.

Металлофторопластовая лента выпускается (по ТУ 27-01-01-1—75) шириной до 100 мм и толщиной 1,1; 1,6 и 2,6 мм. В соответствии со стандартом СТП 27-01-20-117—75 изготовляют свертные металлофторопластовые втулки диаметром 6—55 мм (разной длины). В табл. 48 приведены размеры металлофторопластовых подшипников. Рекомендуемые зазоры при работе подшипников без смазки приведены в табл. 49.

У комбинированных антифрикционных материалов коэффициент термического расширения практически такой же, как у стали, благодаря этому при эксплуатации подшипников в очень широком диапазоне температур зазор существенно не изменяется. Незначительное изменение зазора наблюдается лишь вследствие несколько большего коэффициента термического расширения у бронзы (слой пористой бронзы имеет толщину ~0,3 мм) и некоторого «выпучивания» при нагреве фторопласта с наполнителем из пор этого слоя.

В некоторых отраслях промышленности действуют собственные стандар-

48. Размеры (в мм) металлофторопластовых подшипников (по СТП 27-01-20-117—75) [75]

$d_{вн}$ (пред. откл. по H8 *1)	$d_{нар}$ (пред. откл. по $\frac{H8}{u8}$ *1)	Толщина	Длина L (пред. откл. —0,2 мм)
8	10	1,0	8, 10, 12
10	13	1,5	6, 10, 12, 16, 25
12	15	1,5	8, 10, 12, 16, 20, 25
15	18	1,5	10, 12, 16, 20, 22, 25
16	19	1,5	10, 12, 16, 20, 25
18	21	1,5	12, 16, 20, 25, 32
20	23	1,5	12, 16, 20, 25, 32, 40
22	25	1,5	16, 20, 25, 32, 36, 40
25	28	1,5	16, 20, 25, 32, 40, 45
30	33	1,5	20, 25, 32, 40, 45, 50
32	37	2,5	20, 25, 28, 32, 40, 50
36	41	2,5	25, 32, 40, 50
40	45	2,5	32, 40, 45, 50, 60
45	50	2,5	32, 40, 50, 60, 65
55	60	2,5	32, 40, 50, 60, 65, 70, 75

*1 Предельные отклонения подшипников в запрессованном состоянии. Внутренний диаметр посадочного места в изделии выполняется по посадке H8 с параметром шероховатости поверхности $Ra \leqslant 0{,}63$ мкм.

49. Рекомендуемые зазоры для металлофторопластовых подшипников, работающих без смазки [75]

Внутренний диаметр втулок, мм	Расчетный диаметральный зазор, мкм	Гарантированный зазор, мкм		
		минимальный	максимальный	средний
10—18	30	30	100	65
18—30	35	35	125	80
30—40	40	40	140	90
40—55	45	45	145	95

ты, в том числе и на свертные втулки с фланцем.

Для смазки водой (в том числе горячей) нашли применение изготовляемые индивидуально подшипники и подпятники из металлофторопластового материала С-I и (С-I-У) [28].

По типу металлофторопластового разработан и выпускается промышленностью ленточный комбинированный материал для работы со смазкой. Отличие его от металлофторопластового заключается в использовании вместо фторопласта-4 другого полимера (полиформальдегида) и наполнителя. Толщина слоя полимера, выступающего над вершинами бронзовых частиц, больше (0,2—0,3 мм); благодаря этому рабочую поверхность подшипника после установки на место можно обрабатывать резанием (в случае применения металлофторопластовых подшипников это исключается). В поверхностном полимерном слое в шахматном порядке сделаны углубления для удержания смазки.

Антифрикционные материалы на основе древесины, резин и фторопластовых тканей. При смазке водой в качестве антифрикционных материалов используют резины различного состава. Разработан способ прививки к поверхности резин фторуглеродных молекул, что придает им антифрикционные и антиадгезионные свойства при трении без смазочного материала (скользкие резины).

50. Свойства материалов на основе древесины (ТУ 88-БССР-11—86) [81]

Свойства	Наполненная древесина		
	АПД-1	АПД-2	АПД-3
ρ, т/м³	1,15—1,25	1,1—1,5	1,3—1,4
НВ, МПа (с торца)	100—110	100—110	160—180
Водопоглощение за 30 суток во влажных условиях (W = 95 %)	10—12	25—30	3—6
Коэффициент трения при работе без смазки	0,08—0,12	0,03—0,04	0,09—0,12
Интенсивность линейного изнашивания $I \cdot 10^9$	0,7	0,0055	0,84
Максимальная рабочая температура, °С	90—100	80—90	200—210

Примечание. Древесина АПД-1 наполнена раствором полиэтилена в масле МС-20; АПД-2 — солями меди и ее оксидами, а также глицерином; АПД-3 — стеаратом в кремнеорганическом соединении.

Достаточно широкое применение находят антифрикционные материалы на основе природного полимерного материала — древесины. Используется древесина твердых пород (бакаута, самшита, бука), содержащая смолистые, обладающие смазочным действием, вещества. Менее ценные породы дерева модифицируют — уплотняют, пропитывают смазочными материалами, полимерами, соединениями металлов [13, 57, 77, 84].

Для подшипников скольжения используют материалы ДСП-Б, ДСП-В и ДСП-Г. В табл. 50 приведены свойства некоторых материалов, разработанных в ИММС АН БССР. Древесная крошка и шпон используются в качестве наполнителей в древпластах — антифрикционных материалах на основе полимеров.

Расширяется применение тканых антифрикционных материалов. Они состоят из волокон (нитей) фторопласта-4 («полифена»), сотканных вместе с волокнами из других материалов (полимеров, металлов и др.) таким образом, что лицевая сторона состоит преимущественно из волокон фторопласта-4, а обратная — из волокон второго материала. Освоено производство тканых материалов нафтлен и даклен. Такие материалы к конструкционной основе приклеиваются (в случае использования металлических волокон они могут припаиваться). Свойства тканых материалов приведены в табл. 51.

Углеграфитовые антифрикционные материалы. Для работы без смазки в различных газовых (исключая инертные газы, осушенные газы и воздух, вакуум) и жидких агрессивных средах в широком диапазоне температур (от —200 до +2000 °С) нашли применение графитовые антифрикционные материалы [3, 49, 53, 81, 101]. Они выгодно отличаются от других неметаллических материалов высокими теплопроводностью (93—210 Вт/(м·°С) и электропроводностью (удельное электросопротивление $5 \cdot 10^{-6}$ — $50 \cdot 10^{-6}$ Ом·м), термической стойкостью в нейтральных и восстановительных газовых средах (до 3000 °С) и очень низкими значениями коэффициента термического расширения α [$(2 \div 3)\ 10^{-6}$]. Графитовые материалы стойки в большинстве кислот и щелочей, растворах солей и органических растворителях. При трении по риду металлов без смазки коэффициент трения графитовых материалов может составлять 0,04—0,05. В вакууме [74], инертных газах, осушенном воздухе и ряде других обезвоженных газах значения коэффициента трения могут возрастать на порядок, что сопровождается интенсивным пылевидным изнашиванием.

Графитовые антифрикционные материалы могут применяться как конструкционные для деталей, работающих при высоких температурах в безокислительных средах, что обусловлено повышением прочности графитовых материалов при увеличении температуры. Благодаря этому свойству при высоких температурах (более 1500 °С) прочность графитовых материалов в инертных средах самая высокая.

По технологическим признакам графитовые антифрикционные материалы подразделяются на следующие основные группы: 1) обожженные твердые (АО); 2) графитированные (АГ); 3) обожженные и графитированные, пропитанные смолами (полимерами); 4) обожженные и графитированные, пропитанные металлами; 5) с полимерным связующим (эти материалы правильнее относить к наполненным полимерным материалам). Физико-механические свойства антифрикционных графитовых материалов приведены в табл. 52.

Графитовые антифрикционные материалы получают из нефтяного кокса с добавками природного графита, а иногда — из пекового кокса, сажи и антрацита в различных соотношениях. Для получения обожженных материалов (АО) отпрессованные заготовки (при давлениях 60—250 МПа) обжигают в восстановительной атмосфере (обычно в газовых печах) при 1000—1500 °С. В процессе обжига идет коксование связующего без структурных изменений основного твердого сырья. Графитированные материалы (АГ) получают при вторичной термической обработке (графитации) обожженных твердых материалов в электропечах при 2200—2500 °С. Исходные углеродные материалы рекристаллизуются, образуя графитовую структуру, совершенство которой зависит от температуры и длительности термической обработки, а также от свойств исходного сырья.

Полученные таким образом материалы — пористые. При заполнении пор металлами или полимерами повышаются плотность и прочностные характеристики материалов.

Разработаны материалы на основе углерода. К ним относятся углеситалл, силицированный графит, углеграфитовые материалы с различными

51. Свойства тканых материалов на основе волокон фторопласта-4 [2]

Свойства	Материал	
	Нафтлен-8	Даклен
Масса 1 м², кг	Не менее 1,5	Легкий, <0,6 Средний, 0,6—1,2 Тяжелый, >1,2
Толщина, мм	2,5 ± 0,5	0,3—0,5
Диапазон рабочих температур, °С	—80÷+120	—194÷+200
Допустимые рабочие нагрузки, МПа	600	200—600
Коэффициент трения при давлении 20 МПа:		
по полированной стали	0,032—0,016	0,028—0,016
по шлифованной стали	0,044—0,041	0,036—0,032

52. Свойства графитовых антифрикционных материалов [53, 81, 101]

Материал	Предел прочности, МПа		E, МПа	Твердость по Шору	$\alpha \cdot 10^6$, °C^{-1}	λ, Вт/(м·°C)	ρ, т/м^3	Допустимая рабочая температура, °C, в среде	
	при сжатии	при изгибе						окислительной	восстановительной и нейтральной
АО-1500	150—180	60—80	16 000	60—65	2,5	93	1,65—1,7	350—400	1300—1500
АО-600	110—150	50—70	14 000	55—60	2,5	87	1,5—1,6	300—350	1200—1400
АГ-1500	80—100	40—50	13 000	45—50	2,7	186	1,7—1,8	400—450	2300—2500
АГ-600	60—80	35—40	10 000	43—45	2,7	186	1,6—1,7	400—450	2300—2600
АО-1500-Ф	300—350	140—170	16 500	70—75	2,5	93	1,75—1,8	—	—
АО-1500-К	230—250	90—100	16 000	70—72	2,5	93	1,7—1,75	—	—
АГ-1500-Ф	160—180	70—80	13 500	55—60	2,7	186	1,75—1,80	—	—
АГ-1500-К	100—120	50—60	13 000	50—60	2,7	186	1,7—1,75	—	—
АО-1500-СО5	260—280	100—120	17 000	70—75	3,7	105	2,7—3	300	300
АО-1500-Б83	250—270	90—100	17 000	70—75	3,7	105	2,6—2,9	230	230
АГ-1500-СО5	150—160	60—75	13 500	65—70	3,8	210	2,5—3,1	—	—
АГ-1500-Б83	140—150	50—60	13 500	70—72	3,8	210	2,4—2,8	—	—
АГ-1500-БрС30	150—160	60—70	13 200	70—75	3,7	204	2,2—2,5	—	—

Примечание. Ф — фенолформальдегидная смола; К — кремнийорганическая смола; СО5 — свинец с 5 % олова; Б83 — высокооловянистый баббит; БрС30 — свинцовистая бронза.

пропитками (для работы на воздухе при повышенных температурах) и т. п. В качестве фрикционных (антифрикционных) начинают находить применение материалы из углеродных волокон и тканей в углеродной матрице («термары»). Эти материалы обладают высокими теплостойкостью и прочностными характеристиками. Углерод (графит, кокс, углеродные и графитированные волокна и ткани) широко применяются в качестве компонентов композиционных материалов на основе полимеров и металлов. Значительное количество мелкодисперсного графита (природного и синтетического) используется в качестве добавок к жидким и пластичным смазкам, применяемым в машиностроении и при обработке металлов давлением (главным образом высокотемпературной).

При трении графитовых материалов по металлам и другим твердым материалам (керамикам, различным твердым тугоплавким соединениям) на поверхности контртела образуется ориентированная пленка графита (плоскостью базиса параллельно поверхности скольжения). Наилучшая ориентация пленки и минимальные значения коэффициента трения наблюдаются при трении графита по металлам (карбидообразующим и растворяющим углерод), адгезия к которым максимальна.

Интенсивность износа при увеличении нагрузки изменяется мало, до определенного ее значения, превышение которого приводит к нарушению благоприятной ориентации перенесенной пленки, что сопровождается повышением коэффициента трения и многократным увеличением интенсивности изнашивания (пылевидный износ).

Высокие значения коэффициента трения и интенсивный износ наблюдаются при трении графитовых материалов в вакууме и в нейтральных газовых средах [74], особенно после предварительного обезгаживания (например, прокаливанием в вакууме).

Углеграфитовые антифрикционные материалы применяют при изготовлении поршневых колец компрессоров для сжатия газов (попадание нефтяных смазочных материалов в которые недопустимо) и холодильных агрегатов, различных подвижных уплотнений для герметизации газовых и жидких сред, подшипников скольжения (работающих в газовых и жидких средах, в широком диапазоне температур и скоростей скольжения, при активных коррозионных воздействиях), различных направляющих.

Состояние стандартизации антифрикционных материалов. Разработаны и действуют государственные стандарты или технические условия на баббиты на оловянной, свинцово-сурьмянистой и свинцовой основах (ГОСТ 1320—74, ГОСТ 1209—78 и ТУ), антифрикционные алюминиевые сплавы (ГОСТ 14113—78 и ряд ТУ), цинковые сплавы (ГОСТ 21437—75), оловянные (ГОСТ 613—79 и ряд ТУ) и безоловянные бронзы (ГОСТ 18175—78, ГОСТ 493—79), деформируемые оловянистые бронзы для изготовления свертных биметаллических втулок (ГОСТ 5017—74), латуни (ГОСТ 17711—80, ГОСТ 15527—70), биметаллические ленты с алюминиевыми сплавами (ряд ТУ), металлофторопластовые ленты (ТУ), литьевые полиамиды (ГОСТ 10589—87 и ряд ТУ), капролон (ТУ), наполненные полиамиды (ТУ) и ряд других антифрикционных материалов.

Размеры втулок подшипников скольжения и вкладышей регламентируются ГОСТ 1978—81, ГОСТ 11525—82, ГОСТ 11611—82, ГОСТ 24832—81, ГОСТ 24833—81, ГОСТ 25143—82, ГОСТ 25105—82.

Существует стандарт «Подшипники скольжения машин. Термины и определения» (ГОСТ 18282—88, ГОСТ 27674—88).

7. ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Тормозные устройства из фрикционных материалов предназначены для превращения кинетической энергии движущихся масс в теплоту при сохранении их работоспособности для последующих многократных циклов торможения. При работе в сцеплениях они должны надежно обеспечить передачу движения от того или иного двигателя к исполнительному механизму.

К специфическим условиям работы фрикционных материалов относятся: 1) широкий диапазон скоростей скольжения (до 50 м/с, а иногда и выше) и нагрузок (до десятков тонн); 2) высокий уровень нагрева трущихся поверхностей вследствие трения без смазки; 3) трение в нестационарных условиях при многократных нагревах и охлаждениях; 4) различная продолжительность контактирования трущихся поверхностей.

При таких режимах работы фрикционная трибосистема должна обладать способностью тормозить в заданных условиях; коэффициент трения должен быть в пределах 0,2—0,5 [57]. Наименьший коэффициент трения назначается из условий создания необходимой силы трения; наибольший коэффициент определяется ограничением по самозаклиниванию. В автомобильных тормозах и на железнодорожном транспорте расчетный коэффициент трения принят равным 0,35 и 0,2, а в авиационных тормозах 0,25—0,5. Коэффициент трения изменяется в зависимости от многих параметров (скорости, нагрузки, температуры) и определяется также видом материалов трущихся поверхностей [81].

Разработаны и применяются фрикционные материалы для весьма легких (температура на поверхностях трения до 100 °С), легких (до 250 °С), средних (до 600 °С), тяжелых и сверхтяжелых (до 1000 °С и выше) условий работы [96]. При эксплуатации фрикционных материалов в масле температура обычно не превышает 100—150 °С.

Для легких условий эксплуатации в качестве фрикционных материалов находят применение стали, чугуны и бронзы. Однако для них характерны нестабильные значения коэффициента трения (сильно зависящие от скорости скольжения и температуры) и склонность к схватыванию, особенно при повышенных температурах. Для фрикционных устройств, работающих при условиях эксплуатации средней тяжести, применяют асбофрикционные материалы и спеченные материалы на основе бронз. Для тяжелых и сверхтяжелых условий эксплуатации применяют спеченные материалы на железной основе, а в последние годы — углеродные материалы (углеродные или графитовые волокна в углеродной матрице). При выборе материала принимается также во внимание способность прирабатываться и сопротивление изнашиванию.

Тормозные детали (накладки, колодки и др.) испытывают напряжения сжатия, растяжения, сдвига, в ряде случаев ударные нагрузки [96]. Поэтому должны учитываться характеристики механических свойств (пределы текучести при растяжении и сжатии, пределы прочности, ударная вязкость, твердость), как при комнатной, так и рабочей температурах. Из физических свойств большее значение имеют теплоемкость и теплопроводность [96, 99], от которых в значительной мере зависит температура, возникающая при торможении. Тепловой режим трения зависит также от конструкции и размеров фрикционного сочленения. Важной характеристикой является коэффициент взаимного перекрытия $K_{вз}$ [59, 96], представляющий собой частное от деления номинальных площадей контакта трущихся элементов (меньшую на большую). Неполное взаимное перекрытие обеспечивает возможность теплоотдачи с открытых участков поверхностей трения; при полном перекрытии вся теплота идет в глубь трущихся тел и тепловой режим сопряжения становится более напряженным.

Фрикционные материалы разделяются на две группы: 1) металлические; 2) неметаллические.

В тяжелых условиях эксплуатации при работе без смазки наиболее долговечными и износостойкими являются легированные чугуны. Лучшие свойства имеют чугуны с перлитной основой. Феррита допускается не более 10 %. При более высоком содержании феррита снижается коэффициент трения и облегчается схватывание поверхностей [41]. Срок службы тормозных колодок вагонов железнодорожного транспорта из чугунов с высоким содержанием фосфора (до 3 %) по сравнению с серым чугуном, не содержащим фосфора, повышается в среднем на 12 %. При этом уменьшается также интенсивность изнашивания колес.

53. Состав наиболее употребительных фрикционных материалов, полученных методом порошковой металлургии [77, 86, 101]

Материал	Мас. доля, %						Другие добавки, %
	Fe	Cu	Ni	C (графит)	SiO_2	Асбест	
ФМК-8	45	—	25	7	—	—	10 Cr; 6 W; 7 Cu_2S
ФМК-11	64	15	0	9	3	3	6 $BaSO_4$
МКВ-50А	64	10	0	8	0	3	5 $FeSO_4$; 5 SiC; 5 B_4C
СМК-80	48	23	0	0	0	0	6,5 Mn; 6,5 BN; 10 B_4C; 3,5 SiC; 2,5 MoS_2

В качестве фрикционных материалов часто применяются также стали 30ХГСА, 65Г и 12Х18Н9Т.

Перспективно применение спеченных фрикционных материалов на основе железа и меди. Из материалов на железной основе наибольшее распространение получили материалы ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А и СМК-80 [53, 77, 86]. Их состав приведен в табл. 53, а свойства — в табл. 54.

Фрикционные спеченные материалы на основе меди находят широкое использование при работе без смазки. Оловянистые бронзы обладают высоким коэффициентом трения и по сравнению с железными материалами изнашиваются меньше вследствие меньшей способности схватываться с материалом контртела. Состав фрикционных материалов на медной основе приведен в табл. 55.

В тормозах автотранспорта, тракторов, железнодорожного транспорта

54. Характеристики некоторых фрикционных материалов на железной основе, изготовляемых в СССР [58, 86]

Материал	ρ, т/м³	НВ, МПа	$\sigma_и$, МПа	$\sigma_{ср}$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\lambda_т$, Вт/(м·°С)	Износ (в мкм) за одно торможение при скорости 20 м/с и мощности торможения $2{,}5 \cdot 10^7$ Вт/(м²·с)	
							Фрикционный материал	Контртело-чугун ЧНМХ
ФМК-8	6,0	600—900	9—100	70—90	450—500	37,7	5—8	1—2
ФМК-11	6,0	800—1000	50—70	80—100	300—350	19—46	16,0	2,0
МКВ-50А	5,0	800—1000	30—40	67—85	150—210	18,8—27,2	6,0	5,5
СМК-80	5,7	800—1000	—	65—80	200—250	21—29	1,25	4,0

55. Состав фрикционных материалов на медной основе, полученных методом порошковой металлургии [86]

Мас. доля, %							Другие добавки, %
Cu	Sn	Pb	Fe	C (графит)	Асбест	SiO_2	
68—76	8—10	7—9	3—5	6—8	0	0	
60—75	6—10	20	5	1—8	0	0	Ti, V, Si, 2—10 As, <6 MoS_2
18	2	3	3	3	30	0	40 стеклянной фриты, 10 сульфида алюминия
68—86	5—10	5—15	2	4—8	3	3	До 2 Ni
75	8	5	4	1—20	0	0	0,75 Si; 6 Zn

нашли широкое применение асбофрикционные материалы [57]. Главным компонентом фрикционных асбополимерных материалов (ФПМ) является кризотил-асбест (ГОСТ 12871—83), применяемый в качестве теплостойкого материала. Асбест обладает способностью очищать поверхность трения от загрязнений, что способствует высоким значениям коэффициента трения (до 0,8). В качестве армирующих компонентов, наряду с асбестом, используются шлаковая или минеральная вата, а также стеклянные, базальтовые, углеродные и другие волокна. Наполнителями являются железный сурик, баритовый концентрат, оксиды хрома и других металлов, глинозем, каолин, вермикулит, мел и др. Широко используют в ФПМ углеродные наполнители: измельченный кокс, графит, технический углерод. Для снижения температуры на поверхности трения повышением теплопроводности добавляют металлические наполнители в виде порошков или стружки меди, латуни, цинка, алюминия, железа и др.

Связующими в ФПМ являются каучуки и смолы, а также их комбинации. Наибольшее распространение находят бутадиеновые (СКБ, СКБСР, СКД), бутадиен-нитрильные (СКН-26м), бутадиен-метилвинилпиридиновые, стирольные, метилстирольные и другие синтетические каучуки, а также натуральный каучук. Широкое применение нашли фенолформальдегидные и анилинфенолформальдегидные (модифицированные) смолы.

По способу изготовления фрикционные изделия подразделяют на формованные, вальцованные, тканые, спирально- и эллипсно-навитые. Применяют также изделия из пропитанного картона. Основой тканых фрикционных материалов является асбестовая ткань, основой спирально-навитых изделий — асбестовые нити.

Формованные изделия на каучуковом, смоляном и комбинированном связующих применяются в тормозах автотранспортных машин и тракторов, в муфтах сцепления, в тормозах железнодорожного подвижного состава и в других фрикционных устройствах. Недостатком вальцованных фрикционных эластичных материалов (лент) является сравнительно невысокая прочность. Тканые изделия обладают высокой прочностью, но имеют сравнительно невысокую фрикционную теплостойкость. Процесс их изготовления трудоемок и мало производителен. Спирально-навитые изделия (с основой из специально переплетенных нитей асбеста) применяют для изготовления накладок сцепления. Прессованные изделия из пропитанного асбестового картона (преимущественно накладки сцепления) имеют низкие эксплуатационные свойства, и применение их нельзя считать перспективным.

Фрикционные асбополимерные детали крепятся к металлическому каркасу или основе (колодке, ведомому диску сцепления и т. п.) различными способами: механически (заклепками, болтами, винтами), приклеиванием, приформованием (в процессе изготовления).

Тормозные и фрикционные устройства рассчитываются на теплостойкость и долговечность [57] с использованием инженерных методов расчета фрикционных пар и процессов торможения [81, 96], разработанных на основе уравнений тепловой динамики трения. Для оценочных практических расчетов применяются методы, основанные на эмпирических и статистических данных стендовых испытаний и эксплуатации фрикционных устройств аналогичных конструкций [99].

В табл. 56 приведены некоторые сведения о серийно выпускаемых нашей промышленностью асбофрикционных материалах [57].

Более 80 % материалов производится методом формования. Около 40 % изделий из асбофрикционных материалов (главным образом тормозные накладки) изготовляют на каучуковом связующем, 25 % — на смоляном связующем, 35 % — на комбинированном.

Некоторые характеристики асбофрикционных материалов, необходимые для расчета процессов торможения, приведены в табл. 57 и 58, а также в [57].

Прочностные свойства (пределы прочности при разрыве, сжатии и срезе, твердость) при повышении температуры для большинства асбофрикционных материалов снижаются и их зависимость описывается экспонентой. Для отдельных материалов при ~300 °С наблюдается переход через минимум (что объясняется структурными превращениями в материале в результате термохимических процессов).

Интенсивность изнашивания асбофрикционных материалов с повышением температуры (до 600 °С) возрастает. В основе механизма износа лежит сначала деструкция полимерного связующего, а затем процессы окисления и выгорания ряда компонентов. В табл. 59 приведены результаты испытаний асбофрикционных материалов при трении трубчатых образцов торцами, которые могут быть использованы для предварительного выбора фрикционных материалов и оценок рабочих характеристик фрикционных узлов на этапе проектирования и конструирования машин.

Обычно при натурных испытаниях значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания несколько ниже, чем при лабораторных испытаниях на моделях. Использование этих показателей позволяет в реальной конструкции иметь некоторый коэффициент запаса по тормозному моменту и по сроку службы, обусловленному износом.

Наибольшей фрикционной теплостойкостью обладают материалы Ретинакс А (ФК-16Л, код 06) и Ретинакс Б (ФК-24А, код 07). В соответствии с ГОСТ 10851—73 первый из них можно успешно применять в тормозах и муфтах при кратковременной поверхностной температуре до 1100 °С, второй — при температуре до 700 °С. Длительно действующая объемная температура для этих материалов не должна превышать 300 °С. Накладки дисковых тормозов из материалов 145-40 (код 66); Т-266 (код 4); 358-40 (код 94) выдерживают поверхностную температуру до 450—500 °С и объемную до 200—250 °С. Эластичные материалы (коды 26, 27, 28, 44, 52) применяют в узлах трения с поверхностной температурой до 200 °С. Остальные фрикционные асбополимерные материалы работоспособны при максимальных температурах поверхностей трения в пределах 250—350 °С.

Состав и свойства асбофрикционных материалов регламентируются ГОСТ 1786—88, ГОСТ 1198—78, ГОСТ 15960—79, ГОСТ 10851—73*.

Трение и изнашивание асбополимерных материалов осложнено протекающими разнообразными физико-химическими процессами (обусловленными влиянием окружающей среды и высоких температур), часто влияющими на коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Эффективность применения тормозных материалов может быть существенно повышена созданием в зоне трения определенной газовой среды. Ведутся исследования по использованию для этой цели выхлопных газов. В частности, положительный эффект получен при воздействии на тормозной узел газов, состоящих из

56. Краткая характеристика ФПМ и типы изделий на их основе [57]

Код материала по ОКП	Обозначение асбокаучуковой массы	Типы изделий на основе ФПМ и краткая характеристика
01	АГ-1Б	Накладки барабанного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
02	—	Накладки сцепления и пластины, формованные из картона, пропитанного фенолформальдегидной смолой
03	К-5	Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста, комбинированного связующего (каучуки + смола)
04	К-15-6	Тормозные колодки, формованные из асбосмоляной смеси
05	—	Накладки сцепления и сектора, формованные из материала, состоящего из асбестовых нитей с латунной проволокой, пропитанных смолой
06	ФК-16Л	Тормозные колодки, сектора, вкладыши, формованные из асбосмоляного материала, армированного латунной проволокой
07	ФК-24А	Тормозные колодки и накладки, формованные из асбосмоляного материала
08	43-612	Тормозные колодки для ленточного тормоза трактора, формованные из асбосмоляного материала
11	—	Накладки сцепления, тормозные накладки, сектора, пластины, формованные из тканого асбестового материала, армированного латунной или медной проволокой, пропитанного смолой
12	—	Накладки сцепления, формованные из тканой асбестовой ленты, армированной латунной или медной проволокой, пропитанной олифой из льняного масла
13	Т-167	Накладки барабанного тормоза автомобиля «Жигули», формованные из асбокаучукового материала
14	Т-266	Накладки дискового тормоза автомобиля «Жигули», формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук)
15	Т-332	Накладки сцепления автомобиля «Жигули» из материала из спирально-навитых асбестовых нитей, армированных латунной проволокой, с латексно-смоляной пропиткой
16	1-43	Накладки барабанного тормоза грузового автомобиля, формованные из смеси на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола)
17	1-271	Накладки сцепления, формованные из смеси на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + + смола), с латунной стружкой
18	2-61	Накладки стояночного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
21	2-339	Накладки барабанного тормоза грузового автомобиля, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола)
22	2-540	Накладки сцепления и сектора, формованные из материала на основе асбеста, комбинированного связующего (каучук + смола)

Продолжение табл. 56

Код материала по ОКП	Обозначение асбокаучуковой массы	Типы изделий на основе ФПМ и краткая характеристика
23	3-2	Накладки барабанного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
24	3-55	Тормозные колодки для шахтных подъемных машин и накладки сцепления, формованные из асбокаучукового материала
26	6КВ-10 (ЭМ-2)	Накладки фрикционных узлов, тормозные вальцованные эластичные ленты из асбокаучукового материала
27	6КВ-10А	Тормозные колодки, формованные из асбокаучукового материала
28	6КВ-56А (ЭМ-2)	Тормозные накладки, тормозные вальцованные ленты, накладки сцепления из асбокаучукового материала
29	6КХ-1	Накладки барабанного тормоза грузового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
31	6КХ-1Б	Накладки сцепления, колодки и накладки тормозные, формованные из асбокаучукового материала
33	6КХ-15	Тормозные колодки, формованные из асбокаучукового материала
34	6КФ-32	Накладки барабанного тормоза легкового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
36	6КФ-58	Накладки барабанного тормоза автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
37	6КФ-59	То же
41	6КФ-61	»
42	6КФ-62	Накладки барабанного тормоза автомобиля, формованные из асбокаучукового материала, содержащего латунную стружку
43	6ЛП-55	Накладки сцепления и тормозные пластины, сектора из прессованного асболатексного картона
44	6-147Н (ЭМ-3)	Тормозные накладки, тормозные вальцованные эластичные ленты из асбокаучукового материала
45	7КФ-3А	Накладки сцепления, формованные из асбокаучукового материала
47	7КФ-34	Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола)
51	8-1	Тормозные колодки для железнодорожных вагонов, формованные из асбокаучукового материала
52	8-45 (ЭМ-1)	Тормозные вальцованные эластичные ленты, сектора и вкладыши из асбокаучукового материала
53	40Б-1-10	Тормозные накладки для тракторов, работающие в условиях трения со смазкой, формованные из асбосмоляного материала
54	41-2	Тормозные колодки для велосипедов, формованные из асбокаучукового материала
56	41-132	Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола)

Продолжение табл. 56

Код материала по ОКП	Обозначение абсокаучуковой массы	Типы изделий на основе ФПМ и краткая характеристика
57	42-321-67	Фрикционные шайбы рычагов управления отопителем и фрикционные кольца демпфера ведомого диска сцепления легкового автомобиля из асбокаучукового материала, вырубленные из листового вальцованного материала
58	42-334-67	Фрикционные кольца упорного фланца, муфты сцепления легкового автомобиля из асбокаучукового материала
59	42-975	Накладки барабанного тормоза грузового автомобиля, формованные из асбокаучукового материала
62	101-303	Накладки сцепления спирально-навитого типа, формованные из материала на основе асбестовой нити, армированные латунной проволокой, пропитанной латексом
63	143	Тормозные колодки и накладки, сектора и вкладыши, формованные из асбокаучукового материала
65	143-63Т-4	Накладки сцепления, формованные из асбокаучукового материала
66	145-40	Накладки дискового тормоза легкового автомобиля, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук)
67	221-111-70	Фрикционные кольца демпфера ведомого диска муфты сцепления легкового автомобиля из асбокаучукового материала
71	ЛАТ-2	Асбестовые ленты для фрикционных узлов, тканые, армированные латунной проволокой, с масляной пропиткой
72	ЛАТ-1	Асбестовые ленты для фрикционных узлов, тканые, армированные латунной проволокой, с масляно-смоляной пропиткой
73	—	Фрикционные асбестовые пластины из ткани, пропитанные фенолформальдегидной смолой
76	5-6	Тормозные колодки для вагонов метрополитена, формованные из асбокаучукового материала
79	АГ-1БС-11	Тормозные колодки для автомобилей и автопоездов семейства МАЗ-6422
82	1-287	Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (каучук + смола)
84	ЛАТ-3	Асбестовые тканые ленты, армированные латунной проволокой с каучуковой пропиткой
85	2140	Накладки дискового тормоза легкового автомобиля, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук)
86	1-4	Накладки сцепления, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола + каучук)
87	328-303	Тормозные колодки для железнодорожных вагонов, формованные из асбокаучукового материала

Продолжение табл. 56

Код материала по ОКП	Обозначение асбокаучуковой массы	Типы изделий на основе ФПМ и краткая характеристика
94	358-40	Накладки дискового тормоза легкового автомобиля, формованные из материала на основе асбеста и комбинированного связующего (смола+каучук)
97	2141	Накладки сцепления, формованные из асбокаучукового материала
99	321-24	Накладки сцепления, формованные из материала, представляющего собой спирально-навитые асбонити, армированные латунной проволокой, пропитанные латексом и смолой

57. Физико-механические характеристики накладок барабанных тормозов [57]

Показатель	Формованные на связующем			Эластичные
	каучуковом	комбинированном	смоляном	
НВ, МПа	200—310	210—440	250—430	20—35
ρ, т/м^3	2,0—2,5	2,0—2,6	2,1—2,5	1,9—2,3
Предел прочности, МПа:				
$\sigma_{ср}$	36—69	21—39	28—47	14—26
$\sigma_{сж}$	57—105	43—152	73—124	22—50
$\sigma_{разр}$	15—52	20—25	22—28	10—12
$E_{изг}$, МПа	2100—5000	3900—6700	5100—7500	110—210
Коэффициент трения	0,44—0,56	0,42—0,50	0,37—0,40	0,46—0,49
c, кДж/(кг·°С)	0,88—1,17	0,92—1,15	0,96—1,0	0,88—1,10
λ, Вт/(м·°С)	0,40—0,52	0,41—0,64	0,76—0,81	0,43—0,50

58. Физико-механические характеристики накладок сцепления [57]

Показатель	Формованные на связующем		Картонно-латексные	Картонно-бакелитовые	Тканобакелитовые	Спирально-навитые
	каучуковом	комбинированном				
НВ, МПа	230	220—270	190	320	280—370	110—170
ρ, т/м^3	2,2	1,9—2,3	1,6	2,0	2,0—2,1	1,5—1,8
Предел прочности, МПа:						
$\sigma_{ср}$	34	24—45	51	84	81—90	11—12
$\sigma_{сж}$	89	63—110	73	104	95—102	37—57
$\sigma_{разр}$	34	18—36	11	55	18—19	14—28
$E_{изг}$, МПа	3200	3500—4500	4800	5600	4700—4900	3300
Коэффициент трения	0,47	0,38—0,53	0,43	0,34	0,41—0,44	0,5—0,57
c, кДж/(кг·°С)	1,13	0,92—1,13	1,09	1,05	1,22	1,26—1,34
λ, Вт/(м·°С)	0,51	0,42—0,48	0,35	0,35	0,44—0,45	0,38

59. Энергетическая интенсивность изнашивания ФПМ при различных температурах [57]

Шифр (код) материала	Интенсивность изнашивания (мкг/Дж) при температуре, °С				
	100	200	300	400	500
АГ-1Б (01)	0,2	0,25	0,3	0,65	1,25
(02)	0,7	0,4	0,35	1,25	2,5
К-5 (03)	0,1	0,15	0,3	0,65	1,3
К-15-6 (04)	1,0	0,8	0,7	0,9	2,1
(05)	0,7	0,5	0,4	0,8	1,9
ФК-16Л (06)	0,37	0,36	0,35	0,65	0,9
ФК-24А (07)	0,13	0,15	0,25	0,6	0,9
43-612 (08)	0,3	0,3	0,35	0,6	1,5
(11)	0,35	0,35	0,75	1,3	1,6
(12)	0,35	0,45	0,7	1,25	2,15
Т-167 (13)	0,35	0,75	1,5	2,2	—
Т-266 (14)	0,6	0,4	0,35	0,75	1,6
Т-332 (15)	0,4	0,3	0,75	1,6	2,3
1-43 (16)	0,2	0,25	0,4	0,75	1,7
1-271 (17)	0,1	0,13	0,15	0,25	1,15
2-61 (18)	0,15	0,1	0,25	0,6	1,25
2-339 (21)	0,15	0,2	0,25	0,6	1,25
2-540 (22)	0,1	0,15	0,25	0,7	1,25
3-2 (23)	0,2	0,2	0,5	2,1	—
3-55 (24)	0,3	0,2	0,4	1,5	—
ЭМ-2, 6КВ-10 (26)	0,45	0,5	0,65	1,6	—
6КВ-10А (27)	0,43	0,5	0,60	1,5	—
ЭМ-2, 6КВ-56А (28)	0,45	0,52	0,60	1,6	—
6КХ-1 (29)	0,2	0,2	0,6	1,2	1,8
6КХ-1Б (31)	0,3	0,31	0,40	0,85	1,7
6КХ-15 (33)	0,3	0,35	0,40	0,8	1,2
6КФ-32 (34)	0,25	0,28	0,30	1,2	2,2
6КФ-58 (36)	0,25	0,27	0,32	1,25	2,3
6КФ-59 (37)	0,17	0,2	0,3	1,25	2,5
6КФ-61 (41)	0,3	0,25	0,3	0,5	0,8
6КФ-62 (42)	0,3	0,22	0,3	0,6	0,8
6ЛП-55 (43)	0,25	0,2	0,75	4	—
ЭМ-3, 6-147Н (44)	0,5	0,4	0,5	2,4	—
7КФ-3А (45)	0,3	0,32	0,4	0,8	1,6
7КФ-34 (47)	0,1	0,15	0,3	1,5	1,8
8-1 (51)	0,2	0,1	0,15	0,5	1,5
ЭМ-1,8-45 (52)	0,13	0,15	0,18	0,8	—
4СБ-1-10 (53)	0,3	0,35	0,45	0,6	0,7
41-132 (56)	0,13	0,15	0,2	0,4	1,1
42-975 (59)	0,15	0,16	0,25	0,6	1,0
101-303 (62)	0,3	0,4	0,75	2,2	2,5
143 (63)	0,15	0,2	0,3	1,0	2,2
143-63Т-4 (65)	0,15	0,2	0,3	0,9	1,8
145-40 (66)	0,3	0,35	0,48	0,7	1,3
(73)	0,9	0,9	0,3	0,8	1,6
5-6 (76)	0,35	0,3	0,3	0,4	0,7
АГ-1БС-11 (79)	0,13	0,15	0,23	0,55	1,0

Продолжение табл. 59

Шифр (код) материала	Интенсивность изнашивания (мкг/Дж) при температуре, °С				
	100	200	300	400	500
1-287 (82)	0,15	0,20	0,20	0,25	0,30
2140 (85)	0,25	0,30	0,45	0,65	1,2
1-4 (86)	0,2	0,15	0,2	0,25	0,35
328-303 (87)	0,1	0,12	0,17	0,4	1,9
358-40 (94)	0,5	0,4	0,4	0,45	1,5
2141 (97)	0,15	0,2	0,25	0,8	1,6
321-24 (99)	0,25	0,35	0,70	2,0	2,3

60. Сравнение свойств асбеста со свойствами его заменителей (по данным фирмы Феродо) [57]

Показатель	Хризотил-асбест	Стальное волокно	Стекловолокно	Натуральные органические волокна	Синтетические органические волокна	Минеральная вата	Арамидные волокна	Углеродные волокна
Термостойкость	в	в	в	н	н	в	в	в
Теплопроводность	н	в	н	н	н	н	н	н
Термическая прочность	в	в	в	н	н	в	в	в
Стойкость к излому	в	в	н	в	в	н	в	н
Площадь поверхности	б	м	м	б	м	м	м	м
Совместимость со связующими (смолами)	х	п	х	х	х	х	х	п

Обозначения: в — высокая; н — низкая; б — большая; м — маленькая; х — хорошая; п — плохая.

74—77 % азота; 0,3—0,8 % кислорода; 5—12 % углекислого газа; 5—10 % окиси углерода; 0,001—0,5 % углеводородов; 0,01 % альдегидов; 0,0002—0,5 % закиси азота [57].

В связи с тем, что асбест небезопасен для здоровья, ведутся исследования, направленные на создание безасбестовых фрикционных материалов.

Замена асбеста в тормозных материалах довольно сложна. Трудно подобрать материал, обладающий комплексом свойств, характерных для асбеста: высокими термостойкостью и прочностью, невысокой стоимостью и др. Зарубежные фирмы используют различные волокна для замены асбеста: металлические (стальные, латунные, бронзовые), углеродные, полиамидные, алюмосиликатные, базальтовые, стеклянные и др. (табл. 60).

Одним из возможных перспективных заменителей асбеста, нашедших применение за рубежом, является высокопрочное и теплостойкое волокно Кевлар. Износостойкость фрикционных накладок, содержащих Кевлар, может быть выше асбестовых при сохранении стабильных фрикционных характеристик и при высоких температу-

рах (волокно не плавится). В ряде случаев целесообразно применять углеродные волокна (особенно в фрикционных материалах углерод—углерод). Применение стальных волокон обеспечивает высокую тормозную эффективность, но при этом имеет место повышенное изнашивание контртела.

Результаты исследований свидетельствуют о реальной возможности эффективной замены асбеста при производстве отечественных тормозных материалов с необходимым комплексом свойств.

Список литературы

1. **Андриевский Р. А., Спивак И. И.** Нитрид кремния и материалы на его основе. М.: Металлургия, 1984. 136 с.
2. **Антифрикционные** самосмазывающиеся пластмассы и их применение в промышленности. М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1984. 143 с.
3. **Антифрикционные** углеродные материалы: Каталог. М.: Союзпромэкспорт, 1973. 13 с.
4. **Арзамасов Б. Н.** Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. М.: Машиностроение, 1979. 224 с.
5. **Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И.** Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 215 с.
6. **Богатин О. Б., Моров В. А., Черский И. Н.** Основы расчета полимерных узлов трения. Новосибирск: Наука, 1983. 214 с.
7. **Богачев И. Н.** Кавитационное разрушение и кавитационно-стойкие сплавы. М.: Металлургия, 1972. 189 с.
8. **Борисов Ю. С., Борисова А. Л.** Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техніка, 1986. 223 с.
9. **Бородин И. Н.** Упрочнение деталей композиционными покрытиями. М.: Машиностроение, 1982. 141 с.
10. **Буше Н. А.** Подшипниковые сплавы для подвижного состава. М.: Транспорт, 1967. 224 с.
11. **Буше Н. А., Азаренко В. А.** Расчет несущей способности вагонного подшипника скольжения//Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 1985. № 6. С. 32—35.
12. **Буше Н. А., Копытько В. В.** Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. 126 с.
13. **Вигдорович А. И., Сагалаев Г. В.** Применение древопластов в машиностроении. М.: Машиностроение, 1977. 150 с.
14. **Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Албагачиев А. Ю.** Изнашивание при ударе. М.: Машиностроение, 1982, 192 с.
15. **Власов В. М.** Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. М.: Машиностроение, 1987. 304 с.
16. **Влияние** лазерного термоупрочнения на износостойкость металлов при граничном трении/В. Н. Литвинов, Н. М. Михин, Г. И. Козлов, А. Д. Сокуренко//Трение и износ. 1983. Т. IV, № 2. С. 341—343.
17. **Влияние** температуры на адгезионное взаимодействие поликристаллических алмаза и эльбора в контакте с металлами/Семенов А. П. и др.// ФИЗХОМ. 1975. № 6. С. 131—134.
18. **Влияние** температуры подложки на структуру и триботехнические свойства тонких слоев MoS_2, полученных высокочастотным катодным распылением/М. В. Ноженков и др.//Физика, химия и механика. 1984. № 8. С. 113—119.
19. **Воронков Б. В.** Подшипники сухого трения. Л.: Машиностроение, 1979. 224 с.
20. **Геллер Ю. А.** Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
21. **Гнесин Г. Г.** Карбидкремниевые материалы. М.: Металлургия, 1977. 277 с.
22. **Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В.** Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техніка, 1974. 270 с.
23. **Горленко О. А.** Износостойкость поверхностей, упрочненных лазерной обработкой//Трение и износ. 1981. Т. II, № 1. С. 27—31.
24. **Гурьянов Г. В.** Электроосаждение износостойких композиций. Кишинев: Штиинца, 1985. 283 с.
25. **Данилин Б. С., Сырчин В. К.** Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982. 62 с.
26. **Дороднов А. М., Петросов В. А.** О физических принципах и типах вакуумных технологических плазменных устройств//ЖТФ. 1981. Т. 51, № 3. С. 504—524.
27. **Дубинин Г. Н.** Классификация методов диффузионного насыщения поверхности сплавов металлами/Диффузионные покрытия на металлах. Киев: Наукова думка, 1965. С. 3—12.
28. **Дьячков А. К., Маховенко А. И.** Применение воды в качестве смазочного материала для подшипников скольжения//Вестник машиностроения. 1981. № 12. С. 27—31.
29. **Ефимов А. И., Семенов А. П.** Оценка долговечности металлофторопластовых подшипников//Вестник машиностроения. 1975. № 1. С. 3—6.
30. **Захаров С. М., Никитин А. П., Загорянский Ю. А.** Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей. М.: Транспорт, 1981. 181 с.
31. **Зорин Е. И., Сухоруков В. В., Тетельбаум Д. И.** Осаждение карбиновых и алмазоподобных пленок в плазме газового ВЧ-разряда//ЖТФ. 1981. Т. 51, № 1. С. 175—177.
32. **Износостойкость** и структура твердых наплавок/М. М. Хрущов, М. А. Бабичев, Е. С. Беркович и др. М.: Машиностроение, 1971. 96 с.
33. **Ионная** имплантация/Под ред. Дж. К. Хирвонена. М.: Металлургия, 1986. 392 с.
34. **Исследование** износа вакуумно-плазменных покрытий из TiN при трении по металлическим материалам/ А. П. Любченко, В. М. Мацевитый, Г. Н. Бакакин и др.//Трение и износ. 1983. Т. IV. № 5. С. 892—897.
35. **Истомин Н. П., Семенов А. П.** Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. М.: Наука, 1981. 148 с.
36. **Козырев С. П.** Генезис кавитационного изнашивания//Трение и износ. 1980. № 5. С. 793—808.
37. **Козырев С. П.** Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: Машиностроение, 1964. 140 с.
38. **Колесников К. С., Колесников Ю. В., Инютин В. П.** Легирование поверхностных слоев деталей машин с использованием лазерного излучения//Машиноведение. 1987. № 4. С. 10—19.
39. **Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
40. **Кудинов В. В., Иванов В. М.** Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. М.: Машиностроение, 1981, 192 с.
41. **Ларин Т. В., Асташкевич Б. М., Транковская Г. Ф.** Влияние ванадия, меди и алюминия на износостойкость и фрикционные свойства фосфористых чугунов для тормозных колодок//Вестник ВНИИЖТа. 1986. № 8. С. 40—42.
42. **Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н.** Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
43. **Лившиц Л. С., Гринберг Н. А., Куркумелли Э. Г.** Основы легирования наплавленного металла. М.: Машиностроение, 1969. 188 с.
44. **Литейные** бронзы/К. П. Лебедев, Л. С. Райнес, Г. Ф. Шеметев, А. Д. Горячев. Л.: Машиностроение, 1973. 312 с.
45. **Мовчан Б. А., Малашенко И. С.** Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983. 231 с.
46. **Мошков А. Д.** Пористые антифрикционные материалы. М.: Машиностроение, 1968. 207 с.
47. **Мур Д.** Основы применения трибоники. М.: Мир, 1978. 487 с.
48. **Наплавочные** материалы стран—членов СЭВ (каталог). Киев—М.: МЦНТИ, 1979. 620 с.
49. **Новые** конструкционные материалы на основе углерода: Каталог М.: 1971. 70 с.
50. **Огнеупоры и их** применение/ Под ред. Я. Инамуры. М.: Металлургия, 1984. 448 с.
51. **Особо** тугоплавкие элементы и соединения: Справочник/Р. Б. Котельников, С. Н. Башлыков, З. Г. Галнакбаров, А. И. Каштанов. М.: Металлургия, 1969. 372 с.
52. **Петриченко В. К.** Антифрикционные материалы и подшипники скольжения. М.: Машгиз, 1954. 383 с.
53. **Плуталова Л. А.** Графитовые антифрикционные материалы. М.: ЦИНТИАМ. Серия VI—81, 1963. 44 с.
54. **Повышение** качества поверхности и плакирование металлов: Справочник/Под ред. А. Кнаушнера. М.: Металлургия, 1984. 368 с.

55. **Повышение** ресурса компрессорных лопаток детонационным напылением износостойких покрытий/ В. А. Венедиктов, А. З. Шарыпов, А. И. Хорошенин, П. Л. Морозов// Трение и износ. 1980. Т. 1. № 6. С. 1093—1096.

56. **Подшипники** из алюминиевых сплавов/Н. А. Буше, А. С. Гуляев, В. А. Двоскина, К. М. Раков. М.: Транспорт, 1974. 256 с.

57. **Полимеры** в узлах трения машин и приборов: Справочник/Е. В. Зиновьев, А. Л. Левин, М. М. Бородулин, А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.

58. **Порошковая** металлургия. Материалы. Технология. Свойства. Области применения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1985. 622 с.

59. **Расчет**, испытание и подбор фрикционных пар/Под ред. И. В. Крагельского. М.: Наука, 1979. 268 с.

60. **Ребиндер П. А., Щукин Е. Д.** поверхностные явления в твердых телах в процессе их деформации и разрушения/Успехи физических наук, 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 1—39.

61. **Ройх И. Д., Колтунов Л. Н., Федосов С. Н.** Нанесение защитных покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1976. 368 с.

62. **Самсонов Г. В.** Силициды и их использование в технике. Киев: Изд-во АН УССР, 1959. 204 с.

63. **Самсонов Г. В., Винницкий И. М.** Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976. 600 с.

64. **Самсонов Г. В., Кулик О. П., Полищук В. С.** Получение и методы анализа нитридов. Киев: Наукова думка, 1978. 317 с.

65. **Самсонов Г. В., Эпик А. П.** Тугоплавкие покрытия. М.: Металлургия. 1973. 400 с.

66. **Сверхтвердые** материалы/Францевич И. Н., Гнесин Г. Г., Курдюмов А. В. и др. Киев: Наукова думка, 1980. 295 с.

67. **Свойства**, получение и применение тугоплавких соединений: Справочник/Под ред. Косолаповой Т. Я. М.: Металлургия, 1986. 928 с.

68. **Семенов А. П.** Вопросы получения температуроустойчивых антифрикционных и износостойких покрытий методом контактного эвтектического плавления//Защитные высокотемпературные покрытия. Л.: Наука, 1972. С. 121—126.

69. **Семенов А. П.** Проблемы трения и износа в современном машиностроении//Вестник АН СССР, 1987, № 6. С. 40—50.

70. **Семенов А. П.** Рациональные области применения металлофторопластовых подшипников//Вестник машиностроения. 1981. № 12. С. 9—12.

71. **Семенов А. П.** Создание износостойких и антифрикционных покрытий и слоев на поверхностях трения деталей машин новыми методами//Трение и износ. 1982. № 3. С. 401—411.

72. **Семенов А. П.** Схватывание металлов. М.: Машгиз, 1958. 280 с.

73. **Семенов А. П.** Схватывание металлов и методы его предотвращения при трении//Трение и износ. 1980, Т. 1. № 2. С. 236—246.

74. **Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошина Л. Б.** Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами. М.: Наука, 1974. 109 с.

75. **Семенов А. П., Савинский Ю. Э.** Металлофторопластовые подшипники. М.: Машиностроение, 1976. 192 с.

76. **Семенов А. П., Федько Ю. П., Григоров А. И.** Детонационные покрытия и их применение. М.: НИИМаш, 1977. 72 с.

77. **Словарь-справочник** по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1979. 188 с.

78. **Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.** Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1975. 488 с.

79. **Сорокин Г. М.** Критерии износостойкости стали при ударе по абразиву//Машиноведение, 1973. № 3. С. 89—94.

80. **Тененбаум М. М.** Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 271 с.

81. **Трение**, изнашивание и смазка: Справочник. М.: Машиностроение. Кн. 1, 1978. 400 с. Кн. 2, 1979. 358 с.

82. **Трение** и износ материалов на основе полимеров/В. А. Белый, А. И. Свириденок, М. И. Петроковец, В. Г. Савкин. Минск: Наука и техника, 1976. 432 с.

83. **Третьяков В. И.** Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. М.: Металлургиздат, 1976. 528 с.

84. **Триботехнические** свойства антифрикционных самосмазывающихся пластмасс. М.: ВНИИЦентр ГСССД, 1982. 64 с.

85. **Тылкин М. А.** Повышение долговечности деталей металлургического оборудования. М.: Металлургия, 1971. 608 с.

86. **Федорченко И. М., Крячек В. М., Панаиоти И. И.** Современные фрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1976. 334 с.

87. **Федорченко И. М., Пугина Л. И.** Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. 403 с.

88. **Физико-химические** свойства окислов: Справочник/Под ред. Г. В. Самсонова. М.: Металлургия, 1969. 456 с.

89. **Фторуглеродные** пластики: Каталог-справочник/Под общей ред. С. Г. Малкевич; составитель В. П. Щедрина. Черкассы: Отд-ние НИИТЭХима. 1974. 84 с.

90. **Хасуй А.** Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.

91. **Хрущов М. М., Бабичев М. А.** Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 252 с.

92. **Хрущов М. М., Бабичев М. А.** Исследование изнашивания металлов. М.: АН СССР, 1960. 351 с.

93. **Цыпин Н. В.** Износостойкость композиционных алмазосодержащих материалов для бурового инструмента. Киев: Наукова думка, 1983. 193 с.

94. **Цыпин Н. В.** Износостойкость твердых сплавов при абразивном изнашивании//Трение и износ, 1983. № 1. С. 80—85.

95. **Чапорова И. Н., Черняв-ский К. С.** Структура спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1975. 248 с.

96. **Чичинадзе А. В.** Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М.: Наука, 1967. 231 с.

97. **Шеенко И. Н., Орешкин В. Д., Репкин Ю. Д.** Современные наплавочные материалы. Киев: Наукова думка, 1970. 238 с.

98. **Шпагин А. И.** Антифрикционные сплавы. М.: Металлургиздат, 1956. 326 с.

99. **Щеренков Г. М., Кулев В. А.** Расчет основных размеров и параметров муфт сцепления автомобилей и тракторов//Вестник машиностроения, 1974. № 2. С. 40—42.

100. **Электроискровое** легирование металлических поверхностей Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров, Г. А. Бовкун, В. С. Сычев. Киев: Наукова думка, 1976. 220 с.

101. **Энциклопедия** неорганических материалов. Киев: Главная редакция УСЭ, 1977. Т. 1. 840 с.; Т. 2. 814 с.

102. **Pratt G. G.** New developments in bearing materials — SAE Preprints. Intern. Autom. Eng. Congress, Jan. 13—17, 1969, N 690112.

103. **Sliding** — Bearing Materials. — Machine Design, 1974, Vol. 46, N 15. P. 37—44.

104. **Tribology** International, 1978. Vol. 11. N 2. P. 99—143.

105. **Wear**, 1978, Vol. 48. N 2. P. 225—266; 291—299.

106. **White G.**, Dearnaley G. The Influence of N_2^+ ion Implantation on Rolling Contact Fatigue Performance. — Wear, 1980, vol. 64, N 2. P. 327—332.

107. **Wilson R. W.** Surface Treatment to Combat Wear. — First European Tribology Congress. The Inst. of Mech. Eng. Conf. Publication 18, 1973. P. 165—176.

Глава IV МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКИМИ УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

К материалам с высокими упругими свойствами относятся пружинные стали и сплавы.

В промышленности используются разнообразные пружинные стали и сплавы, так как условия службы изготовляемых из них упругих элементов (пружин, рессор, мембран, сильфонов и др.) различны. Независимо от условий применения пружинные сплавы должны иметь определенные, характерные для всех конструкционных сплавов, свойства — высокую прочность в условиях статического, циклического или динамического нагружения, достаточную пластичность и вязкость, а также высокое сопротивление разрушению.

Однако основным свойством, которым должны обладать пружинные стали и сплавы, является высокое сопротивление малым пластическим деформациям как в условиях кратковременного (предел упругости), так и длительного (релаксационная стойкость) нагружения, зависящее от состава и структуры этих материалов, а также от параметров воздействия на них внешних условий — температуры, коррозионной активности внешней среды и др. Между сопротивлением малым пластическим деформациям и пределом выносливости во многих случаях существует корреляционная связь. Установлена также связь между сопротивлением малым пластическим деформациям и степенью развития таких неупругих эффектов, как амплитудно-зависимое внутреннее трение, упругое последействие (прямое и обратное) и упругий гистерезис.

Таким образом, сопротивление малым пластическим деформациям определяет весь комплекс основных свойств пружинных сталей и сплавов.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРУЖИННЫХ СПЛАВОВ ПО ОСНОВНЫМ СПОСОБАМ УПРОЧНЕНИЯ

К сплавам, упрочняемым холодной пластической деформацией и последующим отпуском или низкотемпературным отжигом, относятся углеродистые и легированные стали перлитного класса с повышенным содержанием углерода (0,4—1,0 %), а также низкоуглеродистые стали аустенитного класса, подвергаемые упрочнению холодной пластической деформацией (после предварительной термической обработки), затем дополнительному отпуску. В первую группу также входят сплавы меди (однофазные латуни, бронзы), молибдена и рения, ниобия и др.

Характерной особенностью всех сплавов рассматриваемой группы является анизотропия упругих свойств, резко выраженная в деформированном состоянии, но уменьшающаяся после отпуска (или при дорекристаллизационном отжиге) в результате перераспределения напряжений и дислокаций.

К сплавам, упрочняемым в результате мартенситного превращения, относятся углеродистые и легированные стали. Эти стали упрочняются в результате мартенситного превращения при закалке, в том числе совмещенной с различными видами термомеханической обработки — высокотемпературной (ВТМО) или низкотемпературной (НТМО) или в процессе холодной пластической деформации, как, например, в сталях переходного аустенитно-мартенситного класса.

Максимум сопротивления малым пластическим деформациям стали и сплавы этой группы приобретают после дополнительного отпуска (старения), в процессе которого помимо изменения структурного или фазового состояния уменьшается уровень внутренних напряжений.

К сплавам, упрочняемым в результате дисперсионного твердения (старения), относятся мартенситно-стареющие стали, аустенитные дисперсионно-твердеющие сплавы, бериллиевые бронзы и т. п., упрочнение которых является следствием выделения дисперсных частиц избыточных фаз из пересыщенного в результате закалки твердого раствора при последующем старении (или отпуске). Максимальное упрочнение этих сталей и сплавов достигается в случае использования термомеханической обработки по следующей технологической схеме: закалка, холодная пластическая деформация и старение (отпуск).

Наиболее перспективным направлением для получения высоких прочностных свойств у существующих сплавов и для создания новых высокопрочных пружинных сплавов является совмещение в каждом из них нескольких структурных механизмов упрочнения. В этом случае классификация даже по основным для каждой группы сплавов методам упрочнения теряет свою определенность и становится слишком сложной и в то же время недостаточно четкой. Поэтому более целесообразно классифицировать пружинные сплавы по назначению.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРУЖИННЫХ СПЛАВОВ ПО НАЗНАЧЕНИЮ

Пружинные сплавы общего назначения относятся к классу конструкционных материалов, и поэтому они должны в первую очередь обладать высокими пределами прочности, упругости, выносливости, релаксационной стойкостью и сопротивлением разрушению.

Пружинные сплавы специального назначения наряду с повышенными механическими свойствами должны иметь определенные физико-химические и физические свойства, требования к которым изменяются в зависимости от условий эксплуатации соответствующих упругих элементов. В частности, к этим сплавам могут предъявляться требования повышенной коррозионной стойкости, немагнитности, малого удельного электрического сопротивления и др.

Пружинные сплавы общего назначения. К этим сплавам относятся преимущественно углеродистые и легированные стали, главным образом перлитного класса, и лишь в ограниченной степени мартенситного класса (табл. 1). У этих сталей обычно повышенное содержание углерода (0,4—1,2 %), что и определяет высокую степень их упрочнения в результате холодной пластической деформации или мартенситного превращения при закалке.

Углеродистые пружинные стали 65, 70, 75, 80, 85, У9А, У10А, У11А, У12А отличаются низкой коррозионной стойкостью, сравнительно высоким температурным коэффициентом модуля упругости и сниженной релаксационной стойкостью даже при небольшом нагреве. Поэтому они непригодны для работы при температурах выше 100 °С. Кроме того, углеродистая сталь имеет малую прокаливаемость и поэтому ее можно применять лишь для изготовления пружин малого сечения. При закалке, когда необходимо охлаждение пружин в воде, неизбежно наблюдается значительная их деформация, а при очень сложных конфигурациях могут возникать трещины.

Легированные пружинные стали отличаются более высокой релаксационной стойкостью, чем углеродистые, и, кроме того, позволяют получать высокие прочностные свойства (в том числе и предел упругости) в сочетании с повышенной вязкостью и сопротивлением хрупкому разрушению в упругих элементах повышенного сечения. Возможность закалки пружин и других упругих элементов из некоторых более высоколегированных пружинных сталей на воздухе также позволяет сильно уменьшить зональные остаточные напряжения, что повышает стабильность характеристик изделий во времени.

1. Химический состав (мас. доля, %) и применение легированных пружинных сталей общего назначения (ГОСТ 14959—79)

Сталь	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Другие элементы	Примерное назначение
60Г	0,57—0,65	0,70—1,00	0,17—0,37	⩽0,25	⩽0,25	⩽0,20	—	Пружины механизмов и машин
65Г	0,62—0,70	0,90—1,20	0,17—0,37	⩽0,25	⩽0,25	⩽0,20	—	
70Г	0,67—0,75	0,90—1,20	0,17—0,37	⩽0,25	⩽0,25	⩽0,20	—	
50ХГ	0,46—0,54	0,70—1,00	0,17—0,37	0,90—1,20	⩽0,25	⩽0,20	—	Рессоры автомашин. Пружины подвижного состава железнодорожного транспорта
50ХГА	0,47—0,52	0,80—1,00	0,17—0,37	0,95—1,20	⩽0,25	⩽0,20	—	
55ХГР	0,52—0,60	0,90—1,20	0,17—0,37	0,90—1,20	⩽0,25	⩽0,20	0,001—0,003 B	
55С2	0,52—0,60	0,60—0,90	1,50—2,00	⩽0,30	⩽0,25	⩽0,20	—	
55С2А	0,53—0,58	0,60—0,90	1,50—2,00	⩽0,30	⩽0,25	⩽0,20	—	
60С2	0,57—0,65	0,60—0,90	1,5—2,0	⩽0,30	⩽0,25	⩽0,20	—	
60С2А	0,58—0,63	0,60—0,90	1,6—2,0	⩽0,30	⩽0,25	⩽0,20	—	
70С3А	0,66—0,74	0,60—0,90	2,40—2,80	⩽0,30	⩽0,25	⩽0,20	—	Пружины механизмов и машин
50ХФА	0,46—0,54	0,50—0,80	0,17—0,37	0,80—1,10	⩽0,25	⩽0,20	0,10—0,20 V	Пружины особо ответственного назначения; рессоры легковых автомобилей
51ХФА *1	0,47—0,55	0,30—0,60	0,15—0,30	0,75—1,0	—	—	0,15—0,25 V	
50ХГФА	0,48—0,54	0,80—1,00	0,17—0,37	0,95—1,10	⩽0,25	⩽0,20	0,15—0,25 V	
55СГФ	0,52—0,60	0,95—1,25	1,5—2,0	⩽0,30	⩽0,25	⩽0,20	0,10—0,15 V	

Продолжение табл. 1

Сталь	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Другие элементы	Примерное назначение
45ХН2МФА *2	0,42—0,50	0,50—0,80	0,17—0,37	0,80—1,10	1,30—1,80	⩽0,20	0,20—0,30 Mo, 0,10—0,20 V	Крупные клапанные пружины, торсионные валы
70С2ХА	0,65—0,75	0,4—0,6	1,40—1,70	0,2—0,4	⩽0,25	⩽0,20	—	Пружины часовых механизмов. Крупные пружины ответственного назначения
50ХСА	0,45—0,55	0,30—0,50	0,80—1,20	0,90—1,20	⩽0,25	⩽0,20	—	
60С2ХА	0,56—0,64	0,40—0,70	1,40—1,80	0,70—1,00	⩽0,25	⩽0,20	—	
60С2ХФА	0,56—0,64	0,40—0,70	1,40—1,80	0,90—1,20	⩽0,25	⩽0,20	0,10—0,20 V	
65С2ВА	0,61—0,69	0,70—1,00	1,50—2,00	⩽0,30	⩽0,25	⩽0,20	0,80—1,20 W	
60С2Н2А	0,56—0,64	0,40—0,70	1,40—1,80	⩽0,30	1,40—1,70	⩽0,20	—	

*1 Сталь 51ХФА предназначена для изготовления проволоки.
*2 По ГОСТ 4543—61.

Примечание. Согласно ГОСТ 14959—79 в стали, изготовленной скрап-процессом, содержание остаточных меди и никеля не более 0,3 % каждого, вместо 0,25 % при использовании других металлургических процессов выплавки. Содержание P и S в качественной стали ⩽0,035 %, а в высококачественной ⩽0,025 % каждого.

В зависимости от конфигурации упругих элементов, их размеров, требуемых свойств и экономичности технологического процесса производства для изготовления этих изделий применяют пружинную сталь: 1) холоднодеформированную, предварительно термически обработанную, обычно патентированную, проволоку или ленту; 2) термически обработанную закалкой и последующим отпуском до заданной прочности ленту или проволоку; 3) холоднокатаную и горячекатаную сталь для пружин, подвергаемых затем закалке.

Для изготовления холоднодеформированной, термически обработанной пружинной проволоки (ГОСТ 9389—75) обычно применяют углеродистые стали с 0,4—1,0 % С в соответствии с ГОСТ 1050—74 и ГОСТ 1435—74, реже, с повышенным содержанием марганца (65Г), а в некоторых случаях — также и низколегированные стали 50ХФА, 70С2ХА согласно ГОСТ 14959—79 (табл. 1), предварительно до холодной пластической деформации подвергнутые термической обработке — патентированию, в результате которой сталь приобретает структуру тонкопластинчатого сорбита. Пружинную проволоку этой группы по значениям прочности разделяют на три класса. Для проволоки максимальной прочности (I класс) обычно применяют углеродистые стали У7А—У9А, а также стали КТ-2 (0,86—0,91 % С; 0,2—0,4 % Mn; 0,17—0,37 % Si) и ЗК-7 (0,68—0,76 % С; 0,5—0,8 % Mn; 0,17—0,37 % Si) с пониженным содержанием примесей; для проволоки повышенной прочности (II и IIA классы) используют сталь 65Г, а для проволоки нормальной прочности (III класс) — сталь 45.

Проволоку I, II и IIA классов используют главным образом для изготовления одножильных или многожильных винтовых цилиндрических пружин сжатия и растяжения, работающих в условиях статического или циклического нагружения. Из проволоки III класса из-за её пониженной прочности изготовляют лишь слабонагружаемые пружины. Проволоку I—III классов, как правило, изготовляют из углеродистых сталей, в том числе из 65Г, но для пружин, которые работают при повышенных температурах и напряжениях, применяют низколегированные стали. Прочность проволоки тем выше, чем больше суммарная степень холодной пластической деформации (частые обжатия, т. е. за 1 проход при волочении, 10—12 %) или соответственно чем меньше ее диаметр. При этом наибольшее упрочнение при сохранении достаточной пластичности и вязкости достигается только после предварительного патентирования.

В результате упрочняющей холодной пластической деформации патентированная проволока приобретает значительные остаточные напряжения, которые сильно снижают предел упругости, почти не влияя на предел прочности. Для уменьшения этих напряжений и повышения предела упругости и релаксационной стойкости— основных характеристик пружинной стали— готовые пружины после навивки или гибки подвергают последующему низкотемпературному отпуску при 200—300 °С. Рост предела упругости в результате этого отпуска достигает примерно 100 % исходной величины, тогда как предел прочности возрастает примерно лишь на 10 %. Релаксационная стойкость пружин после отпуска возрастает по сравнению с неотпущенными примерно в 2—3 раза. Также возрастает и предел выносливости (на 5—10 %), причем температура отпуска для достижения максимума этого свойства обычно выше (300—350 °С), чем температура отпуска для достижения максимального предела упругости (обычно 200—300 °С) (табл. 2). При назначении режима отпуска следует учитывать влияние не только температуры, но и его продолжительности (табл. 3).

Рекомендуемые режимы отпуска пружин из патентированной высокоуглеродистой стальной проволоки: температура 175 °С с выдержкой 2 ч или 220—300 °С с выдержкой 1 ч или 350 °С с выдержкой 15 мин.

Пружины, изготовленные из патентированной и холоднодеформированной стальной проволоки или ленты, после дополнительного отпуска приобретают высокую прочность, в том числе и сопротивление усталости, при повышенной вязкости. Эта сталь рекомендуется для изготовления тяжелонагруженных пружин преимущественно из профилей малого сечения (толщиной или диаметром до 1,5—2 мм). При больших диаметрах проволоки не удается обеспечить высоких степеней обжатия, и поэтому стандартный комплекс механических свойств в этих сечениях ниже, хотя и не уступает свойствам, получаемым после обычной закалки и отпуска. Однако по ограниченной выносливости и меньшей склонности к хрупкому разрушению пружины из патентированных сталей превосходят упрочненные в результате закалки и отпуска. В то же время у стали, закаленной и отпущенной до равной твердости с патентированной и холоднотянутой, более высокий предел упругости и большая релаксационная стойкость при 20 °С; при нагреве эта стойкость для стали после обеих упрочняющих обработок практически одинакова.

Термически обработанную или нагартованную (упрочненную) пружинную ленту и проволоку изготовляют из углеродистой (60, 70, У7А—У12А) или легированной (65Г, 70С2ХА, 60С2А) стали (см. табл. 1). Лента отличается высокой точностью размеров, повышенной прочностью, высоким качеством отделки поверхности в результате шлифования и полирования *1, что определяет ее высокое сопротивление хрупкому разрушению и сопротивление выносливости. Последнее может быть повышено при шлифовании не только поверхности, но и закругленных кромок, полученных в результате плющения проволочной заготовки под валками.

Свойства термически обработанной или нагартованной ленты приведены в табл. 4 и 5.

*1 После шлифования или полирования ленту подвергают низкотемпературному отпуску, который уменьшает возникающие при поверхностной обработке остаточные напряжения и создает оксидную пленку желтую или синюю, способствующую лучшему сохранению смазочного материала.

2. Зависимость усталостной прочности проволоки диаметром 0,5 мм из стали У8А от степени деформации волочением и температуры последующего отпуска

Степень деформации, %	τ_{-1} (в МПа) после отпуска при температуре, °С					
	Без отпуска	100	200	300	400	500
30	750	750	760	770	750	770
50	900	900	870	890	880	880
70	1020	1020	980	1030	1050	1000
90	1000	1000	950	980	980	930

3. Влияние продолжительности отпуска при 300 и 500 °С на предел выносливости проволоки диаметром 0,5 мм из стали У8А после волочения с отжатием 70 % (числитель) и 90 % (знаменатель) (По данным Л. А. Красильникова)

Температура отпуска, °С	τ_{-1} (в МПа) после отпуска при 300 и 500 °С с выдержкой, мин					
	0,1	0,5	1	5	10	20
300	1020 / 1030	1070 / 1060	1080 / 1080	1070 / 1000	1050 / 980	1020 / 980
500	1060 / 1070	1100 / 1020	1030 / 950	1020 / 920	1060 / 920	1020 / 920

4. Прочностные свойства термически обработанной или нагартованной ленты (ГОСТ 21997—76)

Группа прочности	$\sigma_в$, МПа	HV
1П	1300—1600	375—485
2П	1610—1900	486—600
3П	⩾1900	⩾600

5. Свойства вязкости (число переменных изгибов) термически обработанной или нагартованной ленты (ГОСТ 21997—76)

Толщина ленты, мм	Радиус валков, мм	Число перемениых изгибов (не менее) по группам прочности					
		1П		2П		3П	
		Стали					
		60, 70, 65Г, У7А, У8А	У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА	60, 70 65Г, У7А, У8А	У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА	60, 70 65Г, У7А, У8А	У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА
0,16	2	28	21	21	16	17	14
0,20	2	23	18	17	14	13	10
0,30	4	35	29	26	20	19	18
0,40	4	26	24	19	15	12	10
0,50	6	31	25	22	18	19	15
0,60	6	25	21	17	14	11	9
0,70	6	20	17	12	9	5	3
0,80	8	17	14	11	9	3	2
0,90	8	14	12	7	4	—	—
1,00	8	12	10	2	1	—	—

6. Химический состав (мас. доли, %) сталей для термически обработанной проволоки

Сталь	C	Mn	Si	Ni	Cr	Al	Cu
65ГА	0,65—0,70	0,70—1,0	0,15—0,30	⩽0,2	⩽0,15	⩽0,08	⩽0,2
68ГА	0,65—0,70	0,70—1,0	0,15—0,25	⩽0,2	⩽0,12	⩽0,05	⩽0,15
68А	0,65—0,70	0,40—0,55	0,15—0,25	⩽0,2	⩽0,12	⩽0,05	⩽0,15

Из термически обработанной или нагартованной плющеной ленты изготовляют пружины сравнительно простой конфигурации путем вырубки с применением, если необходимо, небольшой гибки. После этих операций проводят низкий отпуск при 200—300 °С для снятия напряжений.

Помимо термически обработанной или нагартованной ленты в промышленности для изготовления пружин также применяют и термически обработанную проволоку диаметром 1,2—5,5 мм, изготовляемую согласно ГОСТ 1071—81 из сталей 65ГА, 68ГА, 68А *1 (табл. 6) и 51ХФА.

*1 По ГОСТ 14959—79.

После закалки и отпуска свойства стальной проволоки зависят от ее диаметра (табл. 7).

Основные достоинства термически упрочненной проволоки — минимальные отклонения от прямолинейности формы и повышенная релаксационная стойкость, особенно у проволоки повышенных диаметров. Стали этого типа используют главным образом для изготовления клапанных пружин.

Холоднокатаная и горячедеформированная сталь для пружин (ГОСТ 2283—79) может быть или в нагартованном состоянии, или после отжига, в том числе и после отжига на зернистый перлит. Из этих полуфабрикатов изготовляют пружины более сложной конфигурации и точных размеров, чем из указанных ранее полуфабрикатов. Пружинную холоднокатаную ленту изготовляют из инструментальных (У7—У13 и У7А—У13А) и пружинных (60Г, 65Г, 85, 60С2А, 60С2, 50ХФА, 65С2ВА и 70С2ХА) сталей (см. табл. 1). Механические свойства пружинной холоднокатаной ленты приведены в табл. 8.

Для производства пружин и рессор крупных сечений применяют сортовой и полосовой горячекатаный прокат из углеродистых и легированных сталей (табл. 1). Эти упругие элементы изготовляют навивкой или штамповкой в холодном или горячем состоянии. Пружины и другие элементы, изготовленные из холодно- или горячекатаного проката, для достижения требуемого комплекса механических свойств подвергают упрочняющей обработке — закалке и отпуску или ВТМО и отпуску.

Свойства и режимы термической обработки углеродистых и легированных сталей приведены в табл. 9. Закалку пружин из этих сталей проводят в воде или масле. Пружины, рессоры и другие упругие элементы

7. Механические свойства проволоки (ГОСТ 1071—81)

Номинальный диаметр проволоки, мм	$\sigma_в$, МПа, категории качества		Диаметр валика, мм	Число перегибов на 180° для проволоки класса	
	первой	высшей		I	II
				не менее	
1,20	1764—2058	1764—1960	7,5	5	4
1,40	1715—2009	1715—1911		4	3
1,60	1715—2009	1715—1911	10	7	6
1,80	1666—1960	1666—1862		7	6
2,00	1666—1960	1666—1862		6	5
2,30	1617—1911	1617—1813	15	7	6
2,50	1617—1911	1617—1813		6	5
2,75	1617—1911	1617—1813		6	5
3,00	1568—1862	1568—1764		4	3
3,20	1568—1862	1568—1764	20	8	7
3,40	1568—1862	1568—1764		8	7
3,50	1470—1764	1470—1666		7	6
3,60	1470—1764	1470—1666		7	6
3,75	1421—1715	1421—1617		7	6
4,00	1421—1715	1421—1617		6	5
4,10	1372—1666	1372—1568	30	8	7
4,20	1372—1666	1372—1568		7	6
4,50	1372—1666	1372—1568		6	5
4,80	1323—1617	1323—1519		4	4
5,00	1323—1617	1323—1519		4	4
5,50	1274—1568	1274—1470		4	4

Примечание. Число скручиваний на 360° — 10 для проволоки класса I и 8 для проволоки класса II.

8. Механические свойства пружинной ленты (ГОСТ 2283—79)

Стали	Толщина, мм	Лента отожженная		Лента нагартованная *1
		$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	$\sigma_в$, МПа
		не менее		
50Г, 60Г, 65Г, У7, У7А, У8	До 1,5 вкл	650	15	
У8А	Св. 1,5	750	10	
У8Г, У8ГА, У9, У9А, У10, У10А, У11, У11А, У12, У12А, 85		750	10	750—1200
У13, У13А	0,10—4,0	900	—	
50ХФА, 60С2А, 60С2, 65С2ВА, 70С2ХА		900	8	800—1200

*1 Нагартованная лента разделяется по классам прочности на Н1, Н2 и Н3 при соответствении увеличении абсолютных значений $\sigma_в$ от 750 до 1200 МПа.

больших сечений и те, от которых требуется повышенная релаксационная стойкость, в том числе и при небольшом нагреве, изготовляют из легированных сталей, чаще всего кремнистых, а также из хромомарганцевых, хромованадиевых.

Твердость пружин после обычной закалки и отпуска, как правило, находится в пределах 42—48 HRC. При более высокой твердости пружины склонны к хрупкому и в том числе к замедленному разрушению. Пружины, рессоры и другие упругие элементы больших сечений и те, от которых требуется повышенная релаксационная стойкость, в том числе и при небольшом нагреве, изготовляют из легированных сталей, чаще всего из кремнистых, а также хромомарганцевых, кремнехромистых, хромованадиевых и др. Указанные в табл. 9 режимы отпуска позволяют характеризовать качество пружинных сталей. Практически используемые режимы отпуска тех или иных упругих элементов зависят от условий их службы и могут варьироваться в достаточно широких пределах. В табл. 10—14 приведены зависимости свойств наиболее распространенных пружинных сталей от температуры отпуска, по которым можно назначать его оптимальные режимы. Помимо закалки и отпуска в ряде случаев применяют изотермическую закалку на нижний бейнит, в частности для сталей перлитного класса марок 60С2, 65С2ВА, 50ХФА и др. После аустенизации при температурах, указанных в табл. 9, осуществляют переохлаждение до 280—350 °С и после соответствующей выдержки пружины охлаждают в масле.

После изотермической закалки у пружинной стали повышаются пластичность, вязкость и уменьшается склонность к хрупкому разрушению. При этом снижаются внутренние напряжения, деформация при закалке и склонность к хрупкому разрушению. Поэтому для пружин, подвергнутых изотермической закалке, допустима более высокая твердость (до 50—52 HRC), чем после обычной закалки и отпуска. После изотермической закалки предел упругости и релаксационная стойкость ниже, чем после обычной закалки и отпуска (при равном временном сопротивлении); но они могут быть повышены путем дополнительного отпуска при темпера-

9. Свойства и режимы термической обработки углеродистых и легированных пружинных сталей

Стали	Критические точки, °С		Режим термической обработки (ориентировочный)			Механические свойства не менее			
	Ac_1	Ac_3	Температура закалки, °С	Закалочная среда	Температура отпуска, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %
65	727	752	830	Масло	470	785	980	10	35
70	730	743	830	»	470	835	1030	9	30
75	730	—	820	»	470	885	1080	9	30
80	730	—	820	»	470	930	1080	8	30
85	730	—	820	»	470	980	1130	8	30
У9А *1	730	—	760—790	Масло или вода	300—420	—	—	—	—
У10А—У12А *1	730	—	770—810	То же	300—420	—	—	—	—
60Г	—	—	830	Масло	470	785	980	8	30
65Г	—	—	830	»	470	785	980	8	30
70Г	—	—	830	»	470	835	1030	7	25
55С2	775	840							
55С2А	775	840	870	Масло или вод	470	1175	1270	6	30
60С2	750	820	870	Масло	470	1175	1270	6	25
70С3А	—	—	850	»	470	1470	1470	6	25
60С2Г	—	—	870	»	470	1325	1470	6	25
50ХГ	750	775	850	»	470	1175	1270	7	35
50ХГА	750	775	850	»	470	1175	1270	7	35
55ХГР	750	790	850	»	470	1175	1270	7	35
60с2А	750	820	870	»	420	1375	1570	6	20
50ХФА	—	—	850	»	470	1080	1270	8	35
50ХГФА	—	—	850	»	470	1325	1420	6	35
55С2ГФ	—	—	870	»	470	1375	1570	6	25
60С2ХА	—	—	870	»	470	1325	1470	6	25
60С2ХФА	—	—	870	»	470	1470	1670	6	25
65С2ВА	—	—	850	»	420	1665	1860	5	20
60С2Н2А	—	—	870	»	470	1325	1470	8	30

*1 При закалке в воде температуру закалки принимают по нижнему пределу, а при закалке в масле — по верхнему.

10. Временное сопротивление сталей ($\sigma_в$ в МПа) после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

Сталь	Температура отпуска (динамического старения), °С					
	200	250	300	350	400	450
65	2350/2450	2280/2400	1980/2140	1770/1880	1420/1570	1170/1200
65Г	2250/2400	2200/2350	2100/2260	2000/2150	1830/1900	1600/1650
60С2А	2300/2370	2350/2360	2280/2300	2140/2250	1760/1820	1500/1520
60С2ХА	2100/2350	2230/2400	2250/2350	2200/2300	2050/2150	1850/1900
65С2ВА	2150/2300	2400/2510	2370/2430	2300/2390	2150/2200	1950/2000
50ХА	2180/2210	2100/2150	1920/2000	1850/1900	1660/1700	1530/1550
50ХГА	2250/2300	2140/2170	1890/1980	1800/1840	1600/1670	1420/1500
50ХГФА	2280/2350	2200/2250	2080/2150	2000/2030	1910/2000	1830/1870
50ХФА	2300/2380	2150/2300	2150/2200	2060/2150	1900/2000	1770/1800
40ХФА	2060/2080	1900/1950	1800/1860	1660/1750	1580/1640	1420/1440

11. Предел текучести ($\sigma_{0,2}$ в МПа) после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

Сталь	Температура отпуска (динамического старения), °С					
	200	250	300	350	400	450
65	1800/2240	1750/2180	1630/2000	1500/1800	1330/1470	1100/1160
65Г	—/2000	2030/2270	2030/2230	1900/2050	1760/1800	1560/1600
60С2А	1900/2250	2100/2280	2090/2200	2030/2120	1630/1710	1400/1450
60С2ХА	1800/1840	2000/2150	2000/2200	1960/2140	1890/2020	1720/1820
65С2ВА	—	—/2270	2090/2250	2050/2120	1950/2020	1740/1800
50ХА	1920/2070	1850/2000	1780/1800	1690/1750	1530/1600	1450/1500
50ХГА	1960/2020	1890/1960	1800/1850	1660/1750	1500/1580	1360/1450
50ХГФА	1900/2110	1930/2070	1900/1950	1830/1900	1700/1800	1600/1650
50ХФА	1920/2100	1950/2060	1900/2020	1900/2000	1760/1850	1600/1650
40ХФА	1640/1840	1620/1820	1650/1700	1580/1620	1500/1550	1360/1400

12. Предел упругости ($\sigma_{0,005}$ в МПа) после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

Сталь	Температура отпуска (динамического старения), °С					
	200	250	300	350	400	450
65	1050/1600	1220/1600	910/1300	850/1250	820/1170	730/1030
65Г	1100/2100	1200/2100	1350/2050	1500/1850	1350/1650	1200/1400
60С2А	1310/1940	1450/2050	1490/2020	1450/1900	1210/1620	1180/1300
60С2ХА	1220/1700	1500/1900	1520/1920	1620/1900	1500/1800	1300/1060
65С2ВА	1220/1680	1400/1890	1580/1950	1690/1910	1590/1850	1420/1660
50Х	950/1510	1000/1550	1150/1550	1160/1500	1200/1400	1050/1250
50ХГА	940/1500	1050/1600	1200/1560	1260/1520	1200/1400	1050/1220
50ХГФА	950/1500	1230/1600	1250/1580	1300/1550	1250/1500	1170/1400
50ХФА	1050/1500	1200/1600	1200/1580	1270/1580	1200/1550	1150/1400
40ХФА	900/1370	930/1450	1050/1420	1100/1400	900/1380	850/1290

туре, равной температуре предшествующей изотермической выдержки при закалке.

В табл. 15 приведены данные о свойствах стали 60С2А после изотермической закалки и последующего отпуска, а также после закалки и отпуска, которые показывают преимущества первого процесса термической обработки. Свойства пружинных сталей могут быть существенно повышены (см. табл. 10—14) в результате применения процесса динамического старения (или отпуска под нагружением) [3]. Эта обработка заключается в нагружении стали после предварительной закалки и низкого отпуска (при 170—180 °С) при среднетемпературном нагреве (отпуске) внешней нагрузкой, обеспечивающей напряжение в образце до значений 0,7—0,8 предела текучести при этих температурах. Под влиянием этих напряжений общие закономерности изменения свойств закаленных сталей от температуры обычного отпуска или динамического старения одинаковы. Улучшение свойств в результате динамического старения является следствием более полного распада остаточного аустенита и формирования структурного состояния стали, отличающегося от наблюдаемого после обычного отпуска. Это связано с влиянием напряжений, возникших под воздействием нагрузки, на условия выделения карбидов, их структуру, распределение морфологии. Напряжения стабилизируют когерентно-связанные с матрицей частицы ε-карбида, которые в итоге сохраняются до более высоких температур (250 °С), когда после обычного отпуска в структуре отмечаются лишь частицы цементита. Кроме того, при динамическом старении изменяются морфология и ориентировка частиц карбидов, дисперсность которых после всех температур процесса обработки выше, чем после обычного отпуска. Эти изменения структуры, а также субструктуры и определяют улучшение всего комплекса свойств пружинных сталей.

Пружинные сплавы специального назначения. Сплавы этого класса разделяются на следующие группы: а) коррозионно-стойкие; б) немагнит-

13. Предел выносливости (σ_{-1} в МПа) и малоцикловой выносливости (σ_N в МПа при $N = 10^5$ циклов) после закалки и отпуска (числитель), а также после закалки и динамического старения (знаменатель) пружинных сталей

Сталь	Температура отпуска (динамического старения), °С													
	250		300		350		400		450					
	σ_{-1}	σ_N	σ_{-1}	σ_N	σ_{-1}	σ_N	σ_{-1}	σ_N	σ_{-1}	σ_N				
65Г	500/710	600/920	640/750	580/890	680/780	545/1000	650/740	650/860	450/550	590/760				
60С2А	550/730	620/770	580/790	740/1040	630/820	840/980	590/780	820/960	530/700	790/850				
65С2ВА	610/830	740/940	—	—	710/900	850/1000	—	—	580/850	660/900				
50ХГА	530/660	590/730	—	—	550/630	570/600	—	—	500/570	530/650				
50ХГФА	575/710	650/800	—	—	590/700	630/800	—	—	540/650	620/700				
50ХФА	570/710	640/810	—	—	590/720	650/820	—	—	540/660	630/710				
40ХФА	500/680	540/750	—	—	520/630	560/700	—	—	480/550	520/650				

14. Максимальная релаксационная стойкость (в %) [*1] пружинных сталей после термической обработки

Сталь	Закалка и отпуск	Закалка и динамическое старение
65 [*2]	2,4	1,0
65Г [*2]	2,2	0,9
60С2 [*2]	2,2	0,8
65С2ВА [*3]	1,2	0,5
60С2ХА [*3]	2,2	1,0
50ХГА [*3]	2,6	1,0
50ХГФА [*2]	2,3	0,8
50ХФА [*3]	2,2	0,8

[*1] Релаксационная стойкость $\frac{\sigma_0 - \sigma_\tau}{\sigma_0} 100$. Условия испытания: исходное напряжение $\sigma_0 = 0{,}7\sigma_{0{,}2}$; σ_τ — напряжение после нагружения при испытании 30 мин.

[*2] После закалки и отпуска (или динамического старения) при 250 °С.

[*3] После закалки и отпуска (или динамического старения) при 350 °С.

15. Влияние изотермической закалки и последующего отпуска на механические свойства стали 60С2А

Обработка	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{пц}$	δ_5	ψ	*KCU*, КДж/м²
	МПа			%		
Изотермическая закалка с выдержкой при 290 °С	2050	1715	1499	11	40	489
То же, отпуск 1 ч при температуре, °С						
150	1980	1765	1567	12	46	568
290	1930	1812	1648	12,5	50	489
400	1773	1715	1568	13,5	40	372
Закалка и отпуск при 420 °С	1765	1648	1529	11	48	353

ные; в) с низким температурным коэффициентом модуля упругости; г) высокоэлектропроводные.

Коррозионно-стойкие сплавы (табл. 16) применяют для изготовления пружин регулирующих устройств и приборов, работающих в коррозионно-активных средах. Применение таких пружин значительно эффективнее, чем пружин с гальваническими покрытиями.

Для пружин, стойких в атмосфере пара, воздуха, воды и слабоокисляющих сред, применяют высокохромистые стали типа 30Х13 и 40Х13. Пружины из этих сталей изготовляют методами холодной (или горячей) навивки или изгиба, а затем закаливают при 1000—1050 °С с охлаждением в воде или масле и далее проводят отпуск при 300—350 °С (если пружины работают при климатических темпе-

16. Химический состав (мас. доли, %) коррозионно-стойких пружинных сталей и сплавов (ГОСТ 5632—72)

Сталь (или сплав)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Mo	Другие элементы
Стали мартенситного класса								
20Х13	0,16—0,24	≤0,6	≤0,6	12,0—14,0	—	—	—	—
30Х13	0,26—0,34	≤0,6	≤0,6	12,0—14,0	—	—	—	—
40Х13	0,36—0,45	≤0,6	≤0,6	12,0—14,0	—	—	—	—
14Х17Н2	0,11—0,17	≤0,8	≤0,8	16,0—18,0	1,5—2,5	—	—	—
Стали аустенитного класса								
08Х18Н10Т	Не более 0,08	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	9,0—11,0	5·С—0,7	—	—
12Х18Н	» » 0,12	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	9,0—11,0	—	—	—
12Х18Н9Т	» » 0,12	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	8,0—9,5	5·С—0,8	—	—
17Х18Н9	0,13—0,21	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	8,0—10,0	—	—	—
37Х12Н8Г8МФБ	0,34—0,40	0,3—0,8	7,5—9,5	11,5—13,5	7,0—9,0	—	1,1—1,4	1,25—1,55 V, ≤0,2 Nb
Аустенитно-мартенситные стали, упрочняемые фазовым наклепом и дисперсионным твердением								
09Х15Н8Ю	Не более 0,09	≤0,8	≤0,8	14,0—16,0	7,0—9,4	—	—	0,7—1,3 Al
09Х17Н7Ю1	» » 0,09	≤0,8	≤0,8	16,5—18,0	6,5—7,5	—	—	0,7—1,1 Al
06Х16Н7М2Ю	0,06—0,10	≤0,7	≤0,7	15,0—16,5	6,5—7,5	—	1,0—2,0	—
(ЭИ66 [*1])								
17ХНГТ	Не более 0,05	≤0,6	0,8—1,2	15,5—17,5	6,5—7,5	0,80—1,20	—	0,5 Al
(ЭИ814,								
0Х17НТГТ [*2])								
Аустенитные сплавы, упрочняемые дисперсионным твердением (ГОСТ 10994—74)								
36НХТЮ	Не более 0,05	0,3—0,7	0,8—1,2	11,5—13,0	35,0—37,0	2,7—3,2	—	0,9—1,2 Al
36НХТЮ5М	» » 0,05	0,3—0,7	0,8—1,2	12,5—13,5	35,0—37,0	2,7—3,2	4,0—6,0	1,0—1,3 Al
36НХТЮ8М	» » 0,05	0,3—0,7	0,8—1,2	12,0—13,5	35,0—37,0	2,7—3,2	7,5—8,5	1,0—1,3 Al
70НХМБЮ [*3]	» » 0,06	≤0,55	≤0,55	14,0—16,0	Основа	—	2,5—3,5	0,7—1,3 Al, 8,0—9,0 Nb

[*1] ТУ 14-1-1369—75.

[*2] По ГОСТ 10994—74.

[*3] По ТУ 14-1-2796—79.

ратурах) и при 500—550 °С (если они работают при нагреве). В первом случае сталь 30Х13 имеет следующие механические свойства: $\sigma_в$ = 1800 МПа; $\sigma_{0,2}$ = 1350 МПа; $\sigma_{пц}$ = 1200 МПа; ψ = 45 % и δ = 10 %; после более высокого отпуска (500 °С): $\sigma_в$ = = 1850 МПа; $\sigma_{0,2}$ = 1500 МПа; $\sigma_{пц}$ = = 1250 МПа; ψ = 35 % и δ = 11 %.

У высокохромистых сталей 30Х13 и 40Х13 наряду с удовлетворительной коррозионной стойкостью большая прокаливаемость, что обеспечивает высокую прочность в крупных сечениях, но в то же время они склонны к хрупким разрушениям и сильно деформируются при термической обработке.

Для повышения коррозионной стойкости пружин из сталей 30Х13 и 40Х13, особенно тех, которые изготовляют методами горячей деформации и закаливают с нагревом в печах без защитной атмосферы, необходимы шлифование и полирование поверхности. Более повышенная коррозионная стойкость, но при снижении прочности достигается на стали с повышенным содержанием хрома (14Х17Н2). После закалки при 1000 °С с охлаждением на воздухе и отпуска при 300—350 °С $\sigma_в$ = 1300 МПа, δ = 10 % и KCU = 1,6 мДж/м².

Высоким упрочнением, хорошей коррозионной стойкостью, меньшей склонностью к хрупкому разрушению и меньшей деформацией при термической обработке отличаются дисперсионно-твердеющие стали аустенитно-мартенситного класса с низким содержанием углерода. Это стали 09Х15Н8Ю, 09Х17Н7Ю1, 0Х17Н7ГТ, 0Х7Н13ГТ. Режим их термической обработки: закалка при 900—950 °С, обработка холодом при —70 °С (2—3 ч) и старение при 450—500 °С.

Более высокие прочностные свойства при высоком сопротивлении хрупкому разрушению и сопротивлению коррозии достигнуты у практически безуглеродистых мартенситно-стареющих сталей, упрочняемых закалкой и отпуском (старение). Стали типа 03Х12Н10Д2ТБ, 04Х14К13Н4М3ТБВ-ВД (ЭП767) *1 по прочности и коррозионной стойкости превосходят стали 40Х13, 30Х13, а также 14Х17Н2.

У стали 03Х12Н10Д2ТБ *2 (⩽0,03 % С; ⩽0,1 % Si; ⩽0,1 % Mn; 10—11 % Ni; 11,5—12,5 % Cr; 1,0—1,4 % Ti; 1,8—2,1 % Cu; 0,1—0,3 % Nb) после закалки при 870 °С, обработки холодом при —70 °С (2 ч) и отпуска (старения) при 450 °С (6 ч) следующие механические свойства: $\sigma_в$ = 1800 МПа; $\sigma_{0,2}$ =1700 МПа; $\sigma_{0,002}$ = 1300 МПа; δ = 10 %, а у стали 04Х14К13Н4М3ТБВ-ВД*1 (ЭП767) (⩽0,04 % С; ⩽0,2 % Si; ⩽0,2 % Mn; 13,5—15,0 % С; 3,8—4,8 % Ni; 2,6—3,6 % Mo; 0,2—0,5 % Ti; ⩽0,15 % V; 0,3—0,5 % W; 13,0—14,0 % Co; 0,01 % Ce) после закалки при 950 °С, обработки холодом при —70 °С (16 ч) и отпуска (старения) при 550 °С (6 ч): $\sigma_в$ = 1700 МПа; $\sigma_{0,2}$ = 1580 МПа; $\sigma_{0,002}$ = 1250 МПа и δ = 12 %.

Эти стали устойчивы в морской воде и окислительных средах. Упругие элементы из них можно изготовлять методами холодной штамповки из закаленных заготовок, а затем уже их подвергать упрочняющему старению (отпуску). Возможен также и другой способ — горячая деформация (штамповка), а затем закалка и старение.

Немагнитные пружинные сплавы. Более высокая коррозионная стойкость в сочетании с немагнитностью и отсутствием склонности к хрупким разрушениям характеризует аустенитные хромоникелевые стали.

Широко применяют аустенитные стали типа 18-9, 18-10, упрочняемые после закалки пластической деформацией с высоким обжатием, в процессе которой, особенно при низких температурах, может образовываться так называемый мартенсит деформации, что увеличивает степень упрочнения, но в то же время делает сталь ферромагнитной.

Обычно стали этой группы, например 08Х18Н10Т, используют для изготовления пружин; полуфабрикаты в виде проволоки или ленты.

Прочность проволоки тем больше, чем меньше диаметр или толщина. При диаметре 8,01 мм $\sigma_в$ = 1400÷1600 МПа и δ ⩾ 20 %, а при диаметре 0,11—0,71 мм $\sigma_в$ = 1750÷2050 МПа и число скручиваний не менее 4.

*1 По ТУ 14-1-1179—74.
*2 По ТУ 14-1-1152—75.

Используя полуфабрикаты (лента или проволока) из стали типа 18-9 или 18-10 диаметром или толщиной более 10 мм, нельзя получить большие обжатия и соответственно повышенную прочность. Поэтому из этих сталей пружины больших сечений не изготовляют.

Технология изготовления пружин из коррозионно-стойких сталей указанного типа состоит из следующих операций: навивки, отпуска (обычно при 450 °С), заневоливания и полирования.

При конструировании упругих элементов из сталей 08Х18Н10Т и 12Х18Н9Т рекомендуется принимать модуль нормальной упругости равным 190 ГПа, модуль сдвига 70 ГПа; допускаемые напряжения *1 для пружин с неограниченной долговечностью 600—800 МПа, а с ограниченной — 850—1200 МПа. После навивки пружин из сталей типа 18-10 и 18-9 производится отпуск, повышающий их работоспособность, для первой стали при 450 °С, а для второй — при 500 °С.

В тех случаях, когда нужна полная немагнитность в сильноупрочненном состоянии, применяют стали 17Х18Н9 и 37Х12Н8Г8МФБ также после сильной деформации.

Когда необходимо изготовлять немагнитные и коррозионно-стойкие пружины и другие упругие элементы сложной формы методами холодной пластической деформации с большим обжатием, с глубокой и сложной вытяжкой, например сильфоны, гофрированные мембраны и т. п., используют аустенитные дисперсионно-твердеющие сплавы, упрочняемые термической обработкой. В закаленном аустенитном состоянии эти сплавы высокопластичны и легко деформируются давлением, а затем после деформации (формовки) в процессе последующего отпуска (старения) упрочняются. Эти сплавы в отличие от предыдущих упрочняются и в больших сечениях и поэтому могут быть применены для изготовления сравнительно крупных по размерам упругих элементов. К числу таких сплавов на железоникельхромовой основе относятся 36НХТЮ, 36НХТЮ5М и 36НХТЮ8М (табл. 16). Помимо повышенной коррозионной стойкости указанные сплавы также отличаются теплостойкостью: 36НХТЮ — до 250 °С, 36НХТЮ5М — до 250—300 °С и 36НХТЮ8М — до 300—350 °С. Термическая обработка и свойства этих сплавов приведены в табл. 17.

Для упругих элементов, у которых должна быть наиболее высокая коррозионная стойкость, особенно в окислительных средах, применяют сплавы 70НХМБЮ и 47ХНМ на никельхромовой основе. У первого высокая коррозионная стойкость и теплостойкость; его можно использовать при температуре до 500—550 °С (табл. 17).

Для упругих элементов малых сечений и простой формы, но от которых требуется очень высокая прочность ($\sigma_в$ ⩾ 2500÷3000 МПа), высокое сопротивление усталости и коррозионная стойкость при немагнитности, применяют сплавы на (Co—Ni—Cr)-основе. Основная область применения этих сплавов — заводные пружины различных механизмов. Состав этих сплавов приведен в табл. 18. Их упрочняют путем термомеханической обработки, включающей в себя закалку, холодную пластическую деформацию с высокими обжатиями и последующее старение (отпуск) для преобразования субструктуры и образования сегрегаций из атомов углерода и легирующих элементов. Режимы упрочняющей обработки и механические свойства сплавов этого типа приведены в табл. 19.

Пружинные сплавы с низким температурным коэффициентом модуля упругости. Для упругих элементов, часовых механизмов и т. д. применяют сплавы с низким температурным коэффициентом модуля упругости, что обеспечивает повышенную точность работы указанных изделий. Эти сплавы ферромагнитные, обычно на железоникельхромовой основе, упрочняются в результате термической и термомеханической обработки. Со-

*1 Верхний предел — для проволоки диаметром 0,2 мм, а нижний — для проволоки диаметром 8 мм.

17. Механические свойства и режимы термической обработки лент из аустенитных сплавов [*1]

Сплав	Состояние сплава (исходное)	Рекомендуемый режим термической обработки	Толщина ленты, мм	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5, %	HRC	$\sigma_{0,005}$, МПа [*3]
				МПа				
36НХТЮ	Полунагартованное или нагартованное	Закалка при 920—950 °С, охлаждение воды и старение при 650—670 °С, 4 ч	0,1—0,9	1180	—	5	—	600—700
			1,0—2,0	1180	785	6	35	
36НХТЮ5М		Закалка при 975 ± ± 10 °С, охлаждение водой и старение при 700—750 °С, 4 ч	0,1—0,9	1230	—	4	—	700—800
			1,0—2,0	1270	930	4	38	
36НХТЮ8М		Закалка при 1000—1050 °С, охлаждение водой, старение при 750±10 °С, 4 ч	0,1—0,9	1270	—	4 [*2]	—	800—900
			1,0—2,0	1320	1030	4 [*2]	42	
40КХНМ	Полунагартованное Нагартованное Высоконагартованное	Старение при 450—550 °С, 2—4 ч	0,1—2,0	1270	—	—	—	
			0,1—2,0	1670	—	—	—	
			0,1—2,0	1770	—	—	—	
70НХМБЮ [*2]	—	Закалка при 1150 °С и старение при 750 °С, 5 ч	—	1350—1600	1200—1400	8—17	44—46	
47ХНМ [*2]		Закалка при 1250 °С и старение при 725 °С, 5 ч	—	1350—1450	1250—1350	5—10	430—440 НВ	

[*1] См. ГОСТ 14117—85 и Справочник прецизионных сплавов. М.: Металлургия. 1974.
[*2] До 01.07.90 г.
[*3] Для толщины 0,3 мм.

18. Химический состав (мас. доли, %) коррозионно-стойких, немагнитных и высокопрочных пружинных сплавов на (Со—Ni—Cr)-основе (ГОСТ 10994—74)

Сплав	C	Si	Mn	Co	Ni	Cr	Mo	Другие легирующие элементы
40КХНМ	0,07—0,12	⩽0,5	1,8—2,2	39,0—41,0	15,0—17,0	19,0—21,0	6,4—7,4	—
40КНХМВТЮ	⩽0,05	⩽0,5	1,8—2,2	39,0—41,0	18,0—20,0	18,0—20,0	3,0—4,0	6—7 W; 0,2—0,5 Al; 1,5—2,0 Ti

19. Механические свойства и режимы упрочняющей обработки проволоки из коррозионно-стойких, немагнитных и высокопрочных пружинных сплавов на основе системы Со—Ni—Cr [5]

Сплав	Режим обработки	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,005}$	δ, %	HV
		МПа				
40КХНМ	Закалка при 1100—1150 °С, деформация, старение при 400—450 °С, 4 ч	2500—2700	2300—2500	1700	3—5	600—700
40КНХМВТЮ	Закалка при 1100—1150 °С, холодное волочение с обжатием 85 % и старение при 500—550 °С, 4 ч	2000—2200	1800—2000	1500—1600	4—6	550—600

20. Химический состав (в %) сплавов с постоянным и низким температурным коэффициентом модуля упругости (ГОСТ 10994—74)

Сплав	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al
42НХТЮ	≤0,05	0,5—0,8	0,5—0,8	41,5—43,5	5,3—5,9	2,4—3,0	0,5—1,0
42НХТЮА	≤0,05	0,4—0,7	0,3—0,6	41,5—43,5	5,0—5,6	2,3—2,9	0,6—1,0
44НХТЮ	≤0,05	0,3—0,6	0,3—0,6	43,5—45,5	5,0—5,6	2,2—2,7	0,4—0,8

21. Механические свойства и режимы термической обработки сплавов с постоянным и низким температурным коэффициентом модуля упругости [5] (исходное состояние сплава — нагартованное)

Сплав	Рекомендуемый режим термической обработки	Толщина ленты, мм	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	HRC	$\sigma_{0,\text{необр}}$, МПа
			не менее				
42НХТЮ	Закалка при 910±±10 °С, охлаждение водой, старение при 690±10 °С, 3 ч	0,1—0,9	980	—	5	—	600—700 *1
		1,0—2,0	1080	735	8	30	
44НХТЮ		0,1—0,9	1030	—	5	—	600—650 *1
		1,0—2,0	1080	685	8	30	

*1 Для толщины 0,3 мм.

ставы и режимы упрочняющей обработки приведены в табл. 20 и 21.

Сплавы 42НХТЮ и 42НХТЮА имеют постоянный модуль упругости при температуре до 100 °С, сплав 44НХТЮ — при температуре до 200 °С.

Высокоэлектропроводные пружинные сплавы [2]. К этой группе относятся бериллиевые бронзы, фосфористая бронза и некоторые другие сплавы, преимущественно на основе меди.

Из многочисленных пружинных сплавов на основе меди наибольшее применение приобрели бериллиевые бронзы — т. е. медноберилиевые сплавы с содержанием от 0,4—0,7 до 2—2,5 % Be, часто имеющие в своем составе и дополнительные легирующие элементы — никель, кобальт, титан, серебро, а также весьма эффективно влияющий на их свойства магний, количество которого не превышает 0,2 % (табл. 22). Бронзы, содержащие 0,25—0,7 % Be и отличающиеся высокой электрической проводимостью, в СССР не изготовляются, так как практически эти же свойства (~50 × × 10^4 $Ом^{-1} \cdot см^{-1}$) могут быть достигнуты у магниевых бронз БрМг0,3, БрМг0,5, БрМг0,8, а также кадмиевой бронзы БрКд0,7.

Широкое применение бериллиевых бронз в промышленности объясняется тем, что наряду с высокими значениями предела упругости и релаксационной стойкости они обладают хорошей коррозионной стойкостью, немагнитностью, повышенной электрической проводимостью и ценными технологическими свойствами — хорошо штампуются, паяются, свариваются и т. д. Прочностные свойства бериллиевых бронз настолько высоки, что в ряде случаев именно они независимо от их физико-химических свойств определяют использование этих сплавов в промышленности. Абсолютные значения предела упругости бериллиевых бронз — основного свойства пружинных сплавов — не превышают величин, которые можно получить для стали, но благодаря почти в 1,5—2 раза меньшему модулю упругости (110—130 ГПа) они характеризуются максимальной энергией упругой деформации ($\sigma^2_{упр}/2E$) и максимальной упругой деформацией ($\sigma_{упр}/E$), которые могут быть достигнуты в упругих элементах. Поэтому при равном напряжении в упругих элементах из бериллиевой бронзы может быть достигнута бо́льшая упругая деформация, чем в упругих элементах из стали (значение этой деформации часто используется как основной параметр при конструировании упругих элементов), или соответственно при равном значении упругой деформации в этих изделиях из бронзы будут меньше действующие напряжения. Поэтому будут меньше и значения упругого гистерезиса, упругого последействия и других свойств несовершенной упругости — основных показателей качества упругих элементов.

Свойства отечественных бериллиевых бронз в разном исходном состоянии — после закалки (мягкое состояние), а также в результате последующей холодной пластической деформации с обжатием 30—40 % (твердое состояние) приведены в табл. 23. Там же приведены и свойства бронз после упрочняющей обработки — старения, во время которого в структуре бронзы образуются зародыши или предвыделения γ-фазы, отвечающей по составу соединению CuBe. На рис. 1 и 2 представлены значения релаксации напряжений в бериллиевой бронзе при 20 °С, а также при нагреве до 150 °С — температуры, которая является предельно высокой для применения бериллиевых бронз, после упрочняющей термической обработки. На рис. 3—4 приведены зависимости деформации и скорости ползучести бронзы БрБНТ1,9 при 20 и при 20—150 °С после закалки и старения, а на рис. 5 — сопротивление усталости бериллиевых бронз.

Представленные выше данные позволяют конструкторам рассчитывать упругие элементы и прогнозировать стабильность их службы в условиях эксплуатации. Для технологов, кроме указанных данных, также важны зависимости свойств бериллиевых бронз от температуры закалки (рис. 6). Оптимальная температура закалки 770 + 10 °С, так как после такой закалки бронза характеризуется мелким зерном, хорошей пластичностью и высоким уровнем упрочнения после старения. Скорость охлаждения при за-

22. Химический состав (мас. доли, %) бериллиевых бронз (ГОСТ 18175—78)

Бронза	Be	Ni	Ti
БрБ2	1,8—2,1	0,2—0,5	—
БрБНТ1,7	1,16—1,85	0,2—0,4	0,1—0,25
БрБНТ1,9	1,85—2,1	0,2—0,4	0,1—0,25
БрБ2,5 *1	2,3—2,6	0,2—0,5	—
БрБНТ1,9Мг *2	1,85—2,1	0,2—0,4	0,1—0,25

*1 По ТУ 482196—72.
*2 Бронза содержит 0,07—0,13 % Mg.

Примечание. Все указанные бронзы содержат не более: 0,15 % Si, 0,15 % Al, 0,005 % Pb, 0,15 % Fe.

23. Свойства отечественных марок бериллиевых бронз (по ГОСТ 1789—70 и данным автора)

Обработка (состояние)	Толщина полосы, мм	$\sigma_в$, МПа	$\sigma^{*1}_{0,002}$, МПа	E *1, ГПа	δ, %	HV	μ *2, мм, не менее
Бронза БрБ2							
Закалка (мягкое)	0,15—0,25	400—600	120—150	110—120	⩾20	⩽130	8
	>0,25	—	—	—	⩾30	—	—
Закалка и старение	0,15—0,25	1100—1500	580—600	—	—	⩾330	—
	>0,25	1150—1500	—	—	⩾2,0	—	—
Деформации 30—40 % (твердое)	0,15—0,25	600—900	440—500	—	—	⩾170	3
	>0,25	650—950	—	—	⩾2,5	—	—
Деформации и старение	0,15—0,25	1150—1600	800—850	—	—	⩾360	—
	>0,25	1200—1600	—	—	⩾1,5	—	—
Бронза БрБНТ1,7							
Деформации 30—40 % (твердое)	0,15—0,25	600—950	380—400	110—120	—	⩽150	3
	>0,25	—	—	—	⩾2,5	—	—
Деформации и старение	0,15—0,25	1100—1500	600—650	120—130	⩾2,0	⩾340	—
Бронза БрБНТ1,9							
Закалка (мягкое)	0,15—0,25	400—600	120—150	120	⩾20	⩽120	8
Закалка и старение	0,15—0,25	1100—1500	620—650	120—130	—	⩾330	—
	>0,25	1150—1500	—	—	⩾2,0	—	—
Деформации 30—40 % (твердое)	0,15—0,25	600—900	450—500	110—120	—	⩾160	3
	>0,25	650—900	—	—	⩾2,5	—	—
Деформация и старение	0,15—0,25	1150—1600	900—950	120—130	—	⩾360	—
	>0,25	1200—1600	—	—	⩾1,5	—	—

*1 Значения предела упругости $\sigma_{0,002}$ и модуля упругости E приведены по данным автора для полос толщиной 0,3 мм.
*2 Вытяжка по Эриксену для полос и лент толщиной 0,10—0,25 мм.

Примечание. Механические свойства бронзы БрБ2,5 согласно ТУ 482196—72 характеризуются следующими значениями: твердость HV ⩾ 340 (после закалки и старения), предел упругости $\sigma_{0,002} \geqslant 600$ МПа (для полос толщиной 0,2—0,3 мм); HV ⩾ 384 (после закалки, холодной пластической деформации с обжатием 30—40 % и старения).

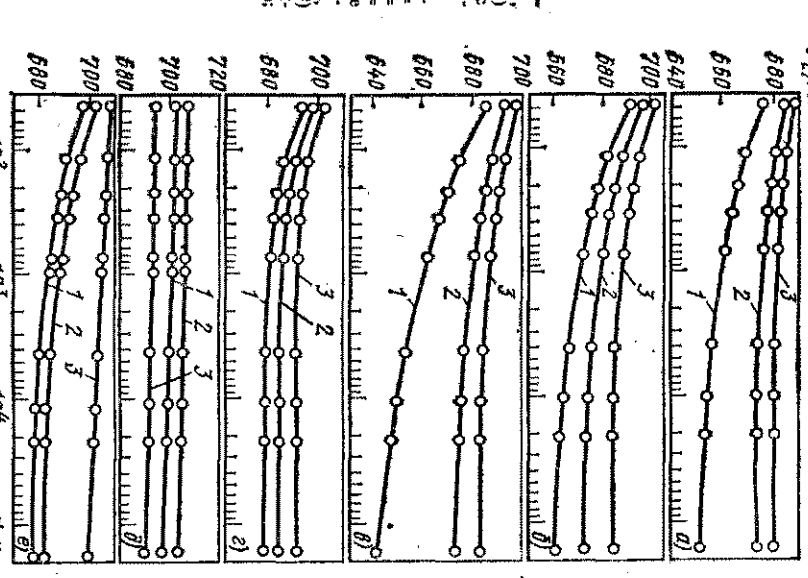


Рис. 1. Релаксация напряжений в бронзах БрБ2 (1), БрБ2,5 (2) и БрБНТ1,9 (3) при 20 °С после закалки с 790 °С и старения по режимам:
а — t = 300 °С, 2 ч; б — t = 320 °С, 3 ч; в — t = 350 °С, 1 ч; г — t = 370 °С, 20 мин; е — после закалки и деформации с обжатием 30 %; t = 350 °С, 30 мин (1, 2) и 1 ч (3) (Б. И. Пучков, А. Г. Рахштадт, И. Л. Рогельберг); τ — время испытаний

калке должна быть значительной (в воде), поскольку при замедлении охлаждения происходит высокотемпературный распад твердого раствора с выделением, особенно по границам зерен, малодисперсных частиц. На рис. 7 представлены зависимости свойств бериллиевых бронз от продолжительности старения при 320 и 340 °С, которые позволяют выбрать оптимальные режимы старения по такому основному показателю, как предел упругости (табл. 24).

Уровень упрочнения бериллиевых бронз повышается при использовании ступенчатого старения сначала при более низкой (210 °С, 1 ч), затем при более высокой температуре (340 °С), но после более кратковременного нагрева — 1,5 ч для бронзы БрБНТ1,9 и 2 ч для бронзы БрБНТ1,9Мг.

Такая обработка способствует получению более высокодисперсной структуры, чем при обычном старении, что и обеспечивает повышенный предел упругости. Так, если после обычного старения предел упругости бронзы БрБНТ1,9 $\sigma_{0,002}$ = 570 МПа, то после ступенчатого $\sigma_{0,002}$ = 620 МПа. Кроме того, после ступенчатого старения возрастает и релаксационная стойкость примерно на 5—7 %. Помимо ступенчатого старения для повышения уровня упрочнения (предела упругости) используют процесс динамического старения, т. е. старения под нагру-

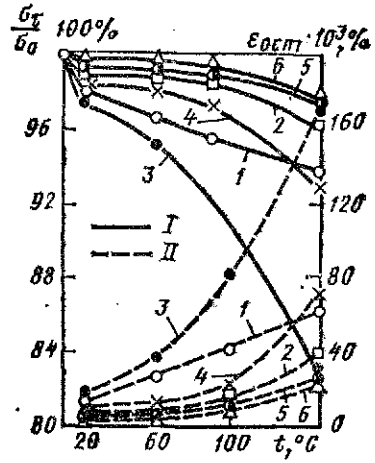


Рис. 2. Температурные зависимости релаксационной стойкости σ_τ/σ_0 (*I*) и остаточной деформации (*II*) бериллиевых бронз БрБ2 (*1*), БрБ2Мг (*2*), БрБ2,5 (*3*), БрБНТ1,9 (*4*), БрБНТ1,9Мг (*5*), БрБНТ1,9МгФ (*6*) за 1000 ч при σ_0 = = 700 МПа. Исходное состояние — закалка и старение по оптимальным режимам

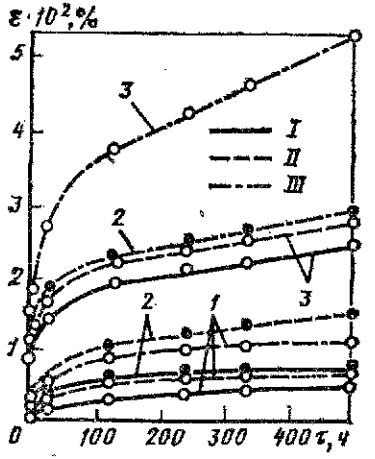


Рис. 3. Временные зависимости деформации ползучести ε бронзы БрБНТ1,9 при 20 (*I*), 100 (*2*) и 150 °С (*3*) после закалки и старения при 300 °С, 3 ч. Приложенные напряжения:
I — $0{,}8\sigma_{0{,}002}$ = 500 МПа;
II — $\sigma_{0{,}002}$ = 620 МПа;
III — $1{,}2\sigma_{0{,}002}$ = 740 МПа
(В. А. Федорович и А. Г. Рахштадт)

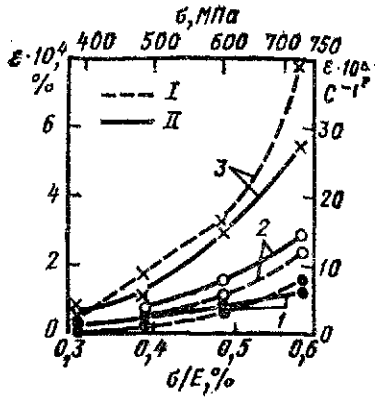


Рис. 4. Зависимости деформации ползучести ε за 500 ч (*I*) и скорости ползучести $\dot{\varepsilon}$ (*II*) бронзы БрБНТ1,9 при 20 (*1*), 100 (*2*) и 150 °С (*3*) от приложенного напряжения (упругой деформации)

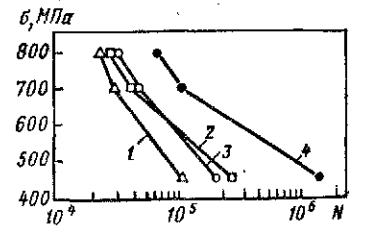


Рис. 5. Сопротивление усталости бериллиевых бронз после закалки и старения по оптимальным режимам:
1 — БрБ2; *2* — БрБ2,5; *3* — БрБНТ1,9; *4* — БрБНТ1,9Мг

24. Оптимальные режимы старения бериллиевых бронз

Бронза	Режим 1		Режим 2	
	T, °С	τ, ч	T, °С	τ, ч
БрБ2,5	320	3	340	2
БрБ2	320	4—5	340	1,5—2
БрБНТ1,9	320	4	340	2—3
БрБНТ1,9Мг	320	5	340	3—4
БрБНТ1,7	320	5	340	3

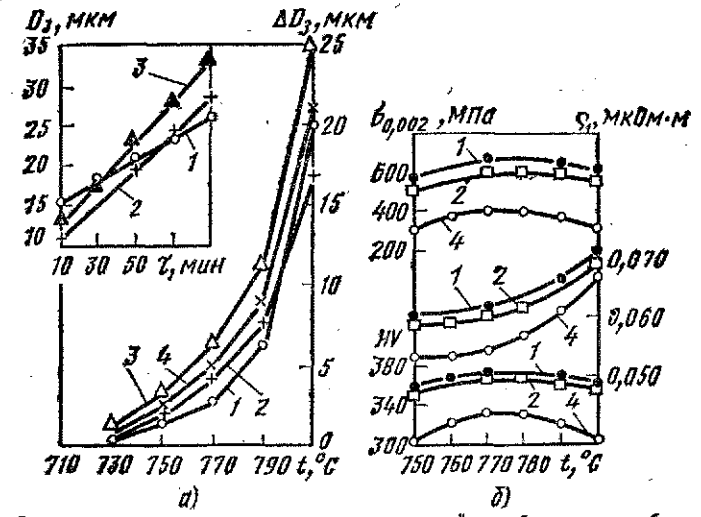


Рис. 6. Влияние режима закалки на структуру и свойства бериллиевых бронз:
а — зависимость величины зерна α-твердого раствора от времени выдержки и температуры закалки; *б* — зависимость физико-механических свойств от температуры закалки (после старения при 320 °С, 4 ч);
1 — БрБНТ1,9; *2* — БрБ2; *3* — БрБ2,5; *4* — БрБНТ1,7

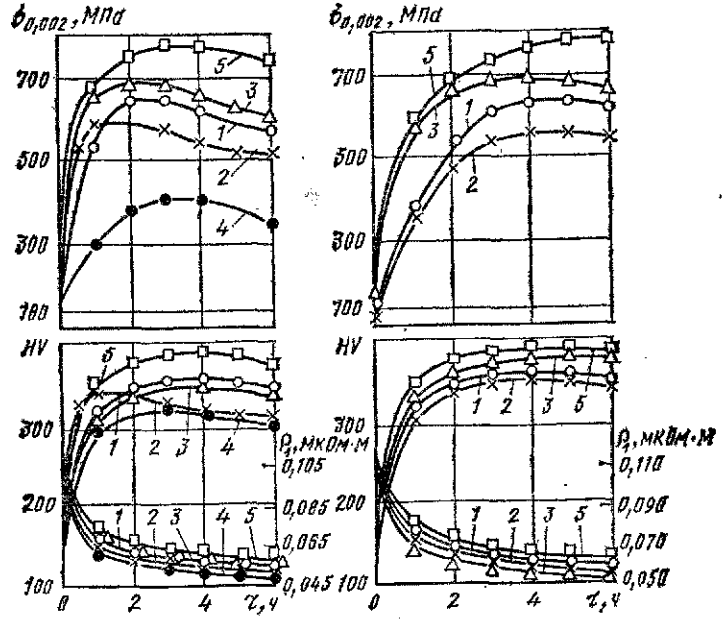


Рис. 7. Зависимость физико-механических свойств бериллиевых бронз БрБНТ1,9 (*1*), БрБ2 (*2*), БрБ2,5 (*3*), БрБНТ1,7 (*4*) и БрБНТ1,9Мг (*5*) от продолжительности старения при 340 (*а*) и 320 °С (*б*)

25. Влияние степени обжатия при холодной пластической деформации на свойства бериллиевых бронз (в числителе — бронзы БрБНТ1,9; в знаменателе — бронзы БрБ2)

Состояние	$\sigma_{0,002}$, МПа	ρ_1, мкОм·м	HV
После закалки при 770 °С + 10 °С, 15 мин	120/120	0,098/0,098	100/100
После закалки и деформации с обжатием, %:			
10	240/220	0,101/0,101	150/140
15	—/260	0,102/0,102	—/165
33	460/440	0,103/0,102	230/230

кой, прилагаемой в том же направлении, что и в условиях службы изделия. Оно оказывается наиболее эффективным после основного старения и поэтому по существу является динамическим достариванием. В частности, если после полного старения бронзы БрБНТ1,9Мг при 340 °С, 3 ч провести достаривание при 200 °С, 1 ч под напряжением 1000 МПа предел упругости $\sigma_{0,002}$ возрастет от 750 до 1080 МПа при увеличении деформации ползучести, возникающей под действием нагрузки, что следует учитывать при назначении этого режима для упрочнения конкретных изделий. После динамического старения приблизительно в 2 раза возрастает релаксационная стойкость изделий из бронзы.

Максимальный уровень упрочнения бериллиевых бронз достигается в результате НТМО, технология которой заключается в закалке, холодной пластической деформации и старении. Пластическая деформация после закалки увеличивает прочностные характеристики, но при этом повышает удельное электрическое сопротивление в тем большей степени, чем выше степень обжатия (табл. 25). После деформации почти вдвое ускоряется процесс старения и возрастает уровень упрочнения тем больше, чем выше степень предшествующей деформации (рис. 8). Еще выше уровень упрочнения достигается при использовании в цикле НТМО ступенчатого и динамического старения, режимы которых практически аналогичны тем, которые были указаны выше для недеформированных бронз.

В связи с дороговизной бериллиевых бронз и определенными трудностями их производства созданы безбериллиевые пружинные сплавы: камелин, № 156 (или ЛАНКМц) *1, камелон, № 538, 131, также упрочняемые в результате закалки и старения или НТМО, включая старение. Из этих безбериллиевых сплавов наиболее высокопрочные № 131, 538 и камелон, созданные в институте Гипроцветметобработка на базе систем Cu—Ni—Al и Cu—Zn, дополнительно легированные хромом, марганцем, кремнием, ванадием и магнием. После упрочняющей обработки, особенно в цикле НТМО, эти сплавы характеризуются ценным комплексом свойств, важнейшими из которых являются теплостойкость (табл. 26) и коррозионная стойкость (табл. 27). Сплавы № 131, 538 и камелон рекомендуются взамен бериллиевой бронзы в условиях службы упругих элементов при повышенной температуре (до 250 °С) и когда требуется лучшая коррозионная стойкость [1, 2]. Однако в том случае, когда упругие элементы должны рабо-

*1 У сплава № 156 (латунь ЛАНКМц ГОСТ 17527—86), по данным [7], после закалки и старения $\sigma_{0,002} = 400 \div 410$ МПа, а после закалки, деформации с обжатием 40 % и старением $\sigma_{0,002} = 800$ МПа. Этот сплав также имеет более высокую релаксационную стойкость, чем Л62 и БрОФ4,5—0,25.

26. Физико-механические свойства *1 пружинных сплавов на основе меди [1, 2]

Свойство	БрБ2	№ 131	№ 538	Камелон	БрОФ6,5—0,15	Камелин	№ 156	МНЦ15—20	Нейзильбер 30
$\sigma_в$, МПа	1150—1600	1200—1250	1300	1500	700—920	1100	900—1000	800—940	1200—1250
δ, %	1,5	2,5	2	1,5	2	4	2	0,5—1,5	0,5—1,5
HV	360	330—360	380	420	190—220	310	250—300	230—270	360—400
$\sigma_{0,005}$, МПа	900—1150	900—970	950	1100	450—550	800—900	800	650—700	1100
E, ГПа	120—130	140	140	145	100—110	125	120	110—125	140
$\frac{\sigma_0 - \sigma_\tau}{\sigma_0} \cdot 100$ % за 100 ч *2 при температуре, °С:									
100	2,0	1,0	0	0	1,0	1,0	0,4	3,0	1,0
250	25,0	3,0	2,5	2,0	15,0 *3	4,0 *3	9,0 *3	12,0 *3	7,0 *3
N *4	$7 \cdot 10^4$	10^6	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	10^5	10^5	10^5	$3 \cdot 10^5$
ρ_1, мкОм·м	0,07	0,13	0,23	0,35	0,15	0,22	0,1	0,26	0,22

*1 Приведены свойства сплавов в максимально упрочненном состоянии: закалка + деформация с обжатием 30—40 % + старение (сплавы БрБ2, № 131, 538, камелин, камелон, № 156); отжиг + деформация с обжатием 60 — 80 %, дорекристаллизационный отжиг (сплавы БрОФ6,5—0,15, МНЦ15—20 и нейзильбер 30).

*2 При $\sigma_0 = 0{,}5\sigma_{0,005}$.

*3 При 150 °С.

*4 N — число циклов до разрушения при $\sigma_0 = 550 \div 600$ МПа.

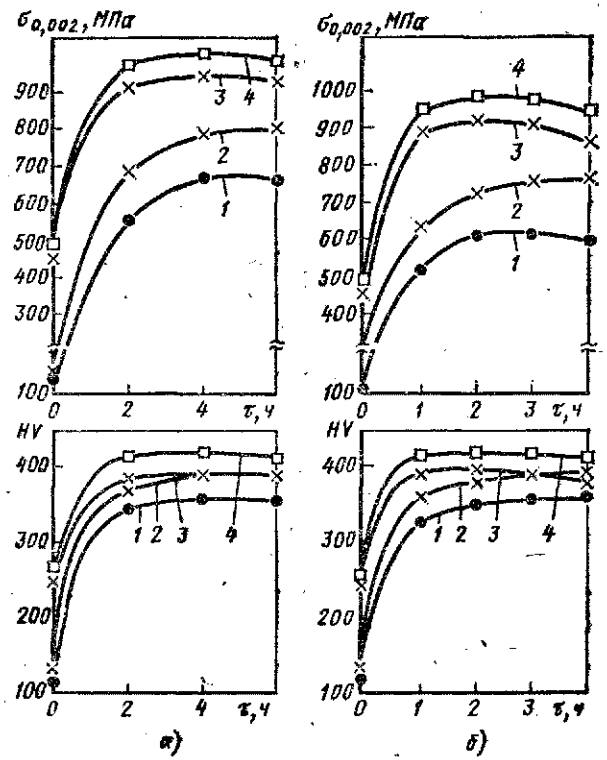


Рис. 8. Влияние продолжительности старения при 320 (*а*) и 350 °С (*б*) на свойства бериллиевой бронзы БрБНТ1,9 (*1*, *3*) и БрБНТ1,9Мг (*2*, *4*). Исходное состояние — после закалки (*1*, *2*); после закалки и холодной пластической деформации с обжатием 35 % (*3*, *4*)

27. Коррозионная стойкость пружинных сплавов меди в атмосфере повышенной влажности и в морском тумане [2]

Среда коррозии	Коррозия (г/дм² × сутки 10⁻⁴) сплавов									
	Камелон	БрБНТ1,9Мг	Нейзильбер	БрБНТ1,9	БрОФ6,5-0,15	№ 156	БрА7	БрБ2	№ 131	БрКМц3—1
Атмосфера повышенной влажности	5	—1,5	—1,5	—2,5	—3	—3	—3,5	—3	+1	+2
Морской туман	—	—	—3,5	—11	—22,5	—5	—6,5	—11	—3	—9

28. Изменение свойств [*1] пружинных сплавов [*2] в результате холодной пластической деформации

Сплав	HV	ΔHV	ΔHV/HV × × 100 %	$\sigma_{0,005}$, МПа	ρ_1, мкОм·м	$\Delta\rho_1/\rho_1$ × × 100 %
Л85	50/164	114	192	90/445	0,045/0,0552	22,3
Л80	58/174	116	200	90/375	0,052/0,062	19,3
Л68	58/204	146	250	90/400	0,063/0,075	19,2
БрОЦ4—3	67/230	163	270	105/535	0,081/0,0865	6,8
БрА7	76,9/269	192	250	120/425	0,110/0,130	18,2
БрКМц3—1	99,6/219	120	120	114/460	0,260/0,275	5,8
МНЦ15—20	61/240	179	296	140/480	0,255/0,246	—3,5

[*1] В числителе указаны значения после отжига, в знаменателе — после прокатки с обжатием на 80 %.

[*2] Составы сплавов указаны в ГОСТ 5017—74, ГОСТ 18175—78 и ГОСТ 492—73.

тать при более высоких температурах и в агрессивных средах, предпочтительно применять высоколегированные аустенитные пружинные сплавы.

К группе пружинных относятся латуни и бронзы, упрочняемые в результате применения холодной пластической деформации и последующего дорекристаллизационного отжига (табл. 28), во время которого в сплавах помимо преобразования субструктуры происходят процессы перераспределения атомов компонентов с образованием либо дисперсных частиц избыточных фаз, либо микрообластей с более высокой степенью упорядочения и концентрационными отклонениями от среднего состава.

В процессе холодной пластической деформации резко возрастает упрочнение сплавов, но при значительном снижении их пластичности. Поэтому из таких сплавов после пластической деформации можно изготовлять упругие элементы простой формы — это плоские пружины, получаемые чаще всего путем вырубки из листовых полуфабрикатов, или витые пружины, для которых используется проволока. В процессе последующего дорекристаллизационного отжига по оптимальным режимам (табл. 29) сильно возрастают релаксационная стойкость (табл. 30), предел упругости, сопротивление усталости; значительно уменьшаются остаточные напряжения и анизотропия свойств, имеющиеся в исходном состоянии листовых полуфабрикатов, как следствие воздействия предшествующей холодной пластической деформации. В результате дорекристаллизационного отжига также резко уменьшается деформация прямого и обратного упругого последействия, что особенно важно для упругих элементов, используемых в приборостроении.

Учитывая весь комплекс свойств сплавов данной группы, можно определить область их применения. Это упругие элементы относительно несложной формы, работающие при воздействии относительно невысоких напряжений в обычных климатических условиях. Достоинство этих сплавов — малая склонность к хрупким разрушениям, относительно невысокий, как и для других сплавов меди, модуль упругости, что обеспечивает в них пониженный уровень напряжений даже при повышенной упругой деформации в условиях службы. Эти сплавы обладают более высокой электропроводностью по сравнению со сталями и поэтому часто используются для изготовления токоведущих упругих элементов.

Достоинством латуней и бронз также являются их технологические свой-

29. Оптимальные режимы отжига и свойства *1 пружинных сплавов на основе меди

Сплав	Режим отжига	$\sigma_{0,002}$	$\sigma_{0,005}$	$\sigma_{0,01}$	HV	ρ_1, мкОм·м
		МПа				
БрОЦ4—3	150 °С, 30 мин *2	463	532	593	218	0,080
БрОФ4—0,25	150 °С, 30 мин *2	423	489	551	220	—
БрОФ6,5—0,15	260 °С, 1 ч	489	550	596	230	—
БрКМц3—1	275 °С, 1 ч	494	565	632	210	0,262
БрА7	275 °С, 30 мин	630	725	790	270	0,115
Л68	200 °С, 1 ч	452	519	581	190	0,086
Л80	200 °С, 1 ч	390	475	538	170	0,057
Л85	200 °С, 30 мин	349	405	538	170	0,057
МНЦ15—20	300 °С, 4 ч	548	614	561	230	0,256

*1 Исходное состояние — холодная прокатка с обжатием 60 %.

*2 Вместо указанного режима можно применять нагрев при 250 °С, 1 ч, обеспечивающий аналогичные свойства, но лучше стабилизирующий форму изделий.

30. Релаксации напряжений в пружинных сплавах на основе меди за 20 лет (178 тыс. ч) (Б. И. Пучков и др.)

Сплав	Релаксация напряжений			
	в сплавах после деформации		в сплавах после деформации и отжига	
	σ_0, МПа	$\frac{\sigma_0-\sigma_\tau}{\sigma_0}\times 100$ %	σ_0, МПа	$\frac{\sigma_0-\sigma_\tau}{\sigma_0}\times 100$ %
Л85	302	29,4	339	13,6
Л80	294	20,4	332	11,1
Л68	282	17,3	331	7,0
БрОФ6,5—0,15	276	11,2	356	8,4
БрОФ4—0,25	304	12,1	369	8,3
БрОЦ4—3	321	12,4	35,8	5,6
БрА7	308	15,6	341	6,2
БрКМц3—1	311	14,8	334	4,3
МНЦ15—20	331	10,5	389	5,6

Примечание. σ_0 — исходное напряжение при испытании; σ_τ — напряжение после испытания за 20 лет.

ства — хорошая паяемость, возможность создания на их поверхности гальванических покрытий для повышения стойкости против коррозии или еще большего повышения электрической проводимости и др.

Список литературы

1. **Дисперсионно-твердеющие** пружинные сплавы на основе меди/ В. М. Розенберг, А. В. Черникова, З. М. Иедлинская и др./Цветные металлы. 1976. № 6. С. 65—68.

2. **Исследование** свойств нового токоведущего пружинного сплава для работы при температурах 200—250 °С/ В. М. Розенберг, А. В. Черникова, З. М, Иедлинская, В. М. Тульская// Гипроцветметобработка. М.: Металлургия. 1978. Вып. 55. С. 47—59.

3. **Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г., Каплун Ю. А.** Динамическое старение сплавов. М.: Металлургия, 1985. 222 с.

4. **Пастухова Ж. П., Рахштадт А. Г.** Пружинные сплавы цветных металлов. М.: Металлургия, 1983. 364 с.

5. **Прецизионные** сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1974. 442 с.

6. **Рахштадт А. Г.** Пружинные стали и сплавы. М.: Металлургия, 1980. 400 с.

7. **Чипиженко А. И., Иедлинская З. М.** Исследование влияния структурного состояния латуни Л62 на ее релаксационную стойкость//Гипроцветметобработка. М.: Металлургия, 1968. Вып. 27. С. 94—96.

Глава V МАТЕРИАЛЫ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ И ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

1. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Алюминий не имеет полиморфных превращений, обладает решеткой гранецентрированного куба с периодом $a = 0{,}4041$ нм. Атомный номер алюминия 13, атомная масса 26,9815, температура плавления 660 °С, температура кипения 2270 °С, плотность 2,7 т/м^3, модуль упругости 71 ГПа, удельное электросопротивление $\rho_1 = 2{,}6 \cdot 10^8$ Ом·м, коэффициент линейного расширения в интервале температур 20—100 °С составляет $\alpha = 23{,}9 \times 10^{-6}$ °С$^{-1}$.

Алюминий и его сплавы хорошо поддаются горячей и холодной деформации — прокатке, ковке, прессованию, волочению, гибке, листовой штамповке и другим операциям.

Все алюминиевые сплавы можно соединять точечной сваркой, а специальные сплавы можно сваривать плавлением и другими видами сварки.

Деформируемые алюминиевые сплавы разделяются на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой.

Все свойства сплавов определяют не только способом получения полуфабриката заготовки и термической обработкой, но главным образом химическим составом и особенно природой фаз — упрочнителей каждого сплава.

Свойства стареющих алюминиевых сплавов зависят от видов старения: зонного, фазового или коагуляционного.

На стадии коагуляционного старения (Т2 и Т3) значительно повышается коррозионная стойкость, причем обеспечивается наиболее оптимальное сочетание характеристик прочности, сопротивления коррозии под напряжением, расслаивающей коррозии, вязкости разрушения (K_{1c}) и пластичности (особенно в высотном направлении).

Химический состав, физические и механические свойства деформируемых сплавов на основе алюминия приведены в табл. 1—6.

Для массивных полуфабрикатов (табл. 7) основными характеристиками разрушения при однократном нагружении являются характеристики K_{1c} и KCT [11, 23].

Состояние полуфабрикатов, характер плакировки и направление вырезки образцов обозначены следующим образом:

Условные обозначения

М	Мягкий, отожженный
Т	Закаленный и естественно состаренный
Т1	Закаленный и искусственно состаренный
Т2	Закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему более высокие значения вязкости разрушения и лучшее сопротивление коррозии под напряжением
Т3	Закаленный и искусственно состаренный по режиму, обеспечивающему наиболее высокие сопротивления коррозии под напряжением и вязкость разрушения
Н	Нагартованный (нагартовка листов сплавов типа дуралюмин примерно 5—7 %)
П	Полунагартованный
Н1	Усиленно нагартованный (нагартовка листов примерно 20 %)
ТПП	Закаленный и естественно состаренный, повышенной прочности
ГК	Горячекатаные (листы, плиты)
Б	Технологическая плакировка
А	Нормальная плакировка
УП	Утолщенная плакировка (8 % на сторону)
Д	Продольное направление (вдоль волокна)
П	Поперечное направление
В	Высотное направление (толщина)
Х	Хордовое направление
Р	Радиальное направление
ПД, ДП, ВД, ВП, ХР, РХ	Направление вырезки образцов, применяемое для определения вязкости разрушения и скорости роста усталостной трещины. Первая буква характеризует направление оси образца, вторая — направление плоскости, например: ПВ — ось образца совпадает с шириной полуфабриката, а плоскость трещины параллельна высоте или толщине.

Коррозионно-стойкие сплавы на основе систем Al—Mn и Al—Mg. Сплавы типа АМц, АМг2, АМг6 не упрочняются термической обработкой. Они отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью. Обрабатываемость резанием улучшается с увеличением степени легированности сплавов. Сплавы используются в отожженном, нагартованном и полунагартованном состояниях.

Применяются для изделий, получаемых глубокой вытяжкой, сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для масла и бензина, радиаторы тракторов и автомобилей, сварные бензобаки), а также для заклепок, корпусов и мачт судов, узлов лифтов и подъемных кранов, рам транспортных средств и др. [3, 25].

Сплавы системы Al—Cu—Mg. Дуралюмины Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17 упрочняются термической обработкой; характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности. Режимы термической обработки приведены в табл. 8.

Применяются: Д1 — для лопастей воздушных винтов, узлов креплений, строительных конструкций и др.; Д16 — для силовых элементов конструкций самолетов (шпангоуты, нервюры, тяги управления, лонжероны), кузовов грузовых автомобилей, буровых труб и др.; Д19 — для тех же деталей, что и из сплава Д16, но работающих при нагреве до 200—250 °С; В65, Д18 — для заклепок; ВД17 — для лопаток компрессора двигателей, работающих при температуре до 250 °С. Дуралюмины хорошо свариваются точечной сваркой и практически не свариваются плавлением из-за высокой склонности к трещинообразованию.

Сплавы Д1, Д16 в искусственно состаренном состоянии имеют улучшенную коррозионную стойкость, которая не снижается при повышенных температурах эксплуатации деталей, и более высокие значения $\sigma_{0,2}$ и $\sigma_в$.

Появление склонности к межкристаллитной коррозии у закаленных и естественно состаренных сплавов системы Al—Cu—Mg при нагреве зависит от их фазового состава. Сплавы Д19, ВД17 менее склонны к межкристаллитной коррозии после нагрева, чем сплавы В65, Д18, Д1 и Д16.

Плакированные полуфабрикаты обладают повышенной коррозионной стойкостью.

Неплакированные детали следует защищать анодно-окисными, химическими и лакокрасочными покрытиями.

Все дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состояниях [3, 25, 45, 53].

Жаропрочные сплавы типа АК4-1 системы Al—Cu—Mg—Fe—Ni по химическому и фазовому составам весьма близки к дуралюминам, но вместо марганца в качестве легирующих элементов содержат железо и никель.

Сплавы хорошо деформируются в горячем состоянии; коррозионная стойкость удовлетворительная. Для защиты от коррозии детали подвергаются анодированию, оксидированию и покрываются лакокрасочными материалами.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной и шовной сваркой, хорошо обрабатываются резанием. Режимы термической обработки сплавов приведены в табл. 9.

1. Химический состав (в %) деформируемых сплавов (ГОСТ 4784—74)

Сплав	Al	Cu	Mg	Mn	Ni	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Zr	Be	Прочие примеси: каждая в отдельности	Прочие примеси: сумма
АД0	Не менее 99,50	До 0,02	До 0,05	До 0,025	—	До 0,3	До 0,30	До 0,1	До 0,1	—	—	—	0,02	—
АД1	Не менее 99,30	До 0,05	До 0,05	До 0,025	—	До 0,3	До 0,30	До 0,1	До 0,15	—	—	—	0,02	—
АМц	Основа	До 0,15	До 0,2	1,0—1,6	—	До 0,7	До 0,6	До 0,1	До 0,2	—	—	—	0,05	0,1
АМг2	»	До 0,1	1,8—2,6	0,2—0,6	—	До 0,4	До 0,4	До 0,2	До 0,1	До 0,05	—	—	0,05	0,1
АМг3	»	До 0,1	3,2—3,8	0,3—0,6	—	До 0,5	0,5—0,8	До 0,2	До 0,1	До 0,05	—	—	0,05	0,1
АМг4	»	До 0,1	3,8—4,6	0,5—0,8	—	До 0,4	До 0,4	До 0,2	0,02—0,10	0,05—0,25	—	0,00025—0,005	0,05	0,1
АМг5	»	До 0,1	4,8—5,8	0,3—0,8	—	До 0,5	До 0,5	До 0,2	0,02—0,10	—	—	0,0002—0,005	0,05	0,1
АМг5П	»	До 0,2	4,7—5,7	0,2—0,6	—	До 0,4	До 0,4	—	—	—	—	—	0,05	0,1
АМг6	»	До 0,1	5,8—6,8	0,5—0,8	—	До 0,4	До 0,4	До 0,2	0,02—0,10	—	—	0,0002—0,005	0,05	0,1
Д18	»	2,2—3,0	0,2—0,5	До 0,2	—	До 0,5	До 0,5	До 0,1	До 0,1	—	—	—	0,05	0,1
В65	»	3,9—4,5	0,15—0,30	0,3—0,5	—	До 0,2	До 0,25	До 0,1	До 0,1	—	—	—	0,05	0,1
Д1	»	3,8—4,8	0,4—0,8	0,4—0,9	До 0,1	До 0,7	До 0,7	До 0,3	До 0,1	—	—	—	0,05	0,1
Д16	»	3,8—4,9	1,2—1,8	0,3—0,8	До 0,1	До 0,5	До 0,5	До 0,3	До 0,1	—	—	—	0,05	0,1
Д16П	»	3,8—4,5	1,2—1,6	0,3—0,7	—	До 0,5	До 0,5	До 0,1	До 0,1	—	—	—	0,05	0,1
Д19	»	3,8—4,3	1,7—2,3	0,5—1,0	—	До 0,5	До 0,5	До 0,1	До 0,1	—	—	0,0002—0,005	0,05	0,1
ВД17	»	2,6—3,2	2,0—2,4	0,45—0,7	—	До 0,3	До 0,3	До 0,1	До 0,1	—	—	—	0,05	0,1
АК4-1	»	1,9—2,7	1,2—1,8	До 0,2	0,8—1,4	0,8—1,4	До 0,35	До 0,3	0,02—0,10	До 0,1	—	—	0,05	0,1
АД31	»	До 0,1	0,4—0,9	До 0,1	—	До 0,5	0,3—0,7	До 0,2	До 0,15	—	—	—	0,05	0,1
АД33	»	0,15—0,40	0,8—1,2	До 0,15	—	До 0,7	0,4—0,8	До 0,25	До 0,15	0,15—0,35	—	—	0,05	0,1
АВ	»	0,1—0,5	0,45—0,90	0,15—0,35	—	До 0,5	0,5—1,2	До 0,2	До 0,15	—	—	—	0,05	0,1
АК6	»	1,8—2,6	0,4—0,8	0,4—0,8	До 0,1	До 0,7	0,7—1,2	До 0,3	До 0,1	—	—	—	0,05	0,1
АК8	»	3,9—4,8	0,4—0,8	0,4—1,0	До 0,1	До 0,7	0,6—1,2	До 0,3	До 0,1	—	—	—	0,05	0,1
В95	»	1,4—2,0	1,8—2,8	0,2—0,6	—	До 0,5	До 0,5	5,0—7,0	—	0,1—0,25	—	—	—	—
В93	»	0,8—1,2	1,6—2,2	—	—	0,2—0,6	До 0,2	6,5—7,3	—	—	—	—	—	—
В96Ц1	»	2,0—2,6	2,3—3,0	0,3—0,8	—	До 0,3	До 0,3	8,0—9,0	—	—	0,1—0,16	—	—	—
1420	»	—	5,0—6,0	До 0,3	—	До 0,3	0,1—0,3	—	До 0,1	—	0,09—0,15	1,9—2,3 Li	до 0,005 Na	

2. Физические свойства деформируемых сплавов [3, 25, 45]

Сплав	ρ, т/м³	$\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м, при 20 °С в зависимости от состояния полуфабриката	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$ при температуре °С		λ, Вт/(м·°С) при температуре °С		c, кДж/(кг·°С) при температуре °С	
			20—100	20—400	100	400	100	400
АД0	2,71	М—2,92	24	25,6	М—226	—	—	—
		Н—3,02	—	—	Н—216	—	—	—
АД1	2,71	М—2 92 Н—3,02	24 —	25,6 —	М—226 Н—216	— —	— —	— —
АМц	2,73	М—3,45 П—4,20 Н—4,32	М—23,2 — —	М—25,0 — —	М—180 — —	М—189 — —	1,09 — —	1,30 — —
АМг2	2,68	М—4,76	24,2	27,6	159	168	0,963	1,09
АМг3	2,67	М—4,96	23,5	26,1	151	159	0,88	1,05
АМг4	2,67	М—6,09	24,3	24,6	138	155	0,963	1,07
АМг5	2,65	М—6,40	—	—	126	147	0,922	1,09
АМг5П	2,65	М—6,25	24,1	26,2	126	147	0,922	1,05
АМг6	2,64	М—6,73	24,7	27,4	122	138	0,922	1,09
Д18	2,76	Т—3,90	23,4	24,5	172	193	0,922	1,17
В65	2,80	Т—5,04	—	—	155	184	0,964	1,17
Д1	2,80	Т—5,4	22,9	25	130	174	0,922	1,05
Д16	2,80	Т—5,7 Т1—4,76 М—3,4	22,9 22,9 —	— — —	130 146 —	163 167 —	0,922 0,879 —	1,17 1,21 —

Продолжение табл. 2

Сплав	ρ, т/м³	$\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м, при 20 °С в зависимости от состояния полуфабриката	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$ при температуре °С		λ, Вт/(м·°С) при температуре °С		c, кДж/(кг·°С) при температуре °С	
			20—100	20—400	100	400	100	400
Д19	2,76	Т—6,1 Т1—5,1	20,3 —	— —	138 —	172 —	0,880 —	1,09 —
ВД17	2,75	Т1—5,5	23,6	25,4	142	172	0,838	0,964
АК4-1	2,80	Т1—5,5	20,8	23,0	146	163	0,797	0,964
АД31	2,71	Т1—3,44	23,4	26,7	188	188	0,921	1,05
АД33	2,71	Т1—4,38	23,2	25	151	172	0,945	1,05
АВ	2,70	Т; Т1—3,70	23,5	25,4	180	188	0,797	1,09
АК6	2,75	Т1—4,10	21,4	23,8	180	189	0,838	1,00
АК8	2,80	Т1—4,3	22,5	24,5	168	180	0,838	1,09
В95оч	2,85	Т1—4,2	22	—	178	179	0,92	1,090
В93	2,84	Т2—4,08	23,8	—	151	163	0,880	1,130
В96ц1	2,89	Т2—4,9	23,9	—	155	167	0,861	1,133
1420	2,47	10,5	22,2	—	80	83 (300 °С)	1,070	1,240

3. Механические свойства деформируемых сплавов при температуре 20 °С [3, 45, 53, 61]

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние испытуемых образцов	Толщина или диаметр, мм	E	G	σ_{-1} на базе $2 \cdot 10^7$ циклов	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{пц}$	δ	ψ	$\sigma_{сж}$	KCU	KCT
				ГПа			МПа			%		МПа	МДж/м³	
АД0, АД1	Лист	Отожженный	2	71	27	—	80	40	—	35	80	—	—	—
	Пруток	Без термической обработки	20	—	—	—	150	100	—	6	60	—	—	—
АМц	Лист	Отожженный	0,7—10,5	—	—	—	110	60	35	25	—	—	—	—
		Полунагартованный	0,7—10,5	—	—	—	170	130	—	10	—	—	—	—
		Нагартованный	0,7—10,5	—	—	—	220	180	—	5	—	—	—	—
	Пруток	Без термической обработки	20	70	26,5	—	170	110	70	18	65	—	—	—
	Плита	То же	25	—	—	—	150	120	—	22	—	—	—	—
АМг2	Лист	Отожженный	2	71	27	85	190	100	—	23	—	100	—	0,25
	Пруток	Отожженный	20	—	—	—	190	80	—	25	65	80	0,9	—
	Труба	Отожженный	⌀50	—	—	—	180	100	—	12	—	100	—	—
АМг3	Лист	Отожженный	2	71	27	90	230	120	—	25	—	120	0,4	0,25
АМг4	Лист	Отожженный	2	71	27	110	280	140	100	20	—	140	0,3	0,2
	Пруток	Без термической обработки	25	—	—	—	320	190	100	15	40	160	—	—
АМг5	[illegible]	[illegible]	2,5	71	26,5	110	300	170	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0,3	0,2
	Пруток	*Отожженный*	20	—	—	—	300	160	—	14	—	160	—	—
	Штамповка и поковка	*Отожженные*	До 30 кг	—	—	—	300	160	—	16	—	—	—	—
АМг5П	Проволока	Отожженная	10	71	27	—	270	150	—	23	—	—	—	—
АМг6	Лист плакированный	Отожженный	2	71	27	100	340	170	130	20	—	180	—	—
		Нагартованный 20 %	—	—	—	—	400	300	230	9	—	320	—	—
		То же 30 %	—	—	—	—	420	320	—	10	—	330	—	—
	Плита	Нагартованная 16 %	30	71	27	—	400	310	240	7	—	320	0,2	0,09
	Профиль горячекатаный	Отожженный	6	—	—	—	345	170	100	20,5	—	170	0,2	0,17
		Без термической обработки	6	—	—	—	355	190	—	19,5	—	190	—	—
	Поковка	Отожженная	До 2500 кг	—	—	—	300	150	—	14	—	—	—	—
Д18	Проволока	Отожженная	1,4—10,0	71	27	—	160	60	—	25	—	—	—	—
		Закаленная и естественно состаренная	1,4—10,0	—	—	—	300	170	—	24	50	—	—	—
Д1	Пруток	То же	До 50	72	27	—	—	260	200	—	—	—	—	—
	Профиль прессованный	То же	До 10	—	—	—	360	220	—	12	—	—	—	—
		То же	Св. 20	—	—	—	410	250	—	10	—	—	—	—
Д16	Лист	То же	2—4	72	—	130	450	320	190	19	—	—	—	—
		То же	30—40	—	—	—	460	360	—	10	—	—	—	—
	Профиль прессованный	Закаленный и искусственно состаренный	5—10	72	—	140—150	480	350	—	12	—	—	—	—

Продолжение табл. 3

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние испытуемых образцов	Толщина или диаметр, мм	E	G	σ_{-1} на базе $2 \cdot 10^7$ циклов	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{пц}$	δ	ψ	$\sigma_{сж}$	KCU	KCT
				ГПа			МПа			%		МПа	МДж/м²	
Д19	Лист плакированный	Закаленный и естественно состаренный	2—4	70	—	—	440	310	250	16	—	330	—	—
		Закаленный и искусственно состаренный	2—4	—	—	—	450	400	350	6,5	—	425	—	0,3—0,4
	Панель	Закаленная и естественно состаренная	7,5 (полотно)	—	—	—	480	350	300	10	—	350	—	—
		Закаленная и искусственно состаренная	7,5 (полотно)	—	—	—	490	450	400	5,5	—	450	—	—
	Профиль прессованный	Закаленный и естественно состаренный	До 5	72	27	—	460	340	300	12	—	340	—	—
	Пруток прессованный		20	—	—	160	—	—	—	—	—	—	—	—
ВД17	Полоса прессованная	Закаленная и искусственно состаренная	60	72	27	165	—	—	—	—	—	—	—	—
АД31	Полоса, пруток прессованный	Закаленные и искусственно состаренные	20—100	71	26,5	90	250	210	15	13	—	230	0,5	—
АД33	Лист неплакированный	Отожженный	2—4	71	26,5	100	140	80	—	20	—	—	—	—
		Закаленный и естественно состаренный	—	—	—	—	230	120	—	19	—	—	—	—
		Закаленный и искусственно состаренный	—	—	—	—	310	260	18	14	—	260	—	—
	Профиль прессованный	То же	20	—	—	90	320	280	21	12	25	280	0,3	—
АВ	Лист неплакированный	Закаленный и естественно состаренный	0,5—10,5	—	—	—	250	160	—	23	—	—	—	—
	Профиль	Закаленный и искусственно состаренный	20	71	27	100	350	290	—	13	—	290	0,35	—
	Штамповка	То же	До 150 кг	—	—	—	310	260	—	10	—	270	—	—
АК6	Штамповка	То же	Св. 30 кг	72	—	—	Вдоль 447	378	—	12,5	—	—	0,19	1,1
					—	—	Поперек 427	357	—	11,2	—	—	0,14	1,1
					—	—	По высоте 400	—	—	8,5	—	—	0,08	0,3
АК8	Пруток	То же	150—200	—	—	—	450	400	—	8	—	—	—	—
	Профиль	То же	30—50	—	—	—	490	450	—	7	15	—	—	—
	Штамповка	То же	До 30 кг	74	—	—	480	380	—	10	25	—	—	—
	Поковка	То же	Крупногабаритная	—	—	135	420	310	—	10	—	—	—	—

Продолжение табл. 3

Марка сплава	Вид полуфабриката	Состояние испытуемых образцов	Толщина или диаметр, мм	E	G	σ_{-1} на базе $2 \cdot 10^7$ циклов	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{пц}$	δ	ψ	$\sigma_{сж}$	KCU	KCT
				ГПа			МПа			%		МПа	МДж/м²	
АК4-1	Лист плакированный	Закаленный и искусственно состаренный	0,5—0,8	72	—	—	380	310	—	6	—	—	0,2	—
	Профиль	То же	Св. 10	—	—	—	400	330	—	8	—	—	—	—
	Штамповка	То же	До 100 кг	—	—	—	380	280	—	6	—	—	—	—
1420	Лист	То же	1,5—2	75	—	—	450	270	200	10	—	—	—	0,2—0,4
	Профили	То же	1,5—10	—	—	—	450	300	—	9	—	—	—	—
В95оч	Профили прессованные	То же	—	72	—	180	600	550	—	12	—	—	—	—
В95пч	Листы, плиты	То же	—	72	—	160	570	500	—	12	—	—	—	—
В96Ц1	Профили прессованные	То же	—	—	—	—	660	630	—	8	14	—	—	—

4. Механические свойства деформируемых сплавов при высоких температурах [3, 23, 25, 45]

Сплав	Полуфабрикат, толщина	t испытания, °С	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	ψ %
АМц	Лист отожженный, 3 мм	20	**110**	—	30	—
		100	**95**	—	35	—
		200	**70**	—	41	—
		300	**45**	—	45	—
АМг2	Лист, 1,5—3 мм: отожженный	20	190	100	25	—
		100	180	90	25	—
		200	130	60	45	—
		300	70	—	75	—
	нагартованный	20	**290**	250	4	—
		100	270	230	6	—
		200	210	150	15	—
		300	80	—	65	—
АМг3	Пруток отожженный, 20 мм	20—100	190	80	30	65
		200	145	80	54	80
		300	75	65	56	90
АМг4	Лист отожженный, 2 мм	20	280	140	20	—
		100	250	130	25	—
		200	170	100	45	—
		300	100	50	60	—
АМг5	Пруток без термической обработки, 25 мм	20	320	190	15	40
		100	260	120	22	70
		200	200	100	30	85
		300	120	60	45	85
	Лист отожженный, 2 мм	20	300	150	20	—
		100	270	150	30	—
		200	180	120	45	—
		300	110	60	65	—
	Пруток отожженный (прессованный) и без термической обработки, 20 мм	20	310	160	14	—
		100	290	150	17	—
		200	210	130	27	—
		250	170	110	34	—

Продолжение табл. 4

Сплав	Полуфабрикат, толщина	t испытания, °С	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	ψ %
АМг6	Лист, 2 мм:					
	отожженный	**20**	**350**	165	22	—
		100	320	160	34	—
		200	195	135	45	—
		300	130	60	55	—
	нагартованный	20	385	290	11	—
		100	335	285	15	—
		200	250	185	25	—
	Профиль (все размеры) отожженный и без термической обработки	20	350	180	18	—
		100	310	160	20	—
		200	200	140	30	—
		250	170	120	35	—
Д18	Проволока закаленная и состаренная	20	300	200	25	50
		100	260	180	24	60
		200	250	140	19	70
		300	20	60	—	—
Д16	Лист плакированный:					
	закаленный и естественно состаренный	**20**	435	280	19	—
		100	410	270	18	—
		200	330	250	12	—
	закаленный и естественно состаренный, нагартованный	20	465	350	13	—
		100	440	320	13	—
		200	360	270	9	—
	закаленный и искусственно состаренный, 5—10 мм	20	455	390	7	—
		100	440	390	7	—
		175	410	350	10	—
		200	380	330	8	—
	Профиль прессованный, закаленный и естественно состаренный, 5—10 мм	20	460	410	9	—
		100	460	410	9	—
		175	410	390	—	—
		200	380	360	10	—
		250	290	260	—	—
Д19	Лист плакированный, закаленный и естественно состаренный, 2 мм	20	440	300	18	—
		100	420	280	16	—
		175	370	260	16	—
		200	340	250	—	—
		250	270	220	—	—
		300	180	150	—	—

Продолжение табл. 4

Сплав	Полуфабрикат, толщина	t испытания, °С	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	ψ %
Д19	Профиль прессованный до 5 мм:					
	закаленный и искусственно состаренный	20	450	400	—	—
		175	380	340	10	—
		200	330	300	14	—
	закаленный и естественно состаренный	20	460	340	12	—
		200	380	290	15	—
		250	280	240	15	—
		300	180	150	18	—
ВД17	Полоса прессованная, закаленная и искусственно состаренная, 60 мм	20	500	330	13	—
		100	450	290	15	—
		200	380	270	16	—
		250	240	170	16	—
		300	170	110	21	—
		350	110	60	27	—
АД31	Пруток, профиль, закаленный и искусственно состаренный, до 20 мм	20	240	200	17	70
		100	210	180	17	70
		200	160	150	16	65
		250	120	100	16	65
		300	60	50	20	85
АД33	Лист неплакированный, закаленный и искусственно состаренный, 2 мм	20	300	250	15	—
		100	260	210	15	—
		200	190	170	17	—
		250	140	125	18	—
		300	80	70	11	—
	Профиль, пруток прессованный, закаленный и искусственно состаренный, 20 мм	20	330	270	12	30
		100	280	240	12	40
		200	200	180	11	55
		300	90	80	8	70
АВ	Профиль, пруток прессованный, закаленный и искусственно состаренный, 20 мм	20	350	320	12	—
		100	320	290	12	—
		200	240	220	12	—
		250	160	130	12	—

Продолжение табл. 4

Сплав	Полуфабрикат, толщина	t испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
АК6	Поковка закаленная и искусственно состаренная, 110×415×1120 мм	20	Поперек 400	—	6	—
		125	» 360	—	7	—
		200	» 280	—	13	40
		250	» 180	—	16	46
		300	» 100	—	23	70
	Штамповка, закаленная и искусственно состаренная, 300 кг	20	Вдоль 420	—	10	—
		125	» 390	—	—	—
		200	» 290	—	—	—
АК8	Лист, закаленный и искусственно состаренный, 2 мм	20	430	370	11	—
		200	310	240	12	—
		250	200	170	12	—
	Плита катаная, закаленная и искусственно состаренная, 25—50 мм	20	460	410	10	—
		100	440	390	15	—
		200	320	—	—	—
	Поковка крупногабаритная, закаленная и искусственно состаренная	20	480	380	11	—
		150	380	290	16	—
		200	300	230	18	—
		250	200	—	—	—

5. Механические свойства деформируемых сплавов при низких температурах [3, 25, 45]

Сплав	Полуфабрикат, толщина	t испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
АД1	Пруток без термической обработки, 20 мм	20	60	40	35	—
		—70	105	45	45	—
		—196	160	50	50	—
АМц	Плита без термической обработки, 25 мм	20	150	120	24	—
		—196	300	155	34	—
АМг2	Лист отожженный, 2 мм	20	190	—	25	—
		—70	200	—	40	—
		—196	310	—	50	—

Продолжение табл. 5

Сплав	Полуфабрикат, толщина	t испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
АМг2	Пруток, 20 мм: без термической обработки	20	180	—	30	60
		—70	190	—	40	60
		—196	310	—	50	60
	отожженный	20	200	—	30	65
		—196	300	—	50	60
АМг3	Лист отожженный, 2 мм	20	230	120	25	—
		—70	250	120	30	—
		—196	330	130	45	—
АМг4		20	280	140	20	—
		—70	300	150	30	—
		—196	420	170	35	—
АМг5		20	300	150	20	—
		—70	310	160	24	—
		—196	400	190	28	—
	Плита без термической обработки, 18 мм	20	320	170	23	—
		—196	440	180	46	—
	Пруток отожженный и без термической обработки, 22 мм	20	310	160	14	—
		—70	320	170	20	—
АМг6	Лист отожженный, 2,5 мм	20	365	160	22	—
		—196	470	185	24	—
	Плита, 30 мм: нагартованная, 18 % в продольном направлении	20	395	345	10	22
		—196	505	380	22	32,5
	полуиагартованная	20	405	330	9,5	14;5
		—196	515	350	16,5	16
	с повышенным качеством выкатки	20	315	280	3,5	5
		—196	360	325	1,5	2
	Профиль отожженный и без термической обработки, все размеры	20	350	180	18	—
		—70	360	—	22	—
		—196	510	—	31	—

Продолжение табл. 5

Сплав	Полуфабрикат, толщина	t испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
Д1	Штамповка закаленная и состаренная, все размеры	20	460	280	21	—
		—70	460	310	25	—
		—196	580	380	23	—
Д16	Лист плакированный, до 2 мм: закаленный и естественно состаренный	20	440	350	17	—
		—70	470	370	19	—
		—196	590	470	24	—
	закаленный и искусственно состаренный	20	460	420	6	—
		—70	500	460	6	—
		—196	570	520	8	—
	закаленный и искусственно состаренный, нагартованный	20	460	360	13	—
		—70	510	370	16	—
		—196	620	490	20	—
	Пруток прессованный, закаленный и естественно состаренный, 20—80 мм	20	530	370	15	16
		—70	560	400	12	12
		—196	700	530	11	10
Д19	Лист плакированный, закаленный и естественно состаренный, 2 мм	20	440	300	20	—
		—70	480	370	23	—
		—196	550	420	26	—
ВД17	Полоса прессованная, закаленная и искусственно состаренная, 60 мм	20	490	—	10	19
		—40	500	—	12	23
		—70	520	—	12	21
АД33	Лист закаленный и искусственно состаренный, 2 мм	20	300	250	15	—
		—70	330	270	16	—
		—196	400	290	22	—
	Профиль прессованный, закаленный и искусственно состаренный, 20 мм	20	330	270	12	30
		—70	350	290	14	30
		—196	430	310	16	25
АВ	Лист неплакированный, закаленный и естественно состаренный, 1—2 мм	20	250	160	23	—
		—196	370	200	30	—
	Пруток, профиль закаленный и искусственно состаренный, 20 мм	20	350	320	12	—
		—196	400	380	13	—

Продолжение табл. 5

Сплав	Полуфабрикат, толщина	t испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
АК6	Пруток прессованный, закаленный и искусственно состаренный, 30 мм	20	400	300	12	25
		—70	425	320	10	22
		—196	560	425	10	22
АК8	Лист закаленный и искусственно состаренный, 3 мм	20	470	410	10	—
		—70	490	430	10	—
		—196	560	460	14	—
	Пруток закаленный и искусственно состаренный, 50 мм	20	540	460	12	—
		—70	550	490	12	—
		—196	660	580	14	—
	Профиль закаленный и искусственно состаренный, 30—50 мм	20	490	450	7	15
		—70	510	460	8	16
		—196	610	530	10	14
1420	Полуфабрикаты прессованные, закаленные и искусственно состаренные	20	490	360	8	—
		—70	560	365	6	—
		—196	570	370	8	—
		—253	660	370	4	—
В93	Штамповки, поковки (П) закаленные и искусственно состаренные	20	490	450	7	—
		—70	520	470	8	—
		—196	580	530	6	—
В95	Листы закаленные и искусственно состаренные	20	520	440	14	—
		—70	560	470	12	—
		—196	640	520	9	—
		—253	750	630	7	—
	Полуфабрикаты прессованные, закаленные и искусственно состаренные	20	600	550	8	—
		—70	620	560	8	—
		—196	750	640	7	—
		—253	810	730	5	—
В96	Полуфабрикаты прессованные, закаленные и искусственно состаренные	20	650	630	6	—
		—70	710	670	4	—
		—196	810	730	2	—
АД31	Пруток, профиль прессованный, закаленный и искусственно состаренный	20	240	220	12	50
		—70	250	—	11	45

6. Длительная прочность и ползучесть деформируемых сплавов [1, 10, 11, 14, 15]

Сплав	Полуфабрикаты, толщина или диаметр	t испытания, °С	σ_{10}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/10}$	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$
			МПа						
АМг2	Лист отожженный, 1,5 мм	100	—	140	110	100	—	80	75
		150	—	100	70	50	—	55	35
		200	—	60	40	—	—	20	—
		250	—	30	20	—	—	—	—
АМг3		100	—	160	130	110	—	85	80
		150	—	120	70	—	—	65	50
		200	—	60	40	20	—	20	—
АМг4	Лист отожженный, 2,0 мм	175	130	95	—	—	60	—	—
		200	105	75	—	—	40	—	—
АМг5		175	120	100	—	—	85	55	—
		200	90	65	—	—	40	—	—
	Пруток без термической обработки, 20 мм	175	140	120	—	—	80	50	—
		200	100	70	—	—	40	—	—
АМг6	Лист отожженный, 1,5 мм	20	—	—	300	280	—	155	150
		50	—	290	250	230	—	150	145
		100	—	220	180	120	—	130	110
		150	—	140	100	—	—	60	20
		200	—	70	45	—	—	—	—
		250	—	35	25	—	—	—	—
Д16	Лист закаленный и естественно состаренный, 1,5—3 мм	100	400	390	380	—	—	280	—
		150	350	300	240	—	—	180	120
		200	240	180	120	—	—	80	45
	Профиль закаленный и искусственно состаренный, 5—10 мм	175	330	275	225	—	230	150	90
		200	285	225	160	—	170	95	60
	Профиль закаленный и искусственно состаренный, 50 мм	100	—	390	—	—	—	340	—
		150	—	320	—	—	—	260	—
		175	—	270	—	—	—	210	—
Д19	Лист закаленный и естественно состаренный, 2 мм	150	—	320	250	—	—	180	—
		175	—	230	170	—	—	135	—
		200	250	180	120	—	120	80	—

Продолжение табл. 6

Сплав	Полуфабрикаты, толщина или диаметр	t испытания, °С	σ_{10}	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{0,2/10}$	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$
			МПа						
ВД17	Полоса закаленная и искусственно состаренная, 60 мм	200	—	190	160	—	—	160	120
		230	160	130	110	—	—	90	80
		270	110	80	55	—	—	50	35
		300	70	55	42	—	—	32	20
		320	50	35	20	—	—	20	15

7. Характеристики разрушения массивных полуфабрикатов [11, 45, 61]

Сплав	Полуфабрикат	Режим старения	Направление вырезки образцов	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$	KCT, МДж/м^2	
							Тип 15	Тип 19
							ГОСТ 9454—78	
Д16	Плита	190 °С, 12 ч	ПД	340	16	26,7	0,58	0,42
В95	Штамповка	115 °С, 8 ч + 180 °С, 8 ч	ДП	461	12,8	51,0	1,1	0,81
АК4-1	Профиль прессованный	195 °С, 12 ч	ПД	410	8,0	23	0,21	0,22
1420	Полоса прессованная	120 °С, 5 ч	ПД	243	10,5	21,3	0,35	0,24

8. Режимы упрочняющей термической обработки сплавов типа дуралюмин [25, 26, 45]

Сплав	t нагрева под закалку, °С	Старение	
		t, °С	τ, ч
Д1	495—510 (все виды полуфабрикатов)	20	⩾96
Д16	485—503 (прессованные изделия)	20	⩾96
		185—195	68
Д19	500—510 (листы)	20	120—240
		185—195	12—14
	495—505 (прессованные изделия)	20	120—240
		185—195	8—10

Продолжение табл. 8

Сплав	t нагрева под закалку, °С	Старение	
		t, °С	τ, ч
ВД17	495—505 (прессованные изделия)	165—175	15—17
Д18	495—505 (проволока, заклепки)	20	⩾96

Примечание. t — температура нагрева; τ — время выдержки.

Сплавы отличаются высокой износостойкостью (низкий коэффициент трения).

Сплав АК4-1 используется для изготовления деталей реактивных двигателей (крыльчатые насосы, колеса, компрессоры, заборники, диски, лопатки).

Сплавы АД31, АД33, АВ повышенной пластичности и коррозионной стойкости системы Al—Mg—Si упрочняются по единому режиму: температура нагрева под закалку 520—530 °С, температура искусственного старения 160—170 °С, время выдержки 10—12 ч. Для высоконагруженных деталей, работающих в условиях переменных нагрузок, старение проводят при 150—160 °С. Для достижения максимальной прочности старение полуфабрикатов следует проводить не позднее чем через 1 ч после закалки, иначе наблюдается снижение $\sigma_в$ и $\sigma_{0,2}$ на 30—50 МПа.

Коррозионная стойкость сплавов высокая; они не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением независимо от состояния материала. Наиболее прочный сплав АВ по коррозионной стойкости уступает сплавам АД31, АД33.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной, шовной и аргонодуговой сваркой. Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии неудовлетворительная, в закаленном и состаренном — удовлетворительная.

Сплав АД31 применяется для деталей невысокой прочности, от которых требуется хорошая коррозионная стойкость и декоративный вид, работающих в интервале температур —70÷50 °С. Сплав применяется для отделки кабин самолетов и вертолетов с различными цветовыми покрытиями. Используется в строительстве для дверных рам, оконных переплетов, эскалаторов, а также в автомобильной, легкой и мебельной промышленности.

Сплав АД33 применяется для деталей средней прочности, работающих в интервале температур —70÷50 °С и обладающих коррозионной стойкостью во влажной атмосфере и морской воде (лопасти вертолетов, барабаны колес гидросамолетов). Применяется в судостроении и строительстве.

9. Режимы термической обработки сплава АК4-1 [3, 45] (температура нагрева под закалку 525—535 °С) *1

Полуфабрикат	Старение	
	t, °С	τ, ч
Листы плакированные	185—195 185—195	9—12 24
Плиты горячекатаные	190—200 190—200	7—9 24
Штамповки, поковки	185—195 195—200	8—12 24

*1 Для уменьшения коробления закалку деталей сложной формы можно проводить в кипящей воде.

10. Режимы термической обработки сплавов АК6 и АК8 [3, 45]

Сплав	Полуфабрикат	t нагрева под закалку, °С	Старение	
			t, °С	τ, ч
АК6	Все виды	505—525	20 160—165	⩾96 10—15
АК8	Поковки, штамповки	495—505	20 150—165 195—205	⩾96 10—15 11—13
	Прессованные полуфабрикаты	495—505	20 165—175	⩾96 10—12

Сплав АВ применяется для деталей, от которых при изготовлении требуется высокая пластичность в холодном и горячем состоянии (лопасти вертолетов, штампованные и кованые детали сложной конфигурации).

Ковочные сплавы АК6, АК8 системы Al—Mg—Si—Cu обладают хорошей пластичностью и стойкостью к образованию трещин при горячей пластической деформации. По химическому составу близки к дуралюминам, отличаясь более высоким содержанием кремния.

Режимы термической обработки сплавов АК6 и АК8 приведены в табл. 10.

Сплавы склонны к коррозии под напряжением. Детали следует анодировать или защищать лакокрасочными покрытиями.

Сплавы удовлетворительно соединяются точечной и шовной сваркой, а сплав АК8 — аргонодуговой. Прочность сварного шва составляет 0,6—0,7$\sigma_в$ осиовного материала. Сплавы хорошо обрабатываются резанием.

Сплав АК6 применяют для изготовления сложных штамповок (крыльчатки вентилятора для компрессоров реактивных двигателей, корпусные агрегатные детали, крепежные детали и др.).

Сплав АК8 применяют для высоконагруженных деталей самолетов, изготовленных ковкой и штамповкой (рамы, фитинги, пояса лонжеронов и др.). Сплав можно использовать для деталей, работающих в условиях криогенных температур [57, 61].

Высокопрочные сплавы В95, В93, В96Ц1 системы Al—Zn—Mg—Cu отличаются высоким временным сопротивлением (600—700 МПа) и близким к нему по значениям пределом текучести.

Высокопрочные сплавы не являются теплопрочными, и при длительной эксплуатации их можно использовать до температур не выше 100—120 °С.

Режим Т1, соответствующий фазовой стадии старения, не обеспечивает достаточное сопротивление расслаивающей коррозии (РК) и коррозионному растрескиванию (КР). Сплавы, обработанные по такому режиму, имеют низкие характеристики пластичности и вязкости разрушения [11, 23, 61].

Режимы коагуляционного ступенчатого старения Т2 и Т3, а также использование сплавов повышенной и особой чистоты позволяют повысить пластичность, трещиностойкость и сопротивление коррозии РК и КР. По коррозионной стойкости сплавы В95пч, В95оч и В93пч в состоянии Т2 и Т3 значительно превосходят сплавы типа дуралюмина (табл. 11—13).

Сплавы применяют для высоконагруженных конструкций, работающих в основном в условиях напряжений сжатия (детали обшивки, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов и другие детали).

Снижение плотности — наиболее эффективный путь повышения удельной

11. Режимы термической обработки сплавов системы Al—Zn—Mg—Cu [45, 61, 62]

Сплав	Полуфабрикат	t, °С	Режим термической обработки	t и τ старения
В95пч, В95оч	Листы	465—475	Т1	115—125 °С, 23—25 ч
			Т2	110—120 °С, 5—10 ч + 160—170 °С, 14—18 ч
			Т3	110—120 °С, 5—10 ч + 160—170 °С, 25—35 ч
	Плиты	465—475	Т2	110—120 °С, 5—10 ч + 160—170 °С, 10—20 ч
			Т3	110—120 °С, 5—10 ч + 160—170 °С, 15—25 ч
	Панели прессованные	465—475	Т1	135—145 °С, 15—17 ч
			Т2	110—120 °С, 5—10 ч + 160—170 °С, 10—14 ч
			Т3	110—120 °С, 5—10 ч + 175—185 °С, 8—13 ч
	Штамповки, поковки	465—475	Т2	110—120 °С, 5—10 ч + 175—185 °С, 4—10 ч
			Т3	110—120 °С, 5—10 ч + 175—185 °С, 8—18 ч
В93пч	То же	450—465	Т1	115—125 °С, 3—10 ч + 160—170 °С, 4—18 ч
			Т2	115—125 °С, 3—10 ч + 170—180 °С, 6—12 ч
			Т3	115—125 °С, 3—10 ч + 180—190 °С, 3—10 ч
В96Ц1	Профили прессованные	465—475	Т1	135—145 °С, 15—17 ч
			Т2	110—120 °С, 3—10 ч + 170—180 °С, 3—20 ч

12. Влияние режимов старения на свойства полуфабрикатов из сплавов системы Al—Zn—Mg—Cu [3, 25, 45, 61]

Сплав	Полуфабрикат	Режим термической обработки	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$	Балл РК
В93пч	Поковки, штамповки	Т1	500/500	460/460	7/3	26,7/22,0	3—4
		Т2	460/460	420/420	8/4	33,0/23,6	—
		Т3	430/430	360/360	9/5	37,8/33,6	1—2
В95пч	Плиты	Т1	580/580	500/500	9/9	34,7/31,4	5—6
		Т2	520/520	460/460	9/9	34,7/31,4	1—2
		Т3	490/490	410/410	11/—	40,9/34,6	—
В96Ц1	Прессованная полоса	Т1	730/675	690/635	5/4	26,7/19,5	8—9
		Т2	660/620	630/575	8/8	26,7/21,4	2—3

Примечание. В числителе приведены значения для полуфабрикатов в продольном направлении, в знаменателе — в поперечном (сплавы В95пч, В96Ц1) и в высотном (сплав В93пч).

прочности и удельного модуля упругости, что достигается путем легирования алюминия литием и магнием.

Сплав 1420 системы Al—Mg—Li отличается от сплава Д16 пониженной на 11 % плотностью и повышенным на 4 % модулем упругости.

Термическая обработка сплава 1420: закалка от 450 °С (на воздухе), старение при 170 °С, 8—24 ч — обеспечивает максимальные прочностные свойства, а при 120 °С, 12—48 ч — приводит к получению повышенной пластичности.

Коррозионная стойкость полуфабрикатов из сплава 1420 в состоянии Т1 такая же, как и у сплава АМг6М. Закалка на воздухе и в горячих средах повышает стойкость к коррозии под напряжением.

Сплав 1420 может быть использован для деталей транспортного машино- и авиастроения.

Применение сплава 1420 в конструкциях вместо изделий из сплава Д16 позволяет снизить массу на 10—15 % [45, 61].

Сварные соединения из сплава 1420 отличаются высокой коррозионной стойкостью.

Литейные алюминиевые сплавы. Для изготовления фасонных деталей применяют литейные алюминиевые сплавы, которые имеют низкую плотность и высокую удельную прочность.

По назначению конструкционные литейные алюминиевые сплавы можно условно разбить на следующие группы:

1) сплавы, отличающиеся высокой герметичностью [АЛ2, АЛ4, АЛ9, ВАЛ8, АЛ9-1, АЛ34 (ВАЛ5), АЛ4М, АЛ32];

2) высокопрочные жаропрочные сплавы [АЛ19, АЛ3, АЛ5, АЛ5-1, АЛ33 (ВАЛ1)];

3) коррозионно-стойкие сплавы (АЛ8, АЛ22, АЛ24, АЛ27, АЛ27-1).

Прочность большинства литейных алюминиевых сплавов можно повысить термической обработкой. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов зависят не только от содержания легирующих компонентов, но и от содержания примесей. Важное значение в технологии приготовления и в повышении свойств сплавов на основе системы Al—Si имеет процесс модифицирования, вызывающий повышение прочностных и особенно пластических свойств сплавов.

13. Вязкость разрушения прессованных панелей из сплавов В95, В95пч и В95оч [3, 25, 53]

Сплав	Режим термической обработки	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$
В95	Т1	24,8—28
В95пч	Т1	30,3—32,3
	Т2	37,2—40,4
	Т3	42—43,5
В95оч	Т1	31—34,2
	Т2	41,8—45
	Т3	46,8—49,6

Качество литейных алюминиевых сплавов определяется не только механическими свойствами, но и технологическими характеристиками: жидкотекучестью, степенью изменения механических свойств в зависимости от сечения отливки, герметичностью, склонностью к горячим трещинам и др.

Химический состав, физические и механические свойства сплавов представлены в табл. 14—18.

Способы литья и виды термической обработки обозначаются следующим образом:

Способ литья:

З — В песчаную форму
В — По выплавляемым моделям
О — В оболочковые формы
К — В кокиль
Д — Под давлением
М — Сплав при литье подвергался модифицированию

Т1 — Старение
Т2 — Отжиг
Т4 — Закалка
Т5 — То же и частичное старение
Т6 — » и полное старение
Т7 — » и стабилизирующий отпуск
Т8 — » и смягчающий отпуск

При определении механических свойств на образцах, вырезанных из

14. Химический состав (в %) литейных сплавов (основа — алюминий) (ГОСТ 2685—75)

Сплав	Mg	Si	Mn	Cu	Ni	Ti	Be	Zr	Zn	Другие элементы	Железо*1, не более З, О, В	Железо*1, не более К	Железо*1, не более Д	Сумма учитываемых примесей, не более З, О, В	Сумма учитываемых примесей, не более К	Сумма учитываемых примесей, не более Д
АЛ2	До 0,10	10,0—13,0	До 0,50	До 0,60	—	До 0,10	—	До 0,10	До 0,30	—	0,70	1,00	1,50	2,10	2,20	2,70
АЛ4	0,17—0,3	8,0—10,5	0,2—0,5	До 0,30	—	—	До 0,10	Сумма Ti и Zr до 0,15	До 0,30	До 0,01 Sn, до 0,05 Pb	0,60	0,90	1,00	1,10	1,40	1,50
АЛ9	0,2—0,4	6,0—8,0	До 0,50	До 0,20	—	—	До 0,10	Сумма Ti и Zr до 0,15	До 0,30	До 0,01 Sn, до 0,05 Pb	0,60	1,00	1,50	1,10	1,50	2,0
АЛ9-1	0,25—0,4	7,0—8,0	До 0,10	До 0,10	—	0,08—0,15	До 0,10	До 0,10	До 0,20	До 0,005 Sn, до 0,03 Pb, до 0,10 B	0,30	0,30	—	0,60	0,60	0,60
АЛ34	0,35—0,55	6,5—8,5	До 0,10	До 0,30	—	0,1—0,3	0,15—0,4	До 0,20	До 0,30	До 0,10 B	0,60	0,60	—	1,00	1,00	—
АЛ4М	0,3—0,6	8,5—10,5	До 0,10	1,3—2,5	—	0,1—0,3	—	До 0,30	—	0,01—0,1 B	0,12	0,25	—	0,6	—	—
АЛ32	0,3—0,5	7,5—8,5	0,3—0,5	1,0—1,5	—	0,1—0,3	—	До 0,10	До 0,30	—	0,70	0,80	0,90	0,90	1,0	1,10
АЛ27	9,5—10,5	До 0,2	До 0,1	До 0,15	—	0,05—0,15	0,05—0,15	0,05—0,2	До 0,1	—	0,2	0,2	0,2	—	—	—
ВАЛ8	0,2—0,45	7,0—8,5	—	2,5—3,0	—	0,1—0,25	0,1—0,25	—	0,5—1,0	—	0,4	—	—	—	—	—
АЛ19	До 0,05	До 0,30	0,6—1,0	4,5—5,3	До 0,10	0,15—0,35	—	До 0,20	До 0,20	—	0,20	0,30	—	0,90	0,90	—
АЛ3	0,35—0,6	4,5—5,5	0,6—0,9	1,5—3,0	—	—	—	Сумма Zr и Ce до 0,50	До 0,30	До 0,01 Sn, до 0,05 Pb	0,60	1,20	1,60	1,10	1,70	1,90
АЛ5	0,35—0,6	4,5—5,5	До 0,50	1,0—1,5	—	—	До 0,10	Сумма Zr и Ti до 0,15	До 0,30	До 0,01 Pb	0,60	1,00	1,50	1,00	0,30	1,70
АЛ5-1	0,40—0,55	4,5—5,5	До 0,10	1,0—1,5	До 0,10 B	0,08—0,15	—	До 0,10	До 0,30	До 0,01 Pb	0,30	0,30	0,80	0,60	0,60	0,60
АЛ33	До 0,05	До 0,30	0,6—1,0	5,5—6,2	0,8—1,2	—	—	0,05—0,20	—	0,15—0,30 Ce	0,30	0,30	—	0,50	0,50	—
АЛ8	9,3—10,0	До 0,30	До 0,10	До 0,10	—	До 0,07	До 0,07	До 0,20	До 0,10	—	0,30	0,30	—	1,00	1,00	—
АЛ22	10,5—13,0	0,8—1,2	—	—	—	0,05—0,15	0,03—0,07	До 0,20	До 0,19	—	0,50	1,00	1,20	0,60	1,10	1,30
АЛ24	1,5—2,0	До 0,30	0,2—0,5	До 0,20	—	0,1—0,2	До 0,10	До 0,10	3,5—4,5	—	0,50	—	—	0,90	—	—

*1 В зависимости от способа литья.

Примечания: 1. При применении сплава АЛ2 для деталей, работающих в морской воде, содержание меди не должно превышать 0,30 %.
2. При применении сплава АЛ22 для литья под давлением допускается содержание 8,0—13,0 % Mg, 0,8—1,6 % Si, до 0,5 % Mn и отсутствие титана.
3. Для повышения механических свойств на 15—20 % необходимо в сплавы АЛ8 ограничить содержание примесей железа и кремния до 0,03 % каждого; в сплавы АЛ2 и АЛ9 вводить иттрий в пределах 0,08—0,20 %, при этом содержание железа не должно превышать 0,30 %.

15. Физические свойства литейных сплавов [3, 45, 54]

Сплав	ρ, т/м³	$\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м, при 20 °С	$\alpha \cdot 10^6$, °С⁻¹, при температуре, °С		λ, Вт (м·°С) при температуре, °С		c, кДж/(кг·°С) при температуре, °С	
			20—100	20—300	100	400	100	400
АЛ2	2,65	5,48	21,1	23,3	168	168	0,838	1,00
АЛ4	2,65	4,68	21,7	23,5	155	155	0,755	0,922
АЛ9, АЛ9-1	2,66	4,57	21,8	23,8	155	168	0,880	1,05*3
АЛ34	2,63	4,62	20,7	24,4	155	163	0,840	—
АЛ4М	2,72	5,09	22,2	23,7	150	167 *2	0,837	1,00*3
АЛ32	2,65	—	20,4	23,3	—	—	—	—
АЛ19	2,78	5,95	19,5	22,3 *1	130	158	0,838	1,13
АЛ3	2,70	4,49	22	24	163	159	0,920	1,17
АЛ5	2,68	4,62	23,1	23,9	163	176 *2	0,838	1,13
АЛ5-1	2,68	4,62	23,1	23,9	163	176 *2	0,838	1,13
АЛ33	2,89	5,68	23,4	28,5 *1	134	163	0,922	1,05
АЛ8	2,55	9,12	24,5	27,3	96,4	113	1,05	1,13
АЛ22	2,50	10,3	24,5	27,3	88,0	105	0,880	1,0
АЛ24	2,74	6,70	23,2	25,2	—	117 *1	—	—
АЛ27	2,55	—	24,5	—	89	113	1,050	1,13
ВАЛ8	2,73	—	22,9	—	130	—	0,920	—

*1 20—400 °С.
*2 300 °С.
*3 350 °С.

отливок, допускается снижение временного сопротивления на 25 % и относительного удлинения до 50 %.

Конструкционные герметичные сплавы. Сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34 (ВАЛ5) на основе систем Al—Si и Al—Si—Mg (силумины) отличаются высокими литейными свойствами и герметичностью изготовленных из них отливок. Двойные сплавы Al—Si (АЛ2) не упрочняются термической обработкой; единственным способом повышения механических свойств является модифицирование. Легированные силумины (АЛ4, АЛ9) подвергаются термической обработке по режимам, приведенным в табл. 19 [28, 54].

У силуминов удовлетворительная коррозионная стойкость. Детали защищают анодированием и лакокрасочными покрытиями. Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии неудовлетворительная, в термически обработанном состоянии — удовлетворительная.

Сплав АЛ2 рекомендуется для изготовления герметичных деталей, однако образование концентрированных усадочных раковин, характерных для сплавов с малым интервалом кристаллизации, вызывает трудности при литье крупногабаритных и сложных по форме деталей.

Сплавы АЛ4, АЛ9 применяют для средних и крупных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания, турбинных колес турбохолодильников, вентиляторов и т. п.

Ответственные детали следует отливать с использованием ультразвуковой обработки, что позволяет повысить уровень гарантируемых механических свойств на 30 %.

Сплав АЛ9-1 отличается от сплава АЛ9 наличием титана и пониженным содержанием примеси железа (до 0,3 %). По сравнению со сплавом АЛ9 он отличается более высокими механическими свойствами ($\sigma_в >$ на 25—35 % и δ выше более чем в 2 раза) и лучшей коррозионной стойкостью.

Сплав АЛ9-1 предназначен для изготовления сложных по конфигурации деталей агрегатов и приборов, испытывающих средние нагрузки и работающих при температурах до 200 °С.

Сплав АЛ34 (ВАЛ5), относящийся, как и сплавы АЛ4 и АЛ9, к системе Al—Si—Mg, превосходит их по прочности на 25—50 %, имеет хорошие литейные свойства и отличается высокой герметичностью. Коррозионная стойкость удовлетворительная. Недостатки сплава АЛ34 — сравнительно плохая обрабатываемость резанием, низкая жаропрочность (рабочие температуры ниже 200 °С). Термическая обработка сплава АЛ34: закалка с 535 ± 5 °С, время выдержки 10—16 ч, старение при 75 ± 5 °С, время выдержки 6 ч (Т5). Сплав АЛ34 предназначен для литья крупных корпусных деталей, сложных по конфигурации и работающих под большим внутренним давлением газа или жидкости.

Сплав АЛ32 предназначен для литья под давлением; обладает хорошими литейными свойствами, обрабатываемостью резанием, свариваемостью и коррозионной стойкостью; герметичность сплава близка к герметичности сплава АЛ2. Марганец и титан, а также большая скорость кристаллизации при литье под давлением способствуют получению метастабильной структуры при литье деталей. Это дает возможность упрочнять отливки путем искусственного старения без предварительной закалки.

Режимы термической обработки сплава АЛ32 приведены в табл. 20.

Применяется для нагруженных деталей, например блоков, цилиндров, головок блоков и других деталей автомобильных двигателей.

Сплав ВАЛ8 обладает хорошими литейными свойствами, является одним из наиболее прочных и герметичных сплавов, что достигается многокомпонентным макро (медь, цинк)- и микролегированием (титан, бериллий). Сплав хорошо обрабатывается резанием, коррозионные свойства и свариваемость аналогичны сплавам АЛ4М и АЛ32. Режимы термической обработки представлены в табл. 21.

Сплав ВАЛ8 рекомендуется для производства силовых и герметичных деталей с рабочими температурами до 250 °С, изготовляемых литьем под давлением методами точного литья.

16. Механические свойства литейных сплавов при температуре 20 °С [53, 54, 55]

Сплав	Полуфабрикат	Способ литья	Состояние испытуемых образцов	E, ГПа	G, ГПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	НВ, МПа	KCU, кДж/м²	σ_{-1}, МПа
АЛ2	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	ЗМ	Без т/о	70	—	170	80	6	550	—	42
		Д	Без т/о	—	—	190	120	1,8	—	—	—
		ЗМ	Т2	—	—	160	90	5	550	—	45
АЛ4	Образец диаметром 12 мм	ЗМ	Т6	70	—	260	200	4	700	0,5	75
	Плоский образец толщиной 3 мм	Д	Без т/о	70	—	290	160	2,0	—	—	—
	Отдельно отлитый образец диаметром 6 мм	ВМ	Т6	—	—	260	—	4	—	—	—
АЛ9	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З, О, В	Т2	—	—	170	120	2	600	—	—
		ЗМ, ОМ ВМ	Т4	70	—	200	110	4	500	—	45
			Т5	—	—	220	120	4	650	—	—
			Т6	—	—	230	180	2	750	—	—
			Т7	—	—	210	160	3	650	—	—
		К	Т5	—	—	230	140	4	700	—	—
АЛ9-1	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З, О, В	Т4	—	—	220	—	5	550	—	—
		З, О, В	Т5	—	—	260	—	5	700	—	—
		ЗМ, ОМ, ВМ	Т5	—	—	280	—	6	700	—	—
		К, КМ	Т5	—	—	300	240	6	700	—	—
		ЗМ, ОМ, ВМ	Т6	70	—	300	230	3	750	0,36	75
		К, КМ	Т6	—	—	320	250	5	750	—	—
		Д	Без т/о	—	—	210	—	2	550	—	—

АЛ32	*Выточенный образец диаметром 10 мм*	З	Без т/о	71	—	180	120	1,5	600	0,20	—
			Т1	71	—	200	180	1,0	700	0,15	—
АЛ34	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З	Т4	—	—	280	—	5,0	750	—	—
		З	Т5	76	—	330	280	3,0	900	0,25	—
		К	Т4	—	—	300	—	7,0	850	—	—
		К	Т5	—	—	360	—	5,0	950	—	—
		К	Т6	73	—	280	220	2,0	1000	—	—
		К	Т7	71	—	240	190	3,0	750	—	—
		К	Без т/о	71	—	200	130	3,0	700	0,30	—
		К	Т1	71	—	220	170	2,0	800	0,20	—
		К	Т6	71	—	300	260	2,5	1100	—	—
		К	Т7	73	—	260	240	2,5	1000	—	—
	Плоский образец толщиной 3 мм	Д	Без т/о	—	—	270	160	3,0	740	—	—
		Д	Т1	—	—	290	200	1,0	900	—	—
АЛ27	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З	Т4	—	—	360	—	18	750	0,15	70
АЛ27-1	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З	Т4	—	—	380	—	20	750	0,3	—
АЛ3	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З	Т5	70	—	250	170	1,0	800	—	—
		К	Т5	70	—	270	200	1,5	850	—	—
АЛ5	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З	Т5	70	—	250	180	1,0	750	0,2	—
	Отдельно отлитый образец диаметром 6 мм	В	Т5	—	—	310	—	1,9	—	—	—
АЛ5-1	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З, О, В, К	Т1	—	—	190	—	1	700	—	—
		З, О, В	Т5	70	—	300	200	1	750	—	—
		К, КМ	Т5	—	—	320	220	2	750	—	—
		З, О, В, К	Т7	—	—	220	—	2	700	—	—

Продолжение табл. 16

Сплав	Полуфабрикат	Способ литья	Состояние испытуемых образцов	E, ГПа	G, ГПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	НВ, МПа	KCU, МДж/м²	σ_{-1}, МПа
АЛ33	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З З З	Т4 Т6 Т7	70 — —	26 — —	250 300 250	150 — —	3,0 1,0 2,0	850 1000 800	0,3 — —	— — —
АЛ8	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З В	Т4 Т4	70 —	— —	**320** **310**	170 —	11 10	700 —	1 —	75 —
АЛ19	Отдельно отлитый образец	З З К	Т4 Т7 Т4	70 — —	25 — —	320 300 320	200 200 220	10,0 3,0 12,0	800 900 900	1,0 — —	70 — —
АЛ22	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З	Т4	70	27	240	180	3	950	0,2	—
АЛ24	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З З З	Без т/о Т1 Т5	69 — —	— — —	240 240 310	150 — —	4 3 3	750 700 900	0,2 — —	65 — 7
ВАЛ8	Образец диаметром 5 мм	К К К	Т4 Т5 Т6	72 72 —	— — —	382 400 410	— 340 —	7 4 6,0	900 1000 —	— — —	— 110 —

*1 На базе $2 \cdot 10^7$ циклов.

17. Механические свойства литейных сплавов при повышенных температурах [45, 54, 55]

Сплав	Полуфабрикат	Способ литья	Состояние испытуемых образцов	t испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	σ_{100}, МПа
АЛ4	Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм	ЗМ	Т6	300	—	—	—	—
АЛ9	Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм	З З З ЗМ	Т4 Т4 Т4 Т4	20 150 250 150 250	200 160 150 170 130	110 — — — —	5 18 23 17 36	— — — — —
АЛ32	Выточенные образцы диаметром 10 мм	З З З	Без т/о Т1 Т2-1*1	200 200 200	150 170 130	100 140 90	2,0 1,0 3,0	— — —
		З	Т5	200 250	210 150	160 130	4,0 4,0	130 55
		З	Т6	200 250	210 140	180 120	4,0 4,0	130 55
		З	**Т7**	200 250	170 130	150 110	3,0 4,0	130 55
		К К К	Без т/о Т1 Т5	200 200 200 250	220 210 230 200	140 150 210 190	4,0 5,0 4,0 4,0	— — — —
АЛ32	Выточенные образцы диаметром 10 мм	Д	Т6 Т7	200 200	250 220	220 190	1,5 3,0	— —
	Отдельно отлитые образцы толщиной 3 мм	Д	Без т/о	200 300	230 170	— —	4,0 3,0	— —
		Д Д Д	Т1 Т2-1 *1 Т2 *2	200 200 200	250 250 210	— — —	2,5 3,5 3,5	— — —
АЛ19	Отдельно отлитые образцы диаметром 12 мм	З	**Т4**	20 200 300 350	300 270 140 80	200 180 70 50	8,0 3,0 5 8	— 150 **60** **35**
		З	**Т5**	20 200	340 280	260 220	4,0 3,0	— 155

Продолжение табл. 17

Сплав	Полуфабрикат	Способ литья	Состояние испытуемых образцов	t испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_{изг}$, МПа
АЛ34	Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм	З	Т5	20	330	270	2,5	—
				100	280	—	4,0	—
				200	230	—	5,0	120
				300	110	—	5,5	20
АЛ4М	Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм	К	Т5	200	260	—	3,0	130
				250	200	—	4,0	55
				300	145	—	6,0	32
АЛ5	Отдельно отлитые образцы диаметром 12 мм	З	Т5	20	250	180	0,8	—
				200	220	—	1,5	90
				300	130	—	4,0	35
		К	Т7	20	240	180	1,5	—
				200	180	140	2,5	—
				300	100	80	6,0	—
АЛ5-1	Отдельно отлитые образцы диаметром 12 мм	З	Т5	100	290	—	1,0	—
				200	240	—	1,5	140
				250	180	—	1,5	70
АЛ33	Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм	З	Т4	150	250	—	3,0	200
				200	220	—	5,0	160
				250	180	110	5,0	140
				300	150	90	4,5	90
				350	80	50	8,0	45
				250	210	150	2,0	140
		З	Т5	300	160	100	2,5	90
				350	100	70	5,0	45
ВАЛ8	Отдельно отлитые образцы диаметром 10 мм	К	Т5	150	340	—	8	—
				200	300	—	9	140
				250	220	210	10	60
				300	130	—	11	35

*1 Режим старения Т2-1 для сплава, отлитого под давлением, 245±5 °С, 5—8 ч.

*2 Режим старения для сплава, отлитого под давлением, 280±10 °С, 5—8 ч.

18. Механические свойства литейных сплавов при низких температурах [45, 53, 54, 55]

Сплав	Полуфабрикат	Способ литья	Состояние испытуемых образцов	Температура испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
АЛ2	Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм	ЗМ, ОМ	Без т/о	—70	220	—	4	—	0,5
АЛ9	Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм	ЗМ	Т5	—70	180	130	3,5	—	—
				—196	220	150	2,5	—	—
			Т6	—70	230	210	1,5	—	—
				—196	250	230	1,0	—	—
АЛ9-1	Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм	З	Т6	—70	300	250	2	—	—
				—196	340	280	2	—	—
АЛ34	Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм	З	Т5	—70	340	290	2	—	—
				—196	390	330	2	—	—
АЛ19	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З	Т4	—70	340	—	8,5	—	—
			Т5	—70	400	—	4,0	—	—
АЛ5	Отдельно отлитый образец диаметром 12 мм	З	Т1	—70	270	—	0,5	—	—
				—196	295	—	0,8	—	—
АЛ33	Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм	З	Т4	—70	215—230	—	1,0	—	—
АЛ8	Выточенный образец диаметром 10 мм	З	Т4	—70	300	210	8,0	7,1	0,71
				—196	250	230	1,0	1,7	0,23
ВАЛ8	Отдельно отлитый образец диаметром 10 мм	К	Т5	—70	430	—	4,0	—	—
				—196	480	—	3,5	—	—

19. Режим термической обработки конструкционных герметичных сплавов [25, 28]

Сплав	Режим термической обработки	Закалка		Старение	
		t, °С	τ выдержки, ч	t, °С	τ выдержки, ч
АЛ4	Т1	—	—	175±5	5—17
	Т6	535±5	2—6	175±5	10—15
АЛ9	Т2	—	—	300±10	2—4
	Т5	535±5	2—6	150±5	1—3
	Т6 *1	535±5	2—6	200±5	2—5
	Т7 *1	535±5	2—6	225±5	3—5
	Т8 *1	535±5	2—6	250±5	3—5
АЛ2	Т2	—	—	300±10	2—4

*1 Закалка в воде с 80—100 °С.

20. Режим термической обработки сплава АЛ32 [45, 55]

Способ литья	Режим термической обработки	Закалка		Старение	
		t, °С	τ, ч	t, °С	τ, ч
Д	Т1	—	—	180±5	5—8
	Т2-1	—	—	245±5	5—8
	Т2	—	—	280±10	5—8
З	Т1	—	—	200±10	5—8
К	Т6	515±5	4—8	175±5	8—16
	Т5	505±5+515±5	4—6	150±5	10—15
	Т7	515±5	4—8	230±5	3—5

21. Режимы термической обработки сплава ВАЛ8 [45, 54, 55]

Режим термической обработки	Закалка	Старение
Т4	450 °С, 4 ч + 500 °С, 4 ч + 510 °С, 6 ч	—
Т5		160 °С, 6—8 ч
Т6		160 °С, 10—12 ч
Т7		200 °С, 4 ч

22. Режимы термической обработки сплава АЛ4М [45, 54, 55]

Способ литья	Закалка	Охлаждение	Старение
В песчаную форму	490±5 °С, 4 ч + + 500±5 °С, 4 ч + 510±5 °С, 6 ч	Вода 20—100 °С	160±5 °С, 8—15 ч
В кокиль	515±5 °С, 4 ч + + 525±5 °С, 8 ч		

Сплав АЛ4М относится к системе Al—Si—Cu—Mg с добавками титана (до 0,3 %) и бора (до 0,1 %). Титан и бор, каждый в отдельности, но особенно вводимые совместно, являются эффективными модификаторами, способствующими измельчению зерен твердого раствора и эвтектических составляющих [55]. Сплав АЛ4М отличается высокой прочностью при температуре 20 °С и повышенной жаропрочностью. Герметичность высокая, коррозионная стойкость пониженная. Сплав АЛ4М подвергается упрочняющей термической обработке с применением ступенчатого нагрева под закалку из-за наличия в структуре сплава легкоплавких эвтектик с различными температурами плавления. Режимы термической обработки приведены в табл. 22.

Сплав АЛ4М предназначен для отливок, полученных методами литья в песчаную форму и в кокиль и работающих в условиях высоких давлений и температур (до 250 °С).

Конструкционные высокопрочные и жаропрочные сплавы. Сплав АЛ19 относится к системе Al—Cu—Mn с добавкой титана до 0,35 %. Сплав характеризуется высокими механическими свойствами при температуре 20 °С и хорошей жаропрочностью, которая может быть повышена одновременным легированием цирконием (0,2 %) и цирконием (0,2 %). Сплав АЛ19 обладает высокими механическими свойствами при низких температурах, хорошей обрабатываемостью резанием и свариваемостью.

Отливки из сплава АЛ19 применяют в термически обработанном состоянии: после закалки (если требуется повышенная пластичность) Т4;

после закалки и искусственного старения (обработка на максимальную прочность) Т5, Т7.

Режим Т4 — двухступенчатый нагрев под закалку (чтобы исключить возможность пережога отливок): I ступень: 530 ± 5 °С, 5—9 ч; II ступень: 545 ± 3 °С, 5—9 ч; охлаждение в воде с температурой 20—100 °С.

В печах, обеспечивающих перепад температур не более ±3 °С, можно применять одноступенчатый нагрев под закалку: 545 ± 3 °С, 10—12 ч, охлаждение в воде с температурой 20—100 °С.

Режим Т5 — закалка по режиму Т4, старение 175 ± 5 °С, 3—6 ч.

Режим Т7 — закалка по режиму Т4, старение 250 ± 10 °С, 3—10 ч.

Коррозионная стойкость сплава АЛ19 пониженная [45, 55].

Сплав АЛ19 предназначен для крупногабаритных отливок, получаемых в основном литьем в песчаные формы, а также для изготовления ответственных деталей, работающих в условиях повышенных статических и ударных нагрузок при низких температурах и повышенных до 300 °С.

Сплав АЛ33 системы Al—Cu—Mn—Ni характеризуется высокой жаропрочностью при 300 °С, значительно превышающей жаропрочность отечественных и зарубежных литейных алюминиевых сплавов (σ_{100}^{300} = 90 МПа). Недостатки — пониженные литейные свойства и коррозионная стойкость.

Термическая обработка — режим Т4: I ступень: 535 ± 5 °С, 5—9 ч; II ступень: 545 ± 3 — 5 °С, 5—9 ч.

23. Режимы термической обработки сплавов АЛ3 и АЛ5 [28, 45]

Сплав	Режимы термической обработки	Закалка двухступенчатая	Старение	
			t, °С	τ, ч
АЛ3	Т1	—	175±5	3—5
	Т5	515±5 °С, 2—4 ч + 525±5 °С, 2—4 ч	175±5	3—5
	Т7	515±5 °С, 2—4 ч + 525±5 °С, 2—4 ч	230±±10	3—5
	Т8	515±5 °С, 2—4 ч + 525±5 °С, 2—4 ч	330±5	3—5
АЛ5	Т1	—	180±5	5—10
	Т5	515±5 °С, 3—5 ч + 525±5 °С, 1—3 ч	175±5	5—10
	Т6	515±5 °С, 3—5 ч + 525±5 °С, 1—3 ч	200±5	3—5
	Т7	515±5 °С, 3—5 ч + 525±5 °С, 1—3 ч	230±5	3—5

В печах, обеспечивающих перепад температур ±3 °С — одноступенчатый нагрев до 545 °С, 12 ч. После закалки старение по режимам: Т5: 175 °С, 3—6 ч; Т6: 225 °С, 3—10 ч; Т7: 250 °С, 3—6 ч.

Обрабатываемость сплава АЛ33 резанием хорошая; сплав предназначен для изготовления деталей, длительно работающих при температурах до 350 °С [45, 55].

Сплавы АЛ3, АЛ5 системы Al—Si—Cu—Mg отличаются повышенной жаропрочностью; детали из них могут работать длительно при температурах до 250—270 °С.

Коррозионная стойкость пониженная, детали следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Режимы термической обработки сплавов АЛ3 и АЛ5 приведены в табл. 23.

При использовании режимов Т5, Т6, Т7, Т8 для деталей, не имеющих массивных участков, можно применять одноступенчатый нагрев до 525 ± 5 °С, 3—5 ч [45].

Сплав АЛ3 используется для корпусов арматуры и приборов, работающих до 275 °С, а сплав АЛ5 — для головок цилиндров двигателей воздушного охлаждения, деталей агрегатов и приборов, работающих при температуре не выше 250 °С.

Конструкционные коррозионно-стойкие сплавы. Сплавы АЛ8, АЛ27, АЛ27-1 на основе системы Al—Mg обладают малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, морской воде, в щелочных растворах, агрессивных средах на основе азотной кислоты, в растворах хлористых солей. Коррозионная стойкость этих сплавов выше, чем других литейных алюминиевых сплавов (табл. 24).

Сплавы Al—Mg хорошо обрабатываются резанием и полируются; литейные свойства сплавов невысокие, кроме того, они отличаются повышенной чувствительностью к примесям Fe и Si.

24. Скорость коррозии сплавов системы Al—Mg [55]

Сплав	Скорость коррозии, г/(м²·ч)				
	при постоянном погружении			при переменном погружении	в камере тумана
	один месяц	два месяца	шесть месяцев	один месяц	три месяца
АЛ8	0,0969	—	—	0,0218	0
АЛ27	0,479	0,0364	0,0228	0,0076	0,001
АЛ27-1	0,0098	0,0031	0,0029	0,0015	0

Легирование сплавов Be, Ti, Zr устраняет их склонность к окислению в процессе плавки и литья, способствует измельчению зерна и тормозит естественное старение, вызывающее у сплавов Al—Mg снижение вязкости, пластичности и повышение склонности к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением из-за неравномерного распада пересыщенного твердого раствора по объему зерна, поэтому эти сплавы упрочняются только закалкой без последующего старения (табл. 25).

Недостатком сплавов АЛ8, АЛ27 и АЛ27-1 является их низкая жаропрочность — уровень рабочих температур не должен превышать 80 °С. Сплавы удовлетворительно свариваются аргонодуговой сваркой. Прочность сварных соединений составляет 80—90 % прочности основного материала.

Сплавы АЛ8, АЛ27, АЛ27-1 применяют для изготовления силовых деталей, работающих при температурах от —60 до +60 °С, а в ряде случаев они могут быть использованы вместо дефицитных бронз, латуней, коррозионно-стойких сталей, для деталей, работающих в различных климатических условиях, включая воздействие морской воды и тумана.

Для снижения склонности к образованию трещин в отливках из этих сплавов в процессе длительной эксплуатации необходимо содержание магния в сплавах ограничивать 10 %, а закалку деталей производить в нагретое до 50—60 °С масло (табл. 25).

Весьма перспективной системой для получения коррозионно-стойких сплавов с высокими и стабильными во времени механическими свойствами является система Al—Mg—Zn.

Сплав АЛ24 на основе этой системы обладает способностью самозакаливания, может подвергаться старению — естественному или искусственному при +200 °С без предшествующей закалки (Т1). Сплавы Al—Mg—Zn могут работать при температурах до 150 °С. Для достижения наиболее высоких прочностных характеристик отливки из

25. Режимы закалки сплавов системы Al—Mg [45, 54, 55]

Сплав	Режим закалки (Т4)		
	t, °С	τ, ч	Охлаждающая среда и ее температура, °С
АЛ8	430±5	12—20	Масло, 50—60
АЛ27	435±5	10	

сплава АЛ24 закаливают с температуры 540—560 °С (охлажденне в кипящей воде или на воздухе) и подвергают старению прн 160—170 °С (20—24 ч).

Сплав АЛ24 сочетает высокую прочность с удовлетворительнымн литейнымн свойствамн, лучшимн, чем у сплавов Al—Mg, отличается высокой корозионной стойкостью н хорошей сварнваемостью.

2. МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Свойства магния. Малая плотность магниевых сплавов в сочетанни с довольно высокой удельной плотностью н целым рядом физико-химических свойств делает их ценнымн для различных областей народного хозяйства — в машиностроенни, в том числе в сельскохозяйственном, автомобнльном, приборостроенни, самолетостроенни, космической технике, раднотехнике, полнграфнческой, текстильной промышленности и т. д. Магниевые сплавы хорошо поглощают внбрацнн, что важно для авнацнн, транспорта и машиностроения. Удельная внбрационная прочность магниевых сплавов с учетом демпфирующей способности почти в 100 раз больше, чем у дуралюмнна, н в 20 раз больше, чем у легированной стали. Магниевые сплавы обладают хорошей обрабатываемостью резанием. Прн механической обработке этнх сплавов допускается скорость резания в 7 раз выше, чем для сталей, и в 2 раза выше, чем для алюминневых сплавов. Магниевые сплавы немагнитны и не дают искры при ударах и трении. Большую выгоду дает примененне магниевых сплавов в деталях, работающнх на продольный или поперечный изгнб. По удельной жесткости при нзгибе и крученнн магниевые сплавы превышают алюминиевые на 20 % и стали на 50 %.

Магниевые сплавы в горячем состоянии хорошо прессуются, куются н прокатываются. Онн широко прнменяются в внде поковок, штамповок, листов, профилей, прутков, труб и т. д.

Наша промышленность располагает магниевыми сплавами, пригодным для работы в нитервале температур от —253 до 350—400 °С. Методы защиты магниевых сплавов оксиднымн пленкамн и лакокрасочными покрытиями обеспечивают нормальную работу изделий из них в различных эксплуатационных условиях.

Магнний нмеет значенне не только как ценный технический материал, но н как заменитель дефицитных и дорогостоящих металлов.

В завнсимости от хнмнческого состава магний выпускается трех марок: Мг96 (99,96 % Mg), Мг95 (99,95 % Mg) н Мг90 (99,95 % Mg). Магнний поставляется в чушках массой 8,0 ± 1 кг.

В СССР освоено производство магния повышенной (99,99 % Mg) и высокой чистоты (99,9999 % Mg), а также гранулированного магния.

Физико-хнмические и механические свойства магния [30] приведены ниже.

Атомный номер	12
Валентность	2
Атомная масса	24, 32
Плотность, кг/м^3	1740
Температура, °С:	
плавленнн	651
кипенння	1107
Удельная теплота плавленнн, кДж/кг	357
Удельная теплоемкость прн 20—100 °С, Дж/(кг× × °С)	1047,6
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	167
Удельное электрическое сопротнвленне (при 20 °С), Ом·м	0,047·10^{-6}
Температурный коэффнцнент лннейного расширенння (прн 25 °С), °С$^{-1}$	26·10^{-6}
Электрохнмнческнй эквнвалент, мг/Кл	0,12601
Нормальный электродный потенцнал по водороду, В	—1,55
Временное сопротнвленне, МПа:	
в литом состоянии	120
в деформнрованном состоянни	200
Предел текучести, МПа:	
в литом состоянии	30

в деформированном состоянии	90
Твердость НВ, МПа:	
в литом состоянии	300
в деформнрованном состоянни	360
Относительное удлинение, %:	
в литом состоянии	8
в деформированном состоянни	12
Модуль нормальной упругости, ГПа	45
Ударная вязкость, МДж/м^2	6,12
Предел выносливости отожженного магния на базе 5·10^8 циклов, МПа	61,8

Сплавы магния. Промышленные магниевые сплавы прнято делить на литейные для получения деталей методом фасонного литья (МЛ) н деформируемые для получения полуфабрикатов и изделий путем пластической деформацни (МА). По применению их классифицнруют на конструкционные и со специальнымн свойствамн.

Состав, свойства (механические, физические и технологнческне), режнмы обработки н области применения лнтейных магниевых сплавов прнведены в табл. 26—32.

Химический состав, свойства, методы обработки и области применения деформируемых магниевых сплавов даны в табл. 33—41.

Термомеханическая обработка (ТМО) является одним нз методов повышения прочности стареющих деформируемых магниевых сплавов. В практнке нспользуют три внда ТМО: низкотемпературную (НТМО), высокотемпературную (ВТМО) н комбннированную (КТМО).

При НТМО деформацня осуществляется в температурной области ниже порога рекристаллнзацни. Она заключается в закалке с температуры твердого раствора, холодной (нли теплой) деформацни (10—15 %) с последующим старением. ВТМО — нагрев до температуры образования перенасыщенного твердого раствора, горячая пластическая деформацня и старение. КТМО — нагрев прн температуре 490—530 °С (для сплава МА11) в течение 2 ч, подстуживание на воздухе до 300—350 °С, деформнрованне прн этой температуре (50—90 %), деформация вхолодную (5—10 %), последующее нскусственное старение при 175 °С в течение 2,5 ч. Полученное упрочнение сохраняется до 300 °С.

В табл. 42 приведены данные о влнянии ТМО на свойства некоторых высокопрочных магниевых сплавов.

Сверхлегкие сплавы (магниеволитиевые сплавы). Особенностями сверхлегкнх сплавов являются низкая плотность (1,350—1,600 т/м^3), повышенная пластичность и обрабатываемость давленнем прн температурах, значительно более низких, чем обычных магниевых сплавов, высокая удельная жесткость и высокнй предел текучести прн сжатнн, отсутствне чувствительности к надрезу, незначительная анизотропня механнческнх свойств, высокая теплоемкость, хорошне механические свойства при крногенных температурах. В табл. 43 прнведены состав н свойства двух сплавов, используемых в технике.

Магниеволитиевые сплавы могут быть также использованы для создания легкнх композиционных сплавов. Например, магниеволитиевый сплав, армнрованный проволокой нз стали У8А, нмеет временное сопротнвление 600 МПа, модуль упругости 64 ГПа прн плотности 2,4 т/м^3.

Магниевые сплавы со специальнымн физическими и химическими свойствами. Свойства этнх сплавов прнведены в табл. 44 н 45. Сплав МА18 применяют для малонагруженных деталей, работающих прн температуре —253 ÷ 60 °С, когда требуются высокая жесткость н малая масса. Сплав МА21 прнменяют для средненагруженных деталей, работающих при температуре до 100—125 °С н криогенных температурах, когда требуются высокая жесткость н повышенная прочность при сжатнн. Сплав МА17 находнт применение в раднотехнической промышленности для изготовления звукопроводов ультразвуковых лнний задержки. **Физические свойства** сплава МА17, характернзующне его как материал для звукопроводов, прнведены ниже.

26. Литейные магниевые сплавы, их состав и свойства [2, 30, 52]

Сплав	Химический состав, % (основа—магний)				Вид термической обработки *1	Испытание при растяжении				Испытание при сжатии			НВ, МПа	KCU, кДж/м²	$\sigma_{изг}$	$\sigma_{0,2/100}$
	Al	Mn	Zn	Другие элементы		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %			МПа	
						МПа		%		МПа						
МЛ3	2,5—3,5	0,15—0,5	0,5—1,5	—	—	180	55	8,0	11,0	280	—	20	—	—	—	—
МЛ4	5,0—7,0	0,15—0,5	2,0—3,5	—	T4 T6	250 255	85 115	9,0 6,0	13,0 8,0	370 390	— —	16 14	— —	— —	— —	— —
МЛ5	7,5—9,0	0,15—0,5	0,2—0,8	—	T4 T6	250 255	90 120	9,0 4,0	15,0 8,5	365 340	— —	16,5 —	250 —	50 —	— —	90 120
МЛ5пч*2	7,5—9,0	0,15—0,5	0,2—0,8	—	T4 T6	250 255	95 120	6,5 5,0	16,0 8,5	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
МЛ6	9,0—10,2	0,1—0,5	0,6—1,2	—	T4 T6	250 260	100 140	5,0 1,0	12,0 3,0	320 380	— —	— —	— —	— 150	— —	— —
МЛ8	—	—	5,5—6,6	0,7—1,1 Zr, 0,2—0,8 Cd	T6 T61	290 300	190 200	6,0 7,0	13,0 8,0	430 430	190 190	— —	— —	— —	— —	— —
МЛ9	—	—	—	1,9—2,6 Nd, 0,4—1,0 Zr, 0,2—0,8 In	T6	250	120	6	—	—	120	—	—	70	—	—
МЛ10	—	—	0,1—0,7	0,4—1,0 Zr, 2,2—2,8 Nd	T6 T61	226 235	137 137	3 3	— —	— —	140 —	— —	260 —	50 —	— —	— —
МЛ11	—	—	0,2—0,7	0,4—1,0 Zr, 2,5—4,0 РЗМ*3	T4 T6	137 137	85 98	3 2	— —	315 320	90 105	— —	— —	— 50	— —	— —
МЛ12	—	—	4,0—5,0	0,6—1,1 Zr	Без т/о T1	220 250	180 150	7 6	8,0 7,0	— 360	— 140	— —	— —	40 40	— —	— —
МЛ15	—	—	4,0—5,0	0,7—1,1 Zr, 0,6—1,2 La	T1	220	150	4,0	5,0	380	150	2	280	50	—	—
МЛ19	—	—	0,1—0,6	0,4—1,0 Zr, 1,6—2,3 Nd, 1,4—2,2 Y	T6	220—260	120—170	4—7	—	—	120	—	280	50	—	—

*1 Виды термической обработки указаны в табл. 28.
*2 пч — повышенной чистоты.
*3 РЗМ — элементы, входящие в состав цериевого мишметалла, содержащего не менее 45 % церия.

Примечания: 1. Статический модуль упругости магниевых сплавов составляет 42 000—44 000, динамический—45 000—45 500 МПа.
2. $\sigma_{0,2/100}$ — напряжение, вызывающее 0,2 остаточной деформации за 100 ч.

27. Свойства литейных магниевых сплавов при повышенных и низких температурах [30, 48]

Сплав	Вид термической обработки	Температура испытания, °С: 100				150				
		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$
		МПа			МПа				МПа	
МЛ2	—	105	45	4	18	80	30	11	—	16
МЛ3	—	160	50	10	39	145	45	11	—	35
МЛ4	Т4	240	80	7	66	210	75	15	—	29
МЛ5	Т4	230	80	10	70	185	60	12	85	25
МЛ6	Т4	220	—	5	72	210	85	18	—	24
МЛ9	Т6	—	—	—	—	250	—	—	—	—
МЛ10	Т6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
МЛ11	Т6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
МЛ12	Т1	—	—	—	56	160	110	8	80	40
МЛ15	Т1	—	—	—	—	145	105	5	100	65

Сплав	Температура испытания, °С: 200					250				
	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$
	МПа			МПа					МПа	
МЛ2	70	25	12,5	—	13	—	—	—	—	—
МЛ3	10,5	40	12	—	25	75	40	11	—	—
МЛ4	150	68	25	—	12	75	—	26	—	—
МЛ5	155	50	15	5	8	120	40	15	25	—
МЛ6	150	—	20	—	7	110	70	—	—	—
МЛ9	200—220	130—140	5	—	95	160—180	120	5	—	45
МЛ10	190	140	8	13	110	165	130	13	70	38
МЛ11	140	80	6	11,5	65	130	75	8,5	55	30
МЛ12	140	85	10	5	25	100	60	12	20	—
МЛ15	125	85	13	6,5	40	100	65	16	40	20

Продолжение табл. 27

Сплав	Температура испытания, °С: 300				—70		—196	
	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	σ_{100}	$\sigma_в$	δ, %	$\sigma_в$, МПа	δ, %
	МПа			МПа				
МЛ2	60	—	—	—	—	—	—	—
МЛ3	60	30	10,5	—	—	—	—	—
МЛ4	—	—	—	—	—	—	—	—
МЛ5	90	—	—	—	290	12	290	7,0
МЛ6	80	—	—	—	270	5	—	—
МЛ9	120	100	20	18	—	—	320	4,5
МЛ10	135	110	17	25	300	5	320	4
МЛ11	105	60	30	22	—	—	—	—
МЛ12	70	45	12	—	250	2	250	2
МЛ15	75	50	16	40	210	1	220	1

28. Режим термической обработки литейных магниевых сплавов [30]

Сплав	Вид термической обработки	Закалка: t, °С	τ выдержки, ч	Охлаждающая среда	Старение: t, °С	τ выдержки, ч
МЛ2	Т2	—	—	—	340	2—3
МЛ3	Т2	—	—	—	340	2—3
МЛ4	Т4	380	8—16	Воздух	—	—
МЛ4пч	Т6	380	8—16	»	175	16
МЛ5	Т4	415	8—32	»	—	—
МЛ5пч	Т6	415	8—32	»	175 или 200	16 или 8
МЛ5он	Т4	410	8—16	»	—	—
МЛ5	Т4	360+410 *1	3—21—29	»	—	—
МЛ6	Т6 *2	360+410	3—21—29	Вода при 90 °С	190	4—6
МЛ10	Т6	540	8—12	Воздух	205	12—15
МЛ10	Т4	570	4—6	»	—	—
МЛ11	Т6	570	4—6	»	200	16
МЛ11	Т1	—	—	—	300	4—6
МЛ12	Т6	400+490	2—3	Воздух	165 или 150	24 или 50
МЛ14	Т1	—	—	—	315	16
МЛ15	Т1	—	—	—	300	2—6
МЛ19	Т6	535	4—8	Воздух	205	8

*1 Знак плюс указывает на ступенчатый нагрев.
*2 Для получения повышенного удлинения.

Примечания: 1. Условные обозначения видов термической обработки: Т1 — старение; Т2 — отжиг (охлаждение с печью); Т4 — гомогенизация и закалка на воздухе; Т6 — гомогенизация, закалка на воздухе и старение; Т61 — гомогенизация, закалка в воде и старение.
2. Охлаждающая среда при старении — воздух.
3. Температура нагрева должна выдерживаться в пределах ±5°.
4. Время выдержки указано без учета времени, необходимого для нагрева до заданной температуры закалки и старения.

29. Физические свойства литейных магниевых сплавов [30]

Сплав	ρ, т/м³	α·10⁶, °C⁻¹ (при 20—200 °C)	λ, Вт/(м·°C)	c, Дж/(кг·°C)	ρ₁·10⁸, мкОм·м
МЛ2	1,80	27,3	133,9	1046,7	—
МЛ3	1,78	27,0	104,7	1046,7	—
МЛ4, МЛ4пч	1,83	27,6	79,5	1046,7	—
МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он	1,81	28,1	78,9	1046,7	0,134
МЛ6	1,81	27,3	78,9	1046,7	—
МЛ7-1	1,76	27,7	78,3	1046,7	—
МЛ8	1,82	27,2	120,5	1004,8	—
МЛ9	1,76	27,1	117,2	—	0,072
МЛ10	1 780	28,0	113,0	1046,7	0,084
МЛ11	1 800	—	117,2	1046,7	0,073
МЛ12	1 810	27,3	133,9	962,9	0,066
МЛ15	1 830	26,9	138,1	921,1	0,068
МЛ19	1 790	27,7	87,9	1130,4	0,096

30. Технологические свойства литейных магниевых сплавов [30]

Сплав	Температурный интервал кристаллизации, °C	t литья, °C	Линейная усадка, %	Горячеломкость (по ширине кольца), м	Жидкотекучесть (по длине прутка), м
МЛ2	650—645	750—800	1,6—1,9	0,500	—
МЛ3	630—560	720—800	1,4—1,6	0,425	2,15
МЛ4, МЛ4пч	610—400	720—800	1,2—1,4	0,375	2,35
МЛ5, МЛ5он, МЛ5пч	600—430	720—800	1,1—1,3	0,300	2,90
МЛ6	600—440	720—800	1,1—1,2	0,275	3,35
МЛ7-1	610—505	720—780	1,2—1,3	0,375	2,50
МЛ10	640—550	720—800	1,2—1,5	0,300	2,50
МЛ11	645—590	720—800	1,2—1,5	0,200	2,90
МЛ12	640—550	730—800	1,3—1,4	0,300—0,325	2,80
МЛ14	648—560	720—800	1,3—1,4	—	—
МЛ15	630—539	720—800	1,3—1,6	0,275—0,300	3,20
МЛ19	—	—	1,2—1,5	0,275—0,300	3,15

31. Характеристики свариваемости литейных магниевых сплавов (аргонодуговая сварка) [31]

Сплав	Вид термической обработки	Присадка	Условия заварки дефектов отливок (деталей)
МЛ5	—	Основной материал	Без подогрева и с подогревом в интервале 350—380° в зависимости от жесткости детали *1
МЛ5пч	—	То же	То же
МЛ10	—	»	То же в интервале 380—430° *2
МЛ11	Т6	»	С подогревом в интервале 380—430° *2
МЛ12	Т1	Проволока марки СВ122 *1	С подогревом (общий + местный) в интервале 400—430°
МЛ8	Т6	Основной материал	С созданием теплового барьера в зоне плавки *2
МЛ12	—	Проволока марки СВ122 *1	Без подогрева (сплавы склонны к образованию трещин в шве, зоне сплавления и околошовной зоне *4)
МЛ8	—	То же	
МЛ15	—	»	
МЛ9	—	Основной материал	Без подогрева и с местным подогревом *2 в интервале 380—470° в зависимости от жесткости детали

*1 Для получения более высокого качества мест заварки следует использовать проволоку, полученную прессованием.

*2 Сплав сваривается удовлетворительно, несколько склонен к образованию микрорыхлот при сварке. Коррозионная стойкость в местах заварки удовлетворительная.

*3 Сплав сваривается хорошо, не склонен к образованию микрорыхлот. Коррозионная стойкость в местах заварки удовлетворительная.

*4 Заварка дефектных мест невозможна без трещин; склонен к образованию микрорыхлот. Коррозионная стойкость в местах заварки неудовлетворительная.

32. Области применения литейных магниевых сплавов [30]

Сплав	Вид термической обработки	Предельная рабочая температура, °С: Длительная	Предельная рабочая температура, °С: Кратковременная	Область применения
МЛ2	—	150	200	Детали, от которых требуется повышенная коррозионная стойкость и герметичность (горловины, бензобаки, бензомасляная арматура и др.)
МЛ3	—	До 150	До 150	Детали с высокой герметичностью (детали арматуры корпусов насосов и др.)
МЛ4	Т4	150	250	Детали двигателей и других агрегатов, работающие в условиях высокой коррозионной стойкости, статических и динамических нагрузок (корпуса приборов и инструментов, штурвалы и др.)
МЛ5	Т4	150	250	Сплав общего назначения. Нагруженные детали, работающие в условиях морской атмосферы, а также детали двигателей, приборов и др. (тормозные барабаны, кронштейны, штурвалы и др.)
МЛ6	Т6	До 150	—	Высоко- и средненагруженные детали (детали приборов, аппаратуры, корпуса и др.)
МЛ8	Т6	150	200	Нагруженные детали (реборды, барабаны колес и другие конструкции)
МЛ9	Т6	250—300	350—400	Детали двигателей, приборов и др.
МЛ10	Т6	250	350	Нагруженные детали различных конструкций, двигателей, приборов и агрегатов, требующие высокой герметичности и высокой стабильности размеров
МЛ11	Т6	250	300	Детали двигателей, приборов и агрегатов, требующие повышенной герметичности и не испытывающие высоких нагрузок при комнатной температуре
МЛ12	Т6	200	250	Нагруженные детали (реборды, барабаны колес и другие конструкции)
МЛ15	Т1	200	300—350	Нагруженные детали двигателей, приборов, агрегатов, требующие герметичности

Примечания: 1. Сплавы МЛ4 и МЛ5 повышенной чистоты.
2. Виды термической обработки. См. табл. 28.

33. Свойства деформируемых горячепрессованных магниевых сплавов при повышенных и низких температурах [15, 30, 48]

Сплав	Температура испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	σ_{100}, МПа	$\sigma_{0,2/100}$, МПа
МА1	20	180	110	15	—	—
	100	140	70	30	70	60
	150	120	60	40	60	50
	200	90	40	50	40	30
	250	60	30	60	20	15
МА2	20	210	115	11	—	—
	100	165	75	19	75	65
	150	140	65	25	65	55
	200	110	45	30	45	35
	250	80	35	40	25	20
МА2-1	20	225	130	11,5	—	—
	100	190	95	13	100	85
	150	170	85	15	85	70
	200	130	70	20	60	50
	250	90	40	30	30	25
МА5	20	220	130	13	—	—
	100	175	100	22	—	—
	150	165	95	25	—	—
	200	140	80	30	—	—
	250	100	50	40	—	—
МА8	20	180	100	10	—	—
	100	140	70	14	—	—
	150	120	60	16	—	—
	200	90	40	20	—	—
	250	60	30	30	—	—
МА11	20	260	180	8	—	—
	100	210	140	12	—	—
	150	190	130	14	—	—
	200	160	110	18	—	—
	250	120	80	25	—	—
МА12	20	260	180	8	—	—
	100	210	140	12	—	—
	150	190	130	14	—	—
	200	160	110	18	—	—
	250	120	80	25	—	—
МА14	20	260	180	8	—	—
	100	210	140	12	—	—
	150	190	130	14	—	—
	200	160	110	18	—	—
	250	120	80	25	—	—
МА15	20	260	180	8	—	—
	100	210	140	12	—	—
	150	190	130	14	—	—
	200	160	110	18	—	—
	250	120	80	25	—	—
МА19	20	260	180	8	—	—
	100	210	140	12	—	—
	150	190	130	14	—	—
	200	160	110	18	—	—
	250	120	80	25	—	—

34. Деформируемые магниевые сплавы и область их применения [15, 30, 51]

Сплав	Химический состав, % (основа магний)						Свойства при комнатной температуре				Вид полуфабриката	Предельная рабочая температура, °С		Область применения
	Al	Mn	Zn	Zr	Nd	Другие элементы	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	НВ, МПа	KCU, кДж/м²		Длительная	Кратковременная	
							МПа								
МА1	—	1,3—2,5	—	—	—	—	190—220	120—140	5—10	400	—	Все виды	150	200	Сварные детали несложной конфигурации, детали арматуры бензо- и маслосистем, не несущие больших нагрузок
МА2	3,0—4,0	0,15—0,5	0,2—0,8	—	—	—	260—280	160—180	5—15	450	120	То же	150	200	Кованые и штампованные детали сложной конфигурации для сварных конструкций
МА2-1	3,8—5,0	0,2—0,6	0,6—1,5	—	—	—	270—310	160—230	8—12	420	70	»	150	200	Панели, штамповки сложной конфигурации для сварных конструкций
МА5	7,8—9,2	0,15—0,5	0,2—0,8	—	—	—	300—330	220—240	8—14	550	—	Прессованные, поковки, штамповки	150	200	Нагруженные детали
МА8	—	1,5—2,5	—	—	—	—	220—250	140—160	7—12	400	50	Все виды	200	250	Листы, плиты, штамповки сложной конфигурации для сварных конструкций
МА11	—	1,5—2,5	—	—	2,5—3,5	0,13—0,25 Ni	260—280	130—160	5—14	—	35	Прутки, штамповки, листы	250	300	Детали, нагревающиеся в процессе эксплуатации
МА12	—	—	—	0,3—0,8	2,5—3,5	—	230—280	130—180	9—12	—	130	Прутки, листы, плиты, профили	250	300	Детали, нагревающиеся в процессе эксплуатации
МА14	—	—	5,0—6,0	0,3—0,9	—	—	320—340	220—290	6—14	600	60	То же	150	200	Высоконагруженные детали
МА15	—	—	2,5—3,5	0,45—0,9	—	0,7—1,0 La 1,2—2,0 Cd	300—320	250—260	5—14	600	100	Прутки, профили, листы	150	200	Детали сварных конструкций, требующие повышенного предела текучести при сжатии
МА19	—	—	5,5—7,0	0,5—0,9	1,4—2,0	—	380—400	330—360	5—8	800	50	Прессованные, поковки, штамповки	150	200	Детали сварных конструкций, для которых требуются повышенный предел прочности и текучесть при растяжении и сжатии *1

*1 Хорошо сваривается контактной, шовной и точечной сваркой.

Примечание. Модуль нормальной упругости деформируемых магние

вых сплавов составляет 41 000—43 000 МПа.

35. Режимы термической обработки деформируемых магниевых сплавов [6, 14, 30, 65]

Сплав	Вид термической обработки	Закалка			Старение		Отжиг	
		t, °С	τ, ч	Охлаждающая среда	t, °С	τ, ч	t, °С	τ, ч
МА1	М	—	—	—	—	—	320—350	0,5
МА1	Н	—	—	—	—	—	260—290	0,5
МА2-1	М	—	—	—	—	—	250—280	0,5
МА2-1	Н	—	4	—	—	—	150—200	1,0
МА5	Т4	410—425	6—2	Воздух	—	12—24	—	—
МА5	Т5	—	—	—	175—200	16—8	—	—
МА5	Т6	410—425	6—2	Воздух	175—200	16—2	—	—
МА8	М	—	—	—	—	—	320—350	0,5
МА11	Т6	480—500	4	Струя холодного воздуха	175±5	24	—	—
МА11	Т4 *1	480—500	4		175±5	24	—	—
МА11	Т6	530	1	Вода	200	16	—	—
МА14	Т5	—	—	—	170±5	10—24	—	—
МА15	М	—	—	—	—	—	260±20	0,5—10

*1 Между закалкой и старением — холодная деформация 3—10 %.

Обозначения: М — отжиг после деформации; Н — полунагартованное состояние (низкотемпературный отжиг после деформации); Т4 — закалка после деформации; Т5 — искусственное старение после деформации; Т6 — закалка и искусственное старение после деформации.

37. Режимы обработки давлением магниевых сплавов [31, 48]

Сплав	t, °С, при обработке			
	прессованием	прокаткой (листов)	ковкой и горячей штамповкой	листовой штамповкой
МА1	320—380	360—400	350—440	250—350
МА2	320—360	—	440—320	420—320
МА2-1	320—360	360—400	390—350	250—320
МА8	380—420	400—450	420—350	230—350
МА11	410—430	390—440	460—350	350—400
МА14	300—360	—	420—300	200—250 (профили)
МА15	330—380	300—350	380—250	200—300

36. Механические свойства высокопрочных деформируемых магниевых сплавов при нормальной и повышенной температурах после термомеханической обработки [30]

Сплав	Вид термической обработки	20 °С					250 °С				300 °С			
		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{-0,2}$	δ, %	KCU, кДж/м²	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	σ_{100}	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %
		МПа					МПа			МПа			
МА11	Т6	260	130	120	9,5	52	205	115	18,5	100	140	100	27
	НТМО *1	320	290	183	8,5	—	250	215	9	120	165	150	20
	ВТМО *2	330	300	245	10	47	220	160	21,5	80	160	135	20,5
	КТМО *3	350	330	—	7	—	250	220	18	80	—	—	—
МА12	Т6	280	150	140	14	58	190	130	19	65	120	110	29
	НТМО	285	250	—	7	—	195	190	11	80	140	135	27
	ВТМО	300	280	235	13	40	180	150	22	55	95	80	40,5
	КТМО	330	300	—	6	—	190	165	17	50	—	—	—
МА14	Т5	340	300	245	13,5	70	200	175	27,5	—	—	—	—
	НТМО	360	325	—	10,5	—	200	190	31,5	—	—	—	—
	ВТМО	380	350	280	11,5	55	190	165	36	—	—	—	—
	ВТМО + старение	380	365	280	12	51	205	190	34	—	—	—	—
МА15	Т5	335	245	240	9,5	22	—	—	—	—	—	—	—
	НТМО	410	325	—	10,5	—	—	—	—	—	—	—	—
	ВТМО	404	320	290	11,5	21	—	—	—	—	—	—	—
	ВТМО + старение	335	245	240	9,5	22	—	—	—	—	—	—	—

*1 НТМО (низкотемпературная термомеханическая обработка) — закалка с температуры твердого раствора + холодная (или теплая) пластическая деформация 10—15 % + старение.

*2 ВТМО (высокотемпературная термомеханическая обработка) — нагрев до температуры образования пересыщенного твердого раствора, горячая пластическая деформация + старение.

*3 КТМО (комбинированная термомеханическая обработка) — нагрев при температуре 490 — 530 °С для сплава МА11 в течение 2 ч, подстуживание на воздухе до 300—350 °С, деформирование (50—90 %) при этой температуре, холодная деформация (5—10 %) + старение при 175 °С в течение 24 ч.

38. Режимы вытяжки и гибки магниевых сплавов [31, 48]

Сплав	t, °С	Вытяжка		Давление прижима, МПа	Минимально допустимый радиус изгиба, мм	
		первая	вторая		без нагрева	с нагревом
МА1	250—350	2,2—2,4	1,5—1,6	35—45	6—8	1,5—2,5
МА8-М	250—350	2,3—2,6	1,7—1,8	40—55	4,5—6	1,5—2,5
МА8-Н	230—280	1,8—2,0	—	70—80	—	—
МА2-1	250—320	2,2—2,4	1,6—1,7	50—65	5—7	1,5—2,5
МА11	250—420	2,0—2,1	1,5—1,7	50—80	5,5—6	2—3
МА15	200—300	2,1—2,15	1,6—1,7	40—60	6—8	2—3

39. Физические свойства деформируемых магниевых сплавов [31]

Сплав	ρ, т/м³	$\alpha \cdot 10^6$, °С⁻¹, при температуре, °С			λ, Вт/(м·°С)	c, Дж/(кг·°С)	$\rho_1 \cdot 10^6$, мкОм·м
		20—100	20—200	200—300			
МА1	1,76	26	26,5	—	125,6	1004,8	0,061
МА2	1,78	26	26	—	96,3	1130,4	0,120
МА2-1	1,79	26	26,3	—	96,3	1088,5	0,120
МА5	1,80	26	26,0	—	75,3	1130,4	0,130
МА8	1,78	23,7	24,9	27,3	133,9	1046,7	0,051
МА11	1,80	25,7	27,5	—	108,8	—	0,062
МА12	1,83	—	—	—	—	—	—
МА14 (ВМ65-1)	1,80	20,9	26,0	28,3	117,2	1046,7	0,056
МА15	1,83	25,9	26,8	—	113,0	1004,8	0,065
МА19	1,88	26,2	—	—	—	—	0,061

40. Технологические свойства деформируемых магниевых сплавов [31, 48]

Свойства	Сплавы					
	МА1, МА8	МА2	МА2-1	МА5	МА14	МА15
Температура, °С:						
ликвидуса	650	630	620	605	635	640
солидуса	646	565	545	430	515	540
Жидкотекучесть по длине спирали, мм	680	600	640	750	575	580
Объемная усадка (между ликвидусом и солидусом), %	1,8	1,6	1,25	1,25	1,4	1,35
Линейная усадка, %	5,4	5,0	4,2	3,8	3,2	3,2

41. Характеристики свариваемости деформируемых магниевых сплавов (аргонодуговая сварка) [31, 48]

Сплав	Присадка	Коэффициент прочности сварного соединения	Угол загиба шва $\Delta°$	Коэффициент трещинообразования	Коррозионная стойкость сварного соединения	Свариваемость
МА1	Основной материал	0,86	70	⩽15	Удовлетворительная	Сплав сваривается хорошо, не склонен к образованию зон микрорыхлоты при сварке
МА8 МА8	Основной материал МА2-1	0,60 0,75	40 60	⩽45 ⩽35	То же	Сплав сваривается удовлетворительно, склонен к образованию зон микрорыхлоты
МА2-1	Основной материал	0,80	65	⩽35	»	То же
МА14	Проволока марки СВ122	—	—	⩽70	Неудовлетворительная	Сплав сваривается плохо, имеет большую склонность к образованию зон микрорыхлоты
МА15	Основной материал	0,82	60	⩽35	Удовлетворительная	Сплав сваривается удовлетворительно, несколько склонен к образованию зон микрорыхлоты
МА11—Т6	Проволока марки СВ27	0,76	—	⩽60	Неудовлетворительная	Сплав сваривается плохо, имеет большую склонность к образованию зон микрорыхлоты

42. Механические свойства сплавов после различных обработок [31, 48]

Вид термической обработки	Температура испытания, °С: 20					200				300		
	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{-0,2}$	δ, %	KCU, кДж/м²	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	σ_{100}, МПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %
	МПа					МПа				МПа		
Сплав МА11												
Т6	260	130	120	9,5	52	20,5	11,5	18,5	10,0	14,0	10,0	27,0
НТМО	320	290	183	8,5	—	25,0	21,5	9,0	12,0	16,5	15,0	20,0
ВТМО	330	300	245	10,0	47	22,0	16,0	21,5	8,0	16,0	13,5	20,5
КТМО	350	330	—	7,0	—	25,0	22,0	18,0	8,0	—	—	—
Сплав МА12												
Т6	280	150	140	14,0	58	19,0	13,0	19,0	6,5	12,0	11,0	29,0
НТМО	285	250	—	7,0	—	19,5	19,0	11,0	8,0	14,0	13,5	27,0
ВТМО	300	280	235	13,0	40	18,0	15,0	22,0	5,5	9,5	8,0	40,5
КТМО	330	300	—	6,0	—	19,0	16,5	17,0	5,0	—	—	—
Сплав МА14 [*1]												
Т5	340	300	245	13,5	70	200	175	27,5	—	—	—	—
НТМО	360	325	—	10,5	70	200	190	31,5	—	—	—	—
ВТМО	380	350	280	11,5	55	190	165	36,0	—	—	—	—
ВТМО + старение	380	365	280	12,0	51	205	190	34,0	—	—	—	—
Сплав МА5												
Т5	335	245	240	9,5	22	—	—	—	—	—	—	—
НТМО	410	325	—	10,5	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТМО	405	320	290	11,5	21	—	—	—	—	—	—	—
ВТМО + старение	335	245	240	9,5	22	—	—	—	—	—	—	—

[*1] При 20 и 150 °С.

Коэффициент затухания ультразвука на продольных волнах, дБ/м, при частоте, МГц:
10 . . . . . 2—3
15 . . . . . 3—5
20 . . . . . 5—8

Скорость распространения волн, м/с:
продольных . . . . . 5760—5840
поперечных . . . . . 3040—3150

Температурный коэффициент задержки, °С⁻¹:
для продольных волн . . . . . 1,3—1,6·10⁻⁴
для поперечных волн . . . . . 2,2—2,4·10⁻⁴

Плотность, кг/м³ . . . . . 1750—1760

Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м . . . . . (5,32—5,34) 10⁻²

Механические свойства сплава МА17 при 20 °С:
$\sigma_в$, МПа . . . . . 190—210
$\sigma_{0,2}$, МПа . . . . . 110—140
δ, % . . . . . 12—14
Ψ, % . . . . . 14—22
НВ, МПа . . . . . 400,0—520,0

Изготовление приборов из этого сплава позволяет повысить надежность их работы, а также снизить трудоемкость изготовления и уменьшить себестоимость.

Сплав МА2-2 используется в полиграфической промышленности для изготовления клише. Внедрение его повышает прочность клише, увеличивает их тиражеустойчивость, сокращает время травления и повышает производительность машин. Для улучшения качества поверхности клише следует применять фильтрацию расплава через стальную сетку с ячейками 1,2×1,2 мм.

Сплавы МЛ16, МЛ16пч, МЛ16бч, МЛ4вч используются в качестве протекторов с высокой коррозионной стойкостью, которая обеспечивается путем глубокой очистки магния от вредных примесей железа, никеля, меди и кремния. Применение их в магистральных газо- и нефтепроводах, а также для защиты подводной части корпусов судов значительно удлиняет срок службы защищаемых объектов.

43. Состав и механические свойства сверхлегких сплавов [14, 16, 30]

Сплав	Химический состав, % (основа магний)					НВ	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	Ψ	$\sigma_{-0,2}$, МПа	KCU, кДж/м²	E, ГПа
	Li	Al	Zn	Mn	Другие элементы	МПа			%				
МА18	10—11,5	0,5—1,0	2,0—2,5	0,1—0,4	0,15—0,35 Ce	600	185	150	30,5	60	18,6	280	**45**
МА21	7,0—10,0	4,0—6,0	0,8—2,0	0,1—0,5	3,0—5,0 Cd	750	240	190	18,5	26	21,6	70	**46**

44. Магниевые сплавы со специальными физическими и химическими свойствами [14, 15, 52, 59]

Сплав	Химический состав (основа магний), мас. доля, %								Полуфабрикат	Назначение
	Al	Zn	Mn	Ce	Zr	Cd	Y	Примесн, масс. доля, %, не более: Si / Fe / Cu / Ni		
МА17	—	—	0,2—0,7	0,7—1,5	—	—	—		Плиты катаные	Для изготовления проводов ультразвуковых линий задержки
МА2-2 *1	2—2,5	0,7—1,2	0,15—0,35	—	—	—	—		Плиты, листы	Для изготовления клише в полиграфической промышленности
МЛ16	7,5—9,0	2,0—3,0	0,15—0,50	0,2	0,03	0,15	0,01	0,01 / 0,005 / 0,01 / 0,001	Отливки и прессованные прутки	Для защиты от коррозии газонефтепроводов и других подземных металлических сооружений
					0,003	0,003	0,001	0,003 / 0,003 / 0,003 / 0,001	То же	То же
					0,003	0,004	0,001	0,003 / 0,004 / 0,004 / 0,001	»	»
МЛ16пч	7,5—9,0	2,0—3,0	0,15—0,50	0,06					Отливки	Протекторный сплав для защиты от коррозии морских судов
МЛ16вч	7,5—9,0	2,0—3,0	0,15—0,50	0,04						
МЛ4вч	5,0—7,0	2,0—3,0	0,15—0,50	0,05						
МЦИ	—	0,1—0,3	—	—	0,4—0,7	0,4—0,75	0,02—0,05		Отливки	Для изготовления деталей, работающих в условиях вибрационных нагрузок

*1 Окончательный отжиг листов рекомендуется проводить при 200—230 °С в течение 30 мин, затем охлаждение на воздухе.

45. Электрохимические свойства протекторных сплавов [30, 48, 56]

Сплав	Потенциал, В	Электрохимический эквивалент, мг/Кл	Токоотдача $\times 10^{-6}$, Кл/кг	Коэффициент полезного использования, %
МЛ4	—1,275	0,1125	3,20	40
МЛ4пч	—1,225	0,075	4,79	60
МЛ16	—1,590	0,085	4,15	52

Сплав МЦИ предназначен для литья деталей, работающих в условиях воздействия вибрационных нагрузок. Демпфирующая способность сплава МЦИ в несколько десятков раз выше, чем магниевых сплавов, используемых в качестве конструкционных сплавов. Использование сплава МЦИ в конструкциях, подвергающихся вибрациям, позволит уменьшить массу, увеличить надежность и срок службы изделий, а также существенно снизить шум. Сплав хорошо сваривается аргонодуговой сваркой, отлично обрабатывается резанием и обладает довольно хорошей коррозионной стойкостью.

Механические свойства сплава МЦИ
При растяжении, МПа:

$\sigma_в$	170—180
$\sigma_{0,2}$	60—70
δ, %	15—30
При сжатии, МПа:	
$\sigma_в$	280—300
$\sigma_{0,2}$	60—70
При изгибе, МПа:	
$\sigma_в$	420—450
$\sigma_{0,2}$	90—100

3. ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

Титан — элемент IV группы Периодической системы Д. И. Менделеева.

Физические свойства титана [7, 10, 32, 43, 57, 63]

Атомный номер	22
Атомная масса	47,9
Плотность, т/м³:	
при 20 °С	4,505
при 900 °С	4,32
Кристаллическая решетка Ti_α ($t < 882$ °С)	ОЦК (К8)
Период решетки при 20 °С a, нм	0,3283
Кристаллическая решетка Ti_β ($t > 882$ °С)	ГПУ (Г12)
Периоды решетки при 900 °С, нм:	
a	0,29503
c	0,48631
c/a	1,5873
Температура, °С:	
плавления	1668
кипения	3260
Удельная теплота, кДж/кг:	
плавления	358
испарения	8 970
полиморфного превращения	67 800
Удельная теплоемкость при 20 °С, кДж/(кг·°С)	0,54
Коэффициент теплопередачи при 20 °С, Вт/(м·°С)	18,85
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м·10^8:	
иодидного титана	42
магниетермического титана	55
Коэффициент линейного расширения $\alpha \times 10^6$, °С$^{-1}$, при температуре, °С:	
20—100	8,2
20—200	8,6
20—300	8,8
20—400	9,1
20—500	9,3
20—600	9,5
Модуль, ГПа:	
упругости	112
сдвига	39,2
Коэффициент Пуассона	0,35—0,38

46. Промышленные марки титановой губки (ГОСТ 17746—79) (основа — титан)

Губка	НВ, МПа	Примеси, % не более						
		Fe	Si	C	Cl	N	O	Ni
ТГ90	900	0,06	0,01	0,02	0,08	0,02	0,04	0,05
ТГ100	1000	0,07	0,04	0,03	0,08	0,02	0,04	0,05
ТГ110	1100	0,09	0,05	0,03	0,08	0,03	0,05	0,05
ТГ120	1200	0,11	0,05	0,04	0,08	0,03	0,065	0,05
ТГ130	1300	0,13	0,05	0,04	0,10	0,03	0,08	0,05
ТГ150	1500	0,20	0,04	0,05	0,12	0,04	0,10	0,05
ТГ—ТВ	1700	2,00	—	0,15	0,3	0,03	—	—

47. Химический состав технического титана (ГОСТ 19807—74) (основа — титан)

Титан	Примеси, % не более						
	Fe	Si	C	O	N	H	Прочие
ВТ1-00	0,12	0,08	0,05	0,10	0,04	0,008	0,1
ВТ1-0	0,18	0,10	0,07	0,12	0,04	0,010	0,3

Отличительными особенностями титана являются высокие механические свойства, небольшая плотность и поэтому высокая удельная прочность при 20—25 °С и криогенных температурах, хорошая коррозионная стойкость.

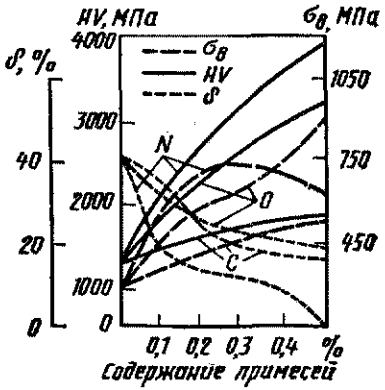


Рис. 1. Влияние содержания примесей на механические свойства титана

Промышленный способ производства состоит в обогащении и хлорировании титановой руды с последующим восстановлением из четыреххлористого титана металлическим магнием. Полученная при этом титановая губка маркируется по твердости специально выплавленных из нее образцов (табл. 46).

Полученный в результате последовательного дробления губки, прессования, спекания и переплавки брикетов технический титан маркируется в зависимости от содержания примесей (табл. 47).

Механические свойства титана в большой степени зависят от содержания примесей, особенно H, O, N и C, образующих с титаном твердые растворы внедрения и промежуточные фазы: гидриды, оксиды, нитриды и карбиды. Небольшое содержание кислорода, азота, углерода повышает твердость и прочность, но при этом значительно уменьшается пластичность (рис. 1), снижается коррозионная стойкость, ухудшается свариваемость, способность к пайке и штампуемость. Поэтому содержание каждой из этих примесей ограничивается ~0,02—0,06 %. Аналогично, но в меньшей степени, на свойства влияют железо и кремний. Особо вредная примесь в титане и однофазных α-сплавах титана — водород. При наличии водорода по границам зерен выделяются тонкие хрупкие пластины гидридной фазы, вызывая значительную хрупкость (табл. 48). Водородная хрупкость наиболее опасна в сварных конструкциях из-за наличия в них внутренних напряжений. Допустимое содержание водорода в техническом титане и однофазных сплавах находится в пределах 0,008—0,012 % (табл. 49).

Наиболее чистый иодидный титан получают методом термической диссоциации из четырехиодистого титана или методом зонной плавки. Механические свойства иодидного и технического титана приведены в табл. 50, механические свойства полуфабрикатов из технического титана — в табл. 51. Размеры полуфабрикатов из технического титана влияют на механические свойства, особенно на характеристики пластичности (табл. 52).

Модуль упругости титана почти в 2 раза меньше, чем у железа и никеля, что затрудняет изготовление жестких конструкций.

Несмотря на высокую температуру плавления, чистый титан не обладает жаропрочностью (рис. 2). Он склонен к ползучести даже при 20—25 °С. Кислород, азот, а также пластическая деформация повышают сопротивление ползучести.

48. Влияние водорода на механические свойства технического титана и титановых сплавов [17]

Сплав	Термическая обработка	Мас. доля H_2, %	Механические свойства				
			$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	KCU, МДж/м²	KCT, МДж/м²
ВТ1-0	Отжиг	0,005	345	265	51	1,50	1,90
		0,01	320	268	54	1,80	1,57
		0,02	355	290	48	1,60	1,53
		0,05	350	293	44,5	1,30	0,85
ОТ4-0	Отжиг	0,005	—	—	—	1,55	1,88
		0,01	—	—	—	1,78	0,27
		0,015	—	—	—	2,03	0,29
		0,05	—	—	—	0,53	0,05
ВТ14	Отжиг	0,005	850	830	22	0,45	0,75
		0,02	880	880	11	0,50	0,75
	Закалка (880 °С, 15 мин, вода) + старение (510 °С, 16 ч)	0,005	1070	990	7,7	0,07	0,33
		0,01	955	950	—	0,16	0,35
		0,015	1060	1000	—	0,18	0,30
		0,02	1160	1080	6,5	0,03	0,16
		0,05	1350	1240	4,5	0,03	0,10
ВТ22	Закалка (700 °С, 18 мин, вода) + старение (450 °С, 24 ч)	0,605	—	—	—	—	0,075
		0,02	—	—	—	—	0,074
		0,05	—	—	—	—	—
ВТ6	Закалка (900 °С, 18 мин, вода) + старение (450 °С, 24 ч)	0,005	1080	990	8	0,07	0,28
		0,01	955	950	—	0,16	0,27
		0,015	1060	1000	—	0,18	0,30
		0,02	1160	1090	7	0,035	0,16
		0,05	1360	1240	4,5	0,03	0,10

49. Допустимое содержание водорода в титане и сплавах на основе титана [64]

Сплав	Класс по структуре	Мас. доля H, %
ВТ1-00	α-сплавы	0,008
ВТ1-0		0,01
ВТ5-1		0,012
ВТ-5		0,012
ОТ4	Псевдо-α-сплавы	0,01
ОТ4-1		0,008
ВТ20		0,02
ВТ3-1, ВТ6, ВТ8, ВТ16, ВТ14	α+β-сплавы	0,03
ВТ22		0,05
ВТ15	Псевдо-β-сплавы	0,15

50. Механические свойства технического и иодидного титана [43]

Сплав	Механические свойства					
	НВ, МПа	*KCU*, МДж/м²	ψ, %	δ, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа
ВТ1-00	1160—1430	1,2—1,5	⩾60	⩾30	250—380	300—450
ВТ1-0	1310—1630	1,0—2,0	⩾60	⩾30	300—420	400—550
Иодидный	1070	2,5	70—80	50—60	120—170	220—260

51. Механические свойства полуфабрикатов из технического титана [10]

Сплав	Полуфабрикаты	Механические свойства				
		$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	σ_{-1}, МПа	*KCU*, МДж/м²
ВТ1-00	Отожженные листы	300—450	25	—	160	—
ВТ1-0		400—550	25	—	230	—
ВТ1-00	Кованые, отожженные прутки	300—450	25	55	—	1,2
ВТ1-0		400—550	20	50	—	1,0
ВТ1-00	Отожженные трубы	300—450	20	—	—	—
ВТ1-0		400—550	15	—	—	—

52. Механические свойства листа из технического титана различной толщины [43]

Сплав	Толщина листа, мм	Механические свойства	
		$\sigma_в$, МПа	δ, %
ВТ1-0	0,3—0,4	400—550	25
	0,5—1,8		30
	2,0—6,0		25
	6,5—10,0		20
ВТ1-00	0,3—0,4	300—450	25
	0,5—1,8		30
	2,0—6,0		25
	6,5—10,0		20

53. Механические свойства технического титана марки ВТ1-0 при низких и высоких температурах [10, 27]

Температура, °С	Механические свойства				
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	*KCU*, МДж/м²
—196	970	750	20	48	0,8
—253	1200	1100	10	35	0,6
—269	1210	870	35	58	—
20	500	380	30	55	1,0
100	420	—	30	55	—
150	350	—	30	55	—
200	300	—	30	55	—
250	280	—	30	55	—

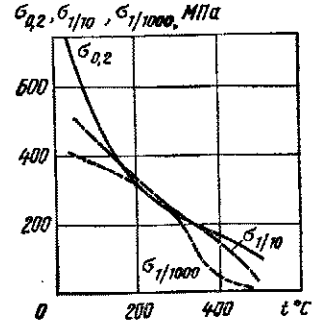


Рис. 2. Изменения пределов текучести и ползучести технического титана в зависимости от температуры испытания

Титан обладает высокими прочностью и удельной прочностью в условиях глубокого холода (табл. 53).

Пластическая деформация значительно повышает прочность титана (рис. 3). Для снятия наклепа проводят рекристаллизационный отжиг. Температура рекристаллизации титана понижается с 600 до 500 °С при увеличении степени предшествующей деформации с 10 до 60 %, после чего не меняется. Наилучшее сочетание механических свойств титан имеет после отжига при 650—750 °С.

При повышении температуры титан активно поглощает газы: начиная с 50—70 °С — водород, свыше 400—500 °С — кислород, с 600—700 °С — азот, окись углерода и углекислый газ. Высокая химическая активность расплавленного титана вызывает необходимость применения при плавке и ду-

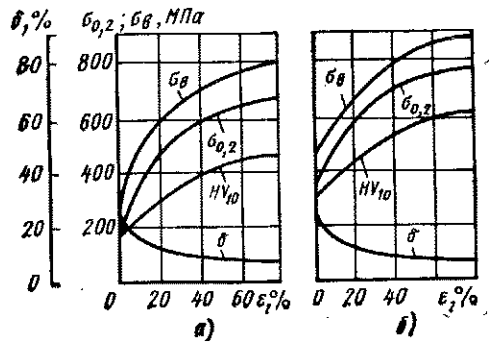


Рис. 3. Влияние холодной пластической деформации на механические свойства:
а — иодидного титана; *б* — технического титана

говой сварке вакуума или атмосферы инертных газов. Вместе с тем благодаря способности к газопоглощению титан нашел применение в радио- и электронной промышленности в качестве геттерного материала.

Технический титан хорошо обрабатывается давлением при 20—25 °С и повышенных температурах. Из него изготовляют все виды прессованного и катаного полуфабриката (листы, трубы, проволоку, поковки и др.). Ковку проводят при температуре 1000—750 °С, горячую прокатку — на 100 °С ниже температуры ковки. Горячей прокаткой получают листы толщиной более 6 мм, листы меньшей толщины изготовляют холодной прокаткой или с нагревом до 650—700 °С. Температура прессования 950—1000 °С. Титан хорошо сваривается аргонодуговой и всеми видами контактной сварки. Сварной шов обладает хорошим сочетанием прочности и пластичности. Прочность шва составляет 90 % прочности основного металла.

Титан плохо обрабатывается резанием, налипает на инструмент, что приводит к его быстрому износу. Для обработки титана требуется инструмент из быстрорежущей стали и твердых сплавов, малые скорости резания при большой подаче и глубине резания, интенсивное охлаждение. Недостатком титана является также низкая антифрикционность.

Титановые сплавы. Химический состав титановых сплавов приведен в табл. 54 и 55. Достоинством титановых сплавов по сравнению с титаном являются более высокие прочность и жаропрочность при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости и малой плотности.

По влиянию на полиморфизм титана все легирующие элементы подразделяются на три группы: α-стабилизаторы, β-стабилизаторы и нейтральные элементы.

α-стабилизаторы (Al, O, N) повышают температуру полиморфного превращения, расширяя область твердых растворов на основе Ti_α (рис. 4, *а*). Практическое значение для легирования титана имеет только алюминий, так как остальные вызывают снижение пластичности и вязкости титановых сплавов. Алюминий уменьшает плотность и склонность к водородной хрупкости, повышает прочность (рис. 5), жаропрочность, модуль упругости титановых сплавов.

β-стабилизаторы снижают температуру полиморфного превращения титана, расширяя область твердых растворов на основе Ti_β. Они образуют с титаном диаграммы состояния двух типов.

Изоморфные β-стабилизаторы Mo, V, Ta, Nb, имеющие, как и Ti_β, кристаллическую решетку объемно-центрированного куба, неограниченно растворяются в Ti_β (см. рис. 4, *б*). Cr, Mn, Fe, Ni, W, Cu и другие образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектоидным распадом (рис. 4, *в*). В некоторых сплавах (Ti—Mn, Ti—Cr, Ti—Fe) при охлаждении в условиях, отлича-

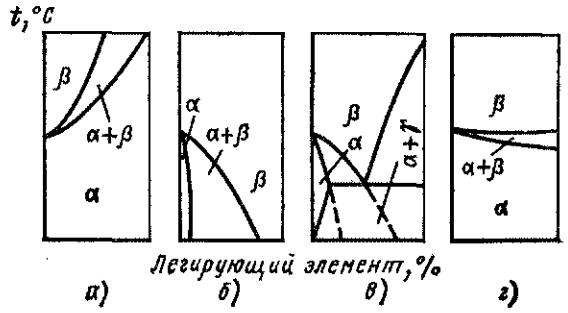


Рис. 4. Диаграммы состояния титан—легирующий элемент (схемы):
а — Ti — α-стабилизаторы; *б* — Ti — изоморфные β-стабилизаторы; *в* — Ti — эвтектоидообразующие β-стабилизаторы; *г* — Ti — нейтральные элементы

54. Химический состав (в %) промышленных деформируемых титановых сплавов (ГОСТ 19807—74)

Сплав	Класс по структуре	Al	Mn	Mo	V	Zr	Cr	Sn
ВТ5	α	4,3—6,2	—	—	—	—	—	—
ВТ5-1		4,3—6,0	—	—	—	—	—	2,0—3,0
ОТ4-0	Псевдо-α	0,2—1,4	0,2—1,3	—	—	—	—	—
ОТ4-1		1,0—2,5	0,7—2,0	—	—	—	—	—
ОТ4		3,5—5,0	0,8—2,0	—	—	—	—	—
ВТ20		5,5—7,0	—	0,5—2,0	0,8—2,5	1,5—2,5	—	—
ПТ7М		1,8—2,5	—	—	—	2,0—3,0	—	—
ПТ3В		3,5—5,0	—	—	1,2—2,5	—	—	—
ВТ3-1	α+β	5,5—7,0	—	2,0—3,0	—	—	0,8—2,3	—
ВТ6		5,3—6,8	—	—	3,5—5,3	—	—	—
ВТ9		5,8—7,0	—	2,8—3,0	—	0,8—2,0	—	—
ВТ14		3,5—6,3	—	2,5—3,8	0,9—1,9	—	—	—
ВТ16		1,8—3,8	—	4,5—6,5	4,0—5,5	—	—	—
ВТ22		4,4—5,9	—	4,0—5,5	4,0—5,5	—	0,5—2,0	—

Сплав	Si	Fe	Примеси, %, не более							
			C	Fe	Si	Zr	O	N	H	Сумма прочих
ВТ5	—	—	0,10	0,30	0,15	0,30	0,20	0,05	0,015	0,30
ВТ5-1	—	—	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30

Продолжение табл. 54

Сплав	Si	Fe	Примеси, %, не более							
			C	Fe	Si	Zr	O	N	H	Сумма прочих
ОТ4-0	—	—	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30
ОТ4-1	—	—	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30
ОТ4	—	—	0,10	0,30	0,15	0,30	0,15	0,05	0,012	0,30
ВТ20	—	—	0,10	0,30	0,15	—	0,15	0,05	0,012	0,30
ПТ7М	—	—	0,10	0,25	0,12	—	0,15	0,04	0,006	0,30
ПТ3В	—	—	0,10	0,25	0,12	0,30	0,15	0,04	0,008	0,30
ВТ3-1	0,15—0,40	0,2—0,7	0,10	—	—	0,50	0,18	0,05	0,015	0,30
ВТ6	—	—	0,10	0,3	0,15	0,30	0,20	0,05	0,015	0,30
ВТ9	0,2—0,35	—	0,10	0,25	—	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30
ВТ14	—	—	0,10	0,3	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30
ВТ16	—	—	0,10	0,25	0,15	0,30	0,15	0,05	0,015	0,30
ВТ22	—	0,5—1,5	0,10	—	0,15	0,30	0,2	0,05	0,015	0,30

В сплаве ВТ5 содержание V $\leqslant$ 1,2 %, а содержание Mo $\leqslant$ 0,8 %.

В сплаве ВТ5-1 содержание V $\leqslant$ 1 %.

В сплаве ВТ6, предназначенном для изготовления баллонов, работающих под давлением, содержится 5,3—6,5 % Al; 3,5—4,5 % V; $\leqslant$0,15 % O; $\leqslant$0,25 % Fe. Сплав такого состава маркируется дополнительно буквой С (ВТ6С).

В плоском прокате из сплава ВТ14 (толщина до 10 мм) должно быть 3,5—4,5 % Al, а в остальных видах полуфабрикатов 4,5—6,3 % Al.

Во всех сплавах, содержащих Mo, допускается его замена W в количестве $\leqslant$0,3 %.

Во всех сплавах, не содержащих Cr и Mn, последние допускаются как примеси в количестве $\leqslant$0,15 (в сумме).

Дополнительное ужесточение содержания примесей, а также сужение пределов содержания легирующих элементов рассматриваются для конкретных видов полуфабрикатов.

55. Составы (в %) некоторых титановых сплавов [10, 12, 43]

Сплав (СССР)	Зарубежный аналог	Al	Sn	V	Mo	Примечание
ВТ5-1	—	4,3—6,0	2,0—3,0	—	—	—
—	Ti317	5,0	2,5	—	—	Англия
—	Hylite-20	5,0	2,5	—	—	Англия
—	TA5E	5,0	2,5	—	—	Франция
—	LT32	5,0	2,5	—	—	ФРГ
—	MST5AL2,5Sn	5,0	2,5	—	—	США
ВТ6	—	5,3—6,8	—	3,5—5,3	—	—
ПТ3В	—	3,5—5,0	—	1,2—2,5	—	—
—	Ti6Al4V	6,0	—	4,0	—	США
—	Ti318A	6,0	—	4,0	—	Англия
—	Hylite-45	6,0	—	4,0	—	Англия
—	Ta6V	6,0	—	4,0	—	Франция
—	LT31	6,0	—	4,0	—	ФРГ
ВТ16	—	1,8—3,8	—	4,0—5,5	4,5—6,5	—
—	Ti4Al4Mo4V	4,0	—	4,0	4,0	США
ОТ4-1	—	1,0—2,5	—	—	0,7—2,0	—
—	Hylite-30	2,0	—	—	2,0	Англия

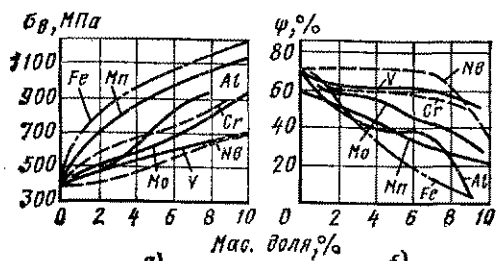


Рис. 5. Влияние легирующих элементов на механические свойства титана при 20—25 °С [25]

ющихся от равновесных, эвтектоидного распада не происходит, а превращение идет по штриховой линии (рис. 4, *в*).

Большинство β-стабилизаторов, особенно V, Mo, Mn, Cr, повышают прочность при 20—25 °С и отрицательных температурах (рис. 5, 6), жаропрочность и термическую стабильность титановых сплавов, несколько снижая их пластичность (рис. 5).

Нейтральные элементы (Sn, Zr, Hf) мало влияют на температуру полиморфного превращения (рис. 4, *г*). Наибольшее практическое значение имеют олово и цирконий. Олово упрочняет титановые сплавы без заметного снижения пластичности, повышает жаропрочность; цирконий увеличивает предел ползучести и длительную прочность.

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяются на деформируемые, литейные и порошковые, по механическим свойствам — на сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности. По способности упрочняться с помощью термической обработки они делятся на упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой; по структуре в отожженном состоянии они классифицируются на α-, псевдо-α, α + β, псевдо-β и β-сплавы.

Сплавы с α-структурой. Физические свойства сплавов приведены в табл. 56, механические — в табл. 57. К этой группе сплавов относят и технический титан. Это сплавы нормальной прочности при 20—25 °С, обладающие высоким сопротивлением разрушению при повышенных (350—500 °С) и криогенных температурах (табл. 58, 59). Сплавы имеют высокую термическую стабильность свойств и обладают отличной свариваемостью. Они свариваются аргонодуговой, всеми видами контактной и электронно-лучевой сварки. При этом прочность свариого шва составляет 90 % прочности основного сплава. Обрабатываемость резанием удовлетворительная.

α-сплавы не упрочняются термической обработкой и применяются в отожженном состоянии. Режимы отжига представлены в табл. 60. Сплавы с цирконием наиболее технологичны, но это самые дорогие из α-сплавов. В горячем состоянии сплавы куют, прокатывают

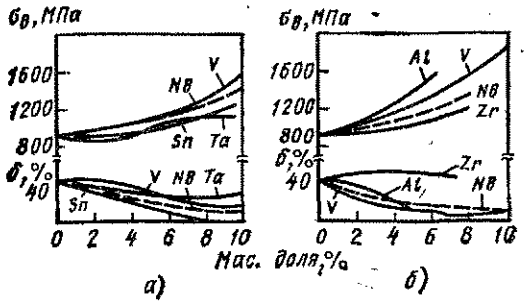


Рис. 6. Влияние легирующих элементов на механические свойства титана:
а — при —196 °С; *б* — при —253 °С [26]

56. Физические свойства титановых α- и псевдо-α-сплавов [32, 43]

Свойства	Сплав				
	ВТ5	ВТ5-1	ПТ7М	ОТ4-1	ВТ20
ρ, т/м³	4,4	4,46	4,49	4,55	4,45
c, кДж/(кг·°С), при температуре, °С:					
20	—	0,502	—	—	—
200	0,586	0,544	0,625	0,565	0,587
300	0,628	0,565	0,659	0,628	0,628
400	0,670	0,586	0,690	0,670	0,670
500	0,712	0,628	—	0,754	0,712
600	0,754	0,670	—	—	0,755
λ, Вт/(м·°С), при температуре, °С:					
20	3,79	2,51	—	9,63	8,0
100	2,63	2,63	9,3	10,47	8,8
200	10,47	10,88	10,5	11,30	10,2
300	11,30	12,14	11,9	12,14	10,9
400	12,56	13,14	13,3	14,24	12,2
500	14,24	14,65	—	14,65	13,8
600	15,49	15,91	—	16,32	15,1
ρ_1, мкОМ·м, при температуре, °С:					
20	1,08	1,38	1,08	1,01	1,11
200	1,15	—	1,27	—	—
300	1,18	—	1,40	—	—
500	1,20	—	1,52	—	—
600	1,23	—	—	—	—
$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$ при температуре, °С:					
20—100	8,3	8,3	8,8	8,0	8,3
100—200	8,9	9,3	8,9	8,0	8,3
200—300	9,5	9,7	9,2	9,1	9,0
300—400	10,4	10,0	9,4	9,6	9,2
400—500	10,6	10,3	—	9,7	9,3
500—600	10,8	10,4	—	9,8	9,5

57. Механические свойства α- и псевдо-α-титановых сплавов в отожженном состоянии [10, 12, 27, 43]

Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	E, ГПа	σ_{-1}, МПа	KCU	KCT	НВ, МПа
	МПа		%				МДж/м²		
ВТ5	750—950	700—800	10—14	25—40	105	450	0,3—0,5	—	2290—3210
ВТ5-1	800—1000 750—950	700—850 750	10—15 10	25—40 —	105 115	420 400	0,45 —	— 0,35	2410—3210 —
ОТ4-0	500—650 500—650	400 500	15 25	35 30	115 —	320 —	0,8 1	— 0,7	1560—2070 2000
ОТ4-1	600—750 600—750	500—600 570	20 30	30 —	110 —	340—360 360	0,5 —	— 0,05	1970—2550 —
ОТ4	700—900 700—900	600—650 550—660	10—12 15—25	25 —	120 110	380—420 440	0,5 —	— 0,6	2070—2050 —
ВТ20	950—1150 950—1150	840 —	10 12	25 —	105—110 120	410 420	0,4—0,5 —	0,15 0,35	2550—3410 —
ПТ7М *1	480—680 500—650	380—550 450—600	15—25 30	30—50 —	112 —	— 260	0,8—1,0 0,8—1,2	— 0,8	— —
ПТ3В	700—900 700—900	600 —	11 11	— —	117—119 —	400 —	0,6—0,7 0,7	— —	— —

*1 То же для труб.

Примечание. В числителе приведены значения свойств для поковок, штамповок, прутков, в знаменателе — листов (1—2 мм).

58. Пределы длительной прочности, выносливости и ползучести (в МПа) титановых сплавов [10, 12, 27, 43, 50]

Сплав	при 300 °С			при 350 °С			при 400 °С		
	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ^*_{-1}	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ^*_{-1}	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ^*_{-1}
ВТ5	470	—	—	440	220	—	260	120	—
ВТ5-1	560	—	—	540	380	—	460	180	—
ОТ4	—	—	—	490	330	—	470	200	260
ОТ4-1	440	440	300	340	260	340	290	190	200
ВТ20	—	230	—	750	550	260	—	—	—
ПТ7М	—	—	—	290	240	380	230	180	—
ВТ6	620	490	—	610	540	—	590	360	420
ВТ3-1	800	635	—	—	—	—	600	500	—
ВТ3-1 *2	1020	785	—	600	—	—	930	588	390
ВТ16	1000	490	330	630	—	460	470	350	—
ВТ14 *2	—	—	—	790—820	590—620	370	680	—	—
ВТ9	—	—	—	800	410	—	780—800	320	—
ВТ22	820	780	500	—	—	—	710	—	—

Сплав	при 450 °С			при 500 °С			при 550 °С		при 600 °С	
	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ^*_{-1}	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ^*_{-1}	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$
ВТ5	370	—	—	255	118	—	—	—	—	—
ВТ5-1	—	—	—	200	78	—	—	—	—	—
ОТ4	325	196	—	245	—	—	—	—	—	—
ОТ4-1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ20	630	200	—	490	150	300	200	—	—	—
ПТ7М	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ6	420	140	390	250	53	—	—	—	—	—
ВТ3-1	550	—	—	360	75	—	—	—	—	—
ВТ3-1 *2	600	250	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ14 *2	540	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ9	740—800	50	—	600—680	350—400	440	400	16	230	5,5
ВТ22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*1 На базе 10^7 циклов.
*2 Закалка + старение.

59. Механические свойства титановых сплавов при низких температурах [12, 27, 32, 50, 57]

Сплав	$\sigma_в$, МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ, %			KCU, мДж/м²		
	−70 °С	−196 °С	−253 °С	−70 °С	−196 °С	−253 °С	−70 °С	−196 °С	−253 °С	−70 °С	−196 °С	−253 °С
ВТ5-1	950	1350	1350—1600	—	1180	1370	—	15	10	0,6	0,4	0,3
ВТ5	880	1225	—	685	980	—	—	—	—	—	—	—
ОТ4-0	775	1050	—	660	920	—	—	—	—	—	—	—
ОТ4-1	804	1128	—	755	1030	—	—	19	17,5	—	0,5	0,4
ОТ4	853	1128	—	755	1033	—	—	13	16	—	—	—
ВТ3-1	1180	1610	2050	1030	1470	—	—	6,5	7,5	—	0,3—0,4	—
ВТ6	—	1510	1860	—	1470	1910	—	17,8	3,5	—	0,4	0,4
ВТ14	—	1650	—	1079	—	—	—	10	—	—	0,2—0,25	—
ВТ20	1270	1410	1470	—	1310	—	—	—	—	—	—	—
ВТ22	1270	—	—	1080	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ9	1410	1810	1225	1225	1570	—	—	—	—	—	—	—

Сплав	$\sigma_в$, МПа			$\sigma_{0,2}$, МПа			δ, %			KCU, мДж/м²		
	−70 °С	−196 °С	−253 °С	−269 °С	−70 °С	−196 °С	−253 °С	−269 °С	−70 °С	−196 °С	−253 °С	−269 °С
ВТ5-1	950	1350	1350—1600	1700	—	1180	1370	—	—	15	10	9	0,6	0,4	0,3	—
ВТ5	880	1225	—	—	685	980	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ОТ4-0	775	1050	—	—	660	920	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ОТ4-1	804	1128	—	—	755	1030	—	—	—	19	17,5	—	—	0,5	0,4	—
ОТ4	853	1128	—	—	755	1033	—	—	—	13	16	—	—	—	—	—
ВТ3-1	1180	1610	2050	2060	1030	1470	—	2060	—	6,5	7,5	3	—	0,3—0,4	—	—
ВТ6	—	1510	1860	—	—	1470	1910	—	—	17,8	3,5	—	—	0,4	0,4	—
ВТ14	—	1650	—	—	1079	—	—	—	—	10	—	—	—	0,2—0,25	—	—
ВТ20	1270	1410	1470	—	—	1310	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ22	1270	—	—	1080	1080	—	—	1080	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ9	1410	1810	1225	1570	1225	1570	—	1570	—	—	—	—	—	—	—	—

60. Температура отжига титана и деформируемых α- и псевдо-α-титановых сплавов [10, 26]

Сплав	Температура полного отжига, °С		Температура неполного отжига, °С
	Прутки, поковки, штамповки, трубы, профили и изделия из них	Листы и детали из них	
ВТ1-00	670—690	520—540	445—485
ВТ1-0	670—690	520—540	445—485
ВТ5	800—850	—	550—600
ВТ5-1	800—850	700—750	550—600
ОТ4-0	690—710	590—610	480—520
ОТ4-1	740—760	640—660	520—560
ОТ4	740—760	660—680	545—585
ВТ20	700—850	700—800 *1	600—650
ПТ7М	700—750	650—700	—

*1 Допускается отжиг листовых деталей при 650—750 °С.

и штампуют. Из сплава ПТ7М изготовляют горяче- и холоднокатаные трубы. Сплавы поставляют в виде прутков сортового проката, поковок, труб, проволоки. Они предназначены для изготовления деталей, работающих в широком диапазоне температур: от криогенных до 500 °С (табл. 59, 61, 76).

Псевдо-α-сплавы имеют преимущественно α-структуру и, вследствие дополнительного легирования β-стабилизаторами (Mn, V, Nb, Mo),— 1—5 % β-фазы. Благодаря наличию β-фазы они обладают хорошей технологической пластичностью при сохранении достоинств α-сплавов. Сплавы с низким содержанием алюминия (2—3 %) обрабатываются давлением в холодном состоянии и только при изготовлении деталей сложной формы подогреваются до 500—700 °С (ОТ4, ОТ4-1). Сплавы с большим содержанием алюминия при обработке давлением требуют подогрева до 600—800 °С. На жаропрочность сплавов помимо алюминия благоприятно влияют цирконий и кремний. Цирконий способствует увеличению растворимости β-стабилизаторов в α-фазе и повышает температуру рекристаллизации. Кремний повышает жаропрочность вследствие образования тонкодисперсных силицидов, трудно растворимых в α-фазе. Поэтому псевдо-α-сплавы с повышенным содержанием алюминия (7—8 %), легированные Zr, V, Mo, Nb, Si, используются в изделиях, работающих при наиболее высоких температурах.

Недостатком этих сплавов является склонность к водородной хрупкости. Водород мало растворим в α-фазе и присутствует в структуре в виде гидридной фазы, снижающей пластичность, особенно при медленном нагружении, и вязкость сплавов (см. табл. 48). Допустимое содержание водорода находится в пределах 0,01—0,005 % (табл. 49).

Двухфазные (α + β)-сплавы. Физические свойства сплавов приведены в табл. 62, механические — в табл. 63 и на рис. 7—10. Сплавы легированы алюминием и β-стабилизаторами. Алюминий значительно упрочняет α-фазу при 20—25 °С и повышенных температурах, увеличивает термическую стабильность β-фазы, снижает плотность (α + β)-сплавов, что позволяет удерживать ее на уровне титана, несмотря на присутствие элементов высокой плотности V, Mo, Cr, Fe, Nb. Наибольшее упрочнение достигается при легировании титана эвтектоидообразующими β-стабилизаторами Fe, Cr, Mn

61. Кратковременная прочность деформируемых сплавов и предельные температуры их эксплуатации [10, 32, 43, 63, 64]

Сплав	Предельная температура эксплуатации, °С		Кратковременная прочность, МПа						
	длительная	кратковременная	200 °С	300 °С	400 °С	500 °С	600 °С	700 °С	800 °С
ВТ5	400	750	680	580	520	480	460	330	200
ВТ5-1	500	800—850	680	590	530	500	350 (при 650 °С)	—	—
ВТ20	500	800	780	730	700	650	470	—	—
ОТ4	350	500	530	510	490	430	370 (при 550 °С)	—	—
ПТ7М	350	400	360	320 (при 350 °С)	300	—	—	—	—
ВТ3-1	400	500	870	800	780	650	430	—	—
ВТ3-1 *1	450	—	1079	1030	930	830	520	—	—
ВТ9	550	700	1030	990	850	750	700	400	200
ВТ14	400	750	1050	1000	900	840	380—430	150—180	—
ВТ14 *1	400	—	—	940—1070 (при 350 °С)	900—1050	—	—	—	—
ВТ22	400	800	1280	1200	1150	1000	600	—	—
ВТ6	450	—	750	680	630	535	—	—	—

*1 Закалка + старение.

и изоморфными Mo, V, Nb стабилизаторами. Ванадий и ниобий упрочняют сплавы слабее других, но и меньше снижают пластичность. Двухфазные сплавы упрочняются с помощью термической обработки — закалки и старения. В отожженном и закаленном состояниях они имеют хорошую пластичность, а после старения — высокую

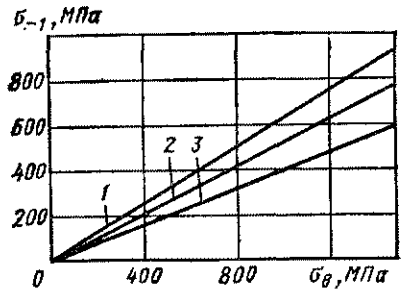


Рис. 7. Зависимость предела выносливости от временного сопротивления титановых сплавов:
1 — $\sigma_{-1} = 0{,}5\sigma_в$; *2* — $\sigma_{-1} = 0{,}6\ \sigma_в$; *3* — $\sigma_{-1} = 0{,}4\sigma_в$ [21]

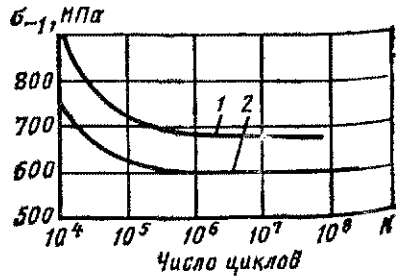


Рис. 8. Выносливость сплава ВТ6:
1 — в закаленном состоянии; *2* — в отожженном состоянии [2]

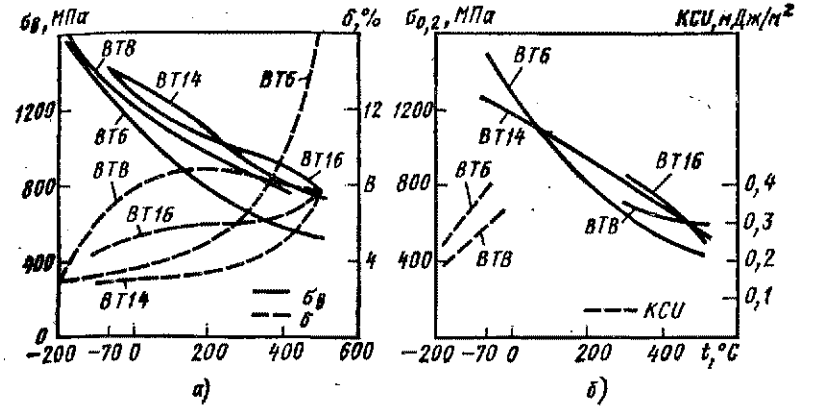


Рис. 9. Зависимость механических свойств титановых сплавов после закалки и старения от температуры испытания:
а — $\sigma_в$ и δ; *б* — $\sigma_{0,2}$ и *KCU*

прочность и жаропрочность. Режимы отжига этих сплавов приведены в табл. 64; режимы закалки и старения — в табл. 65; влияние температуры деформирования на свойства после термической обработки — в табл. 66; анизотропия механических свойств после различных видов термической обработки представлена в табл. 67. Чем больше β-фазы содержится в структуре сплава, тем он прочнее в отожженном состоянии и сильнее упрочняется при термической обработке.

По структуре после закалки двухфазные сплавы подразделяют на два класса: мартенситный и переходный.

Сплавы мартенситного класса менее легированы и в равновесном состоянии содержат сравнительно немного β-фазы (5—25 %). В результате закалки образуется структура мартенсита α' (или α'' — в более легированных сплавах). К этому классу относятся высокопрочные сплавы ВТ6, ВТ14, ВТ16 и жаропрочные сплавы ВТ8, ВТ9, ВТ3-1.

Сплавы переходного класса содержат больше легирующих элементов и соответственно больше β-фазы (25—50 %) в равновесной структуре, чем сплавы мартенситного класса. Структура этих сплавов чувствительна к колебаниям химического состава и режимам термической обработки (табл. 68). Так, после закалки в этих сплавах можно получить однофазную структуру переохлажденной β-фазы или структуру, состоящую из этой фазы и мартенсита α''. Наличие большого количества β-фазы обеспечивает сплавам переходного класса самую высокую прочность среди (α + β)-сплавов. Например, сплав ВТ22 (50 % β-фазы) имеет после отжига такое же временное сопротивление, как сплав ВТ6 после закалки и старения.

Двухфазные сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием и

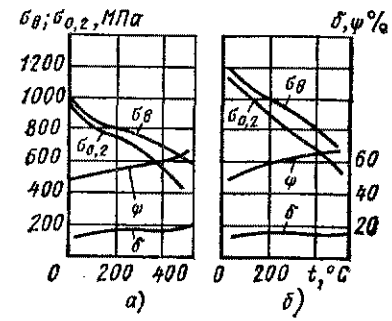


Рис. 10. Механические свойства сплава ВТ6 после различных режимов термической обработки в зависимости от температуры испытания:
а — отжиг при 700 °С, охлаждение на воздухе; *б* — закалка с 950 °С (охлаждение в воде + старение при 500 °С, 8 ч) [2]

62. Физические свойства ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов [32, 43]

Свойства	Сплав				
	ВТ6	ВТ14	ВТ3-1	ВТ8	ВТ22
ρ, т/м³	4,43	4,52	4,5	4,48	4,6
c, кДж/(кг·°С), при температуре, °С:					
20	—	—	—	—	—
200	0,586	0,544	0,502	0,502	0,565
300	0,670	0,586	0,544	0,586	0,586
400	0,712	0,628	0,628	—	0,649
500	0,795	0,670	0,670	0,628	0,712
600	0,879	0,712	0,712	0,670	—
λ, Вт/(м·°С), при температуре, °С:					
20	8,37	8,37	8,01	1,12	8,32
100	9,21	9,21	8,79	8,37	9,21
200	10,88	10,47	10,04	2,63	10,5
300	11,70	11,72	11,3	11,3	11,7
400	12,56	12,92	12,92	12,56	13,4
500	13,82	13,82	14,24	14,24	14,6
600	15,49	—	15,49	15,49	15,9

Продолжение табл. 62

Свойства	Сплав				
	ВТ6	ВТ14	ВТ3-1	ВТ8	ВТ22
ρ_f, мкОм·м, при температуре, °С:					
20	1,6	—	1,36	1,61	1,53
200	1,82	—	—	—	—
300	2,02	—	—	—	—
500	2,12	—	—	—	—
600	2,14	—	—	—	—
$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$, при температуре, °С:					
20—100	8,4	8,0	8,6	8,3	8,0
100—200	8,7	8,2	9,8	8,6	8,2
200—300	9,0	8,5	10,3	8,7	8,4
300—400	10,0	8,8	10,9	8,8	8,6
400—500	—	8,9	11,4	9,0	8,8
500—600	—	8,7	—	9,1	—

63. Механические свойства полуфабрикатов из ($\alpha + \beta$)-тнтановых сплавов [10, 12, 27, 43, 63]

Сплав	Полуфабрикат	После отжига						После закалки и старения							
		$\sigma_в$, МПа	δ	ψ	НВ	σ_{-1}	KCU	KCT	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$	$\sigma_в$, МПа	δ	ψ	E, ГПа	НВ, МПа	KCU	KCT
			%		МПа		МАж/м²	МАж/м²			%				МДж/м²	
ВТ3-1	Штамповка	1040—1118	14—20	45—60	2690—3630	400—500	0,3—0,4	0,75	—	1150—1220	10—12	32—48	115	3020—4150	—	0,1
	Пруток	1000—1250	12	32—35	—	—	0,3	0,35	55—67	—	—	—	—	—	—	0,25
ВТ6	Штамповка	950—1100	10—13	35—60	2550—3410	300	0,4—0,8	0,2	—	—	—	—	—	—	—	—
	Пруток	900—1100	8—20	20—45	—	400	0,4	0,35—0,4	80,5—90,0	1100—1250	6	20	115	2930—3610	0,3	0,25
ВТ9	Штамповка	1100—1300	8—14	25—45	—	540	0,2—0,5	0,15	—	—	—	—	—	—	—	—
	Пруток	1050—1250	12	28—30	—	—	0,3	—	80,0—81,5	1200	6	20	118	—	0,3—0,5	—
ВТ14	Штамповка	850—900	10—15	35—60	2550—3410	400	0,5—0,9	0,20	—	1250—1300	6—15	20—40	110	3020—3880	0,5	0,2
	Лист, 1—2 мм	900—1070	8—10	—	—	—	—	—	—	1200—1400	—	—	110	—	—	—
ВТ16	Лист, 1—2 мм	840—1250	12—22	—	—	—	—	—	—	1300—1400	5—6	—	110	3020—4150	0,4—0,6	—
ВТ22	Пруток	1100	10	20	2850	530	0,4	0,3	69,5	1400	—	—	—	—	—	—

64. Режимы отжига ($\alpha + \beta$)-сплавов (прутки, поковки, штамповки, профили, трубы и изделия из них) [10, 26]

Сплав	t отжига, °С		Изотермический отжиг		
	полного	неполного	t_1, °С	t_2, °С	τ, ч, при t_2
ВТ6	750—800 / 750—800	600—650 / 600—650	800—850 / —	750 или 500 / —	0,5 / —
ВТ9	950—980	530—620	950—980	530—580	6
ВТ3-1	800—850	530—620	870—920	600—650 *1	2
ВТ14	740—760 / 740—760	550—650 / 550—650	790—810 / —	640—660 / —	0,5 / —
ВТ16	770—790 / 730—770	550—650 / 550—650	770—790 / —	500 *2 / —	— / —
ВТ22	720—780 / 740—760	550—650 / 550—650	650—750 / —	350 *3 / —	— / —

*1 Охлаждение на воздухе.
*2 То же с t_1 до t_2 со скоростью 2—4 °С/мин, далее на воздухе.
*3 То же с t_1 до t_2 с печью, далее на воздухе.

Примечание. В знаменателе — режим отжига листов.

65. Режимы упрочняющей термической обработки (среда охлаждения — вода) ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов (прутки, поковки, штамповки, трубы, профили и изделия из них) [26]

Сплав	t закалки, °С	Старение		Сплав	t закалки, °С	Старение	
		t, °С	τ, ч			t, °С	τ, ч
ВТ3-1	860—900	500—620	1—6	ВТ14	870—910	480—560	8—16
ВТ6	900—950	450—550	2—4	ВТ16	810—830	560—580	8—10
ВТ9	920—940	500—600	1—6	ВТ22	690—750	480—540	8—16

66. Влияние температуры деформирования на механические свойства титановых сплавов ВТ3-1 и ВТ22 [17]

Сплав	Термическая обработка после деформирования	Температура деформирования, °С	Механические свойства						
			$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCT, МДж/м²	K_{1c}, МПа·м	KCU, МДж/м²
			МПа		%				
ВТ3-1	900 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 630 °С, 1 ч, воздух	980	1100	1060	14	29	0,235	3080	—
		1030	1080	1050	13	26	0,324	2550	—
	900 °С, 1 ч, охлаждение — воздух + старение 550 °С, 5 ч	980	1140	1100	14	31	—	2550	—
		1030	1190	1160	10	19	0,33	2310	—
	850 °С, 1 ч, охлаждение — вода + + старение 550 °С, 5 ч	980	1310	1240	5	12	0,108	1770	—
		1030	1250	1210	5	11	0,137	2015	—
ВТ22	750 °С, 1 ч, охлаждение — вода + + старение 575 °С, 8 ч	850	1260	1230	12	48	—	—	0,30
		950	1310	1270	7,7	20	—	—	0,27
		1050	1310	1270	9,5	10,6	—	—	0,20

67. Анизотропия механических свойств титановых сплавов [17]

Сплав	Термическая обработка	Механические свойства			
		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	KCT, МДж/м²
		МПа			
ОТ4	Отжиг 550 °С, 1 ч, воздух	760 / 785	726 / 652	15 / 16,5	0,88 / 0,45
ВТ3-1	Отжиг 800 °С, 20 мин	1070 / 1120	1000 / 1095	15 / 11,8	0,363 / 0,412

Продолжение табл. 67

Сплав	Термическая обработка	Механические свойства			
		$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	КСТ, МДж/м²
ВТ3-1	Закалка 920 °С, 20 мин, вода	1095 / 1140	608 / 680	13,7 / 12,8	0,177 / 0,167
	Закалка 920 °С, 20 мин, вода + старение 520 °С, 10 ч	1440 / 1510	— / —	4,4 / 3,1	0,039 / 0,031
ВТ14	Отжиг 850 °С, охлаждение с печью до 650 °С, воздух	950 / 870	— / —	11 / 13	0,50 / 0,33
	Отжиг 750 °С, 1 ч, воздух	824 / 873	735 / 873	14 / 7	0,47 / 0,882
	Закалка 880 °С, 20 мин, вода + + старение 480 °С, 16 ч	1275 / 1375	1170 / 1280	2,2 / 4,9	0,108 / 0,137
ВТ22	Отжиг 730 °С, 30 мин, вакуум	940 / 1080	883 / 1060	16,0 / 17,6	0,1350 / 0,1510
	Отжиг 800 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 350 °С, воздух	1010 / 1060	— / —	12,6 / 8,1	0,236 / 0,167
	Отжиг 800 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 650 °С, воздух	1000 / 1070	— / —	13 / 11	0,235 / 0,167
	Закалка 750 °С, 15 мин, вода + старение 500 °С, 16 ч	1360 / 1480	— / —	7,5 / 3,7	0,098 / 0,049
	Закалка 750 °С, 15 мин, вода + старение 550 °С, 16 ч	1290 / 1345	— / —	12,6 / 8,1	0,137 / 0,088
ВТ5-1	Отжиг 750 °С, 20 мин, воздух	874 / 868	810 / 820	20 / 12,6	0,902 / 1,45
	Отжиг 750 °С, 1 ч, вакуум	825 / 815	745 / 760	22,3 / 18,5	0,981 / 1,52
	Закалка 950 °С, 20 мин, вода	912 / 804	755 / 755	17 / 19,3	0,91 / 1,45

Примечание. В числителе приведены значения параметров для продольных образцов, в знаменателе — для поперечных.

68. Влияние термической обработки на механические свойства титановых сплавов [17]

Сплав	Термическая обработка	Механические свойства			
		$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	КСТ, МДж/м²
ВТ14	Отжиг 750 °С, 1 ч, охлаждение — воздух	1080	1040	—	0,255
	Закалка 880 °С, 30 мин + + старение 480 °С, 16 ч	1370	1275	5	0,137
	Закалка 880 °С, 30 мин + + старение 510 °С, 16 ч	1060	1010	12,5	—
ВТ3-1	Отжиг 750 °С, 1 ч	880	800	8	0,88
	Отжиг 800 °С, 20 мин	1120	1095	11,8	0,412
	Закалка 920 °С, 20 мин	1140	680	12,8	0,167
	Закалка 920 °С, 20 мин + + старение 520 °С, 10 ч	1510	—	3,1	0,31
ВТ22	Отжиг 750 °С, 1 ч, охлаждение с печью до 350 °С, затем на воздухе	1080	1000	—	0,147
	Отжиг 800 °С, 15 мин, охлаждение с печью до 350 °С, затем на воздухе	1060	—	8,1	0,167
	Закалка 750 °С, 15 мин + + старение 500 °С, 16 ч	1480	—	5,3	0,088
	Закалка 750 °С, 15 мин + + старение 550 °С, 16 ч	1345	—	3,7	0,049

сварнваются. После сварки требуется отжиг для повышения пластичности сварного шва. Они менее склонны к водородной хрупкости, чем α- и псевдо-α-сплавы, так как водород обладает большей растворимостью в β-фазе (см. табл. 49). Двухфазные сплавы куются, штампуются и прокатываются легче, чем сплавы с α-структурой. Они поставляются в виде поковок, штамповок, прутков, листов, лент. Технологические свойства и области применения сплавов представлены в табл. 69.

Однофазные β-сплавы не имеют промышленного значения, так как для получения устойчивой β-структуры сплавы должны быть легированы большим количеством изоморфных β-стабилизаторов (V, Mo, Nb, Ta) — дорогих, дефицитных и обладающих высокой плотностью.

Псевдо-β-сплавы. Это высоколегированные в осиовном β-стабилизаторами сплавы. Суммарное количество легирующих элементов в них, как правило, превышает 20 %. Наиболее часто их легируют Mo, V, Cr, реже Fe, Zr, Sn. Алюминий присутствует почти во всех сплавах в небольшом количестве (~ 3 %). В равновесном состоянии они имеют в основном β-структуру и небольшое количество α-фазы.

После закалки имеют структуру переохлажденной метастабильной β'-фазы, обеспечивающей высокую пластичность сплавам ($\delta = 12 \div 40$ %, $\psi = 30 \div 60$ %) и хорошую обрабатываемость давлением; $\sigma_в \simeq 650 \div 1000$ МПа. При старении сплавов временное сопротивление увеличивается приблизительно в 1,5 раза и достигает 1300—1800 МПа. Плотиость сплавов находится в интервале 4,9—5,1 г/м^3, а удельная прочность, самая высокая среди титановых сплавов, превышает 30 км. Сплавы обладают низкой склонностью к водородной хрупкости, но чувствительны к примесям — кислороду и углероду, вызывающим снижение пластичности и вязкости; сварные швы имеют пониженную пластичность; термическая стабильность низкая. Наибольшее распространение в промышленности получил сплав ВТ15 (~ 3 % Al, ~ 8 % Mo и 11 % Cr). Этот сплав выпускается в виде полос, листов, прутков, поковок и рекомендуется для длительной работы при температуре до 350 °С.

Литейные титановые сплавы. Небольшой температуриый интервал кристаллизации обеспечивает высокую жидкотекучесть и плотность отливок из титановых сплавов. Они отличаются малой склоиностью к образованию горячих трещин; линейная усадка 1 %; объемная усадка 3 %.

Плавку и заливку сплавов на основе титана осуществляют в среде нейтральных газов или в вакууме в связи с их высокой химической активностью при нагреве.

Отливки изготовляют методом фасонного литья в чугунные, стальные и специальные формы. Для получения высококачествеиных сложных титановых отливок необходим комплексный подход к выбору оптимальиых режимов литья как при плавке и заливке металла, так и при формировании отливки в литейной форме.

Литейные сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые. Упрочняющая термическая обработка не применяется, так как резко снижает пластичность сплавов.

Химический состав и механические свойства литейных титановых сплавов приведены в табл. 70 и 71.

Порошковые тнтановые сплавы. Высокая стоимость изготовления и трудность механической обработки сплавов на основе титана являются серьезным препятствием на пути их широкого применения. Методы порошковой технологии позволяют повысить коэффициент использования металла путем уменьшения отходов при механической обработке и открывают потенциальные возможности получения готовых деталей для конструкций летательных аппаратов и двигателей.

Получение порошков из сплавов на основе титана является сложной проблемой вследствие вредного влияния различиых примесей. Высокая химическая активность расплавленного титана исключает применение большинства огнеупоров в качестве материала для тиглей.

Использование современных методов получения легированных порошков ду-

69. Технологические свойства и область применения титановых сплавов [12, 43, 44, 64]

Сплав	Класс прочности	Технологические свойства: Термическая обработка	Пластичность	Свариваемость	Обработка резанием	Коррозионная стойкость	Область применения
ВТ1-00	Малопрочные высокопластичные	Неупрочняемые	Высокая	Хорошая	Удовлетворительная	—	Слабонагруженные детали сложной конфигурации, работающие при температуре от —253 °С до 150 °С
ВТ-0						Отличная	
ОТ4-0						Хорошая	Детали сложной конфигурации, работающие длительно при температуре 300—350 °С и кратковременно при температуре до 500—600 °С
ОТ4-1						—	Тонкостенные детали сложной формы, работающие длительно до температуры 300 °С (3000 ч) и 350 °С (2000 ч)
ОТ4	Среднепрочные		В горячем состоянии хорошая, в холодном удовлетворительная		Хорошая	Хорошая	Детали, длительно работающие до температуры 350—400 °С
ВТ5			В горячем состоянии хорошая		Удовлетворительная		Сварные детали, работающие при температуре от —253 до 400 °С
ВТ5-1					—		Штампосварные детали и узлы, работающие до 450 °С

Продолжение табл. 69

Сплав	Класс прочности	Технологические свойства: Термическая обработка	Пластичность	Свариваемость	Обработка резанием	Коррозионная стойкость	Область применения
ВТ20	Среднепрочные	Неупрочняемые	В горячем состоянии хорошая	Хорошая	Удовлетворительная	Хорошая	Детали, длительно работающие до 500 °С
ПТ7М			Хорошая		—		Трубы и другие тонкостенные сварные детали
ВТ3-1	Высокопрочные	Упрочняемые	В горячем состоянии хорошая	Удовлетворительная	Хорошая	—	Кованые и штампованные детали, работающие при температуре до 400 °С (6000 ч) и 450 °С (2000 ч)
ВТ6				Хорошая	—	—	Штампосварные детали, длительно работающие до температуры 400—450 °С
ВТ14				—	—	—	Детали, длительно работающие до температуры 400 °С
ВТ16			Хорошая	Хорошая	—	—	Крепежные и резьбовые детали диаметром 40 мм, работающие до температуры 350 °С
ВТ22			—	—	—	—	Детали, длительно работающие при 350 °С (2000 ч)
ВТ9			В горячем состоянии удовлетворительная	Хорошая	Хорошая		Детали, работающие до температуры 500 °С

70. Химический состав литейных титановых сплавов [43]

Сплав	Легирующие элементы, %: Al	Mn	Mo	V	Zr	Cr	Sn	Si	Fe
ВТ1Л	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ5Л	4,1—6,2	—	—	—	—	—	—	—	—
ВТ6Л	5,0—6,5	—	—	3,5—4,5	—	—	—	—	—
ВТ3-1Л	5,3—7,0	—	2,0—3,0	—	—	0,8—2,3	—	0,15—0,4	0,2—0,7
ВТ9Л	5,6—7,0	—	2,8—3,8	—	0,8—2,0	—	—	0,20—0,35	—
ВТ14Л	4,3—6,3	—	2,5—3,8	0,9—1,9	—	—	—	—	—

Сплав	Примеси, % не более: C	Fe	Si	Zr	W	O	N	H	Прочие
ВТ1Л	0,15	**0,3**	**0,15**	—	0,20	0,20	0,05	0,015	**0,3**
ВТ5Л	0,20	**0,35**	**0,20**	0,80	0,20	0,20	0,05	0,015	**0,3**
ВТ6Л	0,10	**0,3**	0,15	0,30	0,20	0,15	0,05	0,015	**0,3**
ВТ3-1Л	0,15	—	—	0,50	0,20	0,18	0,05	0,015	**0,3**
ВТ9Л	**0,15**	**0,30**	—	—	0,20	0,15	0,05	0,015	**0,3**
ВТ14Л	**0,12**	**0,6**	**0,15**	**0,30**	0,20	0,15	0,05	0,015	**0,3**

Примечания: 1. Во всех марках сплавов количество титана определяется по разности до 100 %.
2. В техническом титане ВТ1Л допускается не более 0,7 % Al.
3. В сплаве ВТ5Л допускается не более 0,8 % Mo и не более 1,2 % V.
4. В сплаве ВТ14Л допускается до 0,6 % Cr.
5. Во всех сплавах, содержащих в качестве легирующего элемента Mo, допускается частичная замена его W в количестве не более 0,3 %.

71. Механические свойства литейных титановых сплавов [10, 43]

Сплав	t, °С	E, ГПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	KCU, МДж/м²	σ_{-1}, МПа *1
ВТ5Л	—70	—	850	10	0,15	—
	20	118	800	6	0,3	280
	300	105	400	8	—	—
	400	93	350	10	—	—
ВТ6Л	20	115	880	4	0,3	200
	200	—	600	4	—	—
	300	95	550	5	—	—
	400	91	500	5	—	—
ВТ14Л	20	113	950	7	0,35	270
	300	97	630	8	—	—
	400	95	550	8	—	—
ВТ3-1Л	—70	—	1100	3	—	—
	20	114	990	4	0,3	220
	400	—	730	9	—	—
	450	92	680	10	—	—
	500	88	630	10	—	—
ВТ9Л	20	103	1030	4	0,25	180
	300	90	710	4	—	—
	400	88	650	7	—	—
	500	82	570	8	—	—
ВТ20Л	—70	—	1100	5	—	—
	20	108	980	8	0,3	200
	300	—	670	10	—	—
	350	93	630	10	—	—
	400	—	610	10	—	—
	500	81	560	12	—	—

*1 $2 \cdot 10^7$.

говой плавкой с вращающимся анодом и неподвижным вольфрамовым катодом, электроплазменной плавкой либо распылением в вакууме и других позволяет исключить загрязнения. Повышение качества полуфабрикатов и готовых деталей сложных форм может быть достигнуто в результате использования новых прогрессивных методов, таких, как горячее компактирование гранул, горячее изостатическое прессование легированных порошков (ГИП) с последующим спеканием в вакууме и др.

Несмотря на определенные сложности и недостатки (пористость, наличие неметаллических включений и примесей), ухудшающих качество изделий из порошковых сплавов на основе титана, преимущество порошковой металлургии, особенно в ее новом варианте, очевидно.

Для изготовления деталей методами порошковой технологии используют

72. Механические свойства порошковых сплавов на основе титана [4]

Сплав	t спекания, °С	τ, ч	$\sigma_в$, МПа	δ, %
ВТ5	1300	3	590—690	0,7—6,3
	1300	4	620—730	2,4—6,9
	1400	3	770—810	0,8—3,8
	1400	4	650—830	1,2—4,8
ВТ5-1	1300	3	450—710	0
	1300	4	620—720	0
	1400	3	400—680	0
	1400	4	630—700	0
ОТ4	1300	4	700—720	8—12
ВТ6	1300	4	740	4,4

сплавы ВТ5, ВТ5-1, ОТ4, ВТ3-1 и др. Свойства порошковых сплавов приведены в табл. 72 и 73. Из зарубежных сплавов весьма перспективными являются сплав Ti-6Al-4V и особенно Корона-5, обладающий высокой вязкостью разрушения.

Химический состав и механические свойства некоторых зарубежных сплавов приведены в табл. 74, 75.

Механические свойства порошковых материалов зависят от их плотности (табл. 76).

73. Кратковременная прочность литого и порошкового сплава ВТ3-1 [4]

t, °С	ВТ3-1Л		ВТ3-1 порошковый	
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа
200	880	720	970	810
350	810	650	960	800
400	790	620	900	780
450	740	590	890	750
500	—	—	700	630

Применение титановых сплавов. В авиастроении, ракетостроении — каркасные детали, обшивка, топливные баки, детали реактивных двигателей, диски и лопатки компрессоров, детали воздухозаборника, детали корпусов ракетных двигателей второй и третьей ступени и т. д.

В судостроении — обшивка корпусов судов и подводных лодок, сварные трубы, гребные винты, детали насосов и др.

В химической промышленности: реакторы для агрессивных сред, насосы, змеевики, центрифуги и др.

В гальванотехнике: ванны для хромирования, анодные корзины, теплообменники, трубопроводы, подвески и др.

В газовой и нефтяной промышленности: фильтры, седла клапанов, резервуары, отстойники и др.

В криогенной технике: детали холодильников, насосов компрессоров, теплообменники и др.

В пищевой промышленности: сепараторы, холодильники, емкости для продуктов, цистерны и др.

В медицинской промышленности: инструмент, наружные и внутренние протезы, внутрикостные фиксаторы, зажимы и др.

74. Химический состав (в %) некоторых зарубежных порошковых титановых сплавов [41]

Сплав	Al	V	Sn	Zr	Mo	Cr	Bi	Cu	Si	Fe
Ti-6Al-4V	5,5—6,75	3,5—4,5	—	—	—	—	—	—	—	—
Ti11	6	—	2	1,5	1	—	0,35	—	0,1	—
Ti662	5,5—5,6	5,7—5,9	2,25	—	—	—	—	0,6	—	0,65
Ti6246	6	—	2	4	6	—	—	—	—	—
Корона-5	4,5	—	—	—	5	1,5	—	—	—	—

75. Механические свойства некоторых зарубежных порошковых титановых сплавов [41]

Сплав	Режим термической обработки	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$
		МПа		%		
Ti-6Al-4V	Отжиг	950	880	10	23	93
Корона-5	Отжиг	999	940	13	—	75
Ti6246	Ковка + отжиг	1200	1075	8	9	52
Ti662	Отжиг	1045	967	20	33	—
	Закалка + старение	1100	1020	17	26	—

Примечание. Метод получения — горячее изостатическое прессование.

76. Механические свойства спеченного, спеченного и кованого технического титана и сплава Ti-6Al-4V [41]

Сплав	Спеченный (плотность 94 %)				Спеченный и кованый (плотность 100 %)			
	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%		МПа		%	
Технический титан (0,12 % O_2)	430	340	15	23	455	365	23	30
Сплав Ti-6Al-4V (0,12 % O_2)	830	740	5	8	920	840	11	24,7

4. БЕРИЛЛИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Бериллий — химический элемент II группы Периодической системы; атомный вес 9,013, температура плавления 1283 °С, плотность 1,860 г/см^3, модуль упругости $E = 284\,000 \div 294\,000$ МПа. Теплофизические свойства бериллия приведены в табл. 77.

Бериллий обладает эффективным сечением захвата тепловых нейтронов, большой проницаемостью для мягкого рентгеновского излучения (в 17 раз больше, чем у алюминия), высокой отражательной способностью, малым коэффициентом линейного расширения, хорошей коррозионной стойкостью, сравнительно высокой прочностью, но низкой пластичностью. Бериллий имеет уникальный модуль упругости. Если для большинства металлов и промышленных сплавов (за исключением сплавов типа 1420) значение удельного модуля упругости $E/(\rho g)$ колеблется в пределах $(2,3—2,6)\cdot10^3$ км, то удельный модуль упругости бериллия достигает $16,6\cdot10^3$ км, а сплавов бериллия с алюминием и магнием $10,5\cdot10^3$ км (табл. 78). Наряду с ценными техническими свойствами бериллий и его соединения обладают резко выраженными токсическими свойствами. Наиболее токсичными являются химические соединения бериллия, особенно хлористые и фтористые. Аэрозоли и мелкодисперсные частицы бериллия, его сплавов и соединений воздействуют на дыхательные пути и могут привести к заболеванию бериллозом, а их попадание на кожу может вызывать поражение кожного покрова и слизистых оболочек (дерматиты, экземы, конъюктивиты). В компактном виде бериллий безвреден. В окружающую среду частицы бериллия могут попадать при плавке, изготовлении порошков, обработке резанием, сварке, шлифовании, полировании. Предельно допустимое содержание бериллия в воздушной среде производственных помещений — 0,001 мг/м^3 [6]. Сочетание высокого модуля упругости, теплопроводности и теплоемкости, малой плотности и других характеристик обусловили применение бериллия и его сплавов в ряде изделий авиаракетной техники, в том числе для тормозов самолетов и теплозащитных экранов при вхождении возвращаемых летательных аппаратов в плотные слои атмосферы, в приборах, в зеркалах, замедлителях и отражателях тепловых нейтронов, материалах оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов.

В таких конструкциях, как системы наведения, тормоза и зеркала бериллий не имеет конкуренции и может превосходить по эффективности использования даже лучшие композиционные материалы [5]. Бериллий широко используется в качестве небольших присадок в алюминиевых сплавах для создания защитной пленки на жидком металле, в стали для

77. Теплофизические свойства бериллия *1

Параметр	Температура испытания, °С											
	100	200	300	400	500	600	20—100	100—200	200—300	300—400	400—500	500—600
λ, Вт/(м·°С)	163	146	131	121	113	100	—	—	—	—	—	—
c, кДж/(кг·°С)	2,05	2,36	2,53	2,62	2,72	2,89	—	—	—	—	—	—
$\alpha\cdot10^6$, 1/°С	—	—	—	—	—	—	13,8	15,3	16,8	18,2	19,2	20,1

*1 По данным А. И. Ковалева.

78. Модуль упругости бериллия и других металлов [*1]

Металл или сплав	ρ, т/м³	$E\cdot10^{-3}$, МПа	$(E/\rho g)\cdot10^{-3}$, км
Os	22,5	559	2,53
Ir	22,4	510	2,34
Re	21,0	460	2,25
Be	1,85	294	16,6
Fe	7,8	205	2,65
Ti	4,5	102	2,44
Al	2,7	69	2,63
Mg	1,76	42	2,5
Сталь	7,85	200	2,65
ВТ16	4,52	102	2,33
В95	2,85	69	2,56
Д16	2,78	69	2,56
1420	2,47	73	3,12
АБМ (30 % Be)	2,35	132	5,7
АБМ (46 % Be)	2,25	156	7,04
АБМ (70 % Be)	2,05	215	10,5

[*1] По данным Е. М. Савицкого, И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко.

образования твердого диффузионного слоя. Сплавы меди с бериллием (бериллиевые бронзы) обладают эффектами термической обработки; они немагнитны, не искрят при ударе, имеют

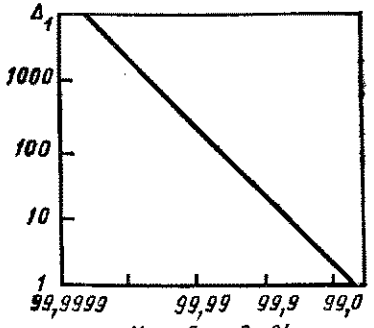


Рис. 11. Зависимость относительного электрического сопротивления Δ_1 бериллия от общего содержания примесей [5]

хорошую коррозионную стойкость, достаточно высокую прочность, а в закаленном состоянии высокую пластичность.

Значительное распространение получили алюминиево-бериллиевые сплавы и алюминиево-бериллиевые сплавы с магнием, сочетающие высокую прочность, пластичность, высокий модуль упругости, теплоемкость и теплопроводность. Добавка 0,5 % Ni повышает длительную прочность бериллия при 900 °С. Лучшие технологические свойства достигаются у сплавов бериллия, содержащих 2—4 % Si, 0,1—1,0 % Ag, 2—4 % Al или у сплава с 0,5 % Ti и 0,1 % Ag.

Интерметаллические соединения бериллия с Ta, Nb, Zn и другие могут использоваться при температуре до 1650 °С; они обладают исключительно высокой твердостью и стойкостью против окисления.

Бериллий получают электролизом хлорида бериллия и NaCl (электролитиый бериллий) или восстановлением фторида бериллия магнием (фторидный или магниевотермический бериллий). Электролитный бериллий имеет меньше примесей и большую пластичность, чем магниевотермический. Для дальнейшего повышения чистоты бериллия проводят дистилляцию в вакууме, зонную плавку или электролиз с растворимым анодом. На рис. 11 показана зависимость отношения электросопротивления $\Delta_1 = R_{25°C}/R_{-169°C}$ от общего содержания примесей. Химический состав технического, очищенного зонной плавкой и дистиллированного бериллия приведен в табл. 79; в табл. 80 дано содержание примесей в промышленных сортах бериллия.

Примеси, в частности алюминий, понижают пластичность бериллия (рис. 12); механические свойства меняются в зависимости от типа заготовки, величины зерна и чистоты металла (табл. 81, рис. 13). Самые высокие свойства у заготовок, выдавленных из мелкозернистых порошков высокой чистоты; еще более высокие прочностные свойства имеет проволока (табл. 82).

Заготовки из бериллия, полученные ковкой и штамповкой с хорошо продеформированной при обработке струк-

79. Химический состав бериллия технической чистоты (10^4, ат. доли, %), очищенного зонной плавкой и дистилляцией [5]

Элемент	ТР-ВП	СР-ВП	СР-ВП-63П	СР-ВП-Д	СР-ВП-23П-Д	СР-ВП-ДД-63П [*1]
C	150	—	—	<45	2,0	1
N	—	—	—	<10	<0,2	0,5
O	—	—	—	<60	5,0	1
F	—	—	—	<10	<0,2	0,5
Na	—	—	—	<10	<1,0	0,7
Al	200	50	5	4	<0,2	<0,003
Si	100	<20	20	2,5	<0,3	4
S	—	—	—	—	<0,2	0,1
Cl	<50	—	—	10	0,1	0,2
K	—	—	—	—	0,3	<0,01
Ca	<200	—	—	1	0,03	0,01
Cr	20	—	—	2	0,01—0,1	0,008
Mn	20	—	—	2	0,1	<0,002
Fe	250	15	5	4	0,02	0,04
Co	—	—	—	—	<0,002	—
Ni	125	30	80	<3	0,01—0,06	0,03
Cu	10	<5	10	0,8	0,6	0,4
Zn	—	—	—	<0,1	0,005	0,2
Mg	—	—	—	6	—	0,002
Be	99,7	99,95	99,99	—	99,999	99,999
Δ_1 [*2]	10	50	250	—	—	3300

[*1] Данные, полученные спектральным анализом.
[*2] $R_{25°C}/R_{-169°C}$.

Обозначения: Бериллий: ТР — технически рафинированный; СР — суперрафинированный, подвергнутый двойному электролизу; ВП — вакуумно-плавленый; Д — дистиллированный; ДД — дважды дистиллированный; 63ЗП — зонноррафинированный (6 рафинированных проходов зоны); СР-ВП-ДД-63П — электрорафинированный, вакуумно-плавленый, дважды дистиллированный и зонноплавленый (6 проходов зоны — металл); СР-ВП-23П-Д — электрорафинированный, вакуумно-плавленый, дистиллированный и зонноплавленый (2 прохода зоны — металл).

80. Содержание примесей в промышленных сортах бериллия [5]

Примеси	Инструментальные сорта 1400, HP-40	Конструкционные сорта S-200 E, HP-20	Сорта для ядерной техники N-50, HP-8
BeO	4,25 (минимум)	2 (максимум)	0,9 (максимум)
C	0,25	0,15	0,1
Fe	0,25	0,18	0,075
Al	0,16	0,16	0,06
Mo	0,08	0,08	0,08
Другие (каждой не более)	0,1	0,04	13 элементов содержится в количестве от $2 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-2}$ %

Примечание. Сорта 1400, S-200E, N-50 — фирмы «Браш Веллман»; HP-40, HP-20, HP-8 — фирмы «Канеки Берилко Индустри».

81. Свойства бериллия разных сортов при испытаниях на растяжение *1 [5]

Сорт материала, полуфабрикат	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ *2, %
Горячепрессованный обычной чистоты *3	370/390	266/273	2,3/3,6
Конструкционный	294/322	196/196	2,7/4,6
Для тормозных агрегатов высокой чистоты (изопрессованный)	455/455	287/287	3,9/4,4
Инструментальный с высоким содержанием окиси (горячепрессованный)	476/511	406/413	1,5/2,7
Мелкозернистый (изопрессованный)	580/587	407/407	3,7/4,2
Листы толщиной 1—6,3 мм:			
порошковый обычной чистоты	531	372	16
литой обычной чистоты	362	172	7
Выдавленные порошковые заготовки:			
обычной чистоты	655—690	345—518	8—13
высокой чистоты	655—828	345—518	8—13
Поковки обычной чистоты	483—600	435—600	0—4,5
Проволока (диаметром 0,05—0,63 мм), полученная из слитка высокой чистоты	966	793	3

*1 В числителе дроби приведены результаты испытаний в продольном, знаменателе — в поперечном направлении.

*2 Удлинение на длине 50,8 мм, кроме проволоки (254 мм).

*3 Конструкционный сорт содержит около 1,8 % BeO, а сорт для тормозных агрегатов и конструкций—около 0,9 % BeO.

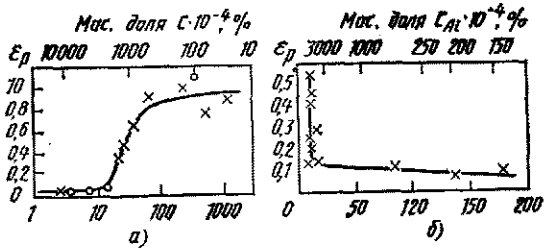


Рис. 12. Зависимость деформации до разрушения при базисном скольжении от содержания:
а — примесей; *б* — алюминия [5]

турой, обладают небольшой анизотропией и достаточно высокими механическими свойствами (табл. 83, 84).

Механические свойства при растяжении, сжатии различных полуфабрикатов из бериллия приведены в табл. 85. На свойства бериллия сильно влияют поверхностные концентраторы и общее состояние поверхности (табл. 86, рис. 14). Чувствительность к концентрации напряжений прессованного прутка в зависимости от коэффициента концентрации напряжений K_t приведена в табл. 87. Уменьшения влияния концентраторов достигают травлением и отжигом (табл. 88, 89). При повышении температуры испытаний происходит заметное снижение прочности и увеличение пластичности (табл. 90, рис. 15). Бериллий обладает сравнительно невысоким сопротивлением ползучести (табл. 91), модуль упругости снижается при 100 °С до 264 700 МПа; при 300 °С — до 235 300 МПа; при 500 °С — до 147 000 МПа. При минус 70 °С прочность снижается с 539—637 МПа до 490—539 МПа, а удлинение с 4—8 до 1—1,5 %. В качестве жаропрочного материала бериллий практически не применяется.

Ультрамелкозернистый сверхчистый бериллий (с размером зерна 5 мкм,

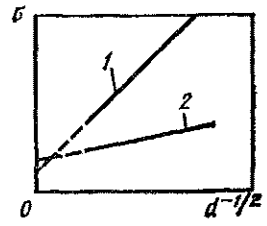


Рис. 13. Зависимость прочностных характеристик от размеров зерна в бериллии:
1 — разрушающие напряжения; *2* — предел текучести [5]

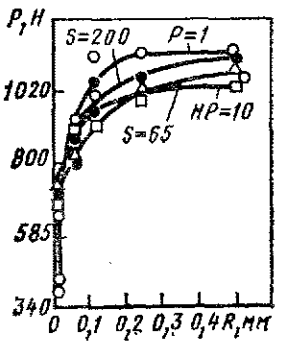


Рис. 14. Влияние радиуса надреза на разрушающую нагрузку [5]

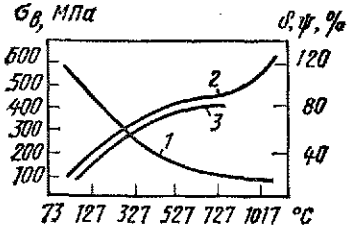


Рис. 15. Температурная зависимость механических свойств мелкозернистого бериллия высокой чистоты:
1 — предел прочности при растяжении $\sigma_в$; *2* — удлинение δ; *3* — поперечное сужение ψ [5]

82. Механические свойства проволоки диаметром 0,125 мм из бериллия, полученного разными способами [5]

Исходный бериллий	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_{25}, %
Слиток (0,02 % BeO)	980	860	6,2
Электрорафинированный ГП:			
0,97 % BeO	1010	875	9,8
0,81 % BeO	1380	1010	2,8
Магниетермический ГП:			
0,86 % BeO	1120	935	5,2
1,52 % BeO	1210	985	2,1

83. Механические свойства поковок из бериллия при растяжении [5]

Растяжение	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ
	МПа		%	
Осевое	468	587	4,3	4,3
Тангенциальное	505	568	3,6	4,0
Радиальное	450	558	3,6	3,7

84. Работа разрушения поковок из бериллия [5]

Испытания	Направление удара	Работа разрушения *1, Дж	Испытания	Направление удара	Работа разрушения *1, Дж
Динамические	Осевое	—/8,4	Баллистические	Осевое	0,92/0,98
То же	Тангенциальное	—/5,7	То же	Тангенциальное	0,46/0,56
»	Радиальное	—/4,6	»	Радиальное	0,87/0,92

*1 В числителе дроби — без разрушения образца, в знаменателе — при разрушении образца.

85. Механические свойства бериллия при растяжении, сжатии *2

Полуфабрикат	Пруток, прессованная труба	Лист	Штамповка	Полоса	Проволока диаметром, мм			
					0,05—0,1	0,1—0,3	0,3—1,0	1,0—5,0
Направление вырезки образца	Д	Д; П	Д; П	Д	Д			
$\sigma_в$, МПа	539—637	392—539	392	⩾490	1176—931 1568—1421Н	931—833М 1421—1274Н	833—686М 1274—882Н	686—392М 882—539Н
$\sigma_{в\,сж}$, МПа	1470—1666	—	—	—	—	—	—	—
δ_5, %	4—8	2—4	⩾2	⩾3	—	—	—	—

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, В. И. Колесниковой, Н. В. Цукановой.

Обозначения: М — в отожженном состоянии; Н — в нагартованном состоянии; Д — долевое направление; П — поперечное направление.

86. Влияние обработки поверхности на прочность при испытании на растяжение образцов с надрезом [*1] и без надреза из прокатанного бериллия [5]

Поверхность листа	$\sigma_в^н$, МПа	$\sigma_в^{б.н}$, МПа	$K_{ов}$ [*2]
Шлифованная	298/268	387/387	0,77/0,69
Фрезерованная	225/217	383/392	0,59/0,55
Травленая	461/228	454/436	1,02/0,52

[*1] Коэффициент концентрации $K_t = 4{,}4$.
[*2] Отношение прочности образцов с надрезом к прочности образцов без надреза.

Примечание. В числителе дроби — прочность в продольном направлении, в знаменателе — прочность в поперечном направлении.

87. Чувствительность бериллия к концентрации напряжений [*1]. Образец круглый (гладкий и с кольцевой выточкой)

K_t	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_в^н$, МПа	$\sigma_в^н/\sigma_н$
1	588	—	—
2,2	—	470	0,8
4,0	—	166	0,28

[*1] По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, Д. Я. Брагина, И. Н. Шкайова.

88. Влияние травителей на свойства бериллия, протравленного после механической обработки [5]

Состояние материала	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
После механической обработки	—	389	0
После стравливания слоя 0,1 мм травителями:			
NH_4F_2 (15 %), Be (20 г/л)	410	573	18
HNO_3 (20 %), HF (1 %), Be (10 г/л)	399	547	16
HNO_3 (20 %), HF (1 %), Be (20 г/л)	410	578	18

89. Влияние отжига и отжига с последующим травлением на свойства горячеосаженного бериллиевого листа при растяжении [5]

Обработка поверхности	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Шлифование слоя толщиной 0,13 мм	290	462	8,6
Шлифование и отжиг	272	496	13,0
Шлифование, отжиг и травление	272	505	18,3

чистотой более 99,9 %) по пластическим характеристикам может не уступать другим металлам с гексагональной кристаллической решеткой и имеет относительное удлинение до 22 %. Температура его перехода из хрупкого состояния в пластичное минус 20 °С. Такой металл имеет способность к сверхпластической деформации; относительное удлинение его образцов при 600—700 °С может достигать 350 %. Однако освоение промышленного выпуска ультрамелкозернистого сверхчистого бериллия, по-видимому, является задачей не близкого будущего.

Более высокой пластичностью, чем бериллий, обладают двойные и тройные сплавы типа алюминий—бериллий и алюминий—магний—бериллий. Высокая пластичность фазы [Al], упрочненной магнием, вводимым в сплавы в концентрациях, не превышающих его предельную растворимость, благоприятно влияет на свойства двухфазных сплавов системы Al—Be—Mg. Так как растворимость магния с повышением содержания бериллия уменьшается, то в сплавы системы Al—Be—Mg при самом низком содержании бериллия необходимо вводить наиболее высокое количество магния. В сплавах с наиболее высоким содержанием бериллия должно быть низкое содержание магния.

Наряду с сравнительно плавным повышением прочности в сплавах системы Al—Be и Al—Be—Mg (рис. 16) с увеличением содержания бериллия одновременно происходит непрерывный, но значительно более интенсивный рост модуля упругости, который при содержании 70—80 % Be достигает 215 000—245 000 МПа; плотность такого сплава равна 2 т/м^3. В результате этого сплавы на алюминиево-бериллиевой основе высокомодульные и

90. Механические свойства при растяжении прессованного прутка из бериллия при высоких температурах после отжига [*1]

Параметр	Температура испытания, °С		
	100	300	500
$\sigma_в$, МПа	509—539	382—431	254—294
δ_5, %	13—20	29—36	22—29

[*1] По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

91. Пределы ползучести и длительной прочности прессованного прутка из бериллия после отжига [*1]

Параметр	Температура испытания, °С				
	100	200	300	400	500
$\sigma_{0,2/100}$, МПа	205	—	147	—	49
σ_{100}, МПа	411	294	225	156	98

[*1] По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

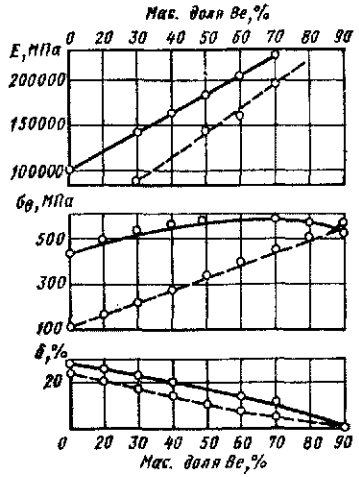


Рис. 16. Механические свойства сплавов с различным содержанием бериллия; штриховая линия — Al — Be; сплошная линия — Al—Be—Mg [18]

по модулю упругости в зависимости от состава превосходят высокопрочные сплавы на алюминиевой основе более чем в 2—3 раза. Модуль упругости — аддитивное свойство, приблизительно определяемое среднеарифметическим значением модуля упругости компонентов, входящих в состав сплава. Этим объясняется высокий рост модуля упругости при введении бериллия в больших количествах в указанные сплавы. Наблюдается аномалия в тройных сплавах Al—Be—Mg — значительное повышение модуля упругости алюминиево-бериллиевых сплавов в результате введения магния.

Сплавы системы Al—Be—Mg имеют более высокий модуль упругости (на 14 700—39 200 МПа), чем сплавы системы Al—Be при одинаковом содержании бериллия, хотя магний (и твердый раствор магния в алюминии) имеет модуль упругости ниже, чем алюминий (44 100 МПа), и его вводят в сплавы сравнительно немного. Эта аномалия объясняется физическими особенностями структурных составляющих исследуемых сплавов, представляющих смесь двух фаз с резко выраженной разнородностью и уменьшением степени этой разнородности при легировании алюминиевой фазы магнием.

Другая закономерность для этих сплавов состоит в том, что тройные сплавы системы Al—Be—Mg при содержании бериллия до 70 % превосходят двойные сплавы системы Al—Be не только по прочности, но и по относительному удлинению. По-видимому, более низкое относительное удлинение двойных алюминиево-бериллиевых сплавов также есть следствие резко выраженной неоднородности фаз, присутствующих в структуре этих сплавов: твердой и прочной бериллиевой фазы [Be] и мягкой и малопрочной фазы [Al]. В сплавах системы Al—Be—Mg свойства упрочненной магнием фазы [Al] меньше отличаются от свойств фазы бериллия. Это обеспечивает и более однородный и равномерный характер деформации при растяжении и, как результат этого, одновременное повышение прочности и относительного удлинения.

Если предел прочности двойных сплавов непрерывно повышается при увеличении содержания бериллия от 10 до 100 %, то кривая прочности тройных сплавов системы Al—Be—Mg располагается значительно выше и достигает максимума приблизительно при 70 % Be. При 70 % Be относительное удлинение тройного сплава сохраняется на достаточно высоком уровне (около 10 %). При дальнейшем повышении содержания бериллия прочность понижается при одновременном резком снижении пластичности, поэтому сплавы системы Al—Be—Mg при содержании бериллия более 70—75 % (более 80 об. долей, %) для практического применения не представляют особого интереса. Резкое снижение относительного удлинения в сплавах данной концентрации объясняется тем, что количество [Al]-фазы в структуре сплава уже недостаточно и она перестает оказывать пластифицирующее действие, как это происходит в сплавах, более богатых этой фазой. Сплавы с малым количеством [Al]-фазы можно рассматривать как бериллий, содержащий некоторое количество легкоплавкой составляющей, ухудшающей его свойства, особенно при температурах свыше 500—600 °С. В этом случае предпочтительно применять чистый бериллий. Благодаря наличию в алюминиево-бериллиевых и алюминиево-бериллиево-магниевых сплавах, содержащих до 70—75 % Be, достаточного количества высокопластичной алюминиевой составляющей и хорошему сцеплению между алюминиевой и бериллиевой фазами, эти сплавы по сравнению с бериллием обладают хорошей общей и технологической пластичностью и удовлетворительно деформируются при 380—420 °С. В процессе обработки давлением происходит деформация алюминиевой матрицы и бериллиевой фазы, поскольку бериллий при температурах около 400 °С имеет достаточно высокую пластичность.

Структура прессованных полуфабрикатов представляет собой смесь алюминиевой матрицы и вытянутых в направлении течения металла частиц бериллиевой фазы [Be] размером 10—50 мкм в поперечнике. В горячекатаных листах эти частицы имеют форму, близкую к линзовидной (чешуйка), с большим отношением диаметра к толщине. Структура изделий из алюминиево-бериллиевых сплавов, полученных деформацией при обработке давлением, является характерной для композиционного материала, армированного сравнительно короткими волокнами или чешуйками бериллия. Поскольку модуль упругости бериллиевой составляющей выше, чем алюминиевой матрицы, она воспринимает основную долю приложенных напряжений. Для эффективной эксплуатации материала важно, что алюминиевая матрица более пластична, чем бериллий, что благоприятствует перераспределению нагрузки между волокнами. Общая прочность композиций пропорциональна квадратному корню из расстояния между частицами (рис. 17). Изменение предела прочности сплавов Al—Be и Al—Be—Mg в зависимости от расстояния между частицами бериллия в структуре сплавов (рис. 17) имеет тот же характер, что и изменение прочности сплавов этих систем в зависимости от содержания бериллия (см. рис. 16). При этом максимум на кривой прочности сплавов Al—Be—Mg (см. рис. 17) соответствует расстояниям между частицами бериллия в сплаве,

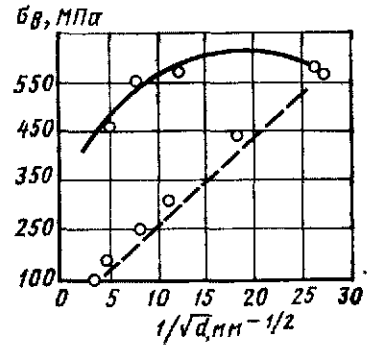


Рис. 17. Зависимость прочности алюминиево-бериллиевых сплавов от расстояния d между частицами бериллия [18]

приблизительно содержащем 70 % Be. Наличие ориентированной структуры в прессованных и волоченых полуфабрикатах резко повышает механические свойства в направлении деформации и приводит к анизотропии механических свойств [2].

Свойства сплавов типа АБМ (Al—Be—Mg) в сравнении с зарубежными двойными сплавами Al—Be «Локаллой» представлены на рис. 18. Механические свойства прутков диаметром 30 мм и листов сплава с 30 % Be различной толщины приведены в табл. 92, а чувствительность к концентрации напряжений — в табл. 93. Скорость роста усталостных трещин (СРТУ) в листовом материале из сплава АБМ с 30 % Be в сравнении с промышленным сплавом Д16Т приведена в табл. 94. Акустическая выносливость листовых образцов сплава АБМ с 30 % Be в сравнении с промышленным сплавом Д16Т показана в табл. 95. Пределы выносливости даны в табл. 96, а влияние длительных нагревов — в табл. 97. При понижении температуры у сплавов типа АБМ прочность и предел текучести растут, а удлинение падает (табл. 98). При повышенных температурах прочностные характеристики снижаются, а при 350 °С — и пластичность (табл. 99). Сопротивление ползучести сплавов АБМ показано в табл. 100. Теплофизические свойства полуфабрикатов из сплавов АБМ с 30 % Be приведены в табл. 101.

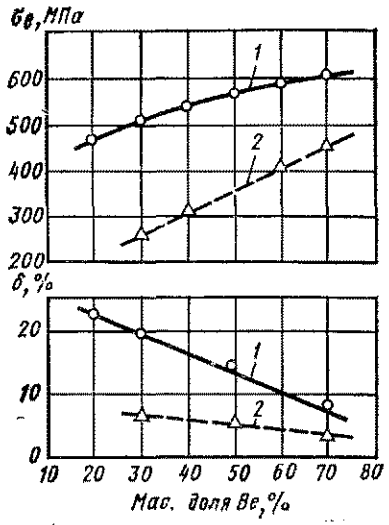


Рис. 18. Сравнительные свойства отечественных и зарубежных деформируемых алюминиево-бериллиевых сплавов:
1 — АБМ; *2* — Локаллой (Al—Be) [5, 18]

Сплав типа АБМ с 70 % Be имеет плотность 2,01—2,06 г/см³, модуль упругости $E = 196\,000 \div 225\,500$ МПа; его теплофизические свойства приведены в табл. 102, а механические свойства при комнатной температуре — в табл. 103. При концентрации напряжения $K_t = 2{,}2$ (кольцевая выточка) предел прочности прутка снижается с 510 до 460 МПа, а предел выносливости ($N = 2 \cdot 10^7$ циклов, чистый изгиб с вращением) при том же коэффициенте концентрации напряжений — с 264 до 98 МПа. Длительные нагревы до 500 °С слабо влияют на прочность сплавов АБМ при комнатной температуре. При повышении температуры испытания одновременно снижаются прочность и относительное удлинение (табл. 104).

Композиты бериллий — титан (табл. 105) обладают высокой прочностью, но очень низким пределом текучести при растяжении. При работе на сжатие предел прочности и особенно предел текучести растут.

Низкий предел текучести не является типичным для порошковых материалов Be—Ti (патент США 3.774.290.1973).

Сравнительно широкое применение имеет бериллиевая бронза — сплав меди с бериллием. При введении в медь 2 % Be прочность многократно повышается, что связано с процессами распада пересыщенного твердого раствора бериллия в меди. Растворимость бериллия снижается с 2,1 % при 864 °С до 0,2 % при 700 °С. Промышленное значение имеют сплавы, содержащие 1,7—2,5 % Be.

В закаленном состоянии бронзы обладают высокой пластичностью и малой прочностью и могут упрочняться нагартовкой и старением. Старение проводится в закаленном или в закаленном и нагартованном состоянии. После старения прочность, предел текучести, твердость растут, пластичность резко снижается. Бериллиевые бронзы коррозионно-стойки в морской воде, в водном растворе соляной кислоты.

Физические свойства бериллиевых бронз приведены ниже.

Физические свойства бериллиевой бронзы БрБ2[49]

Температура плавления, °С:	
солидус	955
ликвидус	864
ρ, г/см³	8,23
$\alpha \cdot 10^6$, 1/°С, при температуре, °С:	
20—100	16,6
100—200	17,2
200—300	19,0
λ бронзы, Вт/(м·°С):	
мягкий	83,5
облагороженной	105
деформированной	75
c, кДж/(кг·°С)	0,419
ρ_1 бронзы, Ом·м·10^6:	
закаленной	0,1
облагороженной	0,68
Магнитная воспринимчивость $\varkappa \cdot 10^6$ бронзы:	
в закаленном состоянии	—0,45
после дисперсионного твердения	—0,62

После соответствующей механической и термической обработки детали из бериллиевых бронз обладают высо-

92. **Механические свойства сплава АБМ с 30 % Be при растижении и сжатии** *1

Параметр	Полуфабрикат					
	Пруток прессованный	Лист				
Толщина, мм	∅ 30	0,5—0,8		1,0—2,0	7—12	
Состояние	Без термообработки	М		Н	М	Н
Направление вырезки образца	Вдоль	Поперек				
$\sigma_в$, МПа	411	402—441	441—539	490—588	392—431	402—451
$\sigma_{0,2}$, МПа	264	245—294	343—372	411—451	264—284	264—313
$\sigma_{в\,сж}$, МПа	1185	—	—	—	—	—
δ_{10}, %	16	15—20	10—18	3—10	7—12	4—10

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной, Г. А. Некрасовой.

Обозначения: М — отожженное; Н — нагартованное.

93. **Чувствительность к концентрации напряжений сплава АБМ с 30 % Be** *1

Параметр	Полуфабрикат			
	Пруток прессованный		Лист	
Толщина, мм	∅ 30		1,0	
Состояние	Без термообработки		Отожженное	
Направление вырезки образца	Вдоль		Поперек	
Форма образца	Круглая (гладкий и с кольцевой выточкой)		Плоская (гладкий и с отверстием)	
K_t	1	2,2	1	2,5
$\sigma_в$, МПа	480	—	524	—
$\sigma_в^н$, МПа	—	519	—	521
$\sigma_в^н/\sigma_в$	1,1		0,99	

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, И. Н. Шканова.

94. СРТУ в листовом материале из сплавов АБМ и Д16Т *1

$\Delta K\sqrt{3}$, МПа	$d(2l)/dN$, мм кол. циклов	
	АБМ (σ брутто = 100 МПа)	Д16Т (σ брутто = 80 МПа)
12,4	0,2—0,4	0,35—0,5
15,5	0,3—0,6	0,6—0,75
18,6	0,6—0,9	1,0—1,2
21,7	0,8—1,5	1,7—2,0
24,8	1,5—2,0	2,8—3,0

*1 По данным С. И. Кишкиной и Е. Н. Старовой.

Примечание. $d(2l)/dN$ — скорость роста трещины усталости; ΔK — размах коэффициента интенсивности напряжения.

95. Акустическая выносливость листовых образцов из сплавов АБМ и Д16Т *1

Материал	N циклов до разрушения при напряжениях, МПа			$\frac{N\ \text{АБМ}}{N\ \text{Д16Т}}$ (при σ = 30 ÷ 35 МПа)
	69	44	34	
АБМ	$3\cdot10^6$	$6{,}7\cdot10^7$	$4{,}4\cdot10^8$	40—50
Д16Т	$0{,}35\cdot10^6$	$0{,}25\cdot10^7$	$0{,}8\cdot10^7$	

*1 По данным Е. А. Шахатуни.

96. Пределы выносливости ($N = 2\cdot10^7$ циклов) сплава АБМ с 30 % Be *1

Параметр	Полуфабрикат			
	Лист		Пруток	
Толщина, мм	1,5		∅ 30	
Состояние	Отожженное		Без термообработки	
Направление вырезки образца	Поперек		Вдоль	
Вид испытания	Чистый изгиб		Изгиб с вращением	
υ, Гц *2	25		50	
R *3	—1			
Форма образца	Плоская (гладкий и с отверстием)		Круглая (гладкий и с кольцевой выточкой)	
K_t	1	2,2	1	1,89
σ_R, МПа	196	137	176	64

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, И. Н. Шканова.
*2 υ — частота циклов, Гц.
*3 R — симметричность циклов.

97. Влияние длительных нагревов на механические свойства листов из сплава АБМ с 30 % Be при комнатной температуре *1

Полуфабрикат	Лист			
Толщина, мм	0,7			
Состояние	Отожженное			
Направление вырезки образца	Поперек			
Температура нагрева, °С	20	150	200	250
Продолжительность нагрева, ч	100			
$\sigma_в$, МПа	460	470	465	465
δ_{10}, %	21	24	17,5	15

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

98. Механические свойства листов из сплава АБМ с 30 % Be при растяжении при низких температурах *1

Полуфабрикат	Лист		
Толщина, мм	1,0—1,5		
Состояние	Отожженное		
Направление вырезки образца	Поперек		
Температура испытания, °С	20	—70	—196
$\sigma_в$, МПа	411	421	539—608
$\sigma_{0,2}$, МПа	264—294	264—284	470—490
δ_5, %	11—18	14—18	1,5—3

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

99. Механические свойства бериллия при растяжении при высоких температурах *1

Полуфабрикат	Лист			
Толщина, мм	1,0—1,5			
Состояние	Отожженное			
Направление вырезки образца	Поперек			
Температура испытаний, °С	200	250	300	350
$\sigma_в$, МПа	304	254	186	166
$\sigma_{0,2}$, МПа	205	176	127	78
δ_{10}, %	12	13	16	8

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной.

100. Пределы ползучести и длительной прочности сплава АБМ с 30 % Be *1

Параметр	Полуфабрикат				
	Лист	Пруток прессованный			
Диаметр, мм	1,5	30			
Состояние	Отожженное	Без термообработки			
Направление вырезки образца	Поперек	Вдоль			
Температура испытания, °С	200	150	250	300	350
σ_5, МПа	—	—	—	68	44
σ_{20}, МПа	156	—	68	—	29
$\sigma_{0,2/5}$, МПа	—	186	34	—	—
$\sigma_{0,2/20}$, МПа	88	—	—	—	—
$\sigma_{0,2/100}$, МПа	—	107	—	—	—
$\sigma_{0,2/300}$, МПа	—	78	—	—	—

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной, З. Г. Семеновой.

101. Теплофизические свойства полуфабрикатов из сплава АБМ с 30 % Be *1

Состояние	Отожженное						
Температура испытания, °С	20	100	200	300	20—100	20—200	20—300
λ, Вт/(м·°С)	138	134	130	126	—	—	—
c, кДж/(кг·°С)	1,13	1,15	1,19	1,21	—	—	—
$\alpha \cdot 10^6$, 1/°С	—	—	—	—	19,2	19,7	20

*1 По данным А. И. Ковалева.

102. Теплофизические свойства сплава АБМ с 70 % Be *1

Полуфабрикат	Пруток прессованный								
Состояние	Без термообработки								
Температура испытаний, °С	100	200	300	400	500	20—100	20—200	20—300	20—400
λ, Вт/(м·°С)	167	151	142	130	125	—	—	—	—
c, кДж/(кг·°С)	1,76	1,92	2,01	2,18	2,3	—	—	—	—
$\alpha \cdot 10^6$, 1/°С	—	—	—	—	—	15	16	16,7	17,2

*1 По данным А. И. Ковалева.

103. Механические свойства сплава АБМ с 70 % Be при растяжении *1

Полуфабрикат	Пруток прессованный
Состояние	Без термообработки
Направление вырезки образца	Вдоль
$\sigma_в$, МПа	509—549
$\sigma_{0,2}$, МПа	353—402
$\sigma_{пц}$, МПа	186—264
δ_{10}, %	7—12
ψ, %	8—12

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной, З. Г. Семеновой.

104. Механические свойства сплава АБМ с 70 % Be при растяжении в зависимости от температуры испытания *1

Температура испытания °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %
200	362—411	304—343	10—12
300	294—313	264—284	10—17
400	166—215	137—186	8—11
500	137—147	117—127	2—3

*1 По данным И. Н. Фридляндера, К. П. Яценко, С. И. Кишкиной, З. Г. Семеновой.

Примечание. Полуфабрикат — прессованный пруток, без термообработки, направление вырезки — вдоль.

105. Свойства порошковых композитов Be—Ti при растяжении и сжатии [5]

$t_{исп}$, °С	Содержание Be, мас. доля, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$E \cdot 10^{-3}$, МПа
		Растяжение			
25	50	104	846	1,5	192
	60	131	766	1,0	180
	20—30	90	1075	1,4	143
315	50	141	685	4,1	154
	60	133	590	1,6	153
	20—30	227	868	3,0	107
		Сжатие			
25	50	1030	1282	—	—
	60	992	1269	—	—
315	50	848	1175	—	—
	60	977	1113	—	—

кой размерной стабильностью в течение всего периода эксплуатации. Одна из важнейших областей применения бериллиевых бронз — это пружины, упругие элементы в виде мембран и сильфонов, применяемых в точном приборостроении.

5. ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Свойства полимеров зависят от их химического строения, физического состояния и условий эксплуатации. Для большинства полимерных материалов характерны: низкая плотность, высокая удельная прочность и жесткость, химическая и радиационная стойкость, а также стабильные электрические свойства в определенном интервале температур. Верхняя граница температурного интервала определяется потерей теплостойкости, а нижняя — появлением хрупкости.

В качестве конструкционного материала полимеры используют как в чистом виде (без наполнителей), так и в виде матриц полимерных композиционных материалов.

В табл. 106 приведены свойства полиэтилена, полипропилена и политетрафторэтилена, обладающих невысоким временным сопротивлением, но очень высокой пластичностью, объединяющей их в одну группу.

В зависимости от метода полимеризации различают полиэтилен высокого и низкого давления. Полиэтилен низкого давления имеет более высокую прочность, теплостойкость и химическую стойкость.

Полипропилен отличается высокой стойкостью к многократным изгибам, износостойкостью и менее подвержен растрескиванию под действием агрессивных сред. Температура перехода в хрупкое состояние полиэтилена находится в интервале —75 °С÷—220 °С, а полипропилена —7 °С÷—15 °С.

Политетрафторэтилен (фторопласт) обладает низким коэффициентом трения, наиболее химически стоек из всех полимеров, имеет повышенную термохладостойкость.

Общими недостатками полимеров данной группы являются: невысокая теплостойкость, ползучесть под действием нагрузки и зависимость механических свойств от температуры, длительности нагружения и скорости деформирования.

В табл. 107 приведены механические и физические свойства полимеров, успешно конкурирующих с металлами при изготовлении деталей конструкций

106. Механические свойства полимеров [29, 60, 66]

Полимер	ρ, т/м³	$E \cdot 10^{-3}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_и$, МПа	НВ, МПа	δ, %
Полиэтилен:							
высокого давления	0,900—0,939	1,4—2,5	10—17	12	12—20	14—25	400—600
низкого давления	0,948—0,959	6,0—8,5	20—45	20—33	20—40	45—60	300—800
среднего давления	0,950—0,976	8,0—12,5	18—40	—	25—40	60—80	200—1300
Полипропилен	0,90—0,91	6,7—12,3 *1	25—40	50—70	70—80	40—70	200—800
Политетрафторэтилен:							
фторопласт-3	2,09—2,16	11,6—15,0 *1	35—45	55—60	60—80	10—13	—
» 4	2,15—2,22	4,7—8,5 *1	14—35	10—12	14—18	30—40	250—500
» 4Д	2,21—2,26	4,5—8,5 *1	12—23	12	11—14	30—40	100—330
» 4М	2,14—2,16	5,5—6,0 *1	16—31	20	20—30	30—40	250—400
» 40	1,65—1,70	8—10 *1	27—50	—	33—34	58—63	150—400
» 42	1,91—2,00	4—8 *1	25—50	—	25—35	—	250—500
» 4НА	2,0—2,1	4 *1	15—30	—	20	30—35	200—450

*1 Указан модуль упругости при изгибе $E_и \cdot 10^{-3}$ МПа.

107. Механические свойства полимеров [29, 60, 66]

Полимер	ρ, т/м³	$E \cdot 10^{-2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_и$, МПа	НВ, МПа	δ, %
Полистирол	1,05—1,10	30	35—45	80—100	65—100	140—160	1,5—3,0
Полиметиленоксид:							
гомополимер	1,43	2,9	68—71	110—130	100—120	150—180	—
сополимер	1,39—1,41	22—30	65—70	105—145	100—125	100—130	15—20
Полифениленоксид:							
арилокс-100	1,06	—	60	40	40	165	3
PPO (США)	1,06	25	74	106	107	—	20—40
норил (США)	1,06	23	61	113	87	—	20—30
Полиэтилентерефталат-лавсан	1,34—1,41	30	60—70	80—100	80—150	90—120	4—20
Поликарбонат	1,20	24—28	57—70	80—90	90—100	110—160	50—100
Полиакрилат U-1060 (Япония)	1,11—1,21	18,8	75	96	—	200—250	62
Полиоксибензоат:							
эксел 1-2000 (США)	1,40—1,45	25,5	99	127	120	—	8
эксел С-1000 (США)	1,40—1,45	13,3	70	140	106	—	7—9
эконол Р-300 (США)	1,40—1,45	72	—	—	75	—	—

повышенной жесткости и коррозионной стойкости.

Перспективность данной группы полимеров заключается в сочетании высокого временного сопротивления, модуля упругости и высокой пластичности со стабильностью свойств под нагрузкой, невысокой плотностью и коррозионной стойкостью. При этом полистирол — хрупкий полимер, склонный к старению.

Полиметиленоксид — горючий, нетоксичный материал с высоким сопротивлением усталости при динамических знакопеременных нагрузках, обладает высокой износостойкостью и низкой ползучестью.

Полиэтилентерефталат (лавсан) отличается низкой гигроскопичностью, низким коэффициентом трения, стабильностью свойств; устойчив к действию слабых кислот, эфиров, масел и жиров; не стоек в концентрированных кислотах и щелочах.

Поликарбонаты имеют стабильные механические свойства в интервале температур —150 °С÷200 °С, обладают низкой гигроскопичностью, стабильностью размеров и малой склонностью к ползучести под нагрузкой.

Полиакрилаты огнестойки, устойчивы к длительному действию разбавленных кислот, износостойки при повышенных температурах до 130 °С.

Перспективные конструкционные полимеры — полиоксибензоаты, обладающие термостойкостью до 500 °С, низким влагопоглощением, высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Высоким временным сопротивлением (120—140 МПа), высокими пластичностью и сопротивлением усталости, низкой ползучестью под нагрузкой обладают полиимиды и полиамиды, механические свойства которых приведены в табл. 108.

Полиимиды в зависимости от строения главной полимерной цепи могут быть линейными или трехмерными, а по строению мономерного звена —алифатическими, алициклическими или ароматическими. Наибольшее применение получили ароматические линейные полиимиды.

Полиимидные пресс-порошки ПМ-67, ПМ-69 (СССР), 2080, P13N, NR (США), кайнол (Франция) перерабатываются в изделия методами прямого или горячего прессования, литьем под давлением.

Изделия из полиимидов отличаются высокой стабильностью размеров, термостойкостью до 300 °С, низким коэффициентом трения и низкой ползучестью под нагрузкой.

Полиамиды, как и полиимиды, могут быть алифатическими (капролон, найлон-6, найлон-10) и ароматическими [фенилон П, фенилон С1, фенилон С2 (СССР), номекс (США) и др.].

Для алифатических полиамидов характерны: высокие сопротивление усталости, сопротивление истиранию и ударным нагрузкам, низкая гигроскопичность.

Ароматические полиамиды, имея резко выраженную температуру плавления, обладают стабильностью свойств при повышенных температурах.

Полиамиды, как и большинство ароматических полиимидов, устойчивы к действию органических растворителей, но растворяются в концентрированных кислотах и спиртах.

6. ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Материалы данного типа относятся к классу порошковых, в которых матрица из металла или сплава упрочняется искусственно введенными мелкодисперсными частицами размером менее 0,1 мкм в количестве 0,1—15 %. В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других тугоплавких соединений.

Смеси порошков получают механическим или химическим смешиванием, поверхностным или внутренним окислением, разложением смеси солей, водородным восстановлением или химическим осаждением из растворов.

После формования и спекания проводят горячую пластическую деформацию с целью получения плотного, беспористого полуфабриката (лент, полос, профилей и т. д.).

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе алюминия. Наиболее распространенными

108. Механические свойства полимеров [29, 60, 66]

Полимер	ρ, т/м³	$E \cdot 10^{-2}$	$\sigma_в$	$\sigma_{сж}$	$\sigma_и$	НВ	δ, %
		МПа					
Полиимид:							
ПМ-67	1,33—1,41	30—36 *1	120—140	200—230	180—240	180—280	9—20
ПМ-69		—	95—125	210—240	180—230	200—270	4—7
ДФО		32	120	—	—	—	20—30
2080 (США)		13,2	120	210	202	—	10
P13 (США)		32—34	51	—	70—80	—	1,4
NR (США)		37,7	106	—	—	—	9,0
Полиамиды алифатические:							
найлон-6	1,09—1,14	12—15	55—77	77—85	85—100	100—120	100—150
6, 10 литьевой		15—17	50—60	70—90	45—70	100—150	100—150
П-12Л литьевой		16—18	40—55	60—63	55—65	75	200—280
капролон В		20—23	90—95	100—110	120—150	130—150	6—20
Полиамиды ароматические:							
фенилон П	1,35	30—32 *1	90	320	120	180—220	4
» С1		30—32 *1	100	220	150	180	5
» С2		30—32 *1	120	220	200	220	6

*1 Приведены значения $E_{сж} \cdot 10^{-2}$, МПа.

109. Механические свойства ДКМ на основе алюминия

Материал	t, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
САП-1	20	200	290—310	7—9
	250	—	180—190	4—6
	350	—	140—150	3—4
	500	—	100	2
САП-2	20	230	320	4
	250	—	190	3
	350	—	150	2
	500	—	100	1
САП-3	20	340	400	3
	250	—	240	1,5
	350	—	190	1
	500	—	130	1
SAP-ISML-930	20	175	250	14,5
	300	95	110	8,5
	400	75	85	4,5
	500	65	70	—
SAP-ISML-895	20	215	310	10,5
	300	120	150	5,5
	400	100	110	2,5
	500	85	90	—
SAP-ISML-865	20	265	380	7,0
	300	155	175	3,5
	400	120	130	2,0
	500	105	105	—
Al—1 % G	20	—	260	7,5
Al—1 % G	400	—	110—120	7
Al—2 % G	20	—	360	3,5
Al—2 % G	400	—	145—160	4,5
Al—3 % G	20	430	450	4,2
Al—3 % G	400	—	145—160	4,5
Al—4 % G	20	—	470	3,5
Al—4 % G	400	—	150—175	4
Al—5 % G	20	—	520	3,5
Al—5 % G	400	—	180—200	2

110. Длительная прочность и пределы ползучести ДКМ на основе алюминия

Марка	t, °С	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,5/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$	$\sigma_{0,5/1000}$
		МПа					
САП-1	200	120	120	90	105	80	95
	310	80	75	60	75	50	65
	430	45	45	35	45	—	40
САП-2	250	110	—	—	—	90	115
	350	80	—	70	—	63	—
	500	50	—	40	—	—	—
САП-3	250	120	—	—	—	99	125
	350	90	—	—	—	—	—
	500	55	—	—	—	36	—

соединениями, применяемыми в качестве упрочняющей фазы в дисперсно-упрочненных композиционных материалах (ДКМ) на основе алюминия и и его сплавов, являются оксиды. В СССР выпускаются три марки ДКМ на основе алюминия: САП-1, САП-2 и САП-3, отличающиеся концентрацией оксидов (6—9 % Al_2O_3, 9—13 % Al_2O_3, 13—17 % Al_2O_3). Зарубежным аналогом САП-1 является SAP-930, САП-2 — SAP-895, САП-3 — SAP-865.

Наряду с материалами типа САП разработаны ДКМ Al—C, упрочняющей фазой в которых служит карбид алюминия Al_4C_3 [29]. Увеличение содержания оксида алюминия в САП и карбида алюминия в ДКМ Al—C приводит к повышению прочности и снижению пластичности.

111. Длительная прочность ДКМ Al — 3 % C

t, °С	σ_1	σ_{10}	σ_{100}
	МПа		
200	230	210	190
300	140	130	120
400	110	95	80
500	70	65	60

При температурах 300—500 °С ДКМ на основе алюминия превосходят по прочности все промышленные алюминиевые сплавы (табл. 109) и отличаются высокими характеристиками длительной прочности и ползучести (табл. 110, 111). Поставляются дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе алюминия в виде листов, полос, профилей, прутков, проволоки и штамповок.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе бериллия. Наиболее эффективными упрочнителями бериллия являются оксид BeO и карбид Be_2C. Временное сопротивление ДКМ Be—BeO повышается с увеличением содержания оксида; при этом эффективность упрочнения растет с увеличением температуры (табл. 112). Сопротивление ползучести и длительная прочность Be—BeO композиционных материалов при повышенных температурах сравнительно невелики. Применение карбида бериллия Be_2C в качестве упрочняющей фазы позволяет повысить 100-часовую прочность бериллия при 650 °С в 3 раза, а при 730 °С — более чем в 5 раз [29] (табл. 113).

Благодаря высокому коэффициенту рассеяния нейтронов, высокому модулю упругости и низкой плотности ДКМ на основе бериллия является перспективным материалом в реакторостроении, а также в качестве армирующих элементов в композиционных материалах с повышенным удельным модулем упругости.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе магния. Незначительная растворимость кислорода в магнии дает возможность упрочнять его оксидами. Наибольший эффект достигается при введении оксида магния MgO в количестве до 1 %. Дальнейшее повышение содержания оксида практически не меняет временное сопротивление, но существенно снижает пластичность ДКМ. ДКМ Mg—MgO обладают низкой плотностью, высокой длительной прочностью и высоким сопротивлением ползучести при нагреве (табл. 114, 115). Применение этих материалов ограничено низкой коррозионной стойкостью в морской воде, а также на воздухе при температурах выше 400 °С. Наиболее перспективно применение ДКМ на основе магния в авиации, ракетной и ядерной технике в качестве конструкционного материала деталей несущих и корпусных изделий минимальной массы и повышенной прочности.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе никеля. В качестве упрочняющей фазы в ДКМ на основе никеля и его сплавов используются оксиды ThO_2 и HfO_2. Оксид тория ThO_2 в количестве до 2 % наиболее эффективен для упрочнения никеля и нихрома (ДКМ ВДУ-1, ТД-никель, DS-никель, TD-нихром). Из-за токсичности оксида тория его часто заменяют оксидом гафния HfO_2 в ДКМ ВДУ-2 (98 % Ni, 2 % HfO_2), что приводит к существенному снижению жаропрочности.

ДКМ на основе никеля предназначены в основном для работы при тем-

112. Механические свойства ДКМ Be—BeO

Об. доля BeO, %	t, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ, %
		МПа		
0,8	25	195	275	2
	400	145	245	14
	600	115	200	15
1,8	25	240	310	2
	400	175	240	4
	600	140	185	6,5
3,0	25	245	325	1
	400	210	325	7
	600	175	285	14,5

113. Длительная прочность ДКМ Be—Be_2C

Об. доля Be_2C, %	t, °С	σ_1	σ_{10}	σ_{100}
		МПа		
0	650	46	30	14
	730	14	9	4
2,5	650	70	55	40
	730	45	35	25

114. Механические свойства ДКМ Mg—MgO

Об. доля MgO, %	t, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ, %
		МПа		
0,3	20	—	270	—
1,0	20	250—260	285—300	8
1,0	400	—	50—60	9
1,0	450	16—18	25—30	9
1,0	500	—	15—20	10—12
2,0	20	—	270	—

115. Длительная прочность и ползучесть ДКМ Mg—1 % MgO

t, °С	σ_{100}, МПа	ε, 10 %/ч, при σ, МПа	
		5	10
450	—	9	600
500	10	80	3000

пературах выше 1000 °С. Характеристики длительной прочности при этих температурах выше у ДКМ с матрицей из нелегированного никеля, однако при температурах до 800 °С более высоким временным сопротивлением обладают ДКМ на основе никелевых сплавов типа TD-нихром (80 % Ni; 20 % Cr, упрочненный 2 % ThO_2) (табл. 116, 117).

116. Длительная прочность ДКМ на основе никеля

t, °С	σ_{10}, МПа		σ_{100}, МПа		σ_{1000}, МПа	
	ВДУ-1	ВДУ-2	ВДУ-1	ВДУ-2	ВДУ-1	ВДУ-2
			Лист			
900	—	—	115	95	105	85
1000	—	78	95	75	85	65
1100	78	62	75	55	65	45
1200	67	42	50	35	50	25
			Пруток			
900	—	—	150	105	140	95
1000	—	95	125	90	120	80
1100	108	75	105	70	100	65
1200	88	60	75	55	65	40

117. Механические свойства ДКМ на осиове никеля и его сплавов

t, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ
	МПа		%	
		ВДУ-1		
20	390—410	540—570	20—24	70—75
400	260—270	350—370	21—24	—
600	210—230	280—300	21—24	40—60
800	150—160	200—220	12—18	25—35
1000	120—130	140—160	10—13	20—25
1200	100—110	120—130	7—9	15—20
		ВДУ-2		
20	300—350	450—500	20—24	70—75
500	180—200	220—250	21—24	40—50
800	120—140	140—160	12—18	25—35
1000	95—100	105—120	10—13	25—30
1100	80—85	95—100	8—10	20—25
1200	75—78	80—85	7—9	15—20
		TD-нихром		
20	440—460	800—850	18—19	25
400	380—390	650—700	18—19	20
600	250—260	480—500	20—23	23
800	200—220	240—260	20—22	30
1000	110—120	130—140	15—16	25
1100	85—90	95—105	14—15	25
1200	75—80	80—90	10—12	15

118. Механические свойства ДКМ на основе кобальта

Химический состав матрицы, мас. доля, %						Об. доля ThO_2, %	t, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Co	Ni	Cr	Mo	W	Zr				
100	—	—	—	—	—	2	25 780 1090	960 170 85	**8** **16** **9**
99,8	—	—	—	—	**0,2**	2	25 780 1090	1020 250 140	13 **24** 13
62	**20**	18	—	—	—	2 2 4	25 1090 1090	1037 158 191	13 **14** —
58	**20**	**22**	—	—	—	4	780 1090	465 163	— —
50	**20**	30	—	—	—	4	780 1090	585 138	— —
75	**15**	—	**10**	—	—	4	780 1090	580 154	— —
70	**15**	—	**15**	—	—	4	780 1090	731 128	— —
60	10	20	—	10	—	4	780 1090	698 137	— —

ДКМ на основе никеля и его сплавов применяются главным образом в авиационной и космической технике для изготовления лопаток газовых турбин, камер сгорания, теплозащитных панелей, а также сосудов и трубопроводов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе кобальта. ДКМ на основе кобальта и его сплавов с хромом, молибденом и вольфрамом упрочняются оксидом тория ThO_2, содержание которого находится в пределах 2—4 %.

При температурах ниже полиморфного превращения (470 °С) ДКМ на основе кобальта имеют более высокое временное сопротивление и меньшую пластичность, чем ДКМ на основе никеля. При высоких температурах свойства кобальтовых и никелевых ДКМ отличаются незначительно. Введение небольших добавок циркония в кобальтовую матрицу повышает пластичность, временный и длительный пределы прочности (табл. 118, 119). Леги-

119. Длительная прочность ДКМ на основе кобальта

Химический состав матрицы, мас. доля, %				Об. доля ThO_2, %	t, °С	σ_{100}, МПа
Co	Ni	Cr	Zr			
99,8	—	—	0,2	2	1090	100—110
61,8	20	18	0,2	2	780	200
61,8	20	18	0,2	2	1090	70—80
61,8	20	18	0,2	4	1090	80—90

120. Механические свойства ДКМ хром-30

t, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %
20	340	15—20
300	265	—
650	245	—
980	125	30—40
1370	33	—

рование хромом и никелем существенно повышает жаростойкость кобальта, что позволяет использовать ДКМ при температурах до 1100 °С.

Дисперсно-упрочненные материалы на основе кобальта и его сплавов применяют для изготовления лопаток газовых турбин авиационных двигателей, а также деталей, работающих при повышенных температурах в парах ртути.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе хрома. Для упрочнения хрома и его сплавов используется оксид магния MgO или оксид тория ThO_2. ДКМ на основе сплава 99,5 % Cr и 0,5 % Ti, упрочненный 6 % MgO, называется хром-30; на основе сплава 97 % Cr, 25 % V и 0,5 % Si, упрочненный 3 % MgO — хром-90, а на основе 93,5 % Cr, 2,5 % V, 1 % Si, 0,5 % Ti, 2 % Ta и 0,5 % C, упрочненный 3 % MgO — хром-90 S.

Основное назначение ДКМ на основе хрома — конструкционный материал для деталей, работающих при высоких температурах в окислительной среде. Высокая эрозионная стойкость этих ДКМ под действием мощных тепловых потоков делает их перспективными материалами для сопл плазмотронов.

Свойства ДКМ на основе хрома приведены в табл. 120, 121.

121. Длительная прочность ДКМ на основе хрома

t, °С	σ_{100}, МПа	t, °С	σ_{100}, МПа	t, °С	σ_{100}, МПа
Хром-30		Хром-90		Хром-90	
930	35	980	56	980	195
980	25	1090	17,5	1090	56
1090	17,5	—	—	—	—

7. ВОЛОКНИСТЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Методы изготовления, используемые для получения композиционных материалов (КМ) из различных комбинаций волокон и матриц, непосредственно определяются свойствами этих волокон и матриц. Некоторые из основных методов, используемых для получения композиционных материалов, приведены в табл. 122. Описанные методы могут быть использованы для производства как готовых изделий, так и полуфабрикатов: листов, полос, труб и т. д. Простые полуфабрикаты, из которых получают более сложные и более крупногабаритные изделия, представляют собой моноволокна или прутки, покрытые материалом матрицы, пучки или полосы из одного и нескольких слоев волокон, заключенные в матрицу, широкоформатные листы, состоящие из матрицы, содержащей волокна. Эти полуфабрикаты могут быть при укладке сориентированы в одном направлении или перекрестно, уложены друг на друга и сформированы в изделия диффузионной сваркой или другим термомеханическим методом.

В специфических условиях использования в авиационной и космической технике КМ с металлической матрицей имеют определенные преимущества по сравнению с КМ с полимерной матрицей по своим высокотемпературным свойствам, стойкости к воздействию повышенной влажности, эрозии и повреждению посторонними объектами.

Сведения о процессах первичного производства композиционных материалов с алюминиевой матрицей приведены в табл. 123.

Методы производства композиционных материалов с металлической матрицей удобно классифицировать, разделив их на три основные категории процессов: твердофазные, жидкофазные и осаждения.

Свойства композиционных материалов в большой степени определяются

122. Существующие и перспективные методы изготовления композиционных материалов [8]

Общее название метода	Предварительные технологические операции	Заключительные технологические операции
Порошковая металлургия	Укладка волокон в матрицу или шликерное литье в каркас из волокон или скрепление волокон летучим связующим	Спекание, горячее прессование или горячее изостатическое прессование
Технология с использованием фольги	Использование летучего связующего или склеивающего вещества для скрепления волокон с фольгой, или прессование чередующихся слоев волокон и фольги (гладкой или с канавками), или точечное либо непрерывное (например, прокаткой) соединение фольги с волокнами	Диффузионная сварка горячим прессованием или горячим изостатическим прессованием
Литье	Литье готового изделия или нанесение жидкого металла на поверхность отдельных волокон или изготовленных из непрерывных лент	При получении готовых изделий заключительные операции не нужны. В других случаях — горячее прессование или горячее изостатическое прессование

123. Сведения о процессах первичного производства композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированной волокнами [8]

Процессы производства	Матрицы	Полуфабрикаты и изделия	Примечание
		Твердофазные процессы	
Горячее прессование	Al—B, Al—борсик, Al—Be, Al—сталь, Al—SiC, Al—SiO_2	Монослойные ленты, листы, стержни, лопатки турбин	Процесс контролируется напряжением течения или ползучестью. Могут использоваться вспомогательные средства — припои, легкоплавкие металлы или металлы, образующие эвтектику. Монослойные ленты и листы из материала Al—B, полученные ступенчатым прессованием
Прокатка	Al—B Al—сталь	Монослойные ленты, листы, балки	Прокаткой можно получать материал либо полностью компактный, либо нуждающийся в дальнейшем уплотнении
Совместная экструзия	Al—B	—	—
Сварка взрывом	Al—сталь	Монослойные ленты, листы	—

Процессы производства	Матрицы	Полуфабрикаты и изделия	Примечание
		Жидкофазные процессы	
Пропитка жидким металлом	Al—B	Прутки, стержни	Для получения полуфабрикатов с постоянным поперечным сечением, армированных однонаправленно
Пропитка жидким металлом	Al—C	Прутки, стержни	
Непрерывное литье	Al—борсик	Монослойные ленты, прутки, стержни, трубы, уголки	
То же	Al—SiC	То же	
»	Al—B (с покрытием BN)	Монослойные ленты	
		Процессы осаждения	
Плазменное напыление	Al—B, Al—борсик	Монослойные ленты	При плазменном напылении существует проблема предотвращения чрезмерного химического взаимодействия расплавленного алюминия с бором. Для производства полуфабрикатов необходимо дополнительно применять горячее прессование, пропитку жидким металлом или сварку
Электролитическое осаждение	Al—B, Al—SiC		
Осаждение из паровой фазы	Al—Be		
Процессы порошковой металлургии	Al—B	Монослойные ленты	Процессы не нашли широкого применения для получения композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированной волокнами

124. Свойства волокон, проволоки и нитевидных кристаллов для армирования композиционных материалов [42]

Материал	t, °С	ρ, т/м³	$\sigma_в$	E	$\sigma_в/(\rho g)$	$E/(\rho g)\cdot 10^{-3}$
			ГПа		км	
Волокно:						
борное	2040	2,63	2,45—3,43	372,0—411,0	95—133	14,4—15,9
углеродное	3000	1,70	1,96—2,96	196,0—296,0	117—176	11,7—17,4
карбида кремния	2827	3,21	1,96—3,92	451,0	62—124	14,3
оксида алюминия	2054	3,96	2,06—2,55	490,0	52—65	12,6
оксида циркония	2677	6,27	2,35—2,65	461,0	39—43	7,4
Проволока:						
бериллиевая	1284	1,84	0,98—1,25	284,0	55—65	15,7
вольфрамовая	3400	1,93	4,11	392,0	21	2,0
стальная	1300	7,80	3,53—3,92	196,0	45—51	2,5
титановая	1668	4,50	1,47—1,96	117,9	33—41	2,6
Нитевидные кристаллы:						
оксида алюминия	2054	3,96	27,4	490,0	710	12,6
нитрида алюминия	2400	3,30	14,7	372,0	455	11,5
карбида кремния	2650	3,21	36,2	569,0	1150	18,0
нитрида кремния	1900	3,18	14,7	485,0	472	15,6

армирующим материалом, его видом (волокно, проволока), количеством и ориентацией в матрице.

Неметаллические волокна — борные, углеродные, карбида кремния, оксида алюминия, оксида циркония, нитевидные кристаллы карбида и нитрида кремния, оксида и нитрида алюминия и др. Металлические армирующие — волокна (проволока) бериллия, вольфрама, молибдена, стали, титановых и других сплавов.

Свойства армирующих материалов, применяемых в СССР, приведены в табл. 124.

В табл. 125 приведены свойства волокон по сравнению со свойствами сплавов, нашедших наиболее широкое применение в качестве матрицы композиционных материалов за рубежом.

Наиболее широкое применение в качестве матрицы КМ получил алюминий, так как именно он определяет в первую очередь те самые удельные (т. е., отнесенные к плотности) характеристики композиционных материалов, благодаря которым эти материалы считаются перспективными во многих областях новой техники. Свойства отечественных композиционных материалов с алюминиевой матрицей приведены в табл. 126, 127, а зарубежных КМ — в табл. 128—130.

Композиционный материал ВКА-1 (табл. 126) состоит из чередующихся слоев фольги алюминия или алюминиевых сплавов и волокон бора. Для предотвращения взаимодействия фольги с борными волокнами при нагреве в условиях длительной эксплуатации на последние наносят барьерный слой карбида кремния или нитрида бора толщиной 3—5 мкм.

Композиционный материал марки ВКУ-1 на алюминиевой основе, армированный углеродными волокнами, обладает малой плотностью в сочетании с высокими прочностными свойствами

125. Свойства волокон и матричных алюминиевых сплавов [8]

Материал	ρ, т/м³	$\sigma_в$, ГПа	$E\cdot 10^{-3}$, ГПа
Монокристаллические волокна конечной длины («усы»)			
Al_2O_3	3,96	4,1—24,1	0,41—1,03
SiC	3,17	13,8—41,5	0,48—1,03
Si_3N_4	3,16	4,8—13,8	0,28—0,38
Непрерывные волокна			
S-стекло	2,50	4,5	0,09
SiO_2	2,19	5,9	0,07
B	2,63	3,1	0,40
Борсик	2,70	2,8	0,40
SiC	3,35	2,8	0,45
C	1,90	2,1	0,34
Be	1,83	1,3	0,24
Сталь	7,70	4,1	0,19
W	19,4	4,1	0,41
Матричные алюминиевые сплавы			
2024 *1	2,77	0,19	0,07
2024 *2	2,77	0,48	0,07
6061 *1	2,70	0,13	0,07
A384 (литой)	2,70	0,32	0,07
6061 *1	2,70	0,31	0,07

*1 Сплав не подвергался термической обработке.
*2 Сплав подвергался термической обработке.

126. Механические свойства одноосно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей [33]

Композиционный материал	Наполнитель: Материал	Наполнитель: Количество, %	ρ, т/м³	$\sigma_в/(\rho g)$, км	E, ГПа	$E/(\rho g)\cdot 10^{-3}$, км	$\sigma_в$, МПа (20 °С)	σ_{-1}, МПа (на базе 10^7 циклов)
ВКА-1	Борное волокно	50	2,65	45	240	9	1200	600
ВКУ-1	Углеродное волокно	30—40	2,2—2,3	42	270	12	900—1000	200
КАС-1	Стальная проволока	40	4,8	33	120	2	1600	350

127. Механические свойства композиционного материала алюминий—стальная проволока [42]

Материал	σ_{100} при 400 °С	σ_{-1} (на базе 10^7 циклов)	E	KCU, кДж/м²
	ГПа			
АД1 — 24 об. долей, % стальной проволоки с $\sigma_в$ = 2,45 ГПа	0,05	0,25	—	—
Алюминий — 25 об. долей, % проволоки ВНС-9 с $\sigma_в$ = = 37,5 ГПа	0,44	0,29	—	150—250
КАС-1*1 — алюминий 40 об. долей, %, проволоки ВНС-9 с $\sigma_в$ = = 3,53 ГПа	0,44	0,34	107,8	930

*1 Материалы КАС-1 имеют плотность 4,8 т/м³, предел прочности при сдвиге 0,065 ГПа и коэффициент Пуассона 0,33.

128. Механические свойства композиционного материала алюминиевый сплав 6061—бериллиевая проволока [42]

Об. доля волокна, %	$\sigma_в$	$\sigma_{пц}$	E	δ, %
	ГПа			
0	0,27	0,18	65,37	5,3
35	0,54	0,29	150,9	6,7
43	0,60	0,31	165,6	9,2
50	0,66—0,69	0,31	186,2—196,0	3—7,6

129. Механические свойства композиционного материала алюминиевый сплав 6061—Be в направлении под углом к оси укладки волокон [42]

Об. доля волокна, %	Угол укладки волокон, °	$\sigma_в$	$\sigma_{пц}$	E	δ, %
		ГПа			
35	30	0,33	0,16	148,0	2,1
35	45	0,27	0,13	122,5	1,7
35	60	0,26	0,13	116,6	0,5
35	90	0,26	0,18	123,5	0,3
43	45	0,30	0,09	130,3	0,6
43	90	0,26	0,11	142,1	0,2

130. Свойства композиционного материала алюминиевый сплав Х7002—Be при различных температурах [42]

Об. доля волокна, %	$\sigma_в$, ГПа					E, ГПа				
	при температуре, °С									
	20	120	200	250	300	20	120	200	250	300
0	0,35	0,34	0,25	—	0,13	68,6	68,6	63,4	56,4	—
10	0,41	—	—	—	—	89,6	88,2	86,2	77,4	59,8
22	0,47	0,41	0,33	0,29	0,22	118,6	117,6	114,7	109,8	—
40	0,55	0,50	0,41	0,38	0,33	172,5	—	—	—	—

и является перспективным для создания новых конструкций.

Для применения в различных отраслях техники перспективными являются КМ на основе алюминия, армированные высокопрочной стальной и бериллиевой проволокой, имеющие высокие прочностные характеристики и сравнительно малую стоимость.

Композиционный материал марки КАС-1 (табл. 127) на алюминиевой основе, армированный стальной проволокой, отличается от других КМ доступностью и низкой стоимостью армирующего материала, а также лучшей тепло- и электропроводностью. В качестве матрицы в этой композиции используется фольга из алюминия и алюминиевых сплавов; армирующим элементом служит проволока из аустенитной стали ЭП322 или аустенитно-мартенситной стали ВНС-9 диаметром 0,15—0,3 мм с временным сопротивлением 3,5—4,0 ГПа.

Весьма перспективными для применения в различных отраслях техники являются композиционные материалы на основе алюминия, армированные высокопрочной стальной и бериллиевой проволокой, имеющие высокие прочностные характеристики и сравнительно малую стоимость.

В табл. 131 приведены свойства при растяжении КМ с металлической ма-

131. Свойства при растяжении композиционных материалов с металлической матрицей, полученной фирмой TRW [8]

Диаметр волокон, мкм	Об. доля волокон, %	Матрица (тип волокон)	Состояние материала	В продольном направлении			В поперечном направлении		
				$\sigma_в$	$E \cdot 10^{-3}$	δ, %	$\sigma_в$	$E \cdot 10^{-3}$	δ, %
				ГПа			ГПа		
100	40	Алюминиевый сплав 6061 (бор)	А *1	1,20	0,2	0,7	0,11	0,11	0,3
	40	То же	В *2	1,3	—	—	0,17	—	—
	50	»	А	1,47	0,23	0,7	0,11	0,14	0,3
	50	»	Б	1,51	—	—	0,15	—	—
	60	»	А	1,78	0,26	0,7	0,11	0,16	0,3
	60	»	Б	1,72	—	—	0,15	—	—
	50	Алюминиевый сплав 7075 (бор)	А	1,36	0,23	0,6	0,10	—	—
	50	То же	Б	1,54	0,22	0,7	0,23	—	—
140	40	Алюминиевый сплав 6061 (бор)	А	1,28	—	—	0,16	0,11	0,4
	40	То же	Б	1,39	—	—	0,23	0,12	0,5
	50	»	А	—	—	—	0,15	0,11	0,4
	50	»	Б	—	—	—	0,30	0,14	0,6
	60	»	А	1,79	—	—	0,19	0,16	0,3
	60	»	Б	1,75	—	—	0,32	0,16	0,4
200	50	Алюминиевый сплав 6061 (бор)	А	1,54	0,23	0,8	0,13	0,14	0,7
	50	То же	Б	1,63	0,23	0,8	0,25	0,14	0,2
106	30	Титановый сплав Ti + 6Al + 4V (борсик)	А	1,06	0,19	0,6	—	—	—

Продолжение табл. 131

Диаметр волокон, мкм	Об. доля волокон, %	Матрица (тип волокон)	Состояние материала	В продольном направлении: $\sigma_в$, ГПа	$E \cdot 10^{-3}$, ГПа	δ, %	В поперечном направлении: $\sigma_в$, ГПа	$E \cdot 10^{-3}$, ГПа	δ, %
106	40	Титановый сплав Ti + 6Al + 4V (борсик)	А	1,10	—	—	—	—	—
	50	То же	А	1,13	0,26	0,5	0,27	0,20	0,4
	60	»	А	1,17	—	—	—	—	—
145	30	Титановый сплав Ti + 6Al + 4V (борсик)	А	1,21	0,20	0,7	0,58	0,18	2,7
	50	То же	А	1,34	0,26	0,6	0,45	0,21	0,8

*1 А — материал не подвергался термической обработке.
*2 Б — материал подвергался термической обработке.

132. Свойства композиционных материалов с матрицей из сплава Ti + 6Al + 4V, армированной бериллиевой проволокой [8], при растяжении при комнатной температуре

Способ получения материалов	Бериллиевая проволока: Состав	Диаметр, мм	$\sigma_в$, ГПа	Композиционные материалы: $\sigma_в$, ГПа	$\sigma_{0,2}$, ГПа	$E \cdot 10^{-3}$, ГПа	Объемное содержание, %
Горячее вакуумное прессование:							
проволоки и листа с канавками	Металл химической чистоты	1,5	0,64	0,70 *1	0,62 *1	0,19 *1	50
	То же	1,5	0,64	0,41 *2	—	0,13 *1	50
проволоки и фольги	»	1,5	0,64	0,79 *1	0,57 *1	0,21 *1	50
То же	Металл с добавкой 2 % BeO	0,5	0,96	0,92 *1	0,60 *1	0,18 *1	43
»	То же	0,5	0,96	0,35 *2	—	—	43
Совместная экструзия и прокатка	»	9,5	0,60	0,80 *1	0,50 *1	0,17 *1	38
То же	»	9,5	0,60	0,75 *2	—	0,17 *2	38
Совместная экструзия	»	9,5	0,60	0,75 *1	0,45 *1	0,18 *1	40
То же	»	9,5	0,60	0,52 *2	—	—	40
»	»	9,5	0,60	0,62 *2	—	0,13 *3	40

*1 Свойства вдоль оси волокон.
*2 Свойства в поперечном направлении.
*3 Свойства вдоль оси волокон при температуре 315 °С.

трицей и неметаллическими волокнами, изготовленных диффузионной сваркой, полученные фирмой TRW.

В большинстве зарубежных КМ на основе титана в качестве матрицы использован (α + β)-сплав Ti + 6Al + + 4V в виде фольги толщиной 0,05—0,10 мм. Широкое использование этого сплава было обусловлено его доступностью и приемлемой прочностью.

Свойства матричного титанового сплава Ti + 6Al + 4V

ρ, т/м³	4,43
$E \cdot 10^{-3}$, ГПа, при температуре, °С:	
20	0,11
205	0,10
315	0,09
425	0,08
540	0,06
$\sigma_{0,2}$, ГПа, при температуре, °С:	
20	0,90
205	0,69
315	0,55
425	0,59
540	0,41
$\sigma_{0,2/1000}$, ГПа, при температуре, °С:	
370	0,34
425	0,15
455	0,09

Свойства композиционных материалов с матрицей из сплава Ti + 6Al + + 4V, армированных бериллиевой проволокой, полученных различными методами, приведены в табл. 132. Горячее вакуумное прессование проводилось при температурах 580—700 °С и давлении 0,21 ГПа; материалы получали совместной экструзией при 700 °С.

В аэрокосмической технике находят все более широкое применение жаропрочные КМ, которые могут работать в условиях высоких температур и знакопеременных нагрузок. В этом случае малая плотность конструкционного материала не имеет такого большого значения, как его способность работать при более высоких температурах.

При испытаниях на длительную прочность измеряется высокотемпературная прочность КМ и ее стабильность в условиях действия постоянной нагрузки. Такие испытания КМ не только выявляют преимущества и недостатки в их изготовлении (эти вопросы в некоторой степени решаются при испытаниях на растяжение), но также и совместимость их компонентов в условиях испытания (т. е. под воздействием напряжений при высоких температурах в течение различных периодов времени).

В большинстве исследований жаропрочных КМ приводятся характеристики их прочности в течение 100 ч испытаний в интервале температур 649—1204 °С (табл. 133),

133. Пределы длительной и удельной длительной прочности композиционных материалов и конкурирующих с ними суперсплавов за 100 ч [8]

Температура испытания, °С	Композиционный материал или суперсплав: Тип волокна	Об. доля волокна, %	Матрица или монолитный сплав	ρ, т/м³	σ_{100}, ГПа	$\sigma_{100}/(\rho g)$, км
649	Mo	30	Ti + 6Al + 4V	6,28	0,08	1,35
649	Mo	16,5	Ti + 6Al + 4V	5,45	0,13	2,44
649	Mo	16,5	Ti + 6Al + 4V	5,45	0,17	3,30
649	—	—	Хастеллой-X	8,22	0,50	3,81
649	W	30	То же	11,54	0,58	5,33
649	—	—	Полоса I	8,30	0,73	9,15

Продолжение табл. 133

Температура испытания, °С	Композиционный материал или суперсплав: Тип волокна	Об. доля волокна, %	Матрица или монолитный сплав	ρ, т/м³	σ_{100}, ГПа	$\sigma_{100}/(\rho g)$, км
732	—	—	Хастеллой-X	8,22	0,18	2,29
732	W	30	То же	11,54	0,50	4,57
816	—	—	Полоса II	8,30	0,47	5,84
816	—	—	Полоса III	8,86	0,22	2,54
816	—	—	Хастеллой-X	8,22	0,95	1,19
816	—	33	То же	11,87	0,32	2,79
816	—	50	Медь	14,19	0,40	3,05
816	—	75	То же	16,69	0,62	3,81
899	—	—	Хастеллой-X	8,21	0,06	0,71
899	W	33	То же	11,87	0,28	2,44
982	—	—	Полоса II	8,30	0,21	2,54
982	—	—	Полоса III	8,86	0,12	1,42
982	—	37	Хастеллой-X	8,22	0,03	0,38
982	W	37	То же	12,32	0,24	2,03
1000	—	—	Нимокаст-258	7,89	0,09	1,17
1000	—	—	EPD-16	8,30	0,14	1,8
1000	—	40	Нимокаст-258	12,46	0,21	1,91
1000	—	40	EPD-16	12,73	0,26	2,11
1000	W + 5Re	20	Сплав 713C	10,82	0,15	1,45
1093	—	—	Полоса II	8,30	0,09	1,09
1093	—	—	Полоса III	8,86	0,1—0,11	1,19—1,35
1093	W + $1ThO_2$ или CS-218	70	Сплав NASA-3	16,19	0,24	1,52
1093	W + $2ThO_2$	70	То же	16,19	0,33	2,13
1100	—	—	Нимокаст-258	7,89	0,02	0,30
1100	—	—	EPD-16	8,30	0,05	0,64
1100	W	40	Нимокаст-258	12,46	0,11	0,89
1100	W	40	EPD-16	12,73	0,13	1,04
1100	W + 5Re	20	Сплав 713C	10,82	0,09	0,89
1100	W + 5Re	24	Сплав J(Nb)	8,86	0,17	1,98
1204	W + $1ThO_2$ или CS-218	70	Сплав NASA-3	16,19	0,01	0,7
1204	W + 3Re	24	Сплав J(Nb)	8,86	0,17	1,98

Среди композиционных материалов с магниевой матрицей наиболее интересными являются материалы, упрочненные борными волокнами, поскольку именно в магниевой матрице удается наиболее полно реализовать высокие прочностные характеристики борных волокон. Некоторые механические свойства композиций на основе магния с различным содержанием борных волокон приведены в табл. 134.

134. Механические свойства композиционных материалов магний—борное волокно [42]

Об. доля волокна, %	ρ, т/м³	E	$\sigma_в$	$\sigma_и$	$\sigma_{сж}$
		ГПа			
25	1,96	19,1—218,5	0,86—0,20	11,2	—
30 *1	—	—	0,94	—	—
35	—	—	—	—	2,01
50 *2	2,20	196,0	12,3	—	—
70	—	—	—	—	31,4
75	—	1,3	1,3	1,57	—

*1 Композиция Mg — 30 об. долей волокна, %, имеет удлинение при разрушении 0,6 %.

*2 Композиция Mg — 50 об. долей волокна, %, имеет временное сопротивление при растяжении 0,78 ГПа при 450 °С и 0,58 ГПа при 500 °С. Длительная прочность этой композиции 0,52 ГПа при 400 °С.

8. ЭВТЕКТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Эвтектическими композиционными материалами (ЭКМ) называются сплавы эвтектического или близкого к эвтектическому состава, в которых упрочняющей фазой служат ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации.

Методы, применяемые для направленной кристаллизации эвтектических сплавов (аналогичные методам получения монокристаллов: Бриджмена, Чохральского, зонной плавки), должны обеспечивать плоский фронт кристаллизации — поверхность раздела между жидкой и твердыми фазами и однонаправленный отвод теплоты. В этом случае фазы эвтектики кристаллизуются перпендикулярно к поверхности раздела и следуют за ней по мере перемещения фронта кристаллизации, образуя ориентированные волокнистые или пластинчатые кристаллы.

Структура эвтектических композиционных материалов, создаваемая естественным путем, а не в результате искусственного введения армирующей фазы в матрицу, обладает высокой прочностью, термической стабильностью до температур, близких к температуре плавления эвтектики, и лишена многих недостатков, связанных с химической совместимостью между матрицей и упрочняющей фазой искусственных композиционных материалов.

Из эвтектических композиционных материалов изделия можно получать за одну операцию, исключая трудоемкие процессы изготовления армирующих волокон, введение и ориентацию их в матрице.

К недостаткам эвтектических композиционных материалов относятся повышенные требования к чистоте исходных материалов, зависимость свойств от скорости процесса направленной кристаллизации и ограниченная возможность изменения объемного содержания армирующей фазы, которое определяется в основном диаграммой состояния системы.

Выбор эвтектических композиционных материалов заключается в подборе матричной основы, удовлетворяющей заданной плотности, температуре эксплуатации, коррозионной стойкости и др., и эвтектики, обеспечивающей необходимую прочность.

Эвтектические композиционные материалы на основе алюминия. ЭКМ на основе алюминия получают в основном

135. Механические свойства ЭКМ на основе алюминия [29]

ЭКМ	v, см/ч	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Al—Al_3Ni	3,3	335	2,3
	10,8	420	—
	30,0	340	—
Al—$CuAl_2$	—	270	0,7
	150	350—450	—
	630	500—650	—
Al—Be	0,1	70	—
Al—Si	0,27	120	—
	48,0	150	—
	—	220 *1	4—20

*1 ЭКМ Al—Si с $\sigma_в$ = 220 МПа после закалки.

136. Влияние угла ориентации волокнистой фазы на механические свойства ЭКМ Al—Al_3Ni [19]

θ°	$\sigma_в$, МПа	δ, %
0	335	2,3
25	100	16,5
45	75	48
90	40	14

137. Влияние угла ориентации пластинчатой фазы на прочность при изгибе ЭКМ Al—$CuAl_2$ [19]

θ°	$\sigma_и$, МПа	$a_{пр}$, мм
0	330	0,4
30 *1	230	1,5
45 *1	195	1,5
75	145	0,2
90	140	0,15

*1 Образец не разрушился.

методом направленной кристаллизации (методом Бриджмена).

Прочность ЭКМ зависит от скорости кристаллизации v (табл. 135) и ориентации армирующей фазы по отношению к направлению приложения нагрузки (табл. 136, 137) [19].

Наибольшая прочность и минимальное удлинение соответствуют растяжению образцов ЭКМ Al—Al_3Ni вдоль волокон (θ = 0°), а минимальная прочность и максимальное удлинение — растяжению под углом 45°. В ЭКМ Al—$CuAl_2$ с пластинчатой формой армирующей фазы $CuAl_2$ максимальный прогиб $a_{пр}$ при ориентации пластинок под углом 30—45°.

Существенным недостатком пластинчатой эвтектики Al—$CuAl_2$ является большая хрупкость при испытаниях на ударную вязкость.

При повышенных температурах ЭКМ на основе алюминия достаточно хорошо сохраняют прочность на разрыв; при этом, начиная с температуры 227 °С, у ЭКМ Al—$CuAl_2$ многократно возрастает относительное удлинение (табл. 138) [19].

138. Механические свойства ЭКМ Al—Al_3Ni и Al—$CuAl_2$ при повышенных температурах [19]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Al—Al_3Ni		
20	335	2,3
100	295	—
200	240	—
300	180	—
400	120	—
500	75	—
Al—$CuAl_2$		
20	270	0,7
100	270	3—6
200	220	6—8
300	120	50
400	70	110
500	30	185

Кроме того, системы Al—Al_3Ni и Al—$CuAl_2$ обладают высокой стабильностью структуры при повышенных температурах. Волокна Al_3Ni не укрупняются и не подвергаются сфероидизации при нагреве до 611 °С.

ЭКМ на основе алюминия обрабатываются холодной пластической деформацией и хорошо свариваются методом диффузионной сварки.

ЭКМ Al—Al_3Ni и Al—$CuAl_2$ применяются как в качестве конструкционного материала, так и для изготовления высокопрочных электрических проводов и контактов выключателей, благодаря низкому электросопротивлению — близкому к электросопротивлению алюминия.

Эвтектические композиционные материалы на основе никеля и кобальта. ЭКМ на основе никеля и кобальта получают методом направленной кристаллизации или методом зонной плавки.

Никелевые и кобальтовые ЭКМ являются жаропрочными материалами и по поведению при растяжении делятся на две группы: хрупкие и пластичные. Хрупкими, например, являются никелевые пластинчатые ЭКМ с объемной долей упрочнителя более 33—35 %. К пластичным относятся волокнистые ЭКМ с объемной долей упрочнителя 3—15 %, например сплавы никеля и кобальта, упрочненные монокарбидами тантала, ниобия, гафния.

Физико-механические свойства никелевых и кобальтовых ЭКМ представлены в табл. 139 [58].

139. Свойства никелевых и кобальтовых ЭКМ [58]

Матрица	Упрочнитель	Об. доля упрочнителя, %	$t_{пл}$, °С	ρ, т/м³	E, ГПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Ni	NiBe	38—40	1157	—	215	918	9,0
Ni	Ni_3Nb	26	1270	8,8	—	745	12,4
Ni	Cr	23	1345	8,0	—	718	29,8
Ni	NiMo	50	1315	9,5	—	1250	1
Ni	Ni_3Ti	29	1300	8,2	—	—	1
Ni	W	6	1500	—	—	830	45
Ni	TiC	5,5	1307	—	—	—	—
Ni	HfC	15—28	1260	—	—	—	—
Ni	NbC	11	1328	8,8	—	890	9,5
Ni	TaC	~10	—	—	—	—	—
Ni—Cr	NbC	11	1320	—	—	—	—
Ni—Co—Cr—Al	TaC	~9	—	8,8	—	1650	5
Ni_3—Al	Ni_3Nb	44	1280	8,44	242	1240	0,8
Ni_3—Al	Ni_3Nb	32	1280	—	—	1230	2,0
Ni—Ni_3Al	Ni_3Nb	—	1270	—	—	1140	2,3
Ni_3Al	Ni_3Ta	~65	1360	10,8	—	930	1
Ni—Ni_3Al	Ni_3Ta	—	1360	—	—	1060	5
Ni_3Al	Ni_7Zr_2	42	1192	—	—	—	—
Ni_3Al	Mo	26	1306	8,18	138	1120	21
Ni_3Al	Cr	34	1450—1455	6,4	182	1240	1
Ni—Cr	$(Cr, Ni)_7C_3$	30	1305	—	200—290	685—960	2—11
Co	CoAl	35	1400	—	172	500—585	6

Продолжение табл. 139

Матрица	Упрочнитель	Об. доля упрочнителя, %	$t_{пл}$, °С	ρ, т/м³	E, ГПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %
Co	CoBe	23	1120	—	—	—	—
Co	Co_3Nb	~50	1235	—	—	—	—
Co	Co_2Ta	35	1276	—	—	—	—
Co	Co_7W_6	23	1480	—	—	750	<1
Co	TiC	16	1360	—	—	—	—
Co	HfC	15	—	—	—	—	—
Co	VC	20	—	—	—	—	—
Co	NbC	12	1365	8,8	—	1030	2
Co	TaC	16	1402	9,1	222	1035	11,8
Co—Cr	NbC	12	1340	—	—	1280	2
Co—Cr	TaC	~9	1360	9,0	210	1035—1160	16—20
Co—Cr	$(Cr, Co)_7C_3$	30	1304	8,0	296	1280—1380	1,5
Co—Cr	$(Cr, Co)_{23}C_6$	40	1340	7,91	276	1200	0,96
Co—Cr—Al	$(Cr, Co)_7C_3$	28	1295	7,8	283	1730—2011	2,5—1,0

Высокие механические свойства волокнистых ЭКМ на основе никеля и кобальта, упрочненных карбидами, объясняются композиционной структурой, при которой пластичная матрица армирована высокопрочными ориентированными кристаллами. Дополнительное увеличение прочности ЭКМ достигается легированием твердого раствора матрицы или ее дисперсным упрочнением.

Пластинчатые ЭКМ, по сравнению с волокнистыми, более чувствительны к скорости кристаллизации, влияющей на расстояние между пластинами.

Быстрая кристаллизация, приводящая к уменьшению расстояния между пластинами, способствует значительному упрочнению ЭКМ. По сравнению с жаропрочными сплавами с интерметаллидным упрочнением ЭКМ при высоких температурах разупрочняются менее интенсивно (табл. 140, 141) [58].

Пределы длительной прочности ряда ЭКМ на основе никеля и кобальта превышают пределы длительной прочности современных жаропрочных сплавов, особенно при температурах выше 900 °С (табл. 142) [29].

ЭКМ на основе никеля и кобальта используют в основном для изготовления литых рабочих и сопловых лопаток, а также крепежных деталей камер сгорания газотурбинных двигателей.

Эвтектические композиционные материалы на основе тантала и ниобия. ЭКМ на основе тантала и ниобия получают методом направленной кристаллизации.

Если армирующая фаза ЭКМ Ta—Ta_2C кристаллизуется в форме пластин, то временное сопротивление составляет 560 МПа при относительном удлинении 2 %. При кристаллизации армирующей фазы в форме стержней временное сопротивление этого ЭКМ достигает 1050 МПа при относительном удлинении 1,5 % (табл. 143) [19].

Прочность ЭКМ Nb—Nb_2C при комнатной температуре в 5 раз выше прочности ниобия и, благодаря высокой термической стабильности, сохраняет

140. Временное сопротивление волокнистых ЭКМ в зависимости от температуры [58]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	t, °С	$\sigma_в$, МПа	t, °С	$\sigma_в$, МПа	t, °С	$\sigma_в$, МПа
Ni—NbC		(Ni—Co—Cr—Al)—TaC		(Co—Cr)—TaC		(Co—Cr)—$(Cr, Co)_7C_3$	
20	890	20	1650	20	1160	20	1380
200	780	200	1545	200	1070	200	1370
400	680	400	1400	400	940	400	1350
600	590	600	1205	600	830	600	1240
800	490	800	910	800	680	800	920
900	420	900	690	900	560	900	690
1000	320	1000	500	1000	410	1000	410
1100	200	1100	330	—	—	—	—
1200	120	1200	200	—	—	—	—
NiAl—Cr		Ni_3Al—Ni_3Ta		(Co—Cr—Ni)—TaC		(Co—Cr—Al)—$(Cr, Co)_7C_3$	
20	1240	20	930	20	1060	20	1730
200	1180	200	895	200	1020	200	1615
400	980	400	820	400	920	400	1500
600	650	600	780	600	850	600	1310
800	400	800	700	800	690	800	940
900	330	900	630	900	580	900	700
1000	280	1000	580	1000	440	1000	520
1100	210	1100	390	—	—	1100	350
1200	70	1200	260	—	—	1200	240

141. Временное сопротивление пластинчатых ЭКМ в зависимости от температуры [58]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	t, °С	$\sigma_в$, МПа	t, °С	$\sigma_в$, МПа	t, °С	$\sigma_в$, МПа
Ni—NiMo		Ni—Ni_3Nb		Ni_3Al—Ni_3Nb		Ni—Ni_3Ti	
20	1250	20	840	20	1130	20	940
200	1190	200	780	200	1100	800	540
400	1140	400	700	400	1030	900	320
600	1090	600	630	600	1000	1000	130
800	1000	800	470	800	950	(Ni_3Al—Ni_3Ti)—Ni_2TiAl_2	
900	800	900	350	900	900	1100	270
1000	550	1000	250	1000	810	Ni_3Al—Ni_7Zr_2	
1100	320	—	—	1100	650	1100	430
1200	140	—	—	1200	300	—	—

142. Жаропрочность ЭКМ на основе никеля и кобальта [29]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	τ, ч
Ni_3Al—Ni_3Nb		
900	520	100
1000	300	100
1100	140—150	100
(Ni—Ni_3Al)—Ni_3Nb		
800	670	100
900	450	100
1000	200	100
1100	135	100
(Ni—Co—Cr—Al—W—Re—V)—TaC		
871	520	156
871	550	154
982	310	125
982	275	300
1093	140	171
1093	120	300
(Co—Cr)—TaC		
800	300	710
1072	120	170
1100	105	618
(Co—Cr—Ni)—TaC		
800	300	4000
1070	120	1300
1100	100	1200
1150	100	100
(Co—Cr)—(Cr, Co)$_7C_3$		
1000	150—160	100
1100	70—80	100
(Co—Cr)—TaC		
649	375	1000
760	350	1000
871	300	1000
982	225	1000
1050	160	403
1093	140	1000
1250	55	100

такие высокие значения при повышении температуры.

ЭКМ на основе тантала и ниобия используют для изготовления деталей

143. Временное сопротивление ЭКМ Ta—Ta_2C и Nb—Nb_2C в зависимости от температуры [19]

t, °С	$\sigma_в$, МПа
Ta—Ta_2C	
20	1050
1100	390
1200	365
1300	325
1400	270
1500	230
1600	180
1640	165

Продолжение табл. 143

t, °С	$\sigma_в$, МПа
Nb—Nb_2C	
20	1070
200	1025
400	955
600	870
800	795
1000	685
1093	632
1200	565
1300	470
1400	385
1500	290
1600	170
1649	128

самолетов и ракет, работающих при повышенных температурах (лопатки двигателей, защитные кромки).

9. ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

В конструкции летательных аппаратов все более широко начинают применяться полимерные композиционные материалы (КМ), которые по сравнению с традиционными сплавами имеют ряд преимуществ, позволяющих значительно снизить массу, повысить прочность, жесткость, теплостойкость конструкций. При создании таких материалов применяют непрерывные и дискретные поликристаллические волокна и нитевидные кристаллы бора, углерода и различных соединений (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др.). В табл. 144 приведены свойства наиболее распространенных в СССР и за рубежом полимерных КМ на основе непрерывных стеклянных, углеродных, борных и органических волокон. Из большого числа разработанных полимерных КМ наиболее перспективными являются КМ на основе углеродных волокон, т. е. углепластики. К основным преимуществам углепластиков следует отнести: сравнительно малую плотность, высокую статическую прочность и сопротивление усталости, жесткость, коррозионную стойкость, износостойкость, малый коэффициент температурного расширения и электропроводность. В табл. 145 приведены свойства углеродных волокон, полученных из вискозного сырья. Большое число различных марок углеродных волокон, получаемых в СССР и за рубежом из ПАН-волокна, можно условно разделить на две группы:

1) высокопрочные волокна с пределом прочности 2,45—3,14 ГПа и сравнительно малым модулем упругости 176,4—215,6 ГПа;

2) высокомодульные волокна с пределом прочности 1,37—2,16 и модулем упругости 343—350 ГПа.

В табл. 146 приведены основные характеристики физико-механических свойств различных эпоксифенольных карбоволокнитов: КМУ-1л на основе углеродной ленты; КМУ-1у на основе углеродного жгута; КМУ-1в — на основе того же жгута, вискеризованного нитевидными кристаллами. Использование ленты и жгутов, состоящих из более прочных моноволокон, обес-

144. Свойства высокомодульных волокон и однонаправленных эпоксидных композиционных материалов [53]

Тип волокон	Марка волокна	Свойства волокон длиной 10 мм		Свойства композиционных материалов *1		$\sigma_в/(\rho g)$, км
		$\sigma_в$	E	$\sigma_в$	E	
		ГПа		ГПа		
Стеклянные	ВМ-1	3,82	102,9	2,01	69,1	98
»	ВМП	4,61	93,2	2,35	64,7	114
»	М-11	4,61	107,9	2,15	72,6	98
Борные	БН (сорт 2)	2,75	392,2	1,37	225,5	75
»	БН (сорт 1)	3,14	382,4	1,72	274,6	87
»	Борофил (США)	2,75	382,4	1,57	225,5	80
Органические	СВМ	2,75	117,7	1,47	58,8	111
»	Кевлар-49 (США)	2,75	130,4	1,37	80,4	100

*1 Объемная доля наполнителя 60 %.

145. Свойства углеродных волокон [5]

Марка волокна (страна)	ρ, т/м³	σ	$E\cdot10^{-3}$	$\sigma_в/(\rho g)$	$E/(\rho g)\cdot10^{-3}$
		ГПа		км	
ВМН-4 (СССР)	1,75	1,96—2,45	0,25—0,29	118—137	14,2—17,6
ВМН-5 (СССР)	1,75	2,45—2,94	0,32—0,49	142—171	18,2—20,6
Модмор 2 (Англия)	1,80	2,35—3,04	0,24—0,30	133—172	13,3—17,2
Торнел-50 (США)	1,63	19,6	0,33	120	20,8
Торнел-60 (США)	1,69	2,16	0,39	130	23,7
Торнел-70 (США)	1,86	2,55	0,51	140	28,0
Торейка М-40А (Япония)	1,95	1,96	0,36	102	19,0

146. Характеристики физико-механических свойств однонаправленных эпоксикарбоволокнитов, эпоксибороволокнитов и карбоволокнита с углеродной матрицей [53]

Характеристика	Карбоволокниты			Бороволокниты				Карбоволокнит КУП-ВМ с углеродной матрицей
	КМУ-1л	КМУ-1у	КМУ-1п	КМБ-1м	КМБ-1к	КМБ-2к	КМБ-3к	
ρ, т/м³	1,4	1,47	1,55	2,1	2,0	2,0	2,0	1,35
$\sigma_в$, ГПа	0,65	1,02	1,00	1,30	0,9	1,0	1,30	0,20
$\sigma_{сж}$, ГПа	0,35	0,40	0,54	1,16	0,92	1,25	1,50	0,26
$\sigma_и$, ГПа	0,80	1,10	1,20	1,75	1,25	1,55	1,45	0,64
τ, ГПа	0,02	0,03	0,04	0,06	0,04	0,06	0,07	0,04
E, ГПа	120	180	180	270	214	260	260	165
$E_и$, ГПа	100	145	160	250	223	215	238	160
G, ГПа	2,8	3,5	5,35	9,8	7,0	6,8	7,2	—
σ_{1000}, ГПа (на базе 10^7 циклов)	0,47	0,88	0,90	1,37	1,22	1,20	1,30	—
σ_{-1}, ГПа	0,30	0,50	0,35	0,40	0,35	0,40	0,42	0,24
δ, %	0,5	0,6	0,6	0,3—0,5	0,3	0,3—0,4	0,3—0,4	—
μ	0,22	0,27	0,22	0,22	0,22	0,18	0,2	—
KCU, кДж/м²	50	44	84	90	78	110	110	12

печивает повышение прочности карбоволокнитов при растяжении и изгибе.

Карбоволокниты КМУ-3 и КМУ-3л на основе эпоксианилиноформальдегидного связующего предназначены для изделий, эксплуатирующихся при температурах 100 °С. До температуры 80 °С карбоволокниты сохраняют свои прочностные и упругие свойства неизменными, соответствующими свойствам матерналов КМУ-1у и КМУ-1л.

Карбоволокниты на эпоксифенольном связующем используют в изделиях, длительно работающих при температурах до 200 °С. Для изделий, длительно работающих при температурах до 300 °С, применяют карбоволокниты марки КМУ-2 и КМУ-2л на полиимидном связующем.

Показатель, наиболее чувствительный к температурному воздействию, — предел прочности при изгибе и межслойном сдвиге, линейно понижающийся с ростом температуры вплоть до температуры стеклования связующего.

Изделия из карбоволокнитов можно изготовлять несколькими методами: «мокрой» намоткой, когда жгуты или ленты пропитывают связующим в процессе укладки на вращающуюся оправку, пропиткой связующим под давлением, когда заготовку из сухого наполнителя пропитывают связующим в замкнутой форме, выкладкой или намоткой в виде пропитанных смолой непрерывных лент или листов и последующего формования при повышенных давлении и температуре. Метод выбирают в зависимости от геометрических особенностей изделия и типа применяемого связующего. Природа связующего определяет основные технологические параметры формования материалов: давление, время и температуру. Наиболее технологичны карбоволокниты КМУ-3, температура и давление формования которых минимальны.

Особенность карбоволокнитов — их высокая усталостная прочность, бо́льшая, чем у боро- и стекловолокнитов, и имеющая тот же порядок, что и прочность титана и легированных сталей. Отличаясь высокой демпфирующей способностью, карбоволокниты существенно превосходят металлы по вибропрочности. Ориентируя волокна под углом друг к другу, можно в больших пределах изменять демпфирующую способность карбоволокнитов и предотвращать резонансный режим деталей, не изменяя их геометрии.

К недостаткам слоистых карбоволокнитов относится их низкая прочность при сжатии и межслойном сдвиге, увеличение которой в 1,5—3 раза достигается различными методами поверхностной обработки углеродных волокон; окислением на воздухе, травлением в азотной кислоте, выращиванием нитевидных кристаллов.

Теплофизические характеристики карбоволокнитов существенно анизотропны. В направлении, перпендикулярном к плоскости укладки волокон, они на 30—50 % выше, чем у стеклопластиков. В направлении укладки волокон теплофизические свойства изменяются в зависимости от ориентации волокон и их содержания в направлении измерения. Необычна зависимость относительного удлинения однонаправленного карбоволокнита от температуры, определяемая термическими свойствами карбоволокон, коэффициент линейного расширения которых в интервале температур 20—300 °С отрицателен. Коэффициент термического расширения однонаправленного карбоволокнита КМУ-1 в интервале температур 20—120 °С близок к нулю, в интервале 120—200 °С равен $0{,}5\times10^{-6}$, 1/°С.

Полимерные бороволокниты отличаются от других композиционных материалов сочетанием таких свойств, как высокое сопротивление сжатию, срезу, сдвигу, низкая ползучесть, высокие твердость и модуль упругости.

В качестве армирующего наполнителя бороволокнитов используют борное волокно в виде единичной нити непрерывной длины диаметром 100 или 150 мкм и комплексные боростеклонити, состоящие из семи или 49 параллельных бороволокон, сплетенных вспомогательной стеклянной нитью высокого метрического номера для придания формоустойчивости.

Прочность бороволокнитов при изгибе и растяжении зависит от средней прочности бороволокна, используемого для их изготовления. Использование бороволокна сортов 1, 2 и 3 обеспечивает получение бороволокнитов со средним значением предела прочности при изгибе 1,75; 1,60 и 1,20 ГПа соответственно. При этом предел прочности при сжатии остается постоянным на уровне 1,20 ГПа.

Использование комплексных боростеклонитей позволяет в несколько раз повысить производительность процесса намотки и сократить общую продолжительность технологического цикла изготовления материала, но при этом увеличивается толщина монослоя и несколько уменьшается содержание борного волокна в композиционном материале, что вызывает незначительное снижение его упругопрочностных свойств (см. табл. 145). В зависимости от температуры эксплуатации изделий указанные наполнители сочетают с модифицированными

эпоксидными и полиимидными связующими. Бороволокниты КМБ-1 и КМБ-1к на эпоксиизоцианатном связующем предназначены для длительной работы при температуре 200 °С. Бороволокнит КМБ-2к на основе амидоимидного связующего работоспособен при температуре 300 °С. Материалы КМБ-3 и КМБ-3к на модифицированном эпоксидном связующем, отличающемся повышенными прочностными свойствами и технологичностью, характеризуются более высоким пределом прочности при сдвиге и сжатии и низким давлением формования при переработке, но рабочие температуры этих материалов не превышают 100 °С.

Своеобразие геометрических, механических и физико-химических характеристик борного волокна предопределяет особенности свойств бороволокнитов. Характерная ячеистая микроструктура обеспечивает достижение высокой прочности при сдвиге по границе раздела упрочняющей и связующей компонент. Отсутствие крутки и искривленности волокон, обусловленных большим диаметром и высокой жесткостью волокон, благоприятствует более полной реализации их механических свойств и повышает сопротивление бороволокнитов при сжатии. Однако большой диаметр волокна вызывает увеличение эффективной длины и повышение чувствительности бороволокнитов к нарушению целостности волокон, что приводит к некоторому снижению прочности бороволокнитов при растяжении по сравнению с прочностью материалов на основе равнопрочного тонковолокнистого наполнителя.

Высокая длительная прочность, неизменность деформативных свойств во времени и низкое удлинение при разрыве волокон бора предопределяют высокий уровень статической усталости и малую ползучесть материалов на их основе. Достаточно высокое сопротивление усталости бороволокнитов, составляющее для материала КМБ-1м и КМБ-2 0,35—0,40 ГПа, может быть увеличено при использовании более высокопрочной матрицы.

Наряду с отмеченными особенностями механические свойства бороволокнитов подчиняются общим для армированных систем закономерностям. Регулирование свойств бороволокнитов достигается варьированием схем ориентации наполнителя.

Теплофизические характеристики бороволокнитов так же, как и карбоволокнитов, анизотропны. Бороволокниты стойки к воздействию проникающей радиации. Длительное воздействие воды, органических растворителей и горючесмазочных материалов не влияет на изменение их механических свойств.

Карбоволокниты с углеродной матрицей находят применение для тепловой защиты, дисков авиационных тормозов, химически стойкой аппаратуры, заменяя различные типы графитов. Сохранение углеродными волокнами присущей им высокой прочности до температуры сублимации, высокая прочность сцепления с коксом связующего придает этим композициям высокие механические и абляционные свойства, стойкость к термическому удару и другие ценные свойства. Процесс изготовления карбоволокнитов с углеродной матрицей состоит из трех стадий: получения обычного карбоволокнита на полимерном связующем, пиролиза полученного карбоволокнита в инертной или восстановительной среде при температуре 1000—1500 °С, пороуплотнения дополнительной пропиткой связующим с последующей карбонизацией или пироуглеродом.

Свойства материалов типа КУП-ВМ изменяются в зависимости от типа и ориентации волокна, плотности коксового остатка, количества пироуглерода.

По значениям прочности и ударной вязкости материал КУП-ВМ превосходит в 5—10 раз специальные графиты и при нагреве в инертной атмосфере в вакууме сохраняет неизменной прочность до температуры 2200 °С. При нагреве на воздухе материал без специального покрытия начинает окисляться при 450 °С.

При трении одного карбоволокнита с углеродной матрицей по другому коэффициент трения их высок (0,35—0,45), а износ мал (0,7—1 мкм на торможение). Применение углеродного материала вместо чугуна позволяет снизить массу тормозных дисков на 40—50 % и увеличить ресурс эксплуатации в 1,5—2 раза.

147. Свойства одноосно-армированных композиционных материалов с полимерной матрицей [33]

Материал	ρ, т/м³	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_в/(\rho g)$, км	δ, %	E, ГПа	$E/(\rho g)\cdot 10^{-3}$, км	σ_{-1}*1, МПа
Органоволокниты с упрочнителем:							
эластичным	1,15—1,3	100—190	8—15	10—20	2,5—8,0	0,22—8,0	100
жестким	1,2—1,4	650—700	50	2—5	35	2,7	—
Стекловолокниты	2,2	2100	96	—	70	3,2	—

*1 На базе 10^7 циклов.

Механические свойства некоторых одноосно-армированных волокнистых композиционных материалов представлены в табл. 147. Самую высокую прочность и удельную прочность имеют стекловолокниты. Временное сопротивление стекловолокнитов повышается приблизительно в 3 раза по мере увеличения объемного содержания наполнителя.

Основные недостатки современных углепластиков с эпоксидной матрицей связываются с пониженными вязкостью разрушения, ударной стойкостью и температурой использования. Новые разработки и исследования направлены на улучшение указанных характеристик и, в первую очередь, на повышение теплостойкости и вязкости разрушения. Углепластики на основе бисмалеидов и полиимидов дешевы и широко применяются в промышленности. По сравнению с эпоксидными полимерами они имеют более высокую теплостойкость и ударную прочность, легко перерабатываются и представляются весьма перспективными при использовании КМ на их основе в силовых конструкциях.

Жидкокристаллические полимеры представляют новый класс полимеров, которые имеют упорядоченную структуру в растворах (лиотропную) или в расплавах (термотропную). Фирмой Силанис разрабатываются термотропные полимеры и, в частности, семейство нафталиновых сополимеров, которые обозначаются LCP. Уникальные свойства LCP позволяют получить высокие механические характеристики при малой плотности, высокую химическую стойкость и большой диапазон рабочих температур.

Изменение характеристик углепластика на основе полиимидной матрицы LAPC-160 и углеродного волокна Селион 6000 с повышенной стойкостью к окислению и модулем упругости 245 ГПа в зависимости от времени выдержки на воздухе при 315 °С представлено в табл. 148. Углепластик Селион 6000/LAPC-160 после выдержки в указанных условиях в течение 1000 ч практически не изменяет своих механических характеристик.

В табл. 149 дано сравнение углепластиков на основе волокна Селион с разрушающей деформацией 1,8 %. Ударная прочность бисмалеимидного связующего по сравнению с эпоксидным значительно улучшается (табл. 150).

Из термопластичных полимеров наиболее перспективны полиэфирэфиркетоны и жидкокристаллические полимеры.

Характеристики однонаправленных углепластиков со связующим PEEK приведены в табл. 151, а углепластиков на основе ткани с эпоксидной и

148. Влияние теплового старения на характеристики углепластика Селион 6000/LAPC-160 (объемное содержание волокна 68 %) [39]

Режим старения	t, °С	Унос массы, %	$\bar{\tau}_и$	$E_и \cdot 10^{-3}$	τ
			ГПа		
Контрольные образцы	23	—	2,15	0,13	0,11
	360	—	1,59	0,12	0,05
Время выдержки при 315 °С на воздухе, ч:					
200	260	0,33	1,59	0,14	0,05
500	260	0,57	2,07	0,13	0,06
1000	260	1,08	2,06	0,14	0,06

149. Механические характеристики однонаправленных углепластиков на основе волокна Селион [39]

Характеристики	Углепластик с эпоксидной матрицей	Углепластик с модифицированной бисмалеимидной матрицей
Растяжение в продольном направлении (ГПа):		
$\sigma_в$	2,06	2,52
$E \cdot 10^{-3}$	0,14	0,14
Разрушающая деформация, %	0,14	0,17
Сжатие в продольном направлении (ГПа):		
$\sigma_{сж}$	1,45	1,32
$E_{сж} \cdot 10^{-3}$	0,11	0,11
Растяжение в поперечном направлении (ГПа):		
$\sigma_в$	0,05	0,06
E	10,0	9,0
Сдвиг в плоскости (ГПа):		
τ	0,09	0,10
G	5,31	4,97
τ (испытания на коротких балках), ГПа	0,12	0,10

PEEK-матрицами — в табл. 152. Углепластики с PEEK-матрицей в условиях влажности и температуры меняют характеристики очень незначительно; при этом максимальное влагосодержание не превышает 0,4 %. Углепластики с PEEK-матрицей по вязкости разрушения на порядок превосходят углепластики с эпоксидной матрицей (табл. 153).

Жидкокристаллические полимеры представляют новый класс полимеров, которые имеют упорядоченную структуру в растворах (лиотропную) или в расплавах (термотропную).

Характеристики жидкокристаллических полимеров LCP, разработанных фирмой Сьюлинз, приведены в табл. 154, а однонаправленных углепластиков с LCP-матрицей — в табл. 155. Удель-

150. Механические характеристики полимерных связующих [39]

Характеристики	Эпоксидное связующее	Модифицированное бисмалеимидное связующее	Условия испытаний
$\sigma_и$, ГПа	0,11	0,14	22 °С
	0,08	0,14	93 °С, сухие
	0,06	0,14	93 °С, влажные *1
$E_и$, ГПа	3,76	3,43	22 °С
	3,26	3,19	93 °С, сухие
	2,89	3,04	93 °С, влажные *1
Ударная прочность по Изоду, Дж:			
на образцах с надрезами	0,4	1,07	22 °С
на образцах без надрезов	3,2	10,2	22 °С

*1 После выдержки в кипящей воде в течение 40 ч.

151. Характеристики однонаправленных углепластиков со связующим PEEK (объемное содержание волокна 50 %) [39]

Характеристики	Температура испытаний	
	20 °С	121 °С
$\sigma_и$, ГПа	1,65	1,27
$E_и \cdot 10^{-3}$, ГПа	0,12	0,12
τ (из испытаний коротких балок), ГПа	0,10	—
$\sigma_{сж}$, ГПа	1,03—1,38	—
Максимальное влагопоглощение, %	0,4	0,4

152. Характеристики углепластиков [39]

Характеристики	Углепластик с эпоксидной матрицей	Углепластик с PEEK-матрицей	Условия испытаний
$\sigma_и$, ГПа	0,78	0,70	20 °С
	0,74	0,58	120 °С, сухие
	0,49	0,57	120 °С, влажные
	0,55	0,40	175 °С, сухие
	0,23	0,41	175 °С, влажные
Влагосодержание, %	1,3	0,4	—
Объемная доля волокна, %	62,0	57,3	—

153. Стойкость к расслоению углепластиков с эпоксидиой и PEEK-матрицами [39]

Армирующий материал	Матрица	$KCU \cdot 10^3$, МДж/м²
Ткань	Эпоксидная	0,23
	PEEK	2,0
Одноиаправленная левта	Эпоксидная	0,14
	PEEK	1,40

154. Характеристики жидкокристаллических полимеров LCP в различной структурной форме (ρ = 1,42 т/м³) [39]

Структурная форма	Характеристики при растяжении		δ, %
	$E \cdot 10^{-3}$	$\sigma_в$	
	ГПа		
Волокно:			
без термообработки	0,09	3,20	5
после термообработки	0,12	3,20	3
Нить диаметром 0,76 мм	0,08	—	4
Лента шириной 6,35 мм	0,08	1,97	4
Лист:			
без термообработки	0,02	0,23	1
после термообработки	0,02	0,58	2
Отливки:			
без термообработки	0,01	0,23	3
после термообработки	0,01	0,35	3

155. Характеристики одноиаправленных углепластиков с LCP-матрицей (объемная доля волокиа 50 %) [39]

Характеристика	Значения	Условия испытаний
$\sigma_и$, ГПа	1,51	22 °С, сухие
	1,45	22 °С, влажные
	0,85	120 °С, сухие
	0,85	120 °С, влажные
$E \cdot 10^{-3}$, ГПа	0,10	20 °С, сухие
	0,09	120 °С, влажные
	0,09	120 °С, сухие
τ, ГПа (испытания коротких балок)	0,05	20 °С
$\sigma_{сж}$, ГПа	0,89	20 °С
Максимальное влагопоглощение, %	0,2	—

156. Физико-механические характеристики связующих [39]

Характеристики	Связующее		
	К-1	К-11	Эпоксидное
Температура стеклования, °С	210	277	190
Максимальная рабочая температура, °С	177	232	135
$\sigma_в$ *1, ГПа	0,106	0,109	0,047
E *1, ГПа	2,42	2,92	3,87
δ, %	7	11	1
KCU, кДж/м²	6,3	14	0,08
Кислородный показатель	50	—	—
Обугливаемость, %	60	—	—

*1 При 23 °С.

157. Механические характеристики одноиаправленных углепластиков на основе волокна AS-4 (объемная доля волокна 60 %) [39]

Характеристики	Сухие образцы			После выдержки в воде при 71 °С в течение 2 недель		
	Связующее					
	эпоксидное	К-1	К-11	эпоксидное	К-1	К-11
$\sigma_и$, ГПа, при температуре, °С:						
23	1,67	1,36	1,53	1,76	1,42	—
93	1,55	1,26	—	1,39	1,15	1,41
121	1,46	1,22	—	1,19	1,11	—
149	1,33	1,04	1,23	1,03	0,95	1,13
177	1,19	1,12	1,04	0,64	0,80	0,92
204	—	—	0,97	—	—	0,92
232	—	—	0,90	—	—	0,84
$E \cdot 10^{-3}$, ГПа, при температуре, °С:						
20	0,10	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11
121	0,12	0,11	0,12	0,12	0,10	0,11
177	0,12	0,11	0,12	0,11	—	0,10
232	—	—	0,12	—	—	0,12
τ, ГПа, прв температуре, °С:						
20	0,11	0,10	0,09	0,10	0,09	—
93	0,08	0,08	—	0,07	0,07	0,08
121	0,08	0,07	—	0,06	0,06	—
149	0,07	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06
177	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06
204	—	—	0,06	—	—	0,06
232	—	—	0,05	—	—	0,04
Температура стеклования, °С	168	208	264	132	190	229
Влагосодержание, мас. доля, %	—	—	—	0,93	0,33	0,60

158. Керамические теплозащитные материалы, используемые в конструкции «Space Shuttle» (США)

Теплозащитный материал	LI-900 [6]	LI-2200 [6]	FRCI-12 [6]	FRCI-40 [7]	FRCI-8 [3]	FRCI-8 [3]
Состав материала	Волокно кремния + + кремниевая связка	Волокно кремния + + кремниевая связка	Волокно кремния + + волокно Nextel 312 *1	60 % волокна кремния + + 40 % волокна Nextel 312	78 % волокна кремния + + 22 % волокна Nextel 312	85 % волокна кремния + + 15 % (об. доля) волокна Nextel 312
ρ, т/м^3	0,128—0,152	0,320—0,384	0,191—0,216	0,098	0,128	0,136
$\sigma_в \cdot 10^{-6}$, ГПа: в направлении формования перпендикулярно к направлению формования	166 462	503 1242	558 1772	1269 3171	290 —	241 —
$\sigma_{сж} \cdot 10^{-6}$, ГПа: в направлении формования перпендикулярно к направлению формования	193 482	896 1586	910 1827	— —	— —	— —
$\alpha \cdot 10^{-7}$, °C^{-1}: в направлении формования перпендикулярно к направлению формования	7,2 7,2	7,2 7,2	12,6 12,6	— —	— —	— —

Продолжение табл. 158

Теплозащитный материал	LI-900 [6]	LI-2200 [6]	FRCI-12 [6]	FRCI-40 [7]	FRCI-8 [3]	FRCI-8 [3]
α, 1/°C, при нагреве до 833 °C: в направлении формования перпендикулярно к направлению формования	— —	— —	— —	$0{,}42\times10^{-3}$ $1{,}89\times10^{-3}$	$0{,}96\times10^{-4}$ $1{,}31\times10^{-4}$	$0{,}82\times10^{-4}$ $0{,}83\times10^{-4}$
λ, Вт/(м·°C): в направлении формования: при 39 °C и 9,8 Па при 556 °C и 9,8 Па перпендикулярно к направлению формования: при 39 °C и 9,8 кПа при 556 °C и 9,8 кПа при 833 °C и 9,8 Па	 0,014 0,038 0,061 0,149 —	 0,030 0,057 0,101 0,177 —	 0,018 0,047 0,073 0,156 —	 — — — — —	 — — — — 0,19	 — — — — 0,09
c, кДж/(кг·°C)	0,71	0,71	0,71	—	—	—
Рабочая температура, °C: многократное воздействие одиократное воздействие	1257 1497	1257 1497	1257 1497	1257 1497	1257 —	1257 —

*1 Nextel 312 — алюмоборосиликатное волокно фирмы 3M Co; состав: 62 % Al_2O_3, 14 % B_2O_3, 24 % SiO_2 (об. доля); волокно кремния фирмы John—Manville Corp. — содержание кремния 99,7 % (об. доля).

иая прочность LCP, получаемых литьевым формованием, в 2 раза превосходит удельную прочность алюминия.

Углепластики с термопластичными связующими на основе К-полимеров, имеющих высокую вязкость разрушения, исследовала фирма Дюпон. Были рассмотрены связующие К-I и К-II с максимальной рабочей температурой соответственно 177 и 232 °С (табл. 156). В качестве армирующего материала использовалось углеродное волокно AS-4. Результаты испытаний однонаправленных углепластиков приведены в табл. 157. Воздействие внешней среды оценивалось по снижению прочности при сдвиге, определяемой при испытании на изгиб коротких балок. Наибольшее снижение прочности (~14 %) получено после выдержки в воде при 71 °С в течение 336 ч; при этом максимальное влагосодержание в углепластике AS-4/К-I составляло 0,28 %.

Теплозащитные композиционные материалы для летательных аппаратов многократного использования изготовляют из тугоплавких волокон (химически чистого кремния, алюмоборосиликатных волокон); они обладают сильной анизотропией теплофизических характеристик в плоскости формования и перпендикулярных к ней. Низкая теплопроводность материала по нормали к плоскости формования обеспечивается преимущественной ориентацией волокон при формовании.

Плотность КМ, его прочностные и теплофизические характеристики определяются относительным объемным содержанием волокон. Состав и свойства теплозащитных КМ приведены в табл. 158.

Эффективность теплозащитного материала повышается при нанесении тонкого покрытия из стекла специального состава, служащего радиационным экраном и обеспечивающего отвод (до 80 %) теплового потока.

Низкая прочность материала и малый коэффициент линейного расширения вызывают необходимость обеспечения термической совместимости теплозащитного КМ и защищаемой конструкции или изоляции КМ от деформируемой поверхности путем введения компенсирующих прокладок.

Список литературы

1. **Акопов И. А., Бобрищев-Пушкин Д. М., Прокофьева А. К., Яценко К. П.** Безопасность труда при работе с бериллием и его сплавами. М.: Машиностроение, 1964. 216 с.

2. **Альтман М. Б., Лебедев А. А., Чухров М. В.** Плавка и литье легких сплавов. М.: Металлургия, 1969. С. 100—139.

3. **Алюминиевые** сплавы/Под ред. В. И. Елагина, В. А. Ливанова. М.: Металлургия, 1984. 407 с.

4. **Анциферов В. Н., Устинов В. С., Олесов Ю. Г.** Спеченные сплавы на основе титана. М.: Металлургия, 1984. 167 с.

5. **Бериллий.** Наука и технология. М.: Металлургия, 1984. 110 с.

6. **Бибиков Е. Л., Глазунов С. Г., Неуструев А. А. и др.** Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983. 296 с.

7. **Борисова Е. А., Бочвар Г. А., Брун М. Я., Глазунов С. Г. и др.** Металлография титана. М.: Металлургия, 1980. 464 с.

8. **Волокнистые** композиционные материалы/Под ред. Дж. Уитона. Э. Скала. М.: Металлургия, 1988. 42 с.

9. **Вульф Б. К.** Титан в электронной технике. М.: Энергия, 1975. 184 с.

10. **Вульф Б. К.** Термическая обработка титановых сплавов. М.: Металлургия, 1969. 375 с.

11. **Герчикова Н. С.** Тонкая структура и коррозионное растрескивание алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1982. 128 с.

12. **Глазунов С. Г., Моисеев В. Н.** Конструкционные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1974. 366 с.

13. **Дриц М. Е., Рохлин Л. Л.** Магниевые сплавы с особыми акустическими свойствами. М.: Металлургия, 1983. 128 с.

14. **Дриц М. Е., Елкин Ф. М., Гурьев И. Н., Бондарев Б. И. и др.** Магниеволитиевые сплавы. М.: Металлургия, 1980. 140 с.

15. **Дриц М. Е.** Магниевые сплавы для работы при повышенных температурах. М.: Наука, 1964. 231 с.

16. **Дриц М. Е., Падежнова Е. М., Рохлин Л. Л. и др.** Легкие сплавы, содержащие литий. М.: Наука, 1982. 142 с.

17. **Дроздовский Б. А., Проходцева Л. В., Новосельцев Н. И.** Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983. 192 с.

18. **Закономерности** изменения структуры и свойств бериллиево-алюминиевых сплавов/И. Н. Фридляндер, К. П. Яценко, Г. А. Некрасов и др.// МИТОМ. 1970. № 7. С. 50—55.

19. **Залкинд М., Лемке Ф., Джорж Д.** Монокристальные волокна и армированные ими материалы. М.: Мир, 1973. С. 332—378.

20. **Кадыкова Г. Н.** Управление структурой двухфазных титановых сплавов при термической обработке// МИТОМ. 1984. № 5. 53 с.

21. **Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В. и др.** Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов//Литейное производство. 1984. № 4. С. 17—19.

22. **Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В.** Структурная стабильность и ее влияние на механические свойства//Доклады АН СССР. 1983. Т. 268, № 4. С. 141—148.

23. **Кишкина С. И.** Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1981. 280 с.

24. **Колачев Б. А., Мальков А. В.** Физические основы разрушения титана. М.: Металлургия, 1983. 160 с.

25. **Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 414 с.

26. **Колачев Б. А., Габидулин Р. М., Пигусов Ю. В.** Технология термической обработки цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 280 с.

27. **Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А.** Механические свойства титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1974. 542 с.

28. **Колобнев И. Ф.** Термическая обработка алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1966. 394 с.

29. **Композиционные** материалы: Справочник/Под ред. Д. М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. С. 373—474.

30. **Магниевые** сплавы: Справочник/ Под ред. М. Б. Альтмана, М. Е. Дрица, М. А. Тимоновой, М. В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Ч. 1. 232 с.

31. **Магниевые** сплавы: Справочник/ Под ред. И. И. Гурьева, М. В. Чухрова. М.: Металлургия, 1978. Ч. 2. 296 с.

32. **Мальцев М. В.** Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1971. 488 с.

33. **Материаловедение**/Под ред. Б. Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1986. 383 с.

34. **Моисеев В. Н., Поваров И. А., Каплин Ю. И.** Структура и свойства титановых сплавов после изотермического деформирования с малыми скоростями//МИТОМ. 1984. № 5. 43 с.

35. **Мондольфо Л. Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1979. 640 с.

36. **Новиков И. И.** Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1986. 480 с.

37. **Папиров И. И.** Структура и свойства сплавов бериллия: Справочник. М.: Энергоиздат, 1981. 311 с.

38. **Папиров И. И.** Бериллий — конструкционный материал. М.: Машиностроение, 1977. С. 8—47.

39. **Перспективные** конструкционные материалы//Техническая информация ЦАГИ. 1985. № 12. 2 с.

40. **Полькин И. С.** Упрочняющая термическая обработка титановых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 93 с.

41. **Порошковая** металлургия титановых сплавов/Ред. Ф. Фроуса, Д. Смучереккн. М.: Металлургия, 1985. 262 с.

42. **Портной К. И., Салибеков С. Е., Светлов И. А., Чубаров В. М.** Структура и свойства композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1979. 89 с.

43. **Применение** титана в народном хозяйстве/Под ред. А. Т. Туманова. Киев: Техніка, 1975. 217 с.

44. **Прогрессивные** методы производства конструкционно-прочных отливок. М.: МДНТИ им. Ф. Э. Дзержинского, 1987. 140 с.

45. **Промышленные** алюминиевые сплавы: Справочник/Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1984. 527 с.

46. **Рачев Х., Стефанов С.** Справочник по коррозии. М.: Мир, 1982. 91 с.
47. **Рохлин Л. Л.** Магниевые сплавы, содержащие РЗМ. М.: Наука, 1980. 193 с.
48. **Сборник** трудов конференции. **Магниевые сплавы. М.:** Наука, 1978. **224с.**
49. **Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В.** Промышленные цветные металлы и сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1974. С. 224—236.
50. **Солонина О. П., Глазунов С. Г.** Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 447 с.
51. **Сплавы** магниевые деформируемые. Марки: ГОСТ 14957—76.
52. **Сплавы** магниевые литейные. Марки: ГОСТ 2876—79.
53. **Справочник** металлиста. М.: Машиностроение, 1976. Т. 2. 717 с.
54. **Строганов Г. Б., Ротенберг В. А., Гершман Г. Б.** Алюминиевые сплавы с кремнием. М.: Металлургия, 1977. 272 с.
55. **Строганов Г. Б.** Высокопрочные литейные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
56. **Тимонова М. А.** Коррозия и защита магниевых сплавов. М.: Машгиз, 1964. 286 с.
57. **Титан.** Металловедение и технология: Труды III Международной конференции по титану/Под ред. А. Ф. Белова. М.: ВИЛС, 1978. Т. 1—3.
58. **Томсон Е. Р., Лемке Ф. Д.** Композиционные материалы с металлической матрицей/Под ред. К. Крейдера. М.: Машиностроение, 1978. Т. 4. С. 110—164.
59. **Фавстов Ю. К., Шульга Ю. Н., Рахштадт А. Г.** Металловедение высокодемпфирующих сплавов. М.: Металлургия, 1980. 272 с.
60. **Фрейзер А. Г.** Высокотермостойкие полимеры: Пер. с англ. М.: Химия, 1971. 294 с.
61. **Фридляндер И. Н.** Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1979. 209 с.
62. **Фридляндер И. Н.** Металловедение и термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1980. 38 с.
63. **Цвиккер У.** Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 510 с.
64. **Чечулин Б. Б., Утков С. С.** Титановые сплавы в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1979. 247 с.
65. **Эмли Е. Ф.** Основы технологии производства и обработки магниевых сплавов: Пер. с англ./Под ред. М. Е. Дрица. М.: Металлургия, 1972. 63 с.
66. **Энциклопедия** полимеров/Под ред. В. А. Каргина, В. А. Кабанова. М.: Сов. энцикл., 1972—1977. Т. 1—3. 416 с.
67. **Banas R. P., Grouski E. R., Larsen W. T.** Processing aspects of the Space Shuttle Orbiter's ceramic reusable surface insulation//Ceramic Eng. and Sci. Proc. 1983. 34, N 7—8. P. 591—610.
68. **Strauss E. L., Jonson C. W., Graese R. W., Campbell R. L.** Producibility of fibrous refractory composite insulation FRCJ 40—20//Ceramic Eng. and Sci. Proc. 1983. 34, N 7—8. P. 611—623.
69. **Tomez R. S., Cordia E. R.** Development of an improved, lightweight insulation material for Space Shuttle Orbiter's thermal — protection system//Ceramic Eng. and Sci. Proc. 1983. 34, N 7—8, P. 501—511.

Глава VI МАТЕРИАЛЫ, УСТОЙЧИВЫЕ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВНЕШНЕЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

1. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Коррозионно-стойкие материалы разделяются на две основные группы: металлические сплавы и неметаллические материалы.

Металлические сплавы представляют собой двух- или многокомпонентные системы, обладающие стойкостью против общей коррозии или локальных видов коррозии, в том числе межкристаллитной, точечной, коррозионного растрескивания и др. (ГОСТ 9.908—85). Реже используют чистые металлы. Основой промышленных коррозионно-стойких сплавов являются железо (стали), титан, никель, медь, алюминий; в отдельных случаях в качестве коррозионно-стойких применяются тугоплавкие и благородные металлы.

Коррозионно-стойкие стали включают в себя так называемые атмосферокоррозионно-стойкие низколегированные стали (АКС) и собственно коррозионно-стойкие стали (КС), применяемые для изготовления оборудования, работающего в контакте с агрессивными средами в химической промышленности и других отраслях техники.

АКС представляют собой низколегированные стали, содержащие медь, фосфор, хром, иногда мышьяк (10ХНДП, 15ХСНД, 10ХДП, 10ХСНД, 15ХСНД и др.). Толщина металлоконструкций из АКС за 20—30 лет работы уменьшается в 2—3 раза меньше, чем толщина конструкций из обычных углеродистой и низколегированной сталей.

Более высокая стойкость на первом периоде работы достигается образованием поверхностных пленок, содержащих оксиды хрома и фосфиды, а при продолжительных сроках — накоплением на поверхности благородного металла — меди.

Для АКС характерна хорошая адгезия лакокрасочных покрытий, что в свою очередь продляет в 1,5—2,0 раза сроки службы искусственных покрытий.

Применение сталей 10ХДП и 10ХНДП без окраски рекомендовано в несущих и ограждающих металлических конструкциях, эксплуатируемых на открытом воздухе в сельской и промышленной атмосфере слабой агрессивности, в том числе:

промышленных зданиях (наружные стеновые панели, кровельный настил для неотапливаемых зданий, фахверки, фонари и стеновые переплеты, ворота);

галереях и эстакадах (несущие конструкции, элементы ограждений, стеновые панели, кровельный настил);

газгольдерах (корпуса сухих газгольдеров пониженного давления, элементы кровли, направляющие);

доменных и других комплексах заводов черной металлургии и топливной промышленности (газопроводы, воздуховоды, опоры и пролетные строения трубопроводов, бункеры, открытые этажерки, лестницы, площадки, переходные мосты, ограждающие конструкции);

опорах ЛЭП и объектах связи (металлические конструкции опор, сплошностенчатые антенные системы, решетчатые конструкции мачт и башен);

жилых и общественных зданиях (наружные элементы каркаса, стеновые панели);

мостах, мостовых переходах для автотранспорта, пешеходных дорог и магистральных газопроводов;

большепролетных покрытиях ангаров и общественных зданий, стадионов, плавательных бассейнов, спортивных комплексов;

несущих конструкциях, панелях с предварительно напряженной обшив-

кой, предварительно напряженном настиле;

дымовых трубах.

Сталь 10ХНДП рекомендуется применять также в окрашиваемых конструкциях, эксплуатируемых в закрытых помещениях с постоянной повышенной влажностью, а также в средне- и сильноагрессивной атмосфере для следующих сооружений:

элементов каркасов и металлических панелей утепленных кровель промышленных зданий черной металлургии, цветной металлургии, лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности;

наружных конструкций заводов химической, нефтехимической целлюлозно-бумажной промышленности и цветной металлургии.

Коррозионно-стойкие стали представляют собой большую группу высоколегированных материалов, включающих шесть структурных классов (ферритный, аустенитный, аустенито-ферритный, мартенситный, аустенито-мартенситный, ферритомартенситный) (ГОСТ 5632—72); при этом независимо от класса КС содержат не менее 12 % Cr. При достижении данной концентрации хрома в сплавах на основе железа скачкообразно возрастает электрохимический потенциал и сталь переходит в категорию коррозионно-стойких.

Важнейшим свойством КС является наличие области пассивного состояния в определенном диапазоне потенциалов. Пассивность определяется как «состояние повышенной коррозионной стойкости металла или сплава (в условиях, когда с термодинамической точки зрения они являются вполне реакционноспособными), вызванное преимущественным торможением анодного процесса» [64].

Причиной пассивности является образование на поверхности химически стойкой пленки гидратированного оксида хрома и оксида хрома шпинельного типа.

К КС примыкают сплавы на железоникелевой основе 06ХН28МДТ, 03ХН28МДТ, 06ХН28МТ (ГОСТ 5632—72), отличающиеся высокой стойкостью в серной, фосфорной кислотах и ряде других агрессивных сред. Однако, в отличие от КС, сплавы типа ХН28МДТ работают не в пассивном состоянии, а в термодинамическом активном состоянии.

Коррозионная стойкость сталей и сплавов обычно оценивают по десятибалльной шкале (табл. 1). В табл. 2 и 3 указано назначение наиболее распространенных КС и их коррозионная стойкость в некоторых агрессивных средах.

Более подробно с основными свойствами, термической обработкой и применением, а также коррозионной стойкостью КС можно ознакомиться в работах [68, 69], выпускаемым сортаментом — в ГОСТ 5949—75, ГОСТ 7350—77 (толстый лист), ГОСТ 5582—75 (тонкий лист), ГОСТ 9940—81 и ГОСТ 9941—81 (холодно- и теплодеформированные, горячедеформированные трубы).

Титан и его сплавы. Титан принадлежит к активно пассивирующимся металлам, что обусловливает его высокую стойкость практически во всех природных средах: атмосфере (в том числе промышленной и морской), грунте, пресной и морской воде.

Легирование титана позволяет создавать сплавы с высокой стойкостью в весьма агрессивных средах, например царской водке, азотной кислоте, многих органических кислотах, влажном хлоре и др.

1. Десятибалльная шкала коррозионной стойкости

Группа стабильности	Скорость коррозии металла, мм/год	Балл
Совершенно стойкие	0,001	1
Весьма стойкие	0,001 до 0,005	2
	0,005 » 0,01	3
Стойкие	0,01 » 0,05	4
	0,05 » 0,1	5
Пониженно-стойкие	0,1 » 0,5	6
	0,5 » 1,0	7
Малостойкие	1,0 » 5,0	8
	5,0 » 10,0	9
Нестойкие	10,0	10

2. Коррозионно-стойкие стали, применяемые в СССР (ГОСТ 5632—72)

Структурный класс	Марка	Область применения
Ферритный	08Х13, 08Х18Т1	Изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред (атмосферные осадки, слабые растворы минеральных и органических кислот) при комнатной температуре
	15Х25Т	Детали, не подвергающиеся действию ударных нагрузок, работающие в средах окислительного характера
Аустенитный	08Х18Н10Т	Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах типа азотной кислоты и др.
	08Х17Н13М2Т	Сварная аппаратура, работающая в кипящей фосфорной, серной, 10 %-ной уксусной кислоте и сернокислых средах
	10Х14Г14Н4Т	Сварная аппаратура, работающая в окислительных средах слабой агрессивности, а также при температурах до —253 °С
	03Х21Н21М4ГБ	Сварная аппаратура по производству фосфорных удобрений
Аустенитоферритный	08Х22Н6Т	Сварная аппаратура в химической, пищевой и других отраслях промышленности; является заменителем стали типа Х18Н10Т при температуре до 300 °С
	08Х21Н6М2Т	Заменитель стали 10Х17Н13М2Т
Мартенситный	20Х13, 30Х13, 40Х13	Режущий, измерительный и хирургический инструмент, упругие элементы, предметы домашнего обихода
Аустенитомартенситный	07Х16Н6	Высокопрочные штампосварные конструкции и детали, работающие в слабоагрессивных условиях
	08Х17Н5М3	Нагруженные детали, работающие в атмосферных условиях, слабоагрессивных условиях восстановительного характера

Продолжение табл. 2

Структурный класс	Марка	Область применения
Мартенситно-ферритный	12Х13	Предметы домашнего обихода, изделия, работающие в слабоокислительных условиях
	14Х17Н2	Нагруженные детали, работающие в слабоагрессивных условиях окислительного характера в авиационной, химической промышленности

3. Коррозионная стойкость (в баллах) сталей [68]

Коррозионная среда	t, °С	08Х13, 12Х13	08Х18Т1	15Х25	08Х21Н6Т	08Х21Н6М2Т	08Х18Н10Т	08Х17Н13М2Т
Азотная кислота концентрации, %:								
5	20	5	4	3	—	—	3	3
5	85	7	5	5	—	—	4	4
5	$t_{кип}$	8	7	5	—	—	—	—
10	20	5	4	4	—	3	3	—
10	85	7	5	5	4	5	5	5
10	$t_{кип}$	8	7	6	5	5—6	5—6	5—6
50	20	6	6	5	—	—	3	3
50	80	8	7	6	4	5	5	4—5
50	$t_{кип}$	9	8	7	6	6	6	6—7
65	20	6	5	5	—	—	4	4
65	85	9	8	7	5	5	5	5
65	$t_{кип}$	10	9	8	7—8	—	8	8
Серная кислота концентрации, %:								
10	20	10	10	10	5	4	5	4
10	75	10	10	10	7	6	7	7
10	$t_{кип}$	10	10	10	10	10	10	10
40	20	10	10	10	7—8	6—7	7—8	6—7
40	50	10	10	10	8	7	8	7
40	100	10	10	10	10	10	10	10
60	20	9	8	8	4	4	4	3—4
60	70	10	10	10	10	9	10	9
60	100	10	10	10	10	10	10	10
98	20	6	6	6	4	3	4	3
98	100	8	8	7	10	9	10	9
100	20	5	4	4	4	3	5	3
100	70	—	—	—	—	7	9	8
150	10	10	10	—	10	10	10	10

Продолжение табл. 3

Коррозионная среда	t, °С	08Х13, 12Х13	08Х18Т1	15Х25	08Х21Н6Т	08Х21Н6М2Т	08Х18Н10Т	08Х17Н13М2Т
Смесь кислот концентрации, % (азотная + + серная):								
1,0 + 50	50	—	—	—	4	4	5	4
3,0 + 30	50	—	—	—	4	4	5	5
3,0 + 30	$t_{кип}$	—	10	10	—	—	7	—
5,0 + 15	$t_{кип}$	—	—	—	5	5	5	5
5,0 + 50	50	—	—	—	5	5	5	5
5,0 + 65	100	—	—	—	9	9	10	9
15 + 80	60	7	6	6	—	—	6	—
25 + 75	60	8	7	5	5	5	5	5
36 + 5	85	—	—	—	5	—	5	5
Соляная кислота концентрации, %:								
0,5	20	8	6	6	—	5	5	4
0,5	50	8	7	7	—	6	6	5
0,5	$t_{кип}$	10	10	10	10	9	9	8
5	20	9	8	8	7	6	6	5
5	60	10	10	10	10	9	9	8
10	20	10	10	10	7	6	6	6
10	60	10	10	10	10	9	9	9
20	20	10	10	10	9	8	8	7
20	20	10	10	10	9	8	8	7
20	60	10	10	10	10	8	8	8
30	20	10	10	9	8	8	7	6
30	60	10	10	10	9	9	8	7
37	20	10	10	10	10	9	9	7
Уксусная кислота концентрации, %:								
1	90	5	5	5	4	3	4	3
1	$t_{кип}$	—	—	—	5	4	5	4
5	20	6	5	4	1	1	1	1
5	75	8	6	6	4	3	4	3
5	$t_{кип}$	10	8	7	6	5	6	5
15	20	7	6	6	1	1	1	1
15	80	8	7	7	4	3	5	3
15	$t_{кип}$	10	9	8	—	5	8	5
50	20	7	7	6	1	1	3	1
50	60	—	—	—	4	3	4	3
50	100	10	9	8	—	5	8	5
80	20	6	5	5	1	1	2	2
80	80	9	8	—	—	4	5	5
80	$t_{кип}$	10	9	8	8	6	8	6
98	$t_{кип}$	—	—	—	6	5	7	5
100	20	6	5	—	—	4	5	4
100	90	9	—	—	6	5	6	5
100	$t_{кип}$	10	10	—	—	7	8	6

Продолжение табл. 3

Коррозионная среда	t, °С	08Х13, 12Х13	08Х18Т1	15Х25	08Х21Н5Т	08Х21Н6М2Т	08Х18Н10Т	08Х17Н13М2Т
Фосфорная кислота концентрации, %:								
5	20	4	3	3	1	1	1	1
5	50	5	4	3	2	2	2	2
10	$t_{кип}$	9	8	—	4	4	4	4
50	20	8	7	5	2	2	3	3
50	85	—	8	6	5	4	5	4
50	$t_{кип}$	10	9	8	2	2	—	5
85	20	4	4	3	4	3	4	3
85	85	9	8	8	7	6	6	4
85	$t_{кип}$	10	10	10	5	5	8	7
90	110	10	10	10	—	—	10	10
Фтористо-водородная кислота концентрации, %:								
5	20	—	—	—	10	10	10	7
10	20	—	—	—	—	—	7	7
40	20	10	10	10	10	8	10	8
Щавелевая кислота концентрации, %:								
5	20	8	7	6	—	—	5	4
5	85	8	7	7	—	6	7	5
10	20	8	7	6	5	5	5	5
10	75	8	8	8	—	—	7	6
10	$t_{кип}$	10	10	10	8	7	10	8
25	85	9	9	8	9	7	9	8
25	$t_{кип}$	10	10	10	—	9	10	8
Едкое кали концентрации, %:								
25	$t_{кип}$	4	4	4	3	3	4	3
50	20	2	2	2	2	2	2	2
50	$t_{кип}$	7	7	7	5	5	7	6
Расплав	300	10	10	10	10	10	10	10
Едкий натр концентрации, %:								
10	90	5	5	—	5	4	5	4
20	50	4	4	—	4	3	4	3
20	$t_{кип}$	8	5	—	5	5	5	5
60	90	8	7	7	5	5	5	5
60	160	—	—	—	9	8	9	8
90	300	9	9	9	—	—	8	8
Расплав	318	10	10	10	9	9	10	10

Титан является перспективным материалом для изготовления костных имплантаитов и других изделий, к которым предъявляются требования высокой стойкости в физиологических средах.

Для титана и его сплавов характерна малая склонность к контактной, питтинговой и щелевой коррозии.

Для повышения коррозионной стойкости в зависимости от поставленной задачи могут быть использованы молибден, цирконий, ванадий, тантал, марганец. Повышение коррозионной стойкости может быть достигнуто и с помощью так называемого катодного легирования, т. е. введением Cu, W, Mo, Ni, Re, Ru, Pd, Pt, роль которых заключается в увеличении наклона катодных поляризационных кривых, что приводит к созданию самопассивирующихся сплавов.

Для повышения прочности сплавы титана часто легируют алюминием, влияние которого на коррозионную стойкость в принципе негативно, но в количественном отношении невелико.

Техническая характеристика и коррозионная стойкость титана и его промышленных сплавов приведены в табл. 4 и 5.

Полуфабрикаты из титана и его сплавов поставляются по следующей нормативно-технической документации: ОСТ 192077—78 (лист), ГОСТ 22178—76 (плиты), ГОСТ 23755—79 (прутки), ТУ 183-42—80 (профили), ОСТ 192051—76 (трубы сварные), ОСТ 190050—72 (трубы), ГОСТ 21945—76 (трубы бесшовные).

Алюминий и его сплавы. Алюминий принадлежит к металлам, имеющим большую склонность к пассивации; в нейтральных и слабокислых водных растворах алюминий обладает способностью к самопассивации. Поверхность алюминия в пассивном состоянии покрыта защитной пленкой, состоящей из байерита β — $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, толщина пленки 5—100 нм.

Коррозионная стойкость алюминия зависит от чистоты по ряду элементов (медь, железо, никель; в сильной степени Mg, Zn); алюминий чувствителен к присутствию в среде галоидных анионов Cl^-, F^-, Br^-, I^-, разрушающих пассивную пленку, что приводит в первую очередь к питтинговой коррозии, например, в морской воде.

Алюминий широко используют для металлоконструкций, работающих в атмосферных условиях (кроме морской), в химической промышленности, бытовой и криогенной технике.

Алюминий высокой чистоты имеет очень высокую коррозионную стойкость в азотной кислоте и используется для ее хранения и транспортирования, в уксусной кислоте, атмосферах, содержащих сероводород, сернистый ангидрид, пары серы.

Алюминий высокой чистоты используется в качестве плакирующего слоя для защиты самолетных конструкций (крылья, фюзеляж и др.), изготовляемых из высокопрочных, но коррозионно-нестойких сплавов на основе алюминия.

Легирование алюминия осуществляют с целью повышения прочности при комнатной и повышенных температурах, жаростойкости, что в зависимости от вида и степени легирования, как правило, в той или иной степени приводит к снижению коррозионной стойкости. Например, наиболее распространенный высокопрочный деформируемый алюминиевый сплав — дуралюмин (3,5—5,5 % Cu и небольшие добавки Mg и Mn), упрочняемый интерметаллидной фазой $CuAl_2$ ($\sigma_в$ = = 330÷500 МПа), имеет низкую стойкость к общей коррозии, склонен к расслаивающей и межкристаллитной коррозии. Поэтому необходимо применять плакирование листового дуралюмина чистым алюминием, прежде чем использовать его в соответствующих конструкциях самолетов, судов и других объектах.

Среди деформируемых сплавов алюминия, приближающихся по коррозионной стойкости к чистому алюминию, можно назвать сплавы, содержащие 1—2 % Mn (АМц) и 1—3 % Mg (АМг); эти сплавы имеют предел прочности 90—250 МПа и хорошо свариваются.

К литейным сплавам алюминия, обладающим достаточно высокой коррозионной стойкостью, относятся силумины (Al — до 14 % Si) и магналий (Al — до 10 % Mn). Сплавы типа силумин успешно применяются в виде

4. Промышленные коррозионно-стойкие сплавы титана [64]

Сплав	Структура	Основной состав, %	Техническая характеристика
ВТ1—0	α	Технически чистый	Деформируемый и свариваемый материал, коррозионно-стоек в природных условиях, окислительных и органических средах и др.
ОТ4—0 ОТ4—1	α + α′ α + α′	0,2—1,4 Al, 0,2—1,3 Mn 1,5—2,5 Al, 0,7—2 Mn	Имеют более высокую прочность по сравнению с чистым титаном ($\sigma_{0,2}$ = = 390÷490 МПа), деформируются, свариваются
ОТ4	α + β	3,5—5 Al, 0,8—2 Mn	Имеет высокую прочность ($\sigma_{0,2}$ = = 580 МПа), деформируется, сваривается
ВТ6	α + β	5,5—7 Al, 4,2—6 V	$\sigma_{0,2}$ = 730 МПа; по коррозионной стойкости близок к технически чистому титану, хорошо деформируется в горячем состоянии, удовлетворительно сваривается
4200	α	0,15—0,30 Pd	Имеет высокую коррозионную стойкость в соляной, муравьиной, лимонной, хромовой кислоте, хлорном железе, деформируется, сваривается
4201	α′ — мартенситоподобная структура после закалки из β-области	35	Обладает высокой коррозионной стойкостью в HCl, H_2SO_4; применение ограничено в связи со сложной технологией изготовления полуфабрикатов

5. Коррозионная стойкость (в баллах) титана и его сплавов [62]

Коррозионная среда	t, °С	ВТ1—0	Коррозионная среда	t, °С	ВТ1—0
Азотная кислота концентрации, %:			Муравьиная кислота концентрации, %:		
32	100	3	5	140	1
55	$t_{кип}$	4	25	100	1
70	$t_{кип}$	3	25	140	5

Продолжение табл. 5

Коррозионная среда	t, °С	ВТ1—0	Коррозионная среда	t, °С	ВТ1—0
30	95	3; 7 для ОТ4	50	165	5
			98	165	1
30	$t_{кип}$	8	100	200	3 для 4200
50	50	1	99	$t_{кип}$	3 для 4201
50	80	2			
50	100	8	Хлористый кальций концентрации, %:		
86	50	1			
86	70	6	30	90	1
86	100	7	50,6	$t_{кип}$	1; 1 для ОТ4
60	200	—			
85	200	—	60	$t_{кип}$	1 для 4200
Соляная кислота концентрации, %:			Хлорное железо концентрации, %:		
0,5—1	95	2 для ОТ4	40	95	1 для ОТ4
5—10	20	3 для ОТ4	1—5	30—100	3 для 4201
5—10	60	4—8 для ОТ4	10	35	3
			10—15	60—100	1
Уксусная кислота концентрации, %:			5—15	100	3
			5—20	20	4
5	165	1			5
25	165	1			

литых изделий, работающих в атмосферных условиях и морской воде; еще более высокой стойкостью в морской воде обладает сплав магиалий АМг с 10 % Mn.

При конструировании металлоизделий с использованием деталей из алюминия и его сплавов необходимо учитывать их высокую склонность к контактной коррозии.

Сплавы алюминия применяются в качестве расходуемых анодов для катодной защиты морских сооружений и судов. Для этих целей используются протекторы из сплавов на основе Al—Zn—Mg и Al—Zn—Hg. Покрытия из алюминия, нанесенные на стальную поверхность плазменным и изотермическим методами, также играют роль расходуемых анодных покрытий и широко используются для защиты стационарных морских конструкций и судов.

Металлопродукция из алюминия поставляется по ГОСТ 11069—74, ГОСТ 4784—74, ГОСТ 2685—75 (марки), ГОСТ 6132—79 (проволока), ГОСТ 21631—76 (лист), ГОСТ 17232—79 (плиты), ГОСТ 21488—76 (прутки), ГОСТ 8617—81 (профили), ГОСТ 18475—82 (трубы), ОСТ 92-1008—77 (штамповки, поковки).

Медь и ее сплавы. Повышенная коррозионная стойкость меди связана с высокой термодинамической стабильностью, в то время как способность к пассивации выражена слабо.

Медь устойчива против коррозии на воздухе, в нейтральных сульфатных и слабощелочных растворах, в пресной, горячей и холодной воде, деаэрированных горячих и холодных разбавленных растворах серной, фосфорной и уксусной кислот. Медь достаточно стойка в морской воде.

В окислительных средах — в HNO_3, горячей концентрированной H_2SO_4, растворах $KMnO_4$, $K_2Cr_2O_7$ — медь неустойчива.

Для латуни характерны два вида коррозионного повреждения — обесцинкование и коррозионное растре-

скивание. Склонность к обоим видам поврежденнй увеличивается с повышением содержания цинка. Явление обесцинкования заключается в избирательной коррозии в связи со значительно более высокой электрохимической активностью атомов цинка по сравнению с атомами меди.

Для снижения склонности к обесцинкованию применяют легирование небольшими количествами фосфора, сурьмы, мышьяка (сотые доли).

Наиболее широкое распространение в морских условиях получили так называемая адмиралтейская латунь (70 % Cu, 29 % Zn, 1 % Sn) и алюминиевая латунь (75 % Cu, 23 % Zn, 2 % Al).

Коррозионное растрескивание проявляется при наличии в металлоизделии внутренних или внешних растягивающих напряжений. Под действием растягивающих напряжений происходит раскрытие трещины и ускоренное разрушение материала по плоскостям, обогащенным цинком.

Скорость развития коррозионного растрескивания усиливается при наличии в атмосфере аммиака, сернистого ангидрида, а в растворах аммиака — аммониевых и ртутных солей.

Коррозионное растрескивание, обусловленное наличием внутренних напряжений, предупреждается отжигом при 250—300 °С в течение нескольких часов.

Цинк повышает стойкость латуни, если в растворе или атмосфере присутствуют сернистые соединения (SO_2, H_2S).

Бронзы могут рассматриваться как коррозионно-стойкие материалы. Оловянная бронза (8—10 % Sn) обладает хорошей стойкостью в разбавленных неокислительных кислотах, органических кислотах. Алюминиевые бронзы (9—10 % Al) более стойки, чем оловянные, в том числе в органических кислотах, соляной кислоте, морской воде. Кремнистые бронзы (до 15 % Si) являются хорошими кислотостойкими материалами.

Бронзы широко используются для изготовления подшипников скольжения, деталей насосов и арматуры для подачи агрессивных жидкостей.

Никель и его сплавы. Чистый никель относительно редко применяется в качестве конструкционного коррозионно-стойкого материала, несмотря на то что проявляет высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях, неокисляющих кислотах: соляной — (до 15 %), серной (до 70 %), растворах многих солей, морской воде. Никель способен переходить в пассивное состояние. Вместе с тем использованне никеля рациональнее в сплавах на его основе, так как с помощью легирования можно добиться значительного повышения коррозионной стойкости.

Промышленные коррозионно-стойкие сплавы в основном относятся к следующим системам: Ni—Mo, Ni—Cr—Mo, Ni—Cu [7].

Сплавы системы Ni—Mo обычно содержат 25—30 % Mo и обладают высокой коррозионной стойкостью в средах восстановительного характера — соляной, серной, фосфорной, органических кислотах, влажном хлористом водороде и др.

Типичным представителем этих сплавов является сплав Н70МФВ—ВИ, имеющий после оптимальной термической обработки (закалка от 1070 °С с охлаждением в воде) структуру α-твердого (ГЦК-решетка) и частиц карбида типа $M_{12}C$. Сплав Н70МФВ—ВИ применяется для изготовления сварной аппаратуры, трубопроводов для ионообменных смол, галлоидоводородных кислот, полипропилена, в процессах органического синтеза, приготовлении фармацевтических препаратов. Сварные соединения сплава Н70МФВ—ВИ стойки против межкристаллитной и ножевой коррозии; скорость коррозии основного металла и сварных соединений в растворе 21 %-ной HCl при температуре кипения не превышает 0,5 мм/год.

Сплавы бинарной системы Ni—Cr обычно содержат 30—50 % Cr и проявляют высокую коррозионную стойкость в окислительных средах, например в кипящих растворах азотной кислоты. Эти сплавы в отличие от сплавов системы Ni—Mo работают в пассивном состоянии.

Типичным представителем является отечественный свариваемый сплав

ХН58В (39—41 % Cr, 0,5—1,5 % W, не более 0,03 % C). Термическая обработка сплава ХН58В состоит в закалке с 1070 °С с охлаждением в воде, после чего он имеет структуру γ-твердого раствора с отдельными выделениями карбонитридов хрома в объеме зерен.

Сплав применяется в химической промышленности для изготовления сварной аппаратуры, а также травильных ванн с азотно-фтористыми растворами. Для сплава ХН58В характерна высокая стойкость в смесях азотной и плавиковой кислот, концентрированных растворах кипящей азотной кислоты, 30—70 %-ной CH_3COOH при температуре кипения.

Промышленные сплавы системы Ni—Cr—Mo чаще всего представлены сплавами на основе системы Ni — 15 % Cr — 15 % Mo, например отечественный свариваемый сплав ХН65МВУ (14,5—16,5 % Cr, 15—17 % Mo, 3,0—4,5 % W, не более 0,02 % C). Сплав после закалки с 1070 °С с охлаждением в воде имеет структуру γ-твердого раствора на основе никеля с выделением первичных карбидов типа M_6C.

Сплав ХН65МВУ применяют в химической промышленности для изготовления сварных аппаратов, теплообменников, реакторов и оборудования для производства уксусной кислоты, эпоксидных смол, сложных органических соединений, этилбензола, стирола и др.

В системе Ni—Cu наибольшее распространение получили сплавы типа монель, содержащие примерно 30 % Cu и 3—4 % (Fe + Mn), иногда с добавками Al и Si.

Сплавы типа монель применяют для аппаратуры, работающей в растворах неокислительных кислот, фосфорной, серной и соляной, растворах солей, органических кислот; для теплообменной аппаратуры, работающей в контакте с морской водой.

Тугоплавкие металлы в качестве коррозионно-стойких материалов имеют ограниченное применение, за исключением тантала. Тантал стоек в большинстве минеральных и органических кислот (например, скорость его коррозии в 85—98 %-ной серной кислоте при температуре 210 °С не превышает 0,05 мм/год), устойчив в фосфорной и азотной кислотах при всех концентрациях до 190 °С, в соленой до 30 %-ной концентрации при температуре до 190 °С. Тантал применяется для изготовления химической аппаратуры.

Благородные металлы Ag, Au, Pt, Pd обладают высокой коррозионной стойкостью, которая связана с их термодинамической стабильностью, а не переходом в пассивное состояние. Высокая стоимость ограничивает их применение в качестве коррозионно-стойких материалов. Наиболее часто эти металлы или сплавы на их основе используют для изготовления химической посуды (лабораторной), неокисляющихся электроконтактов, фильтров и фильтров для производства искусственного волокна, в ювелирном деле и др.

Неметаллические материалы. К неметаллическим материалам относятся **полимерные и минеральные материалы, а также резины и эбониты.**

Полиэтилен принадлежит к числу химически стойких материалов; он стоек в соляной, фтористоводородной и фосфорной кислотах, в разбавленных азотной и серной кислотах в широком диапазоне концентраций и температур (табл. 6).

Полиэтилен устойчив в щелочах, растворах солей, воде, сложных эфирах, кислотах.

Полиэтилен является коррозионностойким конструкционным материалом в химической промышленности, строительстве, используется в виде листов, плит, пленки.

Полистирол, получаемый полимеризацией стирола, от полиэтилена отличается тем, что атом водорода в нем замещен фенольной группой. Полистирол устойчив к воздействию минеральных кислот (кроме окислительных), щелочей, минеральных солей. Для полистирола характерно низкое водопоглощение.

Выпускается блочный и суспензионный полистирол для изготовления изделий методом прессования, литья под давлением, экструзией.

6. Химическая стойкость полимерных материалов [74]

Агрессивная среда	Концентрация, %	t, °С	Винипласт	Полиэтилен		Полипропилен	Пентапласт	Фторопласт	
				НД-ВП	ВД-НП			Ф-3	Ф-4
Кислота: азотная	До 70	20	с	с	с	с	с	с	с
	До 90	60	о	н	с	с	с	с	с
	0,5	20	н	н	н	н	н	н	н
серная	До 40	100	—	—	—	—	—	—	—
	40—75	20	с	с	с	с	с	с	с
		60	с	с	с	с	с	с	с
	75—98	20	с	с	с	с	с	с	с
		60	о	н	н	о	с	с	с
соляная	До 5	20	с	с	с	с	с	с	с
	10—35	60	с	с	с	с	с	с	с
		20	с	с	с	с	с	с	с
	Любая	60	о	о	о	о	о	с	с
фосфорная	10—90	130	—	—	—	—	—	—	—
		20	с	с	с	с	с	с	с
	85	60	о	с	о	с	с	с	с
фтористо-водородная	Любая	20	с	с	с	с	с	с	с
уксусная	До 80	60	о	о	н	с	о	с	с
		20	с	с	с	с	о	с	с
кремнефтористо-водородная	До 35	60	о	с	с	с	с	с	с
		20	с	с	с	с	—	с	с
едкий натр	До 52	60	с	с	с	с	—	с	с
хлористое железо	До 48	20	с	с	с	с	с	с	с
Ацетон	—	60	о	с	с	с	с	с	с
		20	н	о	о	с	с	с	с
Спирты (метиловый, этиловый)	—	60	н	н	н	о	о	с	с
		20	с	о	с	с	с	с	с
Бензин	—	20	с	с	о	о	с	с	с
		60	с	о	н	н	с	с	с

Продолжение табл. 6

Агрессивная среда	Концентрация, %	t, °С	Винипласт	Полиэтилен		Полипропилен	Пентапласт	Фторопласт	
				НД-ВП	ВД-НП			Ф-3	Ф-4
Бензол	—	20	с	о	о	о	с	с	с

Обозначения: с — стоек; о — относительно стоек; н — не стоек.

Поливинилхлорид получают полимеризацией хлористого винила; этот полимер является одним из наиболее стойких материалов [в минеральных (неокислительных) кислотах, например 20—100 %-ной H_2SO_4 до 60 °С; 35 %-ной HCl до 60 °С; ряде органических кислот].

Винипласт получают из поливинилхлорида с добавлением стеарина, трансформаторного масла и меламина. При комнатной и повышенных температурах винипласт проявляет высокую стойкость в 37 %-ной HCl, 90 %-ной H_2SO_4, 50 %-ной HNO_3, 80 %-ной CH_3COOH, растворах едких щелочей, карбонатов щелочных металлов, растворах аммиака, бензина, спиртов и других средах. Винипласт относится к свариваемым полимерам.

Тефлон — фторированный этилен — пропиленовый полимер; обладает высокой стойкостью. Тефлон используют в качестве термо- и коррозионностойкого материала в сочетании с титаном, танталом и бериллием ввиду почти одинаковой коррозионной стойкости.

Тефлон выпускается в виде труб, прутков, шлангов, пленки и других полуфабрикатов для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах.

Промышленность выпускает полимерные коррозионно-стойкие материалы других наименований, находящие применение в качестве конструкционных материалов, покрытий, замазок в различных отраслях техники [31, 74].

Минеральные материалы. Природные каменные материалы (гранит, диорит, спенит, андезит, бештаунит, базальт, габбро, кварцит, порфирит [31, 74]) обладают при нормальной температуре высокой кислотостойкостью, удовлетворительной щелочестойкостью, малым водопоглощением. Благодаря большой плотности, механической прочности на сжатие, твердости и другим свойствам природные каменные материалы удобны для изготовления фундаментов промышленных зданий, облицовки стен и полов корпусов, башен, резервуаров в гигиенических целях. Обычно каменные природные материалы используют в виде штучных изделий простой формы. Из расплавов природного каменного сырья получают фасонные изделия, даже трубы.

К искусственным минеральным материалам относят: кислотоупорный кирпич (ГОСТ 474—80), кислото- и термокислотоупорные плитки, шамотный кирпич, кварцевое (ГОСТ 16548—80) и силикатное (ГОСТ 8688—77) стекло, ситаллы и шлакоситаллы (ТУ 21-УСС-539—70), кислотоупорный бетон; их физико-химические свойства, включая коррозионную стойкость, описаны в работе [74].

Для изготовления тонкой химической аппаратуры, в том числе промышленной, контактирующей с высоко-

агрессивными средами, начинают применять кварцевое и силикатное стекло в виде труб диаметром до 300 мм, змеевиков, футеровочных плит, фасонных изделий, царг ректификационных колонн.

Коррозионная стойкость кварцевого и силикатного стекла примерно одинакова — оно устойчиво практически во всех минеральных и органических кислотах до 80 °С, кроме плавиковой кислоты при комнатной температуре и фосфорной при высокой. Кварцевое стекло имеет значительно более высокую термостойкость по сравнению с силикатным.

Ситаллы и шлакоситаллы являются кристаллическими стеклами, которые получают с помощью специальной термической обработки.

Ситаллы и шлакоситаллы имеют высокую коррозионную стойкость в серной, соляной, азотной, фосфорной, уксусной кислотах [74]. Эти материалы чаще всего применяют в виде футеровочных плиток, которые крепят к поверхности конструкций растворами на силикатных и полимерных вяжущих.

Кислотоупорный бетон представляет собой затвердевшую смесь кислотоупорного цемента и песка со щебнем из кислотоупорных природных каменных пород.

В свою очередь кислотоупорный цемент состоит из вяжущего (жидкое стекло) наполнителя — порошка из кислотостойких природных каменных материалов; могут также использоваться порошки искусственных каменных материалов, способствующих схватыванию и твердению (кремнефтористый натрий Na_2SiF).

Кислотоупорный порошок в смеси с кремнефтористым натрием известен как кислотоупорный кварцевый кремнефтористый цемент.

В зависимости от конструкции применяют ряд составов кислотоупорных бетонов, отличающихся друг от друга расходом составляющих в килограммах на 1 м³ бетона.

Кислотоупорный бетон стоек к действию многих минеральных кислот в широком диапазоне концентраций, агрессивных газах и солях с кислой реакцией. При контакте со щелочами и растворами солей со сложной реакцией кислотоупорный бетон разрушается.

К кислотоупорным бетонам принадлежат также полимерсиликатбетон и полимербетон.

Полимерсиликатбетон имеет тот же состав, что и кислотоупорный, но только с введением в смесь добавки фурилового спирта в количестве 3 % массы жидкого стекла. Добавка фурилового спирта делает бетон более пластичным, прочным, водостойким.

Полимербетон получают при отвердении смеси, состоящей из связующего (эпоксидные, полиэфирные, акриловые, фурановые, карбоамидные смолы), отвердителя и заполнителя.

Полимербетон имеет высокую прочность и стойкость против серной, соляной, азотной, фосфорной, уксусной, щавелевой, молочной кислот, едкого натра, водного раствора аммиака, минеральных солей [31].

При использовании этих материалов элементы технологического оборудования, зданий, сооружений должны эксплуатироваться в условиях, исключающих замораживание и оттаивание.

Углеграфитовые изделия обладают высокой коррозионной стойкостью в минеральных кислотах, NaOH и многих других средах, являясь к тому же термостойкими, а также тепло- и электропроводными (табл. 7).

Углеграфитовые изделия получают методом прессования и последующего отжига массы, состоящей из измельченного и прокаленного антрацита и нефтяного или каменноугольного пека. Различают изделия, отожженные при температуре 1300 °С — угольные и отожженные при 2300 °С — графитизированные.

Графитизированные изделия имеют более высокую прочность при растяжении и изгибе, на порядок более высокую теплопроводность, более высокую температуру применения — до 400 вместо 350 °С.

Для защиты химической аппаратуры углеграфитовые материалы применяют в виде штучных изделий — блоки, пластины, фасонные изделия (ТУ 48-12-6—77. «Изделия фасонные из угольного и коксового обожженного

7. Химически стойкие углеграфитовые плитки АТМ-1 [31]

Агрессивная среда	Концентрация, %	t, °С
Кислоты:		
азотная	5	20
серная	До 60	До 130
соляная	Любая	До $t_{кип}$
уксусная	»	20
фосфорная	До 80	До $t_{кип}$
фтористо-водородная	До 48	До $t_{кип}$
щавелевая	Любая	До 100
Аммиак (газ)	—	—
Алюминий (сернокислый, хлористый), хлористые аммонии, железо (сернокислое, хлорное), этиловый спирт, бензол, толуол, ацетон, бензин	Любая	До $t_{кип}$

8. Рекомендуемые марки резин и эбонитов [31] для службы в агрессивных средах

Среда	Концентрация, %	t, °С	Резины		
			мягкие и средней твердости	повышенной твердости	эбониты и полуэбониты
Кислоты:					
азотная	5	20	60—340	—	51—1626
	5	20	60—341	—	51—1629
	5	20	ИРП-1390	ИРП-1391	—
	10	70	51—1639	51—1632	—
	15	20	—	ИРП-1391	60—343
кремнефтористо-водородная	14	100	51—1639	51—1632	51—1627
	27	70	ИРП-1390	ИРП-1394	51—1626
	27	100	—	51—1632	51—1627
серная	60	100	—	51—1632	51—1626
	—	—	—	—	51—1627
	—	—	—	—	51—1629
	60	125	51—1639	—	—
	70	70	60—340	—	51—1574
	70	70	60—341	—	—
	70	70	ИРП-1390	—	—
	70	85	—	ИРП-1394	51—1626
	70	85	—	—	51—1627
соляная	10	70	—	—	51—1629
	10	80	—	—	51—1626
	10	80	—	—	51—1627
	20	90	51—1639	—	51—1626
	Любая	20	60—340	—	51—1629
	»	—	60—341	—	60—343
	»	—	ИРП-1390	—	60—344

Продолжение табл. 8

Среда	Концентрация, %	t, °С	Резины		
			мягкие и средней твердости	повышенной твердости	эбониты и полуэбониты
уксусная	Любая	70	—	—	51—1626
	»	70	—	—	51—1627
фосфорная	»	70	60—340	—	60—343
	»	70	60—341	—	60—344
	»	70	ИРП-1390	ИРП-1391	51—1574
	»	100	—	51—1632	51—1626
	—	100	—	ИРП-1394	51—1627
	—	—	—	—	51—1629
	Любая	110	51—1639	—	—
фтористо-водородная (плавиковая)	»	20	—	ИРП-1391	—
	10	100	—	51—1632	—
Основания:					
гидрат окиси калия	Любая	70	60—340	—	51—1574
	»	70	60—341	—	60—343
	»	70	ИРП-1390	ИРП-1391	60—344
гидрат окиси натрия	»	110	51—1639	ИРП-1394	51—1626
	»	110	—	51—1632	51—1627
	»	110	—	—	51—1629
Растворы солей:					
бихромат натрия или бихромат калия	10	70	ИРП-1390	—	51—1574
	10	100	51—1639	ИРП-1394	51—1626
	10	100	—	—	51—1627
	10	100	—	—	51—1629
хлористый натрий	Любая	70	60—340	ИРП-1391	—
	»	70	60—341	—	51—1574
	»	70	ИРП-1390	—	—
хлористый цинк	30	100	51—1639	ИРП-1394	51—1626
	30	100	—	—	51—1627
	30	100	—	—	51—1629
	30	100	—	—	60—344
Ацетон	Любая	56	51—1639	—	51—1626
	»	56	—	—	51—1627
Спирты (C_2—C_5)	Любая	70	51—1639	—	—
Белильная известь	Любая	65	60—340	—	60—343
	»	65	60—341	—	—
	»	65	ИРП-1390	—	—
Хлор сухой и влажный	98	80	—	ИРП-1394	60—343
	98	80	—	—	60—344

материала», ТУ 48-12-11—77. «Блоки угольные футеровочные» и др.).

Резины и эбониты изготовляют на основе натурального или синтетического каучука.

Резиновая смесь представляет собой композицию из каучука и серы. С повышением содержания серы в каучуке изменяется твердость резины; выпускают резины: мягкие, средней и повышенной твердости, эбониты и полуэбониты. Кроме серы резиновые смеси содержат наполнители, ускорители и активаторы вулканизации и другие добавки.

Резиновые смеси и эбониты используют в технике как коррозионностойкие уплотнительно-прокладочные материалы и для гуммирования в качестве антикоррозийной обкладки аппаратуры. Для обкладки применяют листовую техническую резину (ГОСТ 7338—77): кислотощелочестойкую, теплостойкую, морозостойкую, маслобензостойкую, пищевую.

Для защиты от коррозии применяют гуммирование резервуаров, арматуры, насосов, гальванических ванн, прокладок и т. д.

Рекомендуемые марки резин и эбонитов для службы в агрессивных средах приведены в табл. 8.

Все большее распространение в технике находят полиуретановые каучуки, проявляющие до 60 °С стойкость в воде, растворах азотно-кислого и серно-кислого аммония, хлористого и хлорноватокислого натрия. Полиуретан стоек в органических средах — бензине, глицерине, растительном масле, пропане, этиловом спирте, тетраэтилсвинце.

2. ТЕПЛОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Теплостойкими называют материалы, способные работать в нагруженном состоянии при температурах до 600 °С в течение определенного времени.

Наиболее распространенным в современной технике жаропрочным материалом являются жаропрочные стали, что объясняется их невысокой стоимостью и хорошими технологическими свойствами. По масштабам применения они занимают ведущее место при температурах 500—750 °С. При температурах ниже 450 °С целесообразно использовать обычные конструкционные стали.

Для изготовления деталей, работающих в нагруженном состоянии при температурах до 600 °С в течение длительного времени, применяют главным образом стали на основе α-железа (перлитные, мартенситные и др.) и их классифицируют как **теплостойкие стали** (теплоустойчивые). При температурах выше 600 °С в основном используют жаропрочные аустенитные стали.

Теплостойкие стали разделяют на низколегированные и среднелегированные перлитного и мартенситного класса, на которые распространяется ГОСТ 20072—74, и высоколегированные хромистые стали, химический состав которых регламентирован ГОСТ 5632—72.

Номенклатура марок теплостойких сталей по ГОСТ 20072—74 и рекомендации по их применению приведены в табл. 9, а механические свойства этих сталей при комнатной и повышенных температурах представлены в табл. 10.

Перлитные стали предназначены для длительной эксплуатации при температурах 450—580 °С и применяются в основном в котлотурбостроении для изготовления паропроводных и пароперегревательных труб. Так как они характеризуются продолжительными сроками службы (сотни тысяч часов), то их не подвергают упрочняющей термической обработке и применяют в отожженном или нормализованном и отпущенном состоянии (иногда вообще без термической обработки). Необходимая теплостойкость перлитных сталей достигается комплексным легированием хромом, молибденом, ванадием, ниобием; содержание каждого из этих элементов не превышает 1 % *1, за исключением хрома, содержание которого для повышения жаростойкости доводят до 2,5—3,0 %. Эти стали низкоуглеродистые с содержанием 0,08—0,15 % С (иногда до 0,2—0,3 % С).

*1 Содержание элементов здесь и далее по тексту в мас. долях.

9. Низко- и среднелегированные теплостойкие стали

Сталь (ГОСТ 20072—74)	Применение	Температура применения, °С	Срок эксплуатации	Температура интенсивного окисления, °С
	Стали перлитного класса			
12МХ 12Х1МФ	Трубы пароперегревателей, трубопроводов, коллекторных установок высокого давления, поковки для котлов и паропроводов. Детали цилиндров газовых турбин	510 570—585	Весьма длительный	570 600
20Х1М1Ф1ТР 20Х1М1Ф1БР	Крепежные детали турбин и фланцевых соединений паропроводов и аппаратуры	500—580	Длительный	—
25Х1МФ 25Х2М1Ф	Болты, плоские пружины, шпильки и другие крепежные детали	510 520—550	Весьма длительный	600
18Х3МВ	Трубы для гидрогенизационных установок	450—500	Длительный	600
20Х3МВФ	Роторы, диски, поковки, болты. Трубы высокого давления для химической аппаратуры и гидрогенизационных установок	500—560	Длительный	600
12Х2МВ8ФБ (ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1154—64)	Энергетическое машиностроение	650	Длительный	—
	Стали мартенситного класса			
15Х5	Трубы, детали насосов, лопатки турбомашин, подвески котлов	600	—	650
15Х5М 15Х5ВФ	Корпуса и внутренние элементы аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов и крекинговые трубы, детали насосов, крепеж	600	Весьма длительный	650
12Х8ВФ	Трубы печей, аппаратов и коммуникаций нефтезаводов	500	Длительный	650

10. Механические свойства (не менее) низко- и среднелегированных теплостойких сталей при комнатной и повышенных температурах [44, 45, 47, 51]

Сталь (ГОСТ 20072—74)	Механические свойства при 20 °С					Жаропрочные свойства					
	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²	Температура испытания, °С	$\sigma_{10\,000}$, МПа	$\sigma_{100\,000}$, МПа	$\sigma_{1/10\,000}$, МПа	$\sigma_{1/100\,000}$, МПа
12МХ	420	240	21	45	0,6	540	110	70	—	35
12Х1МФ	480	260	21	55	1,0	560	140	108	118	84
20Х1М1Ф1ТР	800	680	15	50	0,6	—	—	—	—	—
20Х1М1Ф1БР	800	680	14	50	0,6	—	—	—	—	—
25Х1МФ	900	750	14	50	0,6	550	130	65	90	30
25Х2М1Ф	800	680	12	50	0,5	550	220	150	250	70
18Х3МВ	650	450	18	—	1,2	550	—	—	75	—
20Х3МВФ	900	750	12	40	0,6	550	200	160	130	100
12Х2МВ8ФБ	460	660	26	51	0,5	650	150	130	120	80
15Х5	400	170	24	50	1,0	—	—	—	—	—
15Х5М	400	220	22	50	1,2	540	100	75	65	40
15Х5ВФ	400	220	22	50	1,2	550	89	70	50	38
12Х8ВФ	400	170	22	50	1,0	—	—	—	—	—

Примечание. Стали термообработаны в соответствии с рекомендациями ГОСТ 20072—74; свойства стали 12Х2МВ8ФБ — из [45].

Перлитные стали пластичны в холодном состоянии (см. табл. 10), удовлетворительно обрабатываются резанием и свариваются. По теплопроводности и тепловому расширению они близки к обычным конструкционным сталям.

Критерием жаропрочности перлитных сталей является предел ползучести с допустимой деформацией 1 % за 10 000 или 100 000 ч. По характеристикам жаропрочности эти стали при 550—600 °С существенно уступают аустенитным жаропрочным сталям. Однако при невысоких рабочих температурах перлитные стали благодаря высокой стабильности структуры оказываются в числе немногих конструкционных материалов, способных в течение длительного времени сопротивляться ползучести и сохранять достаточную пластичность (не охрупчиваясь), которая характеризует надежность работы конструкции в условиях возможного образования внутренних и внешних дефектов.

Наиболее широкое применение при температурах 550—600 °С нашла сталь 12Х1МФ, которая применяется на всех мощных электростанциях для изготовления пароперегревателей, коллекторов, паропроводов и т. п. Стали 25Х2М1Ф и 20Х3МВФ отличаются повышенной жаропрочностью в интервале 500—550 °С. Наиболее высокие показатели жаропрочности при 600—650 °С, приближающие ее к высоколегированным аустенитным сталям, имеет сталь 12Х2МВ8ФБ. В отличие от аустенитных она не содержит никеля, имеет высокую теплопроводность, меньший коэффициент термического расширения и не склонна к разрушению в зоне сварного шва.

Состав низколегированных сталей перлитного класса стабилизировался и новых путей его принципиального изменения пока не найдено. Значительное улучшение свойств достигнуто совершенствованием технологии производства и применением микролегирования.

Мартенситные стали предназначены для изделий, работающих при температурах 450—600 °С, и отличаются от перлитных сталей повышенной жаростойкостью в атмосфере пара или топочных газов.

Критерием жаропрочности мартенситных сталей является предел ползучести с допустимой деформацией 0,1 % за 10 000 ч или 1 % за 100 000 ч. По уровню жаропрочности они не намного превосходят перлитные стали.

Хром, который повышает жаростойкость и жаропрочность, присутствует во всех сталях, предназначенных для длительной эксплуатации при высоких температурах в различных средах: на воздухе, в продуктах сгорания угля, природного газа или мазута с различными агрессивными добавками ванадия, серы и др.

В зависимости от содержания хрома высокохромистые стали на основе α-железа подразделяют на три группы: 1) с содержанием 5—10 % Cr (мартенситные); 2) с содержанием 10—13 % Cr (мартенситно-ферритные); 3) с содержанием Cr выше 13 % (ферритные). Наиболее высокую жаропрочность имеют стали, содержащие 10—13 % Cr, а самую низкую — стали, содержащие свыше 13 % Cr, которые применяются в основном как жаростойкие.

Номенклатура марок мартенситных сталей, содержащих до 8 % Cr (в соответствии с ГОСТ 20072—74), и рекомендации по их применению приведены в табл. 9, а механические свойства — в табл. 10. Для обеспечения высоких, стабильных в процессе длительной службы механических свойств эти стали дополнительно легируют вольфрамом, молибденом, ванадием.

Сортамент теплостойких сталей (из числа указанных в ГОСТ 20072—74) должен соответствовать ГОСТ 2590—88 — для горячекатаной круглой; ГОСТ 2591—71 — горячекатаной квадратной; ГОСТ 103—76, 4405—75 — горячекатаной полосовой; ГОСТ 1133—71 — кованой круглой и квадратной; ГОСТ 7417—75 — калиброванной, круглой; ГОСТ 8559—75 — квадратной; ГОСТ 8560—78 — шестигранной.

К высоколегированным мартенситным сталям, содержащим до 10 % Cr, в первую очередь относятся *сильхромы* — среднеуглеродистые стали (до 0,4 % C) с кремнием (до 2—3 % Si). Они характеризуются повышенной жаростойкостью в среде выхлопных газов и используются для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания. Номенклатура марок в соответствии с ГОСТ 5632—72 и рекомендации по их применению приведены в табл. 11, а жаропрочные свойства после соответствующей термической обработки — в табл. 12. Жаропрочность сильхромов позволяет применять их при температурах не выше 600—650 °С; при более тяжелых условиях эксплуатации клапаны мощных двигателей изготовляют из аустенитных сталей.

Сильхромы не содержат дорогих и дефицитных легирующих элементов. Технологические свойства их хуже, чем свойства перлитных сталей; особенно затруднена сварка, требуется предварительный подогрев и последующая термическая обработка.

Наибольшее распространение в промышленности среди высоколегированных жаропрочных сталей получили *высокохромистые* стали, содержащие 10—13 % Cr (см. табл. 11). Номенклатура марок и химический состав этих сталей также обусловлен ГОСТ 5632—72. Для повышения сопротивления ползучести в состав сталей дополнительно вводят Mo, W, V, Nb, Ti. При таком высоком содержании хрома и других ферритообразующих элементов и низком содержании углерода стали становятся мартенситно-ферритными. Количество феррита невелико, поэтому по характеристикам жаропрочности они близки к мартенситным. Упрочнение этих сталей обеспечивается созданием мартенситно-ферритной основы и выделением различных карбидов (типа $Me_{23}C_6$ и MeC) и фаз Лавеса Fe_2W [44]. При длительной эксплуатации они могут приме-

11. Высоколегированные теплостойкие стали

Сталь (ГОСТ 5632—72)	Применение	Рекомендуемая температура применения, °С	Срок эксплуатации	Температура интенсивного окисления, °С
Стали мартенситного класса				
40Х9С2, 40Х10С2М	Клапаны моторов, крепежные детали	650	Длительный	850
15Х11МФ	Рабочие и направляющие лопатки паровых турбин, поковки, бандажи и др.	560—580	Весьма длительный	750
18Х11МНФБ, 20Х12ВНМФ	Высоконагруженные детали, лопатки паровых турбин, детали клапанов, поковки дисков, роторов паровых и газовых турбин, крепежные детали	600	То же	750
11Х11Н2В2МФ, 13Х11Н2В2МФ, 16Х11Н2В2МФ	Диски компрессора, лопатки и другие нагружеиные детали	600	Длительный	750
20Х13	Лопатки паровых турбии, уплотнительные втулки, клапаны, болты, гайки, трубы, арматура крекинг-установок	500	Весьма длительный	750
13Х14Н3В2ФР	Высоконагруженные детали (диски, валы, болты, лопатки и др.), работающие в условиях повышеиной влажиости	550	То же	700
Стали мартенситно-ферритного класса				
18Х12ВМБФР	Поковки, турбинные лопатки, трубы паровых котлов и паропроводов, крепеж	500	Весьма длительный	750
12Х13	Лопатки паровых турбии, клапаны гидравлических прессов, болты, гайки, трубы, бандажи, арматура крекинг-установок	500	То же	750
14Х17Н2	Рабочие лопатки, диски, валы, втулки	400	Длительный	800

Продолжение табл. 11

Сталь (ГОСТ 5632—72)	Применение	Рекомендуемая температура применения, °С	Срок эксплуатации	Температура интенсивного окисления, °С
	Стали аустенитного класса			
08Х16Н13М2Б	Поковки для дисков и роторов, лопатки, болты	600	Весьма длительный	850
09Х16Н15М3Б	Трубы пароперегревателей и трубопроводов высокого давления	350	То же	850
12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 12Х18Н12Т	Детали выхлопных систем, газовых турбин, турбокомпрессоров, трубы, листовые и сортовые детали	600	То же	850
31Х19Н9МВБТ	Роторы, диски, болты, поковки, лопатки и др.	600	Весьма длительный	800
55Х20Г9АН4	Клапаны моторов	600	То же	750

12. Механические свойства (не менее) высоколегированных теплостойких сталей при повышенных температурах [44, 45, 47, 51]

Сталь (ГОСТ 5632—72)	Режимы термической обработки	Температура испытания, °С	σ_{-1} ($N = 10^7$) для образца: гладкого	σ_{-1} ($N = 10^7$) для образца: с надрезом	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
			МПа					
40Х10С2М	Закалка с 1100 °С, масло, отпуск 800 °С, вода	550	—	—	130	95	100	40
		600	—	—	—	—	46	22
15Х11МФ	Нормализация 1050 °С, отпуск 680—700 °С	550	250 *	170 *	200	170	180	90
		600	—	—	—	—	90	40
18Х11МНФБ	Нормализация 1100—1140 °С, отпуск 750 °С	550	—	—	170	—	120	—

Продолжение табл. 12

Сталь (ГОСТ 5632—72)	Режимы термической обработки	Температура испытания, °С	σ_{-1} ($N = 10^7$) для образца: гладкого	σ_{-1} ($N = 10^7$) для образца: с надрезом	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
			МПа					
20Х13	Закалка с 1000—1050 °С, воздух или масло, отпуск 700—750 °С	500	240	130	195	160	180	48
18Х12ВМБФР	Закалка 1050 °С, масло, отпуск 650—700 °С	590	—	—	210	170	140	100
		620	—	—	140	110	80	60
12Х13	Закалка с 1030—1050 °С, масло, отпуск 740—750 °С	500	—	—	145	120	100	57
	Закалка с 1030—1050 °С, масло, отпуск 680—700 °С	500	225	107	220	190	—	—
08Х16Н13М2Б	Закалка с 1100—1130 °С, воздух	550	—	—	260	210	—	160
		600	—	—	200	150	140	90
12Х18Н9Т	Закалка с 1130—1160 °С, воздух или вода, старение 800 °С	600	205	135	130	95	200	75
12Х18Н12Т	Закалка с 1050—1100 °С, воздух	600	—	—	170	135	—	75
31Х19Н9МВБТ	Закалка с 1150—1180 °С, вода, старение 800 °С	560	—	—	300	260	240	170
		600	—	—	240	220	150	110

* База испытаний $N = 10^8$.

няться до 600—650 °С. Используются и термически упрочненном состоянии после закалки (или нормализации) и старения (высокого отпуска).

Основным свойством высокохромистых сталей является высокое сопротивление газовой коррозии, что выгодно отличает их от никельсодержащих сталей в условиях применения высокосернистых мазутов. Благодаря высокому содержанию легирующих элементов стали глубоко прокаливаются даже при нормализации (до 120—200 мм) и поэтому более пригодны для деталей крупных сечений, чем перлитные стали.

Наименее легированные хромистые стали 12Х13 и 20Х13 применяются для лопаток паровых турбин, работающих длительное время при температурах 450—500 °С. Одной из причин использования этих сталей для лопаток является их высокая демпфирующая способность. Сталь 15Х11МФ отличается пониженным содержанием хрома, но дополнительно легирована молибденом и ванадием, которые всегда используют при комплексном легировании. Максимальная температура для длительной службы этой стали 550—580 °С. Для легирования 12 %-ных хромистых сталей также используется в небольшом количестве никель (0,5—3 %). Комплексно-легированные хромистые стали содержат молибден, вольфрам, ванадий, ниобий и бор, например сталь 18Х12ВМФР. Жаропрочные свойства высоколегированных теплостойких сталей приведены в табл. 12.

К теплостойким сталям можно также отнести некоторые аустенитные стали, для которых максимальная рабочая температура при длительной эксплуатации составляет 600 °С и ниже (см. табл. 11 и 12). Они обладают более высокой жаростойкостью и используются для более нагруженных деталей.

Химический состав этих сталей регламентирован ГОСТ 5632—72 и является обязательным для других стандартов, установленных для конкретных видов продукции: прутков, листов, труб, проволоки, штанг и ленты. Каждым из этих стандартов определена номенклатура марок стали (из числа указанных в ГОСТ 5632—72) и установлены требования по сортаменту, качеству поверхности, макроструктуре, механическим свойствам и термической обработке. Механические свойства различных полуфабрикатов из высоколегированных теплостойких сталей приведены в табл. 13—15. Профили для паровых турбин поставляются по ГОСТ 19442—74 в виде горячекатаных и холоднотянутых фасонных прутков — для лопаток и в виде холоднокатаных и холоднотянутых круглых и полукруглых прутков — для деталей (связей) лопаток для работы при температурах до 580 °С. Согласно ГОСТ 18968—73 поставляются профили горячекатаные и кованые: круглые (до 150 мм), квадратные (до 220 мм) и полосы (толщиной до 80 мм и шириной до 150 мм) с механическими свойствами, соответствующими приведенным в табл. 16.

К теплостойким материалам можно отнести высоколегированные чугуны с шаровидным графитом [4]. Механические свойства некоторых высоколегированных чугунов при повышенных температурах приведены в табл. 17.

Жаропрочные цветные сплавы на основе титана, алюминия и магния можно применять как теплостойкие. Указанные материалы, несмотря на более высокую стоимость, используют в тех случаях, когда нельзя применять стали вследствие большой массы. Однако они менее жаропрочны и используются при следующих температурах: сплавы магния — до 300—350 °С, сплавы алюминия — до 350—400 °С (за исключением САП, их можно применять до 500 °С), сплавы титана — до 500—600 °С.

Свойства некоторых жаропрочных сплавов магния приведены в табл. 18. Недостатками магниевых сплавов является их низкая технологичность при плавке, литье, обработке давлением и термообработке и недостаточная коррозионная стойкость и жаропрочность по сравнению с алюминиевыми сплавами.

Алюминиевые сплавы более прочные и имеют хорошие технологические свойства. Высокие тепло- и электропроводность позволяют использовать их в качестве проводниковых материа-

13. Механические свойства (не менее) сортовой теплостойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5949—75

Сталь	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU_+, МДж/м²	Сталь	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU_+, МДж/м²
40Х9С2	735	441	15	35	—	13Х11Н2В2МФ	882 (1078)	735 (931)	15 (13)	55	0,9
40Х10С2М	931	735	10	35	0,2	18Х12ВМБФР	735	490	12	45	0,4
15Х11МФ	686	490	15	35	0,6	12Х13	588	412	20	60	0,9
18Х11МНФБ	735	588	15	50	0,6	14Х17Н2	1078	412	20	30	0,5
20Х12ВНМФ	735	588	15	50	0,6	08Х16Н13М2Б	539	216	40	50	1,2
11Х11Н2В2МФ	980	833	10	50	—	12Х18Н9Т	539	196	40	55	—
16Х11Н2В2МФ	По согласованию					12Х18Н10Т	510	196	40	55	—
20Х13	645 (833)	441 (637)	16 (10)	55 (50)	0,8 (0,6)	12Х18Н12Т	539	196	40	55	—
13Х14Н3В2ФР	931 (1127)	735 (882)	14 (12)	55 (50)	0,9 (0,7)	31Х19Н9МВБТ	588	294	30	40	—

Примечание. Значения в скобках относятся к стали, термообработанной с более низкой температуры отпуска.

14. Механические свойства (не менее) толстолистовой теплостойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 7350—77

Сталь	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %	Сталь	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %
20Х13	509	372	20	12Х18Н9Т	530	216	38
12Х13	490	340	21	12Х18Н10Т	530	236	38
14Х17Н2	По согласованию			12Х18Н12Т	530	236	38

15. Механические свойства (не менее) тонколвстовой теплостойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5582—75

Сталь	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %	Сталь	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %
11Х11Н2В2МФ	830	—	22	13Х13	392	—	21
16Х11Н2В2МФ	830	—	22	14Х17Н2	По согласованию		
20Х13	490	—	20	12Х18Н10Т	529	196	40

16. Механические свойства термообработанных профилей для паровых турбин при испытании механически обработанных образцов

Сталь	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа (не менее)	δ, % (не менее)	ψ, % (не менее)	KCU, МДж/м² (не менее)	НВ
15Х11МФ, 15Х11МФ-Ш	550—670	686	15	50	0,6	217—255
	588—755	735	15	50	0,6	220—269
	666—784	813	13	40	0,4	255—286
18Х11МНФБ, 18Х11МНФБ-Ш	588—735	735	15	50	0,6	229—255
20Х12ВНМФ	588—755	735	15	50	0,6	229—269
20Х12ВНМФ-Ш	666—784	813	13	35	0,4	241—286
20Х13	490—657	666	18	50	0,7	207—241
20Х13-Ш	686—882	833	15	50	—	255—302
12Х13, 12Х13-Ш	441—608	617	20	60	0,8	187—229

17. Механические свойства (не менее) высоколегированных чугунов

Чугун (ГОСТ 7769—82)	20 °С: $\sigma_в$, МПа	20 °С: $\sigma_т$, МПа	20 °С: δ, %	20 °С: KCU, МДж/м²	600 °С: σ_{10}, МПа	600 °С: σ_{1000}, МПа	Скорость ползучести, %/ч (σ = 40 МПа)
ЧЮ22-Ш	350	—	0,5	0,05	100	—	$4{,}0 \cdot 10^{-5}$*
ЧН11Г7-Ш	300	180	10,0	0,2	—	120	$1{,}8 \cdot 10^{-4}$
ЧН19Х3-Ш	250	180	2,0	0,2	—	120	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$; $2{,}0 \cdot 10^{-4}$ *

* Скорость ползучести при 700 °С и напряжении 30 МПа.

18. Свойства жаропрочных сплавов магния и алюминия [30, 49, 54]

Сплав	Рекомендуемая температура применения, °С	Температура испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	σ_{100}, МПа	$\sigma_{0,2/100}$, МПа	δ, %
Сплавы на основе магния						
Деформируемые (ГОСТ 14957—76)						
МА8	150—200	200	130	75		35
МА9	150—200	200	170	70		28
МА11	200—250	250	180	80		20
МА13	300—350	300	120	70		50
МА14	300—350	300	130	90		60
Литейные (ГОСТ 2856—79)						
МЛ15	150—200	200	120	65		40
МЛ11	200—250	250	120	50		30
МЛ9	250—300	250	180	60		45
МЛ14	300—350	300	80	65		37
Сплавы на основе алюминия						
Деформируемые (ГОСТ 4784—74)						
ВД17	250—300	300	170	55		32
АК4	250—300	300	160	40		35
Д20	250—300	300	180	80		65
Литейные (ГОСТ 2685—75)						
АЛ19	250—300	300	150	65		40
АЛ21	300—325	300	—	70—80		50
АЛ33	300—350	300	160	90		—
АЦР1У	350—400	300	115	110		60
Спеченные						
САП-1	300—500	350	—	70		60
		500	—	40		30

19. Свойства и область применения жаропрочных титановых сплавов [30, 58]

Сплав (ГОСТ 19807—74)	Температура применения, °С	Применение	Температура испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{тв}$, МПа	$\sigma_{0,2/100}$, МПа	σ_{-1} ($N = 10^7$), МПа, гладкий образец
α-сплавы							
ОТ4	350—400	Корпусные детали	400	560	390	200	230—250
ВТ5-1	450—500	То же	500	480	310	150	270
ВТ20	500—550	То же, фасонные отливки	500	690	450—480	150—170	360
ВТ18	550—600	Лопатки компрессора и др. детали	500	880	650—700	370	—
			600	770	300—330	100—120	400—430
(α + β)-сплавы							
ВТ3-1	350—400	Лопатки, диски, кольца, крепежные и др. детали. Силовые детали, фасонные отливки	400	800/950	780/920	500/250	450—480 *
ВТ8	450—500	Детали авиадвигателей	500	750/870	500/580	250	440
ВТ9	450—500	Детали компрессора и др. детали, фасонные отливки	500	750	600/780	350/450	420 *
ВТ25	500—550	Детали авиадвигателей	500	850/900	680/750	360	420 *

* База испытаний $N = 2 \cdot 10^7$.

Примечание. В числителе указаны значения для сплавов в отожженном, а в знаменателе — в термически упрочненном (после закалки и старения) состоянии.

лов. Жаропрочные алюминиевые сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности, в том числе в авиационной и ракетной технике. Свойства основных алюминиевых жаропрочных сплавов приведены в табл. 18.

Свойства и область применения жаропрочных сплавов титана приведены в табл. 19.

3. ЖАРОСТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Разрушение поверхностных слоев металлов и сплавов при высоких температурах в коррозионно-активных средах создает большие трудности при эксплуатации машин и аппаратов, например газовых турбин, высокотемпературных печей, ядерных реакторов, двигателей внутреннего сгорания. Велики потери металла от газовой коррозии и при различных технологических операциях, ковке, штамповке, в металлургии и металлообработке, например, при термической обработке и ряде других операций.

Способность материалов сопротивляться газовой коррозии в процессе обработки и эксплуатации при высоких температурах называют *жаростойкостью*.

Наиболее распространенным является процесс взаимодействия металлов с кислородом, хотя известны и другие виды газовой коррозии (сернистая, водородная и др.). Химическая коррозия, имеющая место в этом случае, развивается в кислородсодержащих газах: на воздухе, в углекислом газе, водяном паре, чистом кислороде и др. Движущей силой газовой коррозии является термодинамическая неустойчивость металлов в газовых средах при данных внешних условиях: давлении, температуре, составе среды и др. При этом на поверхности металла чаще всего образуется оксидная пленка. От структуры, состава и свойств этих пленок зависит скорость процесса газовой коррозии. Защитные свойства оксидных пленок в значительной степени определяются их сплошностью, которая зависит от отношения моля оксида к массе атома металла. Хорошо защищают металл от дальнейшего окисления только плотные оксиды, если отношение объемов находится в пределах 1,0—2,5 [28].

При разработке жаростойких сплавов основным необходимым требованием ко всем легирующим элементам является большее химическое сродство их к кислороду, чем основы. Согласно существующим теориям можно выделить три принципа жаростойкого легирования.

1. Ионы легирующего элемента входят в кристаллическую решетку оксида основного металла, уменьшая его дефектность и соответственно скорость диффузии, и образуется *легированный оксид*. Этим объясняется повышенная жаростойкость низколегированных сталей и сплавов.

2. Легирующий компонент образует собственный *оксид*, обладающий лучшими защитными свойствами, чем оксид основного металла. Этим объясняется хорошая жаростойкость высоколегированных сталей и сплавов.

3. Легирующий элемент с основным металлом образует *двойной оксид* с кристаллической решеткой типа шпинеля, обладающий повышенными защитными свойствами. На жаростойких сплавах обнаружены двойные оксиды-шпинели: $FeO \cdot Cr_2O_3$, $FeO \cdot Al_2O_3$, $NiO \cdot Fe_2O_3$, $NiO \cdot Cr_2O_3$, $NiO \cdot Al_2O_3$ и др. С этим связана высокая жаростойкость высоколегированных сталей и сплавов.

Окисление металлов протекает по различным кинетическим законам, зависящим от условий реализации процесса и свойств образующихся оксидов. Температурные зависимости скорости окисления металлов определяют экспериментально в условиях, имитирующих эксплуатационные. По ним оценивают жаростойкость и максимальную рабочую температуру, что определяет возможность использования металла при заданных температуре и длительности эксплуатации.

Для количественного определения жаростойкости применяют различные методы, из которых наиболее известны весовой метод (по изменению массы образца) и метод непосредственного измерения глубины коррозии по ГОСТ 6130—71. Высокой точностью характеризуется параметрический метод расчета жаростойкости металлов на ЭВМ. В руководящих материалах [27] приведены характеристики жаростойкости основных классов металлических конструкционных материалов, применяемых в энергомашиностроении: глубина коррозии, средняя скорость коррозии, предельная допускаемая температура применения в различных коррозионных средах. Применительно к нагревателям расчетные значения характеристик жаростойкости, применяемых для оценки конструкционных материалов, не выявляют степень отрицательного влияния неоднородности окисления на срок их службы. В этом случае разработаны специальные методы оценки стойкости путем нагрева образцов электрическим током [59].

Жаростойкость сплавов магния с Mn, Zn, Al выше, чем нелегированного магния. Улучшает жаростойкость маг-

ния бериллий (0,02—0,05 %) *1, устраняя самовозгорание при технологической обработке.

Жаростойкость промышленных **медных сплавов** (латуней и бронз) выше жаростойкости меди, так как они легированы элементами четвертой группы. Высокой жаростойкостью отличаются сплавы меди с Be, Al, Mn; немного уступают им сплавы с Zn, Sn, Si.

Жаростойкость промышленных **алюминиевых сплавов** такая же хорошая, как и нелегированного алюминия. Исключение составляют сплавы с магнием типа АМг, так как при нагреве образуется собственный рыхлый оксид MgO.

Жаростойкость **сплавов титана** можно повысить применением жаростойких покрытий.

Тугоплавкие металлы (Mo, W, Ta, Nb) имеют низкую жаростойкость. Они не могут работать в окислительных средах при температуре выше 500 °С. Объемное легирование повышает жаростойкость (разработаны сплавы ниобия с повышенной жаростойкостью [7]). Основные усилия специалистов направлены на разработку защитных покрытий [6].

Основные жаростойкие сплавы созданы на основе **железа и никеля**. Химический состав высоколегированных сталей и сплавов на железной, железоникелевой и никелевой основах, предназначенных для работы в коррозионно-активных средах и при высоких температурах, приведен в ГОСТ 5632—72. Согласно этому стандарту жаростойкие (окалиностойкие) сплавы относятся к группе II и характеризуются как стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температуре выше 550 °С, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Жаропрочные стали и сплавы, отнесенные к группе III, также должны обладать достаточной жаростойкостью.

При выборе марки стали или сплава необходимо знать рабочую температуру, механические напряжения, допустимую по конструктивным соображениям деформацию, срок службы и режим работы детали, состав окружающей среды. *1 Номенклатура и рекомендации по применению жаростойких сталей и сплавов приведены в табл. 20, а характеристики жаростойкости некоторых из них — в табл. 21.

Жаростойкость сталей и сплавов на основе железа и никеля повышается легированием в основном хромом, алюминием и кремнием, которые могут образовывать плотные оксиды Cr_2O_3, Al_2O_3, SiO_2. Наибольшее распространение в качестве легирующего элемента получил хром. Высокими защитными свойствами отличаются двойные оксиды-шпинели, которые образуются в высокохромистых сплавах $FeO \cdot Cr_2O_3$ и $NiO \cdot Cr_2O_3$.

Из жаростойких сталей наиболее широкое применение нашли *хромистые* (15Х5, 15Х6СЮ). Стали с содержанием хрома 5—6 % обладают достаточно высокой жаростойкостью до 600—650 °С, с 14—15 % — до 800 °С. При более высоких температурах требуется применять стали с более высоким содержанием хрома (12Х17, 15Х28). Недостатком высокохромистых сталей является склонность к росту ферритного зерна. Для предотвращения охрупчивания при длительных нагревах сталь дополнительно легируют титаном, сильным карбидообразующим элементом (08Х17Т, 15Х25Т, 08Х18Т1). Стали без титана применяются для деталей при высоких температурах и отсутствии больших нагрузок, например для нагревателей.

Дополнительное легирование железохромистых сталей алюминием и кремнием повышает их жаростойкость. В качестве жаростойких сталей применяют хромистые стали, легированные кремнием, — *сильхромы* (40Х9С2, 40Х10С2М6, 30Х13Н7С2), которые широко применяются в автостроении. Однако содержание алюминия и кремния в отличие от хрома в сталях ограничено, так как эти элементы ухудшают технологические свойства. Этот недостаток исключается при совместном легировании хромом и алюминием.

*1 Содержание элементов здесь и далее по тексту в мас. долях.

*1 Исходят также из расчета на прочность с учетом экономии никеля.

20. **Жаростойкие стали и сплавы на основе железа и никеля [42, 51, 75, 76]**

Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72)	Применение	Температура интенсивного окисления, °С (на воздухе)	Рекомендуемая температура (до 10 000 ч), °С (на воздухе)	Примечание
Стали мартенситного класса				
15Х5 (ГОСТ 20072—74)	Трубы	600—650	—	—
40Х9С2 *	Клапаны автомобильных, тракторных и дизельных моторов, теплообменники, колосники	850	—	Устойчива в серосодержащих средах
40Х10С2М *	Клапаны автомобильных, тракторных и дизельных моторов	850	—	То же
30Х13Н7С2	Клапаны автомобильных, тракторных и дизельных моторов	950	—	То же
Стали мартенситно-ферритного класса				
15Х6СЮ	Детали котельных установок, трубы	800	—	Устойчива в серосодержащих средах
12Х13	Детали турбин, трубы, детали котлов, детали, работающие в агрессивных средах	700	—	—
Стали ферритного класса				
10Х13СЮ	Клапаны моторов, различные детали	950	—	Устойчива в серосодержащих средах
12Х17	Теплообменники, чехлы, термопары, краны, поддоны, оборудование для кухонь, трубы	900	850	Рекомендуется для замены стали 12Х18Н9
08Х17Т	То же	900	—	—
08Х18Т1	То же	900	—	—

Продолжение табл. 20

Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72)	Применение	Температура интенсивного окисления	Рекомендуемая температура (до 10 000 ч)	Примечание
		°С (на воздухе)		
15Х18СЮ	Трубы пиролизных установок, аппаратура, детали	1050	—	Устойчива в серосодержащих средах
15Х25Т	Аппаратура, детали, чехлы термопар, электроды, трубы пиролизных установок, теплообменники	1050	1000	Рекомендуется для замены стали 12Х18Н10Т
15Х28	Аппаратура, детали, трубы пиролизных установок	1100—1150	1100	Рекомендуется для замены стали 20Х23Н18
Стали аустенитно-ферритного класса				
08Х20Н14С2	Трубы	1000—1050	1000	Устойчива в серосодержащих средах
20Х20Н14С2	Печные конвейеры, ящики для цементации	1000—1050	—	То же
20Х23Н13	Трубы для пиролиза метана, пирометрические трубки, печная арматура, муфели	1050	1000	В интервале температур 600—800 °С охрупчивается
Стали аустенитного класса				
09Х14Н16Б *	Трубы пароперегревателей и трубопроводы установок сверхвысокого давления	850	650	—
12Х18Н9	Трубы, печная арматура, теплообменники, муфели	850	900	Неустойчива в серосодержащих средах
08Х18Н10	То же	850	900	—

Продолжение табл. 20

Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72)	Применение	Температура интенсивного окисления	Рекомендуемая температура (до 10 000 ч)	Примечание
		°С (на воздухе)		
12Х18Н9Т	Трубы, печная арматура, теплообменники, муфели	850	900	Неустойчива в серосодержащих средах
08Х18Н10Т	То же	850	900	То же
12Х18Н10Т *	То же	850	900	То же
12Х18Н12Т *	Трубы	850	900	То же
36Х18Н25С2	Печные конвейеры и другие нагруженные детали, головки форсунок, ящики для цементации	1100	1000	Устойчива в науглероживающих средах
55Х20Г9АН4 *	Клапаны автомобильных моторов	950	—	—
45Х22Н4М3 *	То же	950	—	—
10Х23Н18 *	Трубы и детали установок для конверсии метана, пиролиза, листы, печная арматура	1050	1000	В интервале температур 600—800 °С охрупчивается
20Х23Н18 *	То же	1050	1000	То же
20Х25Н20С2	Подвески и опоры в котлах, трубы электролизных установок, печная арматура, муфели, роторы	1050	1000	В интервале температур 600—800 °С охрупчивается

Продолжение табл. 20

Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72)	Применение	Температура интенсивного окисления	Рекомендуемая температура (до 10 000 ч)	Примечание
		°С (на воздухе)		
12Х25Н16Г7АР *	Детали газопроводных систем, камер сгорания, диафрагмы, листовые детали	1100	1050	Рекомендуется для замены сплавов никеля
Сплавы на железоникелевой основе				
ХН38ВТ *	Детали газовых систем	1050	1000	Рекомендуется для замены стали ХН78Т
ХН28ВМАБ	Листовые детали турбин	1100	800—1000 (до 1000 ч)	—
ХН45Ю *	Детали горелок, чехлы термопар, листы и трубы для деталей печей, муфели колпаковых печей	—	1250—1300	Рекомендуется для замены стали ХН78Т
Сплавы на никелевой основе				
ХН60ВТ *	Листовые детали двигателя	1100	1000	—
ХН60Ю *	То же	1250	1200	—
ХН75МБТЮ *	Детали газопроводных систем, аппаратура, детали камер сгорания	1100	1050	—
ХН70Ю *	Детали газопроводных систем, печная арматура	1250	1200	—
ХН78Т *	Детали газопроводных систем, детали камер сгорания	1150	1100 (1200 кратковременно)	—

* Марки сталей и сплавов, способных работать в нагруженном состоянии.

21. Показатели жаростойкости сталей и сплавов на воздухе [51, 59]

Сталь или сплав (ГОСТ 5632—72)	Температура испытания, °С	Средняя скорость коррозии, мм/год	Увеличение массы, г/(м²·ч)	Глубина коррозии, мм (10 000 ч)
12Х13	600	0,02	—	—
	700	0,12	—	—
	800	0,45	—	—
	850	0,83	—	—
12Х17	800	0,0034	—	0,004
	850	0,0045	—	0,005
	900	0,0059	—	0,007
15Х25Т	900	0,0181	—	0,021
	950	0,0276	—	0,032
	1050	0,35	—	—
15Х28	1050	0,45	—	—
12Х18Н9	700	0,06	—	—
	800	0,17	—	—
12Х18Н9Т	750	0,013	—	—
12Х18Н12Т	700	0,0023	—	0,003
36Х18Н25С2	1000	—	0,42	—
20Х23Н18	900	—	—	0,018
	950	—	—	0,025
	1000	—	0,2	—
	1100	—	0,35	—
12Х25Н16Г7АР	1100	—	0,46	—
ХН45	1250	0,1	—	—
	1300	0,24	—	—
ХН75МБТЮ	900	0,0112	—	0,013
	950	0,0177	—	0,02
ХН78Т	900	0,0066	—	0,007
	1100	—	—	0,036
	1200	—	—	0,063

Химический состав этих сталей и сплавов приведен в ГОСТ 10994—74.

Легирование никелем улучшает технологические и прочностные свойства *хромоникелевых* аустенитных сталей, но значительно удорожает их. Стали и сплавы с никелем необходимо применять только в тех случаях, в которых требуется повышенная жаропрочность и пластичность. Разработаны жаростойкие Cr—Mn—стали, легированные алюминием [2], которые могут использоваться как жаростойкие до 900—950 °С, имеют высокие механические свойства и хорошую технологичность. В сплавах системы Fe—Ni—Cr, предназначенных для работы до 1050 °С, марганец может лишь частично заменить никель (до 10 %). Следует выделить сплав ХН45Ю, который обладает лучшими свойствами, чем сплавы на основе никеля. Это единственный сплав, который работает при температуре 1350 °С (до 100 ч). Стали ХН35ЮС, 10Х18Н18Ю, 10Х10Н20ЮС содержат еще меньшее количество никеля, но могут эксплуатироваться соответственно: сталь ХН35ЮС — до 1200 °С, две остальные стали — до 1100 °С. Сплавы системы Fe—Ni—Co—Cr также являются высокожаростойкими, но легирование кобальтом (до 40 %) связано в основном с необходимостью повышения жаропрочности [51].

Никель обладает более высокой жаростойкостью в окислительных средах, чем железо, так как его единственный оксид NiO менее дефектный, чем оксид FeO. Высокая жаростойкость *нихромов* (сплав никеля с хромом) объясняется прежде всего образованием шпинели $NiO \cdot Cr_2O_3$. Жаростойкие сплавы на никелевой основе имеют в основном структуру твердых растворов, мало упрочняются термической обработкой и обладают невысокой прочностью и жаропрочностью, но хорошей технологичностью. Нихромы имеют высокое удельное электрическое сопротивление и поэтому используются как материал для нагревателей электропечей, а также для изготовления камер сгорания, газопроводов и деталей газотурбинных установок.

Сплав, содержащий никель и 20 % Cr — основа большинства жаростойких никелевых сплавов. Содержание углерода ограничено 0,1 %. Марганец снижает жаростойкость этих сплавов. Кремний с этой целью также не используется, так как он снижает технологичность сплава. Для создания высокожаростойких никелевых сплавов используют алюминий. Лучший жаростойкий никелевый сплав Х20Н80Ю3.

Жаростойкие сплавы на основе никеля в окислительных средах (парах воды, кислороде, синтетическом аммиаке) более стойки, чем на основе железа. Однако в серосодержащих средах никель нестоек к газовой коррозии. Присутствие серы в окислительных средах снижает температуру применения никелевых сплавов до 550 °С, а в восстановительных — до 260 °С.

Виды полуфабрикатов из жаростойких сталей и сплавов, применяемых в электропечестрсении, и стандарты на поставляемую продукцию приведены в табл. 22. В табл. 23 представлены стандарты на полуфабрикаты, из которых можно изготовлять нагреватели печей сопротивления. В табл. 22 и 23 приведены стандарты на сортамент жаростойких сталей, в которых определена номенклатура марок сталей (из числа указанных в ГОСТ 5632—72 и ГОСТ 10994—74) и устаиовлены требования по сортаменту, качеству поверхиости, макроструктуре, режимам термической обработки и механическим свойствам в состоянии поставки. В литом состоянии жаростойкие стали выпускаются по ГОСТ 2176—77.

Жаростойкие сплавы на основе железа и никеля не претерпевают фазовых превращений, и поэтому их термическая обработка состоит в высокотемпературном нагреве для выращивания зерна или для снятия напряжений.

Механические свойства термически обработанных полуфабрикатов из жаростойких сталей приведены в табл. 24—27. В табл. 28 даны механические и жаропрочные свойства широко применяемых в электропечестроении жаростойких сталей и сплавов при различных температурах.

Сплавы для нагревателей составляют особую группу. Эти сплавы отличаются сочетанием жаростойкости и

22. Стандарты и технические условия на полуфабрикаты из сталей и сплавов, применяемых в электропечестроении [76]

Сталь или сплав	Трубы	Листы	Лента	Сортовой прокат	Проволока
12Х13	ГОСТ 9941—81, ГОСТ 9940—81	ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77	ГОСТ 4986—79	ГОСТ 5949—75	ГОСТ 2246—70, ГОСТ 18143—72
15Х25Т	ГОСТ 9941—81, ГОСТ 9940—81	ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77	—	ГОСТ 5949—75	ГОСТ 2246—70
12Х18Н10Т	ГОСТ 9941—81, ГОСТ 9940—81	ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77	ГОСТ 4986—79	ГОСТ 5949—75	ГОСТ 2246—70, ГОСТ 18143—72
20Х23Н13	—	ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77	—	ГОСТ 5949—75	—
20Х20Н14С2	ГОСТ 9941—81, ГОСТ 9940—81	ГОСТ 5582—75	—	ГОСТ 5949—75	—
20Х23Н18	ГОСТ 9940—81	ГОСТ 5582—75, ГОСТ 7350—77	ГОСТ 4986—79	ГОСТ 5949—75	ГОСТ 2246—70
20Х25Н20С2	—	ГОСТ 5582—75	—	ГОСТ 5949—75	—
ХН45Ю	ТУ 15-3-59—72	ТУ 14-123-41—73, ТУ 14-123-40—73	—	ТУ 14-1-941—74	ТУ 14-131-65—72
ХН70Ю	—	ТУ 14-1-1386—75, ТУ 14-1-493—75	—	ГОСТ 12766.4—77	ГОСТ 12766.1—77

Примечание. Тонколистовая сталь по ГОСТ 5582—75 (горячекатаная толщиной 1,5—3,9 мм, холоднокатаная толщиной 0,7—3,9 мм) поставляется в термически обработанном и выпрямленном виде; термообработка толстолистовой стали по ГОСТ 7350—77 (горячекатаной толщиной 4—50 мм, холоднокатаной толщиной 4—5 мм) и сортового проката по ГОСТ 5949—75 (диаметром или толщиной до 200 мм) оговаривается в заказе.

23. Сортамент жаростойких сплавов для нагревателей печей сопротивления

Сортамент	ГОСТ
Проволока холоднокатаная диаметром 0,1—7,5 мм	12766.1—77
Лента холоднокатаная сечением (0,1÷3,2)×(6÷250) мм, длиной 10—40 м	12766.2—77
Сплав калиброванный диаметром 8—10 мм	12766.3—77
Прокат сортовой горячекатаный диаметром: 6—12 мм в мотках, 13—30 мм в прутках	12766.4—77
Лента плющенная сечением (0,1÷1,0)×(0,5÷5,0) мм	12766.5—77

высокого омического сопротивления. Ниже приведены предельные рабочие температуры ($T_{пр}$) сплавов в различных средах [59].

В воздушной среде

Сплав	Х15Ю5	Х23Ю5	Х23Ю5Т	Х27Ю5Т	0Х24Ю5Т-ВИ (с иттрием)
$T_{пр}$, °С	1000	1200	1400	1350	1300
Сплав	Х15Н60-Н	Х20Н80-Н	ХН70Ю	ХН60Ю3	ХН20ЮС
$T_{пр}$, °С	1125	1200	1200	1200	1100

В водяном паре $T_{пр}$ для сплавов Х23Ю5Т, Х27Ю5Т — не более 1300 °С, для сплава Х20Н80-Н — не более 1100 °С.

В углеродсодержащих и серосодержащих средах рекомендуется применять сплавы Х23Ю5, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т до 1150 °С

В азотсодержащих средах

Среда	Азот	Диссоциированный аммиак		
Сплавы	Х32Ю5Т	Х15Н60-Н	Х20Н80-Н	Х23Ю5	Х23Ю5Т
$T_{пр}$, °С	900	1100	1200	1100	1200

В водороде целесообразно использовать сплавы Х23Ю5Т, Х27Ю5Т до 1400 °С, сплавы ХН70Ю, ХН60Ю3 до 1200 °С; *в вакууме* (10^{-1}—10^{-2}) Па — сплавы Х23Ю5, Х23Ю5Т, Х27Ю5Т, 0Х24Ю5Т-ВИ с иттрием до 1350 °С, сплавы ХН70Ю, ХН60Ю3, Х15Н60Ю3А до 1150 °С, *в аргоне технической чистоты* — сплавы Х23Ю5Т, Х27Ю5Т до 1300 °С, сплав Х20Н80-Н до 1200 °С. В *парах хлора и брома* можно применять нагреватели из сплава Х20Н80-Н при температурах не выше 300 °С.

Значения предельной рабочей температуры относятся только к нагревателям толстого сечения. Срок службы нагревателей резко снижается с уменьшением сечения проволоки или ленты. Максимальные рабочие температуры нагревательных элементов приведены в табл. 29. В табл. 30 приведены механические свойства проволоки из жаро-

24. Механические свойства (не менее) сортовой жаростойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5949—75

Сталь	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_т$ МПа	δ %	ψ %	*KCU*, МДж/м²	Сталь	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_т$ МПа	δ %	ψ %	*KCU*, МДж/м²
40Х9С2	735	441	15	35	—	20Х23Н13	490	294	35	50	—
40Х10С2М	931	735	10	35	0,2	09Х14Н16Б	490	196	35	50	—
30Х13Н7С2	1176	784	8	25	0,2	12Х18Н9	490	196	45	55	—
15Х6СЮ	441	245	20	40	—	12Х18Н9Т	539	196	40	55	—
12Х13	558	412	20	60	0,9	08Х18Н10	470	196	40	55	—
10Х13СЮ	490	343	15	60	—	08Х18Н10Т	490	196	40	55	—
12Х17	392	245	20	50	—	12Х18Н10Т	510	196	40	55	—
08Х17Т	По согласованию					12Х18Н12Т	539	196	40	55	—
15Х18СЮ	490	294	20	50	—	36Х18Н25С2	637	343	25	40	—
15Х25Т	441	294	20	45	—	10Х23Н18	490	196	35	50	—
15Х28	441	294	20	45	—	20Х23Н18	490	196	35	50	—
08Х20Н14С2	539	245	40	50	1,0	20Х25Н20С2	558	294	35	50	—
20Х20Н14С2	588	294	35	55	—	12Х25Н16Г7АР	686	323	40	45	—

25. Механические свойства (не менее) полуфабрикатов из толстолистовой жаростойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 7350—77

Сталь	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_т$ МПа	δ, %	Сталь	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_т$ МПа	δ, %
12Х13	490	343	21	04Х18Н10	490	176	45
12Х17	441	—	18	08Х18Н10Т	510	206	43
15Х25Т	441	—	14	12Х18Н12Т	510	206	43
20Х23Н13	568	—	35	20Х23Н18	539	265	35
12Х18Н9	529	216	38	12Х25Н16Г7АР	735	392	50
12Х18Н9Т	529	216	38				

26. Механические свойства (не менее) полуфабрикатов из тонколистовой жаростойкой стали, термообработанной в соответствии с рекомендациями ГОСТ 5582—75

Сталь	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_т$ МПа	δ, %	Сталь	$\sigma_в$ МПа	$\sigma_т$ МПа	δ, %
12Х13	392	—	21	12Х18Н9	539	—	35
12Х17	490	—	20	08Х18Н10	510	—	45
08Х17Т	461	—	20	08Х18Н10Т	510	—	40
08Х18Т1	461	—	30	12Х18Н10Т	529	196	40
15Х25Т	529	—	17	20Х23Н18	510	—	35
15Х28	529	—	17	20Х25Н20С2	490	—	35
20Х20Н14С2	588	—	40	12Х25Н16Г7АР	Не более 980	—	35
20Х23Н13	539	—	35				

27. Механические свойства жаростойкой проволоки

Сталь	Диаметр проволоки, мм	Термообработанная	Нагартованная	
		$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_в$, МПа
			не менее	
12Х13	1,0—6,0	500—750	16	—
08Х18Н10 12Х18Н9 12Х18Н9Т	0,2—1,0	600—900	20	1100
12Х18Н10Т	1,0—6,0	550—900		

Примечание. Термическая обработка проводится в соответствии с рекомендациями ГОСТ 18143—72.

28. Механические и жаропрочные свойства жаростойких сталей и сплавов, применяемых в электропечестроении [76]

Сталь; режим термообработки	Температура, °С	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	KCU, МДж/м²	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$
		МПа		%			МПа	
12Х13; нагрев 1030—1050 °С, охлаждение в масле, отпуск 700 °С	20	710—750	580—605	14—22	66—68	1,4—1,7	—	—
	400	585	470—500	13—15	64—67	1,8—2,3	—	—
	500	530—550	450—480	15—18	69,5	1,9—2,5	150	—
	600	340—460	320—420	20—27	79—85	1,9—2,7	47	47,0
	700	—	—	—	—	—	12	8,8
12Х18Н10Т; нагрев 1050—1100 °С, охлаждение на воздухе	20	560	230	46	66	2,2	—	—
	400	420	150	26	61	2,9	—	—
	500	400	140	30	60	2,0	—	—
	600	350	120	28	51	2,0	130—160	100,0
	700	270	120	20	40	2,6	54—70	16,0
	800	—	—	—	—	—	15	5,5

Продолжение табл. 28

Сталь; режим термообработки	Температура, °С	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	KCU, МДж/м²	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$
		МПа		%			МПа	
15Х25Т; нагрев 730—770 °С, охлаждение в воде или на воздухе	20	450	300	20	45	—	—	—
	800	—	—	—	—	—	5,0	—
	1000	—	—	—	—	—	1,7	0,08
20Х23Н13; нагрев 1150 °С, охлаждение на воздухе	20	667	363	38,5	59,9	2,1	—	—
	800	—	—	—	—	—	1,7	6,8
	1000	—	—	—	—	—	0,42	1,8
20Х20Н14С2; нагрев 1150 °С, охлаждение на воздухе	20	640	350	53	73	—	—	—
	800	230	100	41	42	—	—	—
	900	110	40	58	58	—	—	—
	1000	—	—	—	—	—	—	0,35
20Х23Н18; без термической обработки	800	—	—	—	—	—	—	1,5
	900	—	—	—	—	—	—	0,4
20Х23Н18; нагрев 1180 °С, старение 800 °С, охлаждение в воде	20	610	300	29—35	47	1,4—1,9	—	—
	800	190	160	19—24	34	1,8	—	—
20Х23Н18; нагрев 1150 °С, охлаждение на воздухе	800	—	—	—	—	—	20,0	17,5
	900	—	—	—	—	—	12,0	—
	1000	—	—	—	—	—	4,5	1,6
20Х25Н20С2; нагрев 1200 °С, охлаждение на воздухе	20	550	⩾250	⩾51,0	73,0	2,5	—	—
	1100	88	—	57,7	67,5	—	—	0,12
ХН45Ю; нагрев 1150 °С, охлаждение на воздухе	20	710	330	60	58	—	—	—
	1100	34	20	80	55	—	3,3	—
	1200	24	—	100	80	—	1,3	—
ХН70Ю; нагрев 1200 °С, охлаждение на воздухе	20	650	330—750	50	45	2,5	—	—
	1100	20	—	70	70	0,4	4,5	0,33
	1200	—	—	—	—	—	—	0,17

стойких сплавов, применяемых для нагревателей.

Широкое применение в промышленности находит **жаростойкий чугун** как наиболее дешевый и доступный материал (см. гл. II). Жаростойкость чугуна определяется его сопротивлением окалинообразованию не более 0,5 г/(м²·ч), увеличению массы и росту (не более 0,2 %) при заданной температуре в течение 150 ч. Для деталей, работающих при температурах до

29. Максимальные рабочие температуры нагревательных элементов, работающих на воздухе

Сплав (ГОСТ 10994—74)	Диаметр или толщина элемента, мм				
	0,2	0,4	1,0	3,0	6,0
Х13Ю4	700	800	850	900	950
Х15Ю5	750	850	900	950	1000
Х23Ю5	950	1025	1100	1150	1200
Х23Ю5Т	950	1075	1225	1350	1400
Х27Ю5Т	950	1075	1200	1300	1350
Х15Н60-Н	900	950	1000	1075	1125
Х20Н80-Н	950	1000	1100	1150	1200
ХН70Ю (ГОСТ 5632—72)	950	1000	1100	1175	1200

30. Механические свойства проволоки из жаростойких сплавов, термообработанных в соответствии с рекомендациями ГОСТ 12766.1—77

Сплав (ГОСТ 10994—74)	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	Сплав (ГОСТ 10994—74)	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ
	МПа		%			МПа		%	
Х23Ю5	645	540	23	72	Х15Н60-Н	645	264	31,0	59,8
Х23Ю5Т	645	540	23	72	Х20Н80-Н	656	—	45,4	61,0
Х27Ю5Т	663	534	15,9	—	Х20Н80	656	—	45,4	61,0
Х15Н60	664	645	31,9	59,8	ХН70Ю (ГОСТ 5632—72)	813	—	37,5	—

300 °С, могут использоваться простые серые чугуны при условии получения мелкого графита. До 450—500 °С удовлетворительными характеристиками обладают отливки из модифицированного и ковкого чугуна. Незначительное легирование хромом (иногда совместно с никелем) позволяет повысить температуру использования чугунов до 700 °С. Не менее важным фактором являются высокие литейные характеристики простых и низколегированных чугунов. Более тяжелые условия работы и необходимость применения отливок для работы при температурах выше 600—700 °С требуют обязательного использования специальных чугунов [4]. При выборе типа чугуна, помимо жаростойкости и ростоустойчивости, необходимо принимать во внимание и изменение механических характеристик с температурой, а также учитывать экономическую целесообразность его применения.

Требования по химическому составу, режимам термической обработки и механическим свойствам жаростойких чугунов определены ГОСТ 7769—82. К основным легирующим элементам жаростойких чугунов относятся хром, кремний и алюминий. При разработке этих чугунов руководствуются теми же принципами жаростойкого легирования, что и при разработке жаростойких сталей. Рекомендации по применению жаростойких чугунов приведены в табл. 31, а их механические свойства — в табл. 32.

Наряду с жаростойкими металлами и сплавами широкое применение в промышленности получили керамика и металлокерамика (керметы). Общим

31. Жаростойкие чугуны

Чугуны (ГОСТ 7769—82)	Марка	Применение	Максимальная рабочая температура, °С	Показатели жаростойкости [75]		
				Температура испытания, °С	Увеличение массы, г/(м²·ч)	Рост, %
Хромистые: низколегированные	ЧХ1	Холодильные плиты доменных печей, колосники, реторты, детали газотурбинных двигателей и компрессоров, горелки, кокили и др.	500	500 600	0,20 0,50	0,05 0,20
	ЧХ2	Колосники и балки горна агломерационных машин, детали химического и нефтехимического оборудования, турбокомпрессоров, термических печей и др.	600	600 700	0,50 0,50	0,05 0,20
	ЧХ3 *		700	700 800	0,50 1,50	0,10 0,50
высоколегированные	ЧХ16 *	Арматура химического машиностроения, печная арматура, детали цементационных печей	900	—	—	—
	ЧХ22С	Детали, не подвергающиеся действию нагрузок. Печная арматура и др.	1000	—	—	—
	ЧХ28	Детали, работающие при небольших нагрузках в среде SO_2 и SO_3, в щелочах, азотной кислоте, растворах и расплавах солей до 1000 °С. Детали центробежных насосов, печная арматура	1100	900 1000	0,20 0,20	— —

Продолжение табл. 31

Чугуны (ГОСТ 7769—82)	Марка	Применение	Максимальная рабочая температура, °С	Показатели жаростойкости [75]		
				Температура испытания, °С	Увеличение массы, г/(м²·ч)	Рост, %
Кремнистые низколегированные	ЧС5	Колосники, бронеплиты для печей обжига цементной промышленности, сероуглеродные реторты	700	800	0,20	0,40
	ЧС5Ш	Арматура котлов, детали пароперегревателей котлов, газовые сопла, подовые плиты термических печей	800	800 900	0,05 0,20	— 0,20
Алюминиевые: низколегированные	ЧЮХШ	Пресс-формы для стекольных изделий, детали печного оборудования, ролики листопрокатных станов	700	—	—	—
высоколегированные	ЧЮ6С5 *	Отливки, работающие при температурах до 800 °С в условиях резких теплосмен	800	—	—	—
	ЧЮ7Х2 *	Детали печной арматуры	800	—	—	—
	ЧЮ22Ш *	Детали арматуры котлов, детали пароперегревателей котлов, обжиговых печей, нагревательных печей, колосники	1100	1100	0,05	—
	ЧЮ30 *	Детали печей обжига колчедана	1100	—	—	—

Примечания: 1. Ш — графит имеет шаровидную форму. 2. Звездочкой отмечены жаростойкие чугуны с повышенной износостойкостью.

32. Механические свойства жаростойких чугунов (не менее)

Чугун	$\sigma_в$	$\sigma_и$	НВ	Чугун	$\sigma_в$	$\sigma_и$	НВ
	МПа				МПа		
ЧХ1	170	350	2030—2800	ЧС5	150	290	1400—2940
ЧХ2	150	310	2030—2800	ЧС5Ш	290	—	2230—2940
ЧХ3	150	310	2230—3560	ЧЮХШ	390	590	1830—3560
ЧХ16	350	700	3900—4400	ЧЮ6С5	120	240	2360—2940
ЧХ22С	290	540	2150—3330	ЧЮ7Х2	120	170	2540—2940
ЧХ28	370	560	2150—2640	ЧЮ22Ш	290	490	2350—3560
ЧХ32	390	690	2450—3330	ЧЮ30	200	350	3560—5360

недостатком этих материалов (на основе окислов, боридов, карбидов, нитридов и силицидов) является их хрупкость при комнатной температуре.

4. ЖАРОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Аустенитные жаропрочные стали. Состав, режимы термической обработки, свойства аустенитных сталей регламентированы ГОСТ 5632—72. Общим признаком для всех этих сталей является сохранение в условиях службы устойчивой аустенитной структуры. В зависимости от химического состава аустенитные стали по структурному признаку могут быть разделены на три группы: гомогенные, с карбидным упрочнением и с карбидно-интерметаллидным упрочнением.

К группе гомогенных аустенитных сталей относятся главным образом низкоуглеродистые хромоникелевые стали, дополнительно легированные более тугоплавкими элементами. Гомогенные аустенитные стали используются преимущественно в энергомашиностроении для изготовления труб пароперегревателей и паропроводов, арматуры установок сверхвысоких параметров и рассчитаны на длительную (до 10^5 ч) службу при 650—700 °С. Характерными для этих сталей являются высокие технологические свойства, такие, как способность к горячей пластической деформации, прошиваемость при изготовлении цельнотянутых труб, свариваемость и др. Эти цели достигаются повышенным содержанием никеля [отношение (Ni/Cr) > 1] при низком содержании углерода (в пределах 0,06—0,012 %) и повышенном отношении (Ti, Nb/C) > > 10, что исключает возможность образования при эксплуатации карбидных фаз типа $Me_{23}C_6$, охрупчивающих стали. Дополнительное легирование сплавов вольфрамом (до 2—3 %) и молибденом (до 2,5 %) способствует повышению жаропрочности.

Базовым составом для гомогенных аустенитных сталей является состав стали 10Х18Н9Т. Механические свойства стали представлены в табл. 33.

Дополнительное легирование молибденом увеличивает жаропрочные свойства стали. В табл. 34 представлены характеристики длительной прочности стали Х18Н12М3Т. Бор и редкоземельные элементы положительно влияют на жаропрочные и технологические свой-

33. Механические свойства стали 10Х18Н9Т при высоких температурах [51]

Температура испытания, °С	$\sigma_в$, МПа	δ	ψ	KCU, кДж/м²
		%		
20	554	63	71	1250
650	320	16,9	33,2	1960
800	185	23,7	51,5	2590
900	91	36	70	2360
1000	55	43	71	2060
1100	38	37	70	1510

34. Длительная прочность (в МПа) стали Х18Н12М3Т [51]

Температура испытания, °С	Время, ч							
	1	10	100	300	500	1000	10 000	100 000
650	350	270	220	196	189	182	140	112
700	270	210	164	155	140	126	84	62
760	210	145	110	83	84	73	49	30
815	145	105	77	66	61	49	23	11
870	120	77	52	42	39	30	—	—
980	58	35	19	13	10	8,4	—	—

35. Длительная прочность гомогенных жаропрочных сталей [47]

Сталь	$t_{зак}$, °С	$t_{исп}$, °С	Длительная прочность, МПа		
			σ_{100}	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$
10Х18Н12Т	1100—1200	600	—	—	110
		650	—	—	70
		700	—	—	45
0Х15Н24В4ТР	1130	700	260	180	120
		750	170	110	80

ства сталей. В табл. 35 представлены свойства стали, в состав которой наряду с хромом и никелем введен бор.

Термическая обработка аустенитных гомогенных сталей состоит из закалки (аустенизации) от высоких температур (1050—1200 °С) или аустенизации и стабилизирующего отпуска (700—750 °С) с целью получения более однородного γ-твердого раствора, заданной величины зерна (балл 3—6) и стабильной структуры, а также снятия напряжений, которые могут возникнуть в процессе изготовления деталей. Положительным качеством гомогенных аустенитных сталей, наряду с технологичностью, является их высокая жаростойкость.

Стали с карбидным упрочнением предназначены для работы при температурах 650—750 °С и высоких напряжениях. Их используют для изготовления ответственных деталей энергомашиностроения (диски и лопатки турбин, крепежные детали и др.).

Основу сталей с карбидным упрочнением составляет хромоникелевый аустенит, содержащий 0,25—0,5 % С. В ряде сплавов дефицитный никель частично заменяют менее дефицитным марганцем. Присутствие марганца наряду с никелем способствует повышению жаропрочности сталей. Карбидообразующие элементы V, Nb, W, Mo связывают часть углерода в специальные карбиды, что приводит к заметному повышению жаропрочности.

Структура и механические свойства сталей в значительной степени зависят от термической обработки, условий старения.

При низкотемпературном старении (500—600 °С) твердение сталей протекает крайне медленно, но с образованием большого количества карбидной фазы высокой дисперсности. При длительных выдержках старения существенно снижаются характеристики пластичности сталей. С целью получения наиболее выгодных свойств для этих сталей используют старение при температурах на 100—150 °С выше рабочей температуры или двойное старение (низкотемпературное + высокотемпературное).

В целях предотвращения коробления и растрескивания изделий при термической обработке не следует допускать вылеживания сталей между операциями двойного старения.

Из аустенитных сталей с карбидным упрочнением наиболее простой является сталь 40Х14Н14В2М. Основное ее назначение — выхлопные клапаны авиационных и автомобильных двигателей, крепежные детали. Сталь 31Х19Н9МВБГ при более низком содержании никеля дополнительно легирована вольфрамом, титаном, ниобием и, кроме того, содержит марганец. С целью повышения пластичности сталь переплавляют методом ЭШП. Еще более низкое содержание никеля имеют стали 40Х15М7Г7Ф2М и 37Х12Н8Г8МФБ. Эти стали могут быть использованы при температурах до 800 °С.

Длительная прочность и сопротивление усталости сталей в значительной степени зависят от однородности размеров зерен. В этой связи не рекомендуется перегревать стали выше 1160 °С и заканчивать деформацию ниже 1000 °С с тем, чтобы при нагреве под закалку получить равномерную мелкозернистую структуру.

Широко применяются стали с невысоким содержанием никеля (7—8 %). К числу последних относится сталь 40Х15Н7ГФ2МС. Однако из-за ограниченной жаростойкости при температурах выше 750 °С ее целесообразно алитировать. Сталь 37Х12Н8Г8МФБ легирована значительным количеством карбидообразующих элементов при ограниченном содержании никеля. Ее применяют для изготовления крупных деталей — турбинных дисков, бандажных колец и пр. Оптимальным вариантом термической обработки является закалка плюс двойное старение.

В табл. 36—49 представлены свойства основных аустенитных сталей с карбидным упрочнением.

Аустенитные стали и сплавы с карбидно-интерметаллидным упрочнением имеют ограниченное содержание углерода; большинство сталей — свариваемые. Вследствие ограничения по углероду для получения устойчивой γ-решетки твердого раствора стали и сплавы должны содержать значительное количество никеля, сбалансированное с содержанием элементов, стабилизирующих структуру феррита.

Для повышения жаропрочности железоникельхромовую основу обычно легируют элементами, упрочняющими твердый раствор и вызывающими дисперсионное твердение. Обычно для упрочнения вводят 10—35 % Cr, до 7 % Mo, до 6 % W, до 1,3 % Nb, до 0,5 % V, до 3,2 % Ti, до 3,2 % Al. Тантал и кобальт вследствие их дефицитности не нашли широкого применения. Ограничено и применение сталей с вольфрамом.

Наиболее благоприятное влияние на жаропрочность и технологические свойства сталей и сплавов оказывает молибден. Хром также повышает жаропрочность и, кроме того, является основным элементом, обеспечивающим защиту сталей и сплавов от окисления.

Стали 08Х16Н13М2Б, 09Х14Н16Б упрочнены вследствие легирования твердого раствора, наличия после закалки карбонитрида ниобия и дополнительных карбидов ниобия, выделяющихся при старении. Для этих сталей характерно, что отношение хрома к никелю меньше 1.

Стали 09Х14Н19В2БР, 09Х14Н19В2БР1 имеют в своем составе значительное количество вольфрама. Основными упрочняющими фазами являются карбонитрид Nb (C, N) и фаза Лавеса Fe_2W. Повышение содержания бора приводит к некоторому изменению характеристики фазового состава. Бор влияет на растворенный вольфрам. Если в стали 09Х14Н19В2БР количество фазы Лавеса не превышает 2 %, то в стали 09Х14Н19В2БР1 фаза Лавеса выделяется в количестве 5 %, причем весьма медленно.

В соответствии с ГОСТ 5632—72 композиция элемеитов, состоящая из

36. Механические свойства стали 31Х19М9МВБ в различном сортаменте при 20 °С [47]

Термическая обработка	Продукция, направление вырезки образцов	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
		МПа		%		
Нагрев 1140—1180 °С; вода; старение 750—800 °С, 15 ч, воздух	Сортовой прокат, продольное	600	300	30	40	—
Нагрев; вода; старение 800 °С, 15 ч, воздух	Поковки, продольное	700	300	35	40	600
	То же, тангенциальное	700	300	27	30	400

37. Механические свойства стали 31Х19Н9МВБТ при различных температурах (пруток, продольные образцы) [26]

Термическая обработка	t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
		МПа		%		
Нагрев 1150—1180 °С; вода; старение 800 °С, 15 ч	20	750	330	31	40	950
	560	500	210	26	40	1000
	600	490	250	20	46	1100
	650	440	240	24	55	1100
Нагрев 1150—1180 °С; вода; старение 700 °С, 50 ч	20	740	320	32	25	400
	300	700	320	32	46	1500
	400	670	310	28	43	1400
	500	630	280	26	45	1400
	600	590	260	26	46	1000
	650	460	190	15	40	500
	700	420	250	21	40	1000
	750	320	220	25	52	—
	800	240	200	29	64	—

38. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) стали 31Х19Н9МВБТ [26]

t, °С	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
560	240	170	300	260
600	150	110	230	200
650	—	80	180	150
700	—	40	100	60

39. Релаксационная стойкость стали 31Х19Н9МВБТ [47]

t, °С	σ_0, МПа	$\sigma_т$ (МПа) за время, ч								
		100	500	1000	3000	4000	5000	10 000	15 000	20 000
560	200	150	147	144	139	—	134	129	124	122
600	200	138	125	117	—	99	—	—	—	—
600	250	160	135	123	—	96	—	—	—	—
600	300	180	163	139	—	100	—	—	—	—
650	200	110	90	80	—	65	—	—	—	—
650	250	130	100	90	—	75	—	—	—	—

40. Механические свойства стали 40Х14Н14В2М при 20 °С в различном сортаменте (продольные образцы) [47]

Вид продукции	Термическая обработка	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
		МПа		%		
Прутки, штанги, полосы	Нагрев 800 °С, 5 ч; воздух	720	320	20	25	500
Детали арматуры	Нагрев 1150—1180 °С; вода; старение 750 °С, 5 ч, воздух	700	300	—	35	—

41. Механические свойства стали 40Х14Н14В2М (пруток, продольные образцы) при различных температурах [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
	МПа		%		
550	580	260	22	31	—
600	500	250	15	26	650
650	440	240	12	24	750
700	340	220	10	22	800
750	280	200	8,8	17	830

42. Механические свойства стали 40Х14Н14В2М (пруток, продольные образцы) при различных температурах после старения в течение 1000 ч [47]

t, °С	$t_{ст}$, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
		МПа		%		
20	550	860	410	—	—	800
550	550	570	270	23	—	—
650	550	550	260	17	—	—
700	550	420	250	15	—	—
20	600	820	410	18	36	600
550	600	820	310	—	28	—
600	600	560	320	—	19	—
700	600	410	280	15	30	—
20	700	820	430	—	32	750
600	700	490	260	20	46	—
650	700	470	270	19	44	—
700	700	400	260	17	39	—

43. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) стали 40Х14Н14В2М [47]

t, °С	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
600	180	80	180	150
650	70	40	130	100
700	37	16	26	—

44. Свойства сварного соединения из стали 40Х14Н14В2М (термическая обработка — отпуск при 750 °С) [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
	МПа		%		
20	730	470	33	48	700
450	580	300	32	43	730
650	450	310	45	29	750

45. Механические свойства стали 40Х15Н7ГФ2МС (пруток, продольные образцы) при различных температурах [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%	
20	1000	600	15	15
300	810	550	13	26
400	780	540	12	23
500	700	490	12	23
600	640	500	9	23
700	520	430	8	32
800	380	280	8	17
900	250	—	7	18
1000	160	—	6	21

46. Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости (в МПа) стали 40Х15Н7ГФ2МС [47]

t, °С	σ_{100}	σ_{1000}	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/1000}$	$\sigma_{0,2/10\,000}$	σ_{-1}*1
20	—	—	—	—	—	—	510
500	—	—	—	240	—	—	—
600	430	320	250	230	—	—	380
700	250	180	110	155	—	—	340
800	130	84	50	80	—	—	240
900	75	—	—	—	—	—	—

*1 На базе 10^7 циклов.

47. Релаксационная стойкость стали 40Х15Н7ГФ2МС [47]

t, °С	σ_0, МПа	σ_τ (МПа) за время, ч				
		100	1000	2000	5000	10 000
560	150	130	120	117	106	93
560	200	170	160	157	145	123
560	250	210	200	196	182	160
580	150	127	120	112	94	72
580	200	174	150	147	120	90
580	250	200	180	172	140	100

48. Механические свойства стали 37Х12Н8Г8МФБ при различных температурах [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
	МПа		%		
20	1000	600	20	25	350
200	770	600	15	37	—
300	740	540	14	36	—
350	730	520	14	37	—
400	730	500	15	36	—
450	720	500	13	38	700
500	680	500	13	37	700
550	660	490	12	37	750
600	600	490	12	38	500
650	560	450	12	42	560
700	500	430	13	37	560
750	420	380	15	44	—

49. Длительная прочность (в МПа) стали 37Х12Н8Г8МФБ [устойчива против окисления в воздушной среде при температурах до 700—750 °С. При 700 °С скорость окисления 0,06 кг/(м²·ч)] [47]

t, °С	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{5000}	$\sigma_{10\,000}$	σ_{-1}
600	450	340	310	300	340
650	370	250	220	210	230
700	310	230	190	180	130
750	250	—	—	—	—

50. Механические свойства стали 08Х16Н13М2Б (прутки, продольные образцы) при 20 °С и повышенной температуре [51]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%	
20	620	230	45	68
500	490	175	30	50
600	470	175	29	55
650	440	175	27	57

51. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) стали 08Х16Н13М2Б (прутки, продольные образцы) [47]

t, °С	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
550	260	210	—	160
600	200	150	140	90
650	130	95	100	90
700	60	35	60	22

52. Релаксационная стойкость стали 08Х16Н13М2Б (прутки, продольные образцы) при 600 °С [47]

σ_0, МПа	σ_τ (МПа) за время, ч				
	100	500	1000	3000	5000
200	121	113	107	98	94
150	95	88	85	77	68

53. Физические свойства стали 08Х16Н13М2Б при различных температурах [51]

t, °С	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	λ, Вт/(м·°С)	t, °С (интервал)	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$
20	2,06	—	20—400	17,1
200	1,91	17,1	20—600	17,8
400	1,74	20,1	20—800	18,6
500	1,67	21,7		
600	1,58	23,0		
700	—	24,7		

54. Ударная вязкость и твердость стали 09Х14Н16Б при 20 °С после старения при различных температурах [51]

t, °С	τ, ч	KCU, кДж/м^2	НВ, МПа
600	500	1670	1450
600	1000	1740	1510
600	2500	1400	1540
600	5000	1350	1560
650	500	1490	1470
650	1000	1550	1540
650	2500	1640	1430
650	5000	1300	1470
700	1000	1470	1470

55. Механические свойства стали 09Х14Н16Б при высоких температурах [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м^2
	МПа		%		
20	570	250	51	73	2100
600	400	180	32	61	3300
650	360	160	33	60	—
700	330	160	32	51	3300

56. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) стали 09Х14Н16Б [47]

t, °С	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
600	170	120	160	100
650	110	77	100	65
700	65	40	55	37

57. Механические свойства стали 10Х11Н20Т3Р при 20 °С в различном сортаменте [47]

Вид продукции	Термическая обработка	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м^2
		МПа		%		
Листы холоднокатаные	Закалка с 1100 °С, воздух	600	—	40	—	—
Лента холоднокатаная	Закалка с 1080 °С, воздух	550	—	—	—	—
Пруток	Закалка с 1100—1150 °С, воздух; старение при 750 °С	900	600	10	15	800

58. Механические свойства стали 10Х11Н20Т3Р при высоких температурах [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%	
20	1000	600	25	30
400	950	600	23	30
600	800	530	22	30
700	680	470	15	18
750	560	450	15	20
800	360	250	25	45

59. Пределы длительной прочности и выносливости (в МПа) стали 10Х11Н20Т3Р [47]

t, °С	σ_{100}	σ_{-1} (10^7 циклов)	
		Гладкие образцы	Радиус надреза 0,75 мм
500	730	370	—
550	650	—	—
600	590	340	—
650	480	—	—
700	400	280	280
750	280	—	—

60. Механические свойства стали 09Х14Н19В2БР [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м^2
	МПа		%		
20	570	230	44	70	1800
600	440	140	32	61	2200
650	430	140	33	61	2100
700	410	140	33	69	2200

61. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) стали 09Х14Н19В2БР [47]

t, °С	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
600	270	200	—	—
650	168	130	110	140
700	125	95	65	85
750	70	55	—	—

62. Физические свойства стали 09Х14Н19В2БР при различных температурах [47]

t, °С	$E \cdot 10^{-5}$, МПа	λ, Вт/(м·°С)	t, °С (интервал)	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$
20	2,02	15,4	20—100	15,2
100	1,99	16,3	20—200	16,3
200	1,93	16,3	20—300	16,9
300	1,86	18,0	20—400	17,5
400	1,78	19,2	20—500	17,8
500	1,69	21,3	20—600	18,1
600	1,60	23,4	20—700	18,6
700	1,52	25,1	20—800	18,6
750	1,98	—		
800	—	27,6		

63. Механические свойства стали 08Х15Н24В4ТР при различных температурах [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м^2
	МПа		%		
20	750	500	20	30	1200
650	650	450	18	30	1000
700	600	400	18	30	1000
750	500	350	20	40	100

64. Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости (в МПа) стали 08Х15Н24В4ТР [47]

t, °С	σ_{1000}	σ_{10000}	$\sigma_{100\,000}$	$\sigma_{1/10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$	σ_{-1}, база испытаний 10^8 циклов
20	—	—	—	—	—	420
500	—	—	—	—	—	350
600	500	400	300	—	—	400
650	400	200	230	200	140	340
700	250	180	140	—	—	270
750	180	120	80	80	60	—

65. Релаксационная стойкость стали 08Х15Н24В4ТР [47]

t, °С	σ_0, МПа	σ_t (МПа) за время, ч					
		150	500	1000	2000	5000	10 000
550	200	155	154	153	152	—	152
550	250	219	218	218	218	216	200
550	300	273	273	271	269	265	249
600	200	185	183	182	179	176	166
600	250	227	226	224	219	213	198
600	300	268	266	266	263	256	243
650	200	177	174	169	162	—	132
650	250	204	198	189	186	—	153
650	300	248	245	236	228	—	188
700	200	162	143	131	123	108	85
700	250	189	174	159	148	134	100
700	300	238	210	179	172	156	113

железа, никеля, хрома и некоторых добавок, когда сумма никеля и хрома превышает 50 %, относится к категории сплавов, а не сталей.

Простейшим жаропрочным сплавом на основе железа является сплав ХН32Т, применяемый для длительной службы при температуре 850 °С. Ограниченное содержание углерода приводит к тому, что при длительной службе в сплаве образуется небольшое количество карбидов хрома, которое не охрупчивает сплав. Именно поэтому при длительном старении (10 000 ч и выше) при 700—800 °С ударная вязкость не опускается ниже 1000 кДж/м².

Из дисперсионно-упрочняемых сплавов самым жаропрочным является сплав ХН35ВТЮ. По системе легирования он типичен для ряда других сплавов, описанных в [47].

Сплав подвергают двойной закалке. Цель первого нагрева — вырастить зерно определенного размера и перевести γ'-фазу в твердый раствор. Закалку сплава проводят путем охлаждения на воздухе; при этом часть γ'-фазы выделяется. При нагреве под вторую закалку небольшая часть γ'-фазы остается нерастворенной; кроме того, она не переходит в твердый раствор и карбиды хрома.

При 1050 °С вторая фаза укрупняется. При охлаждении на воздухе при повторной закалке и последующем старении γ'-фаза выделяется в виде дисперсных включений размером 20,0—50,0 нм. В результате упрочнений сплав наряду с мелкими включениями имеет определенный объем укрупненных выделений. Такая структура позволяет получить высокую прочность и необходимый запас пластичности. Если двойную закалку не делать, то прочность и жаропрочность будут несколько выше, чем при двойной закалке, но тогда сплав не будет иметь запаса пластичности и будет проявлять высокую чувствительность к надрезу.

Если температура работы сплава не максимальна (750 °С), а снижена до 600—650 °С, то необходимый уровень пластичности может быть получен в результате измельчения зерна. В этом случае штампованная деталь с мелким зерном подвергается старению при 750 °С в течение 16 ч. Такая обработка заметно повышает пластичность и прочность сплава при умеренных температурах (550—650 °С). Однако когда от сплава требуется жаропрочность и пластичность при длительной службе при более высоких (вплоть до 750 °С) температурах, оптимальное сочетание свойств обеспечивают двойная закалка и старение.

Жаропрочные сплавы на основе никеля. Чистый никель имеет низкую длительную прочность порядка 40 МПа при 800 °С за 100 ч. Повышение свойств достигается путем комплексного легирования, в результате которого образуются многофазные сплавы, отвечающие требованиям современного машиностроения. Хром, кобальт, молибден, вольфрам, ванадий, гафний упрочняют твердый раствор, основу сплава. Помимо этого, хром играет активную роль в защите сплавов от окисления; молибден, вольфрам, ванадий образуют в сочетании с хромом упрочняющие сплав карбидные фазы Me_7C_3, $Me_{23}C_6$, Me_6C.

Алюминий, титан, ниобий и тантал, помимо упрочнения твердого раствора, образуют с никелем интерметаллидное соединение сложного состава, например, типа $(Ni, Co)_3$ (Al, Ti, Nb, Ta); кроме того, карбидообразующие элементы этой группы образуют карбиды типа MeC.

Углерод, бор, цирконий, а также лантан, церий, неодим и др., которые вводят в количествах, не превышающих десятые и сотые доли процента, образуют фазы внедрения, упрочняют границы зерен вследствие образования сегрегаций по границам зерен, рафинируют металл от примесей.

Эффективными упрочнителями сплавов являются трудно растворимые оксиды типа ThO_2, ZrO_2, Al_2O_3 и др.

Повышенное количество карбидов, вызванное в первую очередь большим содержанием углерода, отрицательно сказывается на пластичности сплавов. Поэтому в деформируемых сплавах предельное содержание углерода в отдельных композициях составляет 0,12 %, чаще всего 0,08 %. Однако содержание углерода ниже 0,03 % также нежелательно, так как долговечность сплавов и длительная пластичность снижаются. Для большинства сплавов на основе никеля содержание углерода колеблется в пределах 0,03—0,08.

Самым простым по составу из дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов является сплав ХН77ТЮ. Более высокожаропрочный сплав ХН77ТЮР отличается от него присадкой бора в количествах 0,005—0,008 %. После закалки сплав обладает относительно невысокой прочностью, но весьма высокой пластичностью. Высокая пластичность сплава в защищенном состоянии позволяет проводить сварку, а также операции пластической деформации в холодном состоянии.

Максимальную жаропрочность сплав приобретает после старения при 700 °С.

Введение бора увеличивает длительную прочность сплава, и этот эффект, обнаруженный на сплаве ХН77ТЮ, был затем широко использован при создании жаропрочных сплавов на основе никеля.

Последующие разновидности сплавов отличаются от сплава ХН77ТЮР более высоким содержанием титана, алюминия и дополнительным введением ниобия, что повышает количество γ'-фазы, выделяющейся при старении. С целью упрочнения твердого раствора в сплавы вводят молибден, вольфрам, ниобий. Чтобы сохранить удовлетворительную пластичность сплавов, в них

66. Свойства сплава ХН70МВТЮБ при различных температурах [47]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
	МПа		%		
20	1050	560	16	16	—
600	980	550	24	24	—
700	930	530	16	16	800
800	720	450	9	12	600
850	600	400	8	15	700
900	380	220	12	35	—

снижают содержание хрома. Однако уменьшение содержания хрома ниже 15 % влечет за собой снижение сопротивления окислению. Поэтому сплавы с низким содержанием хрома требуют защиты от газовой коррозии.

Горячая деформация высоколегированных жаропрочных сплавов имеет следующие особенности: 1) малую пластичность при всех температурах; 2) высокое сопротивление деформации, включая и однофазную область твердого раствора; 3) узкий температурный интервал деформации (до 80—100 °С); 4) высокую чувствительность к перегреву (нагрев выше определенной температуры приводит к катастрофическому снижению пластичности).

67. Примерное назначение некоторых жаропрочных сплавов на основе никеля [26]

Сплав (ГОСТ 5632—72)	Назначение	Рекомендуемая температура использования	Температура начала интенсивного окалинообразования
		°С	
ХН70ВМЮТ ХН70ВМТЮ	Лопатки газовых турбин, крепежные детали, срок работы — весьма длительный	750 850	1000
ХН80ТБЮ	Лопатки, крепежные детали турбин	700	1000
ХН70МВТЮБ ХН70Ю ХН78Т	Листовые детали, газопроводы, работающие при умеренных напряжениях, срок службы ограниченный	850 1100 1100	1200 1200 1100
ХН75МБТЮ	Листовые детали турбин, срок службы ограниченный	850	1050
ХН77ТЮР	Диски, лопатки турбин с ограниченным сроком службы	750	1050
ХН60ВТ	Листовые детали турбин с ограниченным сроком службы	1000	1100
ХН62МВКЮ	Лопатки, диски турбин с длительным сроком службы	800	1080

68. Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости (в МПа) сплава ХН70МВТЮБ [26]

t, °С	σ_{100}	σ_{200}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1}
20	—	—	—	420
600	—	—	—	350
650	620	600	—	—
700	480	420	300	370
800	250	230	180	350
850	180	230	180	—
900	—	—	—	180

69. Чувствительность к надрезу при испытании на длительную прочность сплава ХН70МВТЮБ [47]

t, °С	σ *1, МПа	Время до разрушения образцов, ч	
		гладких	с надрезом r = 0,1 мм
650	600	280	12—17
700	400	220	35—130
800	250	100	90—140

*1 Напряжение при испытании.

70. Механические свойства сплава ХН80ТБЮ при различных температурах [26]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
	МПа		%		
20	950	650	18	22	700
500	1000	610	26	26	—
600	830	600	11	—	—
630	790	600	7	—	—
650	700	550	7	10	1000
700	680	500	7	6	1200

71. Длительная прочность (в МПа) сплава ХН80ТБЮ [26]

t, °С	σ_{1000}	σ_{5000}	$\sigma_{10\,000}$
650	450	320	280
700	280	220	170

72. Выносливость сплава ХН80ТБЮ при 650 °С при симметричном и ассимметричном циклах нагружения [26]

$\sigma_{стат}$, МПа	Гладкий образец				Образец с надрезом			
	10^5	10^6	10^7	10^8	10^5	10^6	10^7	10^8
—	—	420	390	370	—	—	—	—
110	—	320	280	260	290	200	190	180
180	340	300	250	200	250	190	180	170

73. Механические свойства сплава ХН70ВМТЮ при различных температурах [26]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%	
20	1070	700	14	13
600	990	680	16	19
700	900	650	10	12
750	770	650	6	10
800	720	580	4,5	9
850	590	470	10	14
900	490	380	14	19

74. Выносливость (в МПа) сплава ХН70ВМТЮ на 10^7 циклов при различных температурах [47]

t, °С	Гладкий образец	Образец с надрезом
20	340	250
600	350	240
700	370	280
800	360	290
850	300	—
900	250	190

75. Пределы длительной прочности и ползучести (в МПа) сплава ХН70ВМТЮ [47]

t, °С	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{3000}	σ_{5000}	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{1/100\,000}$
650	—	550	470	440	400	—
700	480	—	—	—	—	—
750	360	250	215	200	180	—
800	240	175	145	130	125	80
850	180	—	—	—	—	—
900	130	—	—	—	—	—

76. Механические свойства сплава ХН73МБТЮ при различных температурах [26] [Сплав ХН73МБТЮ — диски газовых турбин для длительной службы с рабочей температурой до 750 °С. Химический состав по ТУ 14-1-1466—75 (мас. доли, %): 13—16 Cr; 2,8—3,2 Mo; 1,8—2,2 Nb; 2,35—2,75 Ti; 1,3—1,7 Al; ⩽2,0 Fe; ⩽0,4 Mn; ⩽0,65 Si; ⩽0,08 C; ⩽0,005 B; ⩽0,005 Ce; ⩽0,007 S; ⩽0,015 P; остальное никель]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
	МПа		%		
20	1210	800	31	24	720
550	1030	700	31	26	1030
600	1090	690	28	26	1000
650	1030	670	28	27	—
700	1000	680	29	22	750

77. Длительная прочность (в МПа) сплава ХН73МБТЮ при различных температурах [26]

t, °С	σ_{300}	σ_{500}	σ_{1000}	σ_{2000}	σ_{3000}	σ_{5000}	$\sigma_{10\,000}$
550	—	900	870	850	820	—	—
650	630	600	570	540	520	500	480
700	480	450	400	360	340	320	290
750	360	330	295	265	250	230	210

78. Механические свойства сплава ХН70ВМЮТ [26]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
	МПа		%		
20	1030	670	28	26	800
500	1020	640	27	23	900
600	970	600	23	18	900
650	990	600	20	23	850
700	890	580	16	27	900
750	710	580	14	28	850
800	570	500	17	34	1050
900	300	280	31	70	—
950	1140	120	49	74	—
1000	80	70	58	76	—

79. Длительная прочность (в МПа) сплава ХН70ВМЮТ [26]

t, °С	Гладкие образцы					Образцы с надрезом		
	σ_{1000}	σ_{2000}	σ_{3000}	$\sigma_{10\,000}$	$\sigma_{20\,000}$	σ_{2000}	$\sigma_{20\,000}$	$\sigma_{2\cdot10\,000}$
600	650	600	560	530	500	—	370	—
650	480	400	—	370	340	—	—	—
700	310	270	—	—	—	—	—	—
750	220	200	170	160	190	200	150	16
800	140	—	—	—	—	—	—	—

80. Механнческие свойства сплава ХН55ВМКЮ

t, °С	σ_0	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, кДж/м²
	МПа		%		
20	1100	750	9	11	200
700	1080	750	5	7	300
750	1080	750	5	7	300
800	1000	700	5	7	300
850	750	650	3	5	300
900	650	500	3	5	400
950	550	400	4	5	400
1000	350	250	6	13	400

81. Длительная прочность и выносливость (в МПа) сплава ХН55ВМКЮ

t, °С	σ_{100}	σ_{1000}	σ_{2000}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{-1} на базе циклов	
					10^7	10^8
800	440	310	290	370	—	—
900	240	130	100	140	320	280
950	140	65	55	—	—	—

82. Механические свойства сплава ХН56ВМТЮ

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	KCU, кДж/м²	t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	KCU, кДж/м²
	МПа					МПа			
20	1000	650	25	800	900	520	400	5	600
700	750	600	5	—	950	320	240	12	—
800	700	600	5	530	1000	120	—	30	900

83. Длительная прочность и выносливость (в МПа) сплава ХН56ВМТЮ [1, 26]

t, °С	σ_{100}	σ_{800}	σ_{-1} на базе 10^7 циклов
800	280	240	—
900	110	80	170
950	60	40	—
1000	30	—	—

Сплавы на основе тугоплавких металлов. К тугоплавким относят металлы, имеющие температуру плавления выше 2000 °С. По комплексу свойств и доступности для практического применения важное значение имеют вольфрам, молибден, ниобий, тантал. В табл. 84 приведены основные физические и механические свойства тугоплавких металлов.

Физические и механические свойства тугоплавких металлов зависят от способа получения металлов, их чистоты.

84. Физические и механические свойства тугоплавких металлов [41]

Свойства	Nb	Ta	W	Mo
Температура, °С:				
плавления	2468	2996	3400	2622
кипения	4927	5427	5900	5560
Q_V, кДж/моль	26,8	24,7	95,2	27,6
c при 20 °С, кДж/(г·°С)	0,272	0,138	0,134	0,255
λ, Вт/(м·°С)	0,523	0,544	2,0	1,46
ρ_1 при 20 °С, мкОм·см	14,5	13,1	5,3	5,3
$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$, при 0—1000 °С	7,0	6,6	4,5	5,2
ρ, т/м³	8,57	16,6	19,3	10,2

85. Механические свойства тугоплавких металлов при 20 °С [41]

Свойства	Ni	Ta	W	Mo
G, МПа	6000	7000	15 140	12 200
$\sigma_в$, МПа	350	330	800—1100	800—900
δ, %	50	70	0	10—15

Вольфрам и молибден охрупчиваются при незначительном содержании примесей. Особенно снижает характеристики пластичности и повышает температуру перехода в хрупкое состояние кислород.

В технически чистом молибдене при содержании кислорода 0,02 % температура перехода в хрупкое состояние составляет 300 °С. При уменьшении содержания кислорода до 0,0001 молибден оказывается пластичным до —196 °С.

Тантал и ниобий выгодно отличаются от вольфрама и молибдена высокими показателями пластичности, технологичности, низкими температурами перехода в хрупкое состояние. Ниобий вакуумно-дуговой выплавки — наиболее распространенного способа получения полуфабриката — имеет температуру перехода в хрупкое состояние —185 °С.

Вследствие высокой пластичности ниобий и тантал хорошо обрабатываются давлением, хорошо свариваются аргонно-дуговой сваркой или электронно-лучевой в вакууме. Точечную сварку листов толщиной менее 0,5 мм можно проводить на воздухе.

Тантал и ниобий применяются в химическом машиностроении, электронике, вакуумной технике, металлургии и других областях. Исключительно высокая химическая стойкость в агрессивных средах позволяет применять тантал и ниобий для изготовления кислотоупорной аппаратуры.

Общим недостатком тугоплавких металлов является низкая жаростойкость, исключающая возможность использования их в качестве жаропрочных материалов без специальных защитных покрытий. Успешно в качестве жаропрочных материалов тугоплавкие металлы могут работать в вакууме и в атмосфере инертных газов. При легировании тугоплавких металлов жаропрочность ниобия и тантала повышается, а технологические свойства молибдена и вольфрама улучшаются.

Основные виды продукции в виде полуфабриката регламентированы техническими условиями, в соответствии

86. Механические свойства сплавов на основе вольфрама при различных температурах [66]

Мас. доля добавок	Полуфабрикат	1650 °С		1930 °С		2200 °С	
		$\sigma_в$	δ	$\sigma_в$	δ	$\sigma_в$	δ
		МПа	%	МПа	%	МПа	%
Нелегированный вольфрам	Прессованные прутки	100	55	60	68	34	62
5 % Mo	То же	200	28	70	89	37	116
25 % Mo	Кованые прутки	220	15	80	48	31	—
0,5 % Mo	Прессованные прутки	260	32	90	55	51	81
1,6 % Ta	То же	140	28	90	47	50	44

с которыми выпускают полосы, пластины, проволоку, трубы, фольгу и пр. [66].

Наиболее изучены жаропрочные и сравнительно технологичные ниобиевые сплавы, предназначенные для работы при 1100—1300 °С. Жаропрочные танталовые сплавы могут применяться при 1300—1500 °С, однако они более дефицитны и дороги из-за повышенной стоимости тантала.

Из тугоплавких металлов VIA группы наибольшее внимание уделяется молибдену. Металлы этой группы предназначаются для работы при температурах 1250—1450 °С. Сплавы на основе вольфрама в качестве жаропрочных конструкционных материалов могут работать выше 1650 °С.

Сплавы на основе вольфрама. Нелегированный вольфрам обладает недостаточной технологической пластичностью и имеет высокую температуру перехода из пластического состояния в хрупкое. Разработка жаропрочных сплавов вольфрама преследует в основном две цели — повышение технологической и низкотемпературной пластичности, а также его жаропрочности.

Наиболее полно исследованы сплавы вольфрама с молибденом. В США освоено промышленное производство сплавов вольфрама с 15 и 20 % Mo. Молибден существенно измельчает зерно вольфрама уже при содержании его около 2 %. Увеличение содержания молибдена до 15—20 % повышает жаропрочность сплавов при 1500—1700 °С. Заметно повышаются характеристики жаропрочности вольфрама при введении 2—3 % Ni или Ta. Высокопрочный деформируемый сплав ВВ-2 системы ниобий—вольфрам рекомендуется для работы при температурах выше 1700 °С [41]. Предел длительной прочности этого сплава при температуре 1500 °С и 50, 100 и 500 ч составляет соответственно 70, 60 и 50 МПа. Предел прочности при 1650 °С составляет 350 МПа, при 1925 °С — 120 МПа.

Легирование рением наряду с увеличением жаропрочности существенно снижает температуру перехода в хрупкое состояние, повышает технологическую пластичность вольфрама.

Перспективными оказались сплавы вольфрама с добавками циркония, гафния, ниобия, бора и углерода. Прочность этих сплавов при 1699 °С в 3—5 раз превышает прочность нелегированного вольфрама и достигает 548 МПа, при 2482 °С — 148 МПа, а при 2760 °С — 46 МПа.

Сплавы на основе молибдена. Разработка жаропрочных сплавов молибдена преследует в основном две цели: улучшение характеристик жаропрочности, а также повышение низкотемпературной и технологической пластичности. В большинстве случаев, за исключением сплавов, легированных рением, увеличение содержания легирующих элементов (таких, как вольфрам, углерод и др.), повышающих жаропрочность, приводит к заметному снижению характеристик пластичности.

Жаропрочные сплавы на основе молибдена могут быть разделены на три основные группы.

Низкоуглеродистые низколегированные сплавы молибдена — это сплавы с содержанием углерода 0,004—0,05 %, титана или циркония в пределах 0,07—0,5 %. В эту группу могут быть включены сплавы Mo — 0,5Ti, TZM, ЦМ — 2А, ВМ — 1 и ВМ — 2 (табл. 89). Эти сплавы характеризуются хорошими технологическими свойствами. Из них изготовляют ленты, полосы и другие полуфабрикаты в соответствии с техническими условиями [66].

Более высокой жаропрочностью обладают сплавы второй группы — низколегированные высокоуглеродистые сплавы молибдена. Представителями этой группы являются сплавы TZC и ВМ — 3. По сравнению со сплавами первой группы в них повышено содержание углерода до 0,25—0,5 %. Несколько увеличено содержание титана и циркония (до 0,5 %). Упрочнение достигается в основном благодаря процессам карбидообразования. Применение высокоуглеродистых сплавов осложняется их плохой технологичностью, высокой температурой перехода в хрупкое состояние.

Высоколегированные молибденовые сплавы — третья группа сплавов —

87. Предел прочности (в МПа) сплавов вольфрама при различных температурах испытания [41]

Состав сплава (мас. доля)	В отожженном состоянии	Деформированный		
	20 °С	20 °С	1500 °С	1800 °С
W — 30 % Re	1400	2720	341	143
W — 25 % Re	1190	2710	300	159
W — 50 % Re	950	1780	152	60
W — 40 % Re	840	1530	136	62
W — 20 % Mo — 40 % Re	1250	1850	210	118
W — 15 % Mo — 29 % Re	980	1290	260	93
W — 24 % Mo — 31 % Re	900	1130	240	86
W — 34 % Mo — 33 % Re	920	1290	216	93

88. Предел прочности (в МПа) вольфрамовых сплавов, получаемых методом порошковой металлургии [30]

Мас. доля добавок	Полуфабрикат	1650 °С	1930 °С	2200 °С	2420 °С
50 % Mo	Проволока	140	45	35	13
1 % ThO_2	Листы	260	190	90	—
2 % ThO_2	»	200	180	120	70
5 % Re + 2 % ThO_2	»	250	—	—	—

89. Предел прочности некоторых отечественных и зарубежных сплавов на основе молибдена [66]

Сплав	Сортамент	Деформированное состояние		Отожженное состояние	
		t, °С	$\sigma_в$, МПа	t, °С	$\sigma_в$, МПа
Mo — 0,5 Ti (0,5 % Ti; 0,02—0,05 % C)	Лист	20	789	20	790
		871	610	982	470
		982	460	1093	555
		1093	420	1205	492
		1204	350	1315	130—218
		1350	135	—	—
		1649	70	—	—
TZM (0,5 % Ti; 0,1—0,08 % Zr; 0,02—0,015 % C)	Пруток	20	970	24	840
		982	945	982	540
		1093	630	1093	513
		1306	410	1315	375
		1649	100	1320	350
		—	—	1649	100
Mo—50 Re (50 % Re)	Лист	400	1200	1093	450
		800	840	1205	350
		1200	350	—	—
		1600	140	1315	275
ЦМ—2А (0,07—0,3 % Ti; 0,07—0,15 % Zr; 0,004 % C)	Лист	20	800	—	—
		800	500	—	—
		1000	420	—	—
		1200	340	—	—
		1500	140	—	—
		1800	100	—	—
ВМ—1 (до 0,4 % Ti; 0,08—0,25 % Zr; ⩽0,01 % C; до 0,6 % Nb)	Лист/ Пруток	20	800/820	—	—
		800	500/510	—	—
		1000	420/400	—	—
		1200	340/343	—	—
		1500	140/137	—	—
		1800	100	—	—
ВМ—2 (до 0,2 % Ti; 0,25—0,40 % Zr; 0,02 % C; до 0,2 % Nb)	Пруток	20	750	20	870
		800	570	700	650
		1000	520	1000	603
		1200	450	1200	445
		1400	295	1500	210
		1510	160	1800	87
		1800	90		
		2000	30		

Продолжение табл. 89

Сплав	Сортамент	Деформированное состояние		Отожженное состояние	
		t, °С	$\sigma_в$, МПа	t, °С	$\sigma_в$, МПа
ВМ—3 (0,8—1,3 % Ti; 0,3—0,6 % Zr; 0,25—0,5 % C; 1,0—1,5 % Nb)	Пруток	—	—	20	800
		—	—	1150	600
		—	—	1300	500
МР—47ВП (47 % Re)	Пруток	20	173	20	950
		1500	152	—	—
		1800	60	—	—

имеют высокие жаропрочные свойства и могут длительное время работать при температурах до 2000 °С. Сплавы с 25—50 % W могут работать при температурах 1500—2500 °С. Хорошим сочетанием прочностных и технологических свойств обладает сплав, легированный 47—50 % Re. Этот сплав выпускается по техническим условиям [66] в виде проволоки, ленты, полосы. Порог хрупкости сплава МР — 47ВП ниже —247 °С.

Сплавы на основе ниобия. Чистый ниобий, обладая высокой пластичностью и технологичностью, имеет ограниченную жаропрочность. Сточасовой предел длительной прочности при температурах 1100 и 1200 °С составляет соответственно 50 и 30 МПа [67]. Легирование существенным образом повышает жаропрочные свойства, но при этом снижаются характеристики пластичности и технологичности.

Основой высокожаропрочных сплавов являются системы Nb—Mo, Nb—W— Mo при содержании до 10—20 % W и Mo. Указанная основа дополнительно легирована цирконием или гафнием. Жаропрочные и окаливостойкие сплавы создают на основе системы Nb—W—Ti или Nb—Mo—Ti при содержании до 20 % Mo или W и до 10 % Ti. Третья группа сплавов с умеренно жаропрочными и достаточно технологичными свойствами — низколегированные ниобиевые сплавы. Они содержат 1—7 % Zr или титан. Основные типы сплавов представлены в табл. 90.

Сплавы на основе тантала из-за дефицитности последнего находят применение в областях, не допускающих применение других материалов. Это прежде всего электронная промышленность, медицина и химическая промышленность. В соответствии с

90. Механические свойства некоторых отечественных и зарубежных промышленных ниобиевых сплавов [41, 66, 67]

Марка сплава	Сортамент	Вид обработки (состояние)	t, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %
ВН—2 (3,8—5,2 % Mo; ⩽0,05 % C)	Пруток	Без обработки	20	750	18—28
	Лист	Деформация	1000	500	25
	»	»	1100	400—500	35
	»	Отжиг	1100	310—350	20—25
	Пруток	Без обработки	1200	180—200	45—55
	Лист	Деформация	1500	80—100	35

Продолжение табл. 90

Марка сплава	Сортамент	Вид обработки (состояние)	t, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %
ВН—2А (3,5—4,7 % Mo; 0,5—0,9 % Zr; ⩽0,08 % C)	Лист	Деформация	20	800—900	4—5
	»	»	1100	450	10
	Пруток	Отжиг	1100	260—300	22—26
	Лист	Деформация	1200	300	12
	Пруток	Отжиг	1200	240—260	26
ВН—3 (4—5, 2 % Mo; 0,8—2 % Zr; 0,08—0,16 % C)	Пруток	Деформация	20	750—800	16—20
			1100	450	21—24
			1200	250—290	26
			1500	125	40—43
ВН—4 (8,5—10,5 % Mo; 1—2 % Zr; 0,25—0,40 % C)	Пруток	Отжиг	20	810	6
			1100	700	—
			1200	550	15
			1500	170	24
РН—6 (4,5—6 % Mo; 4,5—6 % W; 1—1,5 % Zr)	Пруток	Отжиг	20	890	—
			1200	290	—
			1800	93	—
F—48 (15 % W, 5 % Mo, 1 % Zr, 0,1 % C)	Лист	Отжиг	20	875	25
			1100	456	19
			1200	336	21
			1320	217	—
			1370	232	—
			1483	170	54
D—43 (10 % W; 1 % Zr; 0,1 % C)	Лист	Отжиг	20	609	21
			1093	330	—
			1205	246	—
			1315	190	—
			1315	190	—
D—31 (10 % Mo; 10 % Ti; 0,1 % C)	Пруток	Деформация	20	700	22
			1100	245	12
			1200	175	14
			1320	140	8
			1420	77	—
F—50 (15 % W; 5 % Mo; 1 % Zr; 5 % Ti; 0,05 % C)	Пруток	Деформация	24	860	24
			1095	350	28
		Отжиг	1205	245	35
			1315	147	35

ТУ 48-05-Г-139—71 выпускаются сплавы тантала с содержанием вольфрама 4—21 % [66]. Сведения по жаропрочности носят ограниченный характер.

Жаропрочные медные сплавы. К жаропрочным сплавам на основе меди в зависимости от области применения могут предъявляться различные, часто трудно совместимые в одном материале, требования. Например, высокая жаростойкость, электро- и теплопроводность, износостойкость при высоких температурах. Однако, независимо от назначения, эти сплавы характеризуются общими принципами выбора состава. Это, как правило, сплавы меди, легированные небольшими присадками тугоплавких компонентов. Жаропрочные медные сплавы по составу или типу обработки подразделяют на две группы: упрочняемые деформацией и дисперсионно-твердеющие сплавы. Причем сплавы второй группы существенно превосходят по свойствам сплавы первой группы, особенно когда между закалкой и старением они подвергаются холодной деформации. К первой группе относятся сплавы систем Cu—Ag, Cu—Cd, Cu—Mg и др. Ко второй группе относятся сплавы на основе систем Cu—Cr, Cu—Zr, Cu—Be.

Режимы обработки, свойства и области применения сплавов приведены в табл. 91, 92. Большинство жаропрочных медных сплавов — это сплавы на основе системы Cu—Cr. Хромовые бронзы не склонны к коррозии под напряжением и к «водородной болезни». Жаростойкость их в среднем на 15—20 % выше жаростойкости меди. Коррозионная стойкость в большинстве случаев аналогична меди. Обрабатываемость резанием большинства хромовых бронз составляет в среднем 20 % обрабатываемости латуни ЛС 63—3.

5. РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Радиационные дефекты и свойства материалов. При облучении потоками частиц (нейтронов, протонов, электронов, альфа-частиц, осколков деления) и жестким электромагнитным (гамма- и рентгеновским) излучением в материалах образуются структурные повреждения, называемые радиационными дефектами. Переданная материалу твердых тел энергия частиц или излучения частично расходуется на разрыв межатомных связей. Для образования, например, простейшего радиационного дефекта — пары Френкеля (вакансии и междоузельного атома) необходима энергия, превышающая пороговую, составляющая 14—35 эВ. При облучении материалов частицами с энергией порядка мегаэлектронвольта смещаемым атомам передается энергия, на порядки более высокая по сравнению с пороговой. Смещаемый атом ускоряется, а его кинетическая энергия расходуется на ионизацию атомов, расположенных вдоль траектории движения. В результате образуется каскад радиационных дефектов.

Частицы и излучения могут приводить к химическим и ядерным реакциям (включая реакции деления) в материале тел, а также появлению в структуре материалов самих бомбардирующих частиц (ионное внедрение), что вызывает появление примесей в материале, и являются второй причиной возникновения радиационных дефектов.

Физические процессы, приводящие к образованию радиационных дефектов, составляют научную основу радиационного материаловедения, изучающего совокупность методов, позволяющих:

создать материалы (конструкционные, полимерные, полупроводниковые и др.), устойчивые к воздействию ядерных излучений;

придать материалам требуемые свойства путем их дозированного облучения.

Радиационные дефекты способны изменять объемные и поверхностные свойства материалов. Характер изменения свойств зависит от длины пробега частицы или излучения. К поверхностным дефектам приводят облучения электрозаряженными частицами, излучениями низких энергий; к объемным дефектам — облучение быстрыми нейтронами.

91. Свойства жаропрочных медных сплавов [5, 8, 25, 53]

t, °С	Сплав										
	Cu	БрКд1	БрЦр0,4	БрХ	БрХЦр	БрХВЦр	БрНХК	БрХНб	МКБ	БрМВТ	БрМг0,3
					$\sigma_в$, МПа						
20	245	412	392	441	490	550	800	—	764	833	490
300	147	304	314	363	382	450	650	—	617	676	—
400	108	216	294	323	343	410	580	—	539	588	—
500	78	137	245	274	294	360	470	—	412	490	—
600	49	78	196	176	245	220	300	—	225	245	—
					$\sigma_т$, МПа						
20	157	392	363	412	441	510	780	—	745	823	—
300	98	274	304	353	363	430	630	—	608	666	—
400	69	186	284	314	333	400	570	—	529	578	—
500	49	108	235	265	284	340	460	—	402	490	—
600	20	49	186	167	235	210	290	—	196	235	—
					ψ, %						
20	90	81	69	69	84	58	50	—	22	10	3
300	37	74	68	37	82	55	40	—	13	8	—
400	43	82	68	27	82	57	24	—	11	5	—
500	86	95	70	20	82	58	12	—	21	3	—
600	100	96	72	32	81	68	26	—	76	10	—
					δ, %						
20	50	18	17	34	—	19	10	—	—	—	—
300	50	14	—	11	—	14	7	—	—	—	—
400	65	13	—	7	—	12	5	—	—	—	—
500	80	5	—	4	—	12	3	—	—	—	—
600	90	3	—	8	—	16	5	—	—	—	—

Продолжение табл. 91

t, °С	Сплав										
	Cu	БрКд1	БрЦр0,4	БрХ	БрХЦр	БрХВЦр	БрНХК	БрХНб	МКБ	БрМВТ	БрМг0,3
					$\rho_1 \cdot 10^{-6}$, Ом·м						
20	0,0172	0,0231	0,0193	0,0213	0,0204	0,02	0,0372	0,0185	0,0346	0,0392	0,0238
300	0,0362	0,0417	0,0387	0,0392	0,0382	0,0378	0,0546	0,0379	0,0536	0,0607	—
400	0,0424	0,0487	0,0454	0,0458	0,0452	0,0449	0,0618	0,0437	0,0614	0,0652	—
500	0,0507	0,0560	0,0534	0,0527	0,0534	0,0525	0,0722	0,0517	0,0705	0,0765	—
600	0,0584	0,0656	0,0612	0,0607	0,0602	0,0608	0,0864	0,0590	0,0825	0,0872	—
					KCU, кДж/м²						
20	1666	1568	1960	2156	2352	1800	1000	—	294	294	—
300	1372	1666	2058	2058	2156	1700	800	—	392	294	—
400	1372	1666	2156	1960	2156	1700	700	—	392	196	—
500	1274	1470	1764	1666	1764	1600	500	—	392	98	—
600	784	1274	1568	1470	1568	1600	1200	—	588	196	—
					E, МПа						
20	129 400	123 000	134 000	131 000	130 000	132 000	140 000	135 000	—	—	—
300	115 600	—	—	121 000	118 000	117 000	128 000	122 000	—	—	—
400	—	—	—	115 000	109 000	108 000	122 000	113 000	—	—	—
500	—	—	—	109 000	100 000	98 000	116 000	105 000	—	—	—
600	94 000	—	—	98 000	93 000	91 000	108 000	97 000	—	—	—
					λ, Вт/(м·°С)						
20	394	297	343	367	366	368	196	380	197	176	—
300	—	—	—	386	380	382	262	384	—	—	243
400	—	—	—	375	382	369	271	390	—	—	—
500	—	—	—	365	367	361	268	372	—	—	—
600	352	—	—	358	361	357	252	365	—	—	—

92. Составы, области применения, режимы обработки, физические свойства жаропрочных сплавов [58, 25, 53]

Сплав	Температура, °С: плавления	горячей обработки давлением	отжига	нагрева под закалку	старения	начала разупрочнения	НВ, МПа	ρ_1% от ρ_1, меди МО	ρ, кг/м³	$\alpha \cdot 10^6$, °С⁻¹	λ, Вт/(м·°С)	Выпускаемые полуфабрикаты	Область применения
БрКд1	1040	680—900	500	—	—	300	784—1078	75—82	8920	17,6	297	Прутки, коллекторные полосы, ленты	Электроды для точечной, шовной сварки легких сплавов, коллекторы электродвигателей, проводов, в радиотехнике
БрЦр0,2; БрЦр0,3; БрЦр0,4; БрЦр0,7	965	700—900	700	940—960	440—460	550	980—1323	90	8930	16,32	326	Полосы, коллекторные полосы, ленты, трубы	Коллекторы высоконагруженных и высокоскоростных двигателей, в радиотехнике, электровакуумной промышленности
БрХ	1073	700—950	650	980—1000	440—460	450	980—1176	80	8920	17	314	Прутки, полосы, коллекторные полосы, трубы	Теплообменники, электроды для контактной сварки углеродистой стали, коллекторы электродвигателей

Продолжение табл. 92

Сплав	Температура, °С: плавления	горячей обработки давлением	отжига	нагрева под закалку	старения	начала разупрочнения	НВ, МПа	ρ_1 % от ρ_1, меди МО	ρ, кг/м³	$\alpha \cdot 10^6$, °С⁻¹	λ, Вт/(м·°С)	Выпускаемые полуфабрикаты	Область применения
БрХЦр	—	700—900	700	940—960	450—470	500	980—1274	80	8920	17,5	366	Прутки, полосы, плиты, листы, проволока	Электроды для точечной и шовной сварки углеродистой стали, губки и ролики сварочных машин, арматура, жала паяльников
БрНХТ	—	700—950	650—800	—	—	—	—	—	—	—	—	Прутки, трубы, листы	Присадочные материалы при сварке кристаллизаторов и теплообменников
БрХЦрТ	—	700—900	650—700	—	—	—	—	—	—	—	—	Прутки, трубы, листы, плиты	Кристаллизаторы, теплообменники
БрХНб	—	700—950	650—700	940—1000	420—460	—	—	92	—	17,1	380	Проволока, прутки	Присадочные материалы при сварке, провода и кабели

Продолжение табл. 92

Сплав	Температура, °С: плавления	горячей обработки давлением	отжига	нагрева под закалку	старения	начала разупрочнения	HB, МПа	ρ_t % от ρ_{20} медн МО	ρ, кг/м³	$\alpha \cdot 10^6$, °С⁻¹	λ, Вт/(м·°С)	Выпускаемые полуфабрикаты	Область применения
БрНХК	—	750—950	750	980—1000	450—470	500	1670	40	8850	—	196	Плиты, проволоки, листы, прутки, лента	**Формирующие и электродные кольца труб**осварочных станков. Электроды, губки и ролики сварочных машин, кристаллизаторы, теплообменники, токоподводящие пружины, элементы креплений, инструмент
БрХВЦр	—	750—950	700	930—950	450—475	550—600	HV 1570	86	8830	16,6	368	Проволока, прутки	**Электроды для сварки**
БрНБТ	—	800—950	750	960—980	470—490	500	1670	45	8830	—	188	Плиты, листы, цилиндрические заготовки	Детали машин для стыковой сварки коррозионно-стойкой стали и жаропрочных сплавов
БрМг0,3; БрМг0,5; БрМг0,8	1076	850—900	600	—	—	300	1300	72	8910	17,6	243	Коллекторные полосы, провола	Контактные кольца, коллекторные пластины, провода, кабели
Cu	1083	800—950	500—700	—	—	180—230	—	100	8940	16,8	394	—	—

При взаимодействии быстрого нейтрона [1] с металлическим или керамическим материалом большая часть его энергии передается атомам, смещающимся из узлов кристаллической решетки (пороговая энергия смещения атома имеет порядок 25 эВ). В результате происходит образование дефектов кристаллов в виде вакансий и междоузлий. Начиная с определенной величины радиационных дефектов становятся заметными изменения механических, физических, химических и других свойств конструкционных металлических или керамических материалов.

При взаимодействии быстрого нейтрона с органическим веществом большая часть его энергии идет на образование протонов отдачи, на ионизацию атомов водорода или их возбуждение. Разрыв связей С—Н или С—С является следствием облучения. Из жидких органических веществ выделяются газы, их вязкость повышается. Радиационная стойкость и стабильность органических веществ намного ниже, чем у металлических и керамических материалов.

Наибольшую чувствительность к радиации имеют полупроводники. При взаимодействии быстрых нейтронов с полупроводниками снижаются их усиливающие характеристики, в запрещенной зоне создаются разрешенные состояния.

Результаты изучения поведения различных материалов в потоках быстрых тепловых [2] нейтронов показали, что существует пороговое значение флюенса нейтронов [3], ниже которого влияние облучения на материалы незначительно. В табл. 93 и 94 приведены пороговые значения флюенсов для быстрых, тепловых и надтепловых [4] нейтронов. Выше пороговых значений флюенса нейтронов эффект облучения необходимо учитывать при выборе материалов, расчете механической и конструкционной прочности, коррозионной стойкости, расчете теплопередачи и совместимости материалов.

Степень радиационного воздействия на материалы при облучении их нейтронами зависит от состава изотопов в химических компонентах материалов. Например, в результате (n, α) [5]-реакции в материалах появляется гелий, влияющий на процессы радиационного распухания, ползучести, охрупчивания. Для примера можно указать и другие ядерные реакции, которые могут приводить к дополнительному изменению свойств материалов:

$^{9}Be\ (p, \alpha)^{6}Li$; $^{27}Al\ (p, \gamma)^{28}Si$;

$^{6}Li\ (n, \alpha)^{4}T$; $^{27}Al\ (n, \gamma)^{28}Al$;

$^{9}Be\ (\alpha, n)^{12}C$; $^{23}Na\ (n, \gamma)^{24}Na$.

К свойствам конструкционных материалов, работающих в условиях радиационных облучений, предъявляются следующие требования [40, 50]: 1) высокая механическая прочность и пластичность; 2) высокая термическая стабильность (теплостойкость); 3) высокая коррозионная стойкость и совместимость с другими материалами; 4) хорошие характеристики теплопередачи; 5) низкое сечение поглощения (захвата) нейтронов; 6) большая радиационная стабильность; 7) низкая наведенная радиоактивность; 8) высокое сечение рассеяния нейтронов, большая потеря энергии нейтрона за одно столкновение.

Первые четыре требования являются общими для конструкционных материалов; пятое—восьмое — специфическими свойствами, определяемыми необходимостью экономии нейтронов, эффективного их замедления (для реакторов на тепловых нейтронах), а также стремлением иметь малое отрицательное изменение механических и других свойств под влиянием радиационного облучения. Специфические требования определили выбор элементов, служа-

[1] Быстрые нейтроны образуются при реакции деления ядер, их энергия 0,1—10 МэВ.

[2] Тепловыми называют нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии с ядрами среды и имеющие энергии 0,005—0,2 эВ.

[3] Флюенс нейтронов (в нейтр./м²) — произведение плотности потока нейтронов и времени облучения; плотность потока нейтронов — произведение плотности нейтронов и их средней скорости.

[4] Надтепловыми называют нейтроны с энергиями между тепловыми и резонансными (2—10^3 эВ).

[5] (n, α), (n, γ) — реакции захвата нейтрона (n) ядром, сопровождающиеся вылетом α-частицы, испусканием γ-кванта; (p, α) — реакция захвата протона (p) ядром, сопровождающаяся вылетом α-частицы

93. Значения порогового флюенса быстрых нейтронов в различных материалах [50]

Пороговый флюенс, число нейтронов на 1 м²	Материал	Вызываемое изменение свойств
10^{18}	Германиевые, кремниевые полупроводники	Ухудшение усиливающих характеристик
10^{19}	Полиметил, метакрилат и целлюлоза	Потеря прочности
10^{20}	Вода и жидкие органические соединения	Газовыделение
	Натуральный и бутиловый каучук	Потери эластичности
10^{21}	Органические жидкости	Газовыделение, повышение вязкости
	Бутиловый каучук	Размягчение
	Полиэтилен	Потеря прочности при растяжении
10^{22}	Фенолполимеры с минеральными наполнителями	Потеря прочности при растяжении
	Натуральный каучук	Отвердевание
10^{23}	Углеводородные масла	Повышение вязкости
	Полистирол	Потеря прочности при растяжении
10^{24}	Металлы	Повышение предела текучести
	Углеродистые стали	Снижение ударной вязкости
10^{25}	Керамика	Снижение теплопроводности, плотности, разрушение кристаллической структуры
	Сплавы циркония	Снижение пластичности, рост предела текучести
	Углеродистые стали	Снижение пластичности, рост предела текучести
	Коррозионно-стойкие стали	Снижение пластичности, рост предела текучести, повышение критической температуры хрупкости

Продолжение табл. 93

Пороговый флюенс, число нейтронов на 1 м²	Материал	Вызываемое изменение свойств
10^{26}	Алюминиевые сплавы	Значительное падение пластичности
	Циркониевые сплавы	Заметное снижение пластичности
	Никелевые сплавы	Распухание, падение пластичности

щих основой и легирующими добавками реакторных металлических материалов. Перечень этих элементов и их ядерно-физические характеристики приведены в табл. 95.

Бериллий и его соединения. Уникальность бериллия как конструкционного материала определяется высоким значением отношения прочности к плотности, особенно при высоких температурах, а также хорошей коррозионной стойкостью. Он имеет наименьшее из всех металлов сечение[1] поглощения тепловых нейтронов, большое сечение рассеяния и высокую температуру плавления, поэтому является отличным замедлителем и отражателем.

Бериллий и оксид бериллия хрупки, дорогостоящи и токсичны, что плохо согласуется с общими требованиями к конструкционным материалам.

Для металлического бериллия и его оксида характерными эффектами, наблюдаемыми при росте флюенса быстрых нейтронов, являются размерная нестабильность и гелиевое охрупчивание. Размерная нестабильность связана с реакциями взаимодействия быстрых нейтронов с бериллием. Увеличение относительного объема $\Delta V/V$ образца бериллия (радиационное распухание) при температурах облучения 70—130 °С описывается зависимостью [50]

$$\Delta V/V = 0{,}584F^{0{,}93},$$

где $F \cdot 10^{-26}$ — флюенс быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ.

Пластичность облученного бериллия падает практически до нуля уже при относительно невысоких флюенсах нейтронов $(1 \div 4)\ 10^{25}$ нейтр./м². Это свойство носит название гелиевого охрупчивания бериллия.

[1] Сечения взаимодействия нейтронов с ядрами характеризуют вероятность ядерной реакции (например, поглощения) или изменения энергии нейтронов (рассеяния).

94. Значения порогового флюенса тепловых и надтепловых нейтронов в различных материалах [50]

Пороговый флюенс, число нейтронов на 1 м²	Материалы
10^{18}	Германиевые, кремниевые полупроводники
	Стекло, люцит
10^{19}	Вода
10^{20}	Бутиловый каучук, натуральный каучук, органические жидкости, графит
10^{21}	Полиэтилен, фенолполимеры с минеральными наполнителями
10^{22}	Углеводородные масла, полистирол
10^{23}	Углеродистая сталь, керамические материалы
10^{24}	Углеродистые, коррозионно-стойкие стали
10^{25}	Алюминиевые, циркониевые, никелевые сплавы

95. Ядерно-физические свойства реакторных металлических материалов [50]

Элемент	Относительная атомная масса	ρ, г/см³	Сечение поглощения тепловых нейтроов		Сечение рассеяния тепловых нейтронов, б	$t_{пл}$, °С
			б [1]	относительных единиц		
Be	9,01	1,85	0,0095	1,0	7,0	1283
Mg	24,31	1,74	0,063	6,6	4,0	640
Zr	91,22	6,50	0,180	19,0	8,0	1845
Al	26,98	2,70	0,235	24,7	1,4	660
Nb	92,91	8,57	1,100	116,0	5,0	2415
Mo	95,94	10,20	2,600	274,0	7,0	2617
Fe	55,85	7,87	2,530	267,0	11,0	1539
Cr	52,00	7,19	3,100	326,0	3,0	1990
Cu	63,54	8,96	3,800	400,0	7,2	1083
Ni	58,71	8,91	4,600	485,0	17,5	1455
V	50,94	6,10	4,900	516,0	5,0	1736
Ti	47,90	4,51	6,100	642,0	4,0	1725
Mn	54,94	7,43	13,300	1400,0	2,3	1245
W	183,85	19,20	19,000	2000,0	5,0	3410
Ta	180,95	16,60	21,000	2210,0	5,0	2996

[1] б (барн) — внесистемная единица измерения площади; 1 б = 10^{-28} м².

При облучении нейтронным потоком линейные размеры изделий из оксида бериллия увеличиваются, соответственно уменьшается плотность, увеличивается пористость изделий. При низких температурах облучения (75—100 °С) ускорение темпа роста объема оксида бериллии наблюдается при флюенсе нейтронов (энергия более 1 МэВ) около $3 \cdot 10^{24}$ нейтр./м² (рис. 1). Увеличение температуры облучения образцов уменьшает рост их объема. Чем выше плотность образцов, тем больше их расширение при одинаковых значениях флюенса.

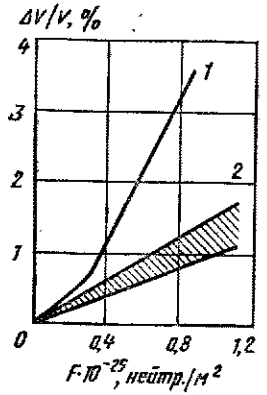


Рис. 1. Относительное изменение объема $\Delta V/V$ высокоплотной окиси бериллия в зависимости от флюенса нейтронов при различных температурах:
1 — 75—110 °С; *2* — 500—700 °С [3]

Существует предельно допустимое удлинение при расширении, превышение которого приводит к растрескиванию, разрушению, превращению изделий в порошок. Флюенс, при котором происходит разрушение, увеличивается с уменьшением размера зерна образцов (мкм)

$$\delta^{-1/2} = 0{,}167F \cdot 10^{-24},$$

где F — флюенс нейтронов с энергией более 1 МэВ, нейтр./м².

Размер зерна получен при температурах облучении 50—100 °С. Максимально допустимые значения флюенсов, не вызывающих микрорастрескивания в зависимости от температуры облучении, плотности потока нейтронов и размера зерна оксида бериллии, приведены на рис. 2.

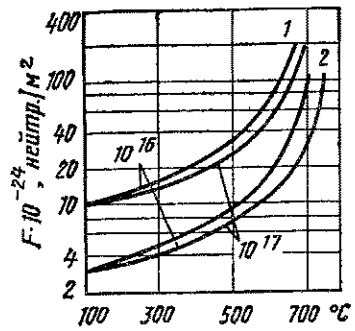


Рис. 2. Максимально допустимые значения флюенсов, не вызывающих микрорастрескивания, в зависимости от температуры облучения, размера зерна оксида бериллия (*1*—1—2,5 мкм; *2* — 10—15 мкм) и потока нейтронов в диапазоне от 10^{16} до 10^{17} нейтр./(м²·с) [3]

Основную роль в изменении объема изделий из оксида бериллии играет гелий, а также тритий, образующиеся при взаимодействии бериллии с быстрыми нейтронами. Содержание гелия (его около 0,95 по объему в смеси с тритием) увеличивается с ростом флюенса нейтронов (рис. 3). Если температура изделия превышает 1200 °С, становнтся существенным выделение гелии из образцов оксида бериллии (рис. 4), зависящее от времени выдержки. На этом основан способ восстановлении свойств изделий из оксида бериллии с помощью высокотемпературного отжига.

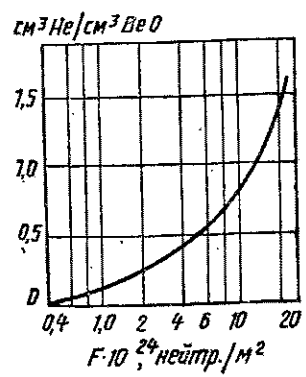


Рис. 3. Объем гелия в облученном оксиде бериллия в зависимости от флюенса нейтронов [3]

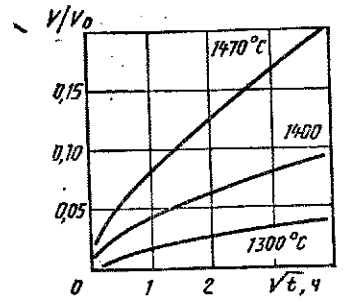


Рис. 4. Объемная доля гелия V/V_0, выделившаяся из облученных образцов оксида бериллия ($F = 2 \cdot 10^{24}$ нейтр./м², 860 °С) при различных температурах отжига как функция времени t [3]

Теплопроводность образцов при облучении уменьшается с ростом флюенса в тем большей степени, чем выше плотность образца (рис. 5). С увеличением температуры уменьшение теплопроводности замедлиется и при 100 °С достигает насыщении на уровне 40—50 % исходного значении при флюенсе $4 \cdot 10^{25}$ нейтр./м².

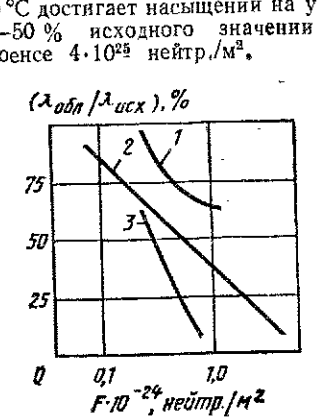


Рис. 5. Зависимость теплопроводности оксида бериллия от флюенса быстрых нейтроов ($E > 1$ МэВ) при плотности образцов (г/см³):
1 — 2,7—2,9; *2* — 2,8—3,0; *3* — 2,9—3,0; температура облучения 40—140 °С [3]

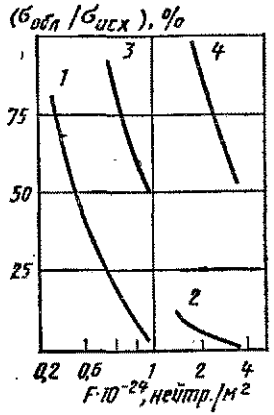


Рис. 6. Изменение прочности при сжатии оксида бериллия в зависимости от флюенса нейтронов при плотности образцов (г/см³):
1 — 2,99—3,0; *2* — 2,5; *3* — 3,0; *4* — 2,7—2,8; *1*, *2* — образцы, облученные при температуре 100 °С; *3*, *4* — образцы, облученные и обожженные при 1300 °С в течение 24 ч [3]

Прочность образцов из оксида бериллия падает с ростом флюенса нейтронов в тем большей степени, чем выше плотность образца. Повышение температуры облучения до 350—400 °С заметно уменьшает влияние нейтронного потока, но оно остается еще значительным. Отжиг при температуре 1300 °С полностью восстанавливает прочностные свойства. На рис. 6—8

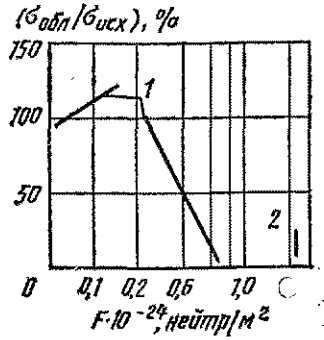


Рис. 7. Зависимость прочности образцов при растяжении от флюенса; плотность образцов 2,6—2,85 г/см³, температура облучения:
1 — 100 °С; *2* — 350—400 °С [3]

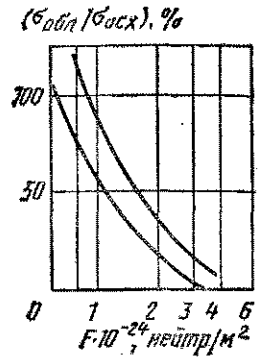


Рис. 8. Зависимость прочности образцов при изгибе от флюенса; плотность образцов 2,8—2,9 г/см³, температура облучения 100 °С [3]

приведены зависимости прочности оксида бериллия при сжатии, растяжении и изгибе в зависимости от флюенса быстрых нейтронов ($E > 1$ МэВ) и температуры. Небольшое увеличение прочностных свойств при малых флюенсах соответствует результатам теоретического анализа.

Облучение приводит к росту скорости ползучести изделий из оксида бериллия. Наблюдается релаксация напряжений в образцах, облучаемых при 500—700 °С, что объясняется наступающей в этих условиях ползучестью.

Магний, его сплавы и соединения. Сплавы магния являются низкотемпературными (температура плавления магния 650 °С) конструкционными материалами, коррозионно-стойкими против окисления на воздухе, в среде углекислого газа до температур приблизительно 400 °С, но имеющими низкое сопротивление коррозии в среде воды, жидкометаллических натрия, эвтектик натрий—калий. По ядерным свойствам магний уступает лишь бериллию. Существенным недостатком магния является высокое термическое сопротивление. Теплопроводность магния и его сплавов [63—171 Вт/(м·°С) при 20 °С] в 100 раз и более ниже, чем у сплавов алюминия.

При температурах ниже 500 °С в среде углекислого газа сплавы магния показали хорошую радиационную стойкость. При флюенсе нейтронов до 10^{25} нейтр./м² никаких существенных радиационных дефектов (распухания, радиационной ползучести, изменения прочности и пластичности) в сплавах магния не наблюдалось.

96. Результаты испытания на ползучесть сплавов циркалой-2 и Н-2,5 *1 [29]

Сплав	Обработка	Температура, °С	Напряжение, МПа	Плотность потока быстрых нейтронов (энергия более 1 МэВ)·10⁻¹⁶, нейтр./(м²·с)	Общее время испытаний, ч	Скорость ползучести $\dot{\varepsilon}_п$, ч⁻¹	
						в конце испытаний	при тех же условиях, но без влияния облучения
Циркалой-2 (труба)	Холодная деформация на 19 %, автоклавирование при 400 °С, 72 ч	220	311	9,6	2130	$1{,}5\cdot10^{-7}$	$10\cdot10^{-8}$
		260	211	9,3	3010	$5\cdot10^{-7}$	$4\cdot10^{-8}$
		300	211	9,4	4300	$8\cdot10^{-7}$	$7\cdot10^{-8}$
		350	211	9,4	4826	$3{,}2\cdot10^{-6}$	$1{,}5\cdot10^{-8}$
		375	211	9,4	4977	$2\cdot10^{-5}$	$8\cdot10^{-6}$
		400	211	9,4	4985	$7\cdot10^{-5}$	$7\cdot10^{-5}$
Н-2,5 (труба)	Закалка в воду от 870 °С, холодная деформация на 11 %, отжиг (500 °С, 24 ч)	260	141	5,3	5300	$1{,}05\cdot10^{-7}$	$0{,}2\cdot10^{-7}$
		300	141	5,3	6250	$4\cdot10^{-7}$	$0{,}7\cdot10^{-7}$
		350	141	5,3	6620	$13\cdot10^{-7}$	$14\cdot10^{-7}$

*1 Сплав циркалой-2: 1,2—1,7 % Sn; 0,07—0,2 % Fe; 0,05—0,15 % Cr; 0,03—0,08 % Ni; 0,03—0,08 % N; 0,010 % O; сплав Н-2,5: 2,5 % Nb; основа — цирконий.

Цирконий и его сплавы. Сплавы циркония получили широкое распространение благодаря высокой механической прочности при повышевных температурах, хорошей коррозионной стойкости в воде и паре, технологичности, приемлемой распространенности. По ядерным параметрам цирконий является третьим после бериллия и магния элементом. Низкая теплопроводность циркония [18 Вт/(м·°С) при 20 °С] компенсируется относительно низким тепловым расширением. Невысокая коррозионная стойкость при высоких температурах и относительная дороговизна сдерживают применение сплавов циркония.

В потоке быстрых нейтронов наблюдается радиационный рост и радиационная ползучесть сплавов циркония, существенные в температурном интервале 180—530 °С. С увеличением температуры (от 300 до 400 °С) влияние нейтронного облучения на ползучесть уменьшается, что объясняется быстрым отжигом радиационных дефектов, однако при этом возрастает и становится определяющей термическая ползучесть. Результаты испытаний сплавов циркалой-2 и Н-2,5 представлены в табл. 96*1.

Нейтронное облучение увеличивает скорость ползучести холоднодеформированного циркалоя-2 при темпера-

*1 В этой таблице и далее все химические составы сплавов приведены в мас. долях, %.

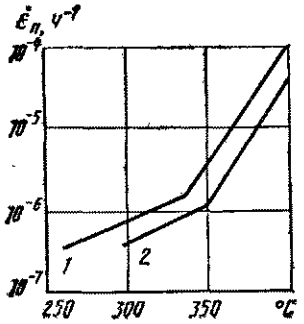


Рис. 9. Зависимость скорости ползучести сплава циркалой-2 от температуры при облучении в потоке нейтронов с энергией более 1 МэВ плотностью (5—9) 10^{16} нейтр./($м^2$·с):

1 — σ = 210 МПа; *2* — σ = 140 МПа; обработка — холодная деформация на 15—20 % [29]

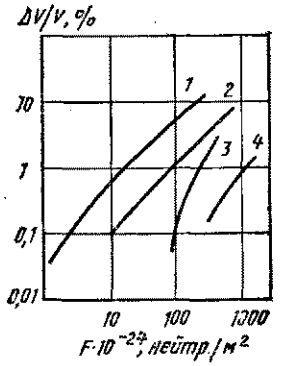


Рис. 10. Относительное изменение объема алюминия и алюминиевых сплавов в зависимости от флюенса нейтронов при температуре облучения 50—60 °С:

1 — 99,9999 % Al; *2* — сплав 8001; *3* — сплав 1100; *4* — сплав 6061 [50]

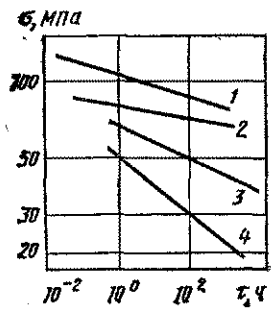


Рис. 11. Длительная прочность алюминиевого сплава 1100:

1, *2* — после облучения при температурах 100 и 50 °С соответственно; *3*, *4* — в исходном состоянии при температурах 100 и 150 °С соответственно [50]

туре 200—350 °С на порядок и более. Скорость ползучести холоднодеформированного сплава Н-2,5 увеличивается в меньшей степени.

При температуре образца циркалоя-2 340—350 °С наблюдается резкое увеличение скорости ползучести (рис. 9). Образцы были подвергнуты различной предварительной обработке.

Алюминий, его сплавы и соединения. Основными радиационными дефектами для сплавов алюминия являются радиационное распухание и увеличение длительной прочности. Радиационное распухание обусловлено реакциями взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами алюминия, при которых образуются кремний, водород и гелий. Влияние флюенса нейтронов (с энергией более 0,1 МэВ) на относительное изменение объема сплавов алюминия приведено на рис. 10 *[1]. Длительная прочность алюминиевого сплава 1100 после облучения флюенсом (0,7÷11) × × 10^{26} нейтр./$м^2$ возрастает (рис. 11), что является следствием радиационного упрочнения материала. Прочностные и пластические свойства сплава 1100 в зависимости от флюенса быстрых нейтронов с энергией более 1 МэВ приведены на рис. 12 и 13. Значительные дозы облучения не приводят к радикальному изменению механических свойств.

Аустенитные коррозионно-стойкие стали и никелевые сплавы. Потоки быстрых нейтронов вызывают в аустенитных коррозионно-стойких сталях и никелевых сплавах изменение механических свойств, радиационное распухание и радиационную ползучесть. На рис. 14 и 15 приведены данные о влиянии флюенса быстрых нейтронов и температуры облучения на механические свойства аустенитных сталей. Это изменение, особенно заметное при флюенсах быстрых нейтронов более $5 \cdot 10^{25}$ нейтр./$м^2$ и температурах выше 500 °С, называется высокотемпературным радиационным охрупчиванием (ВТРО).

ВТРО сопровождается значительным снижением пластичности материала (полное удлинение при разрыве может достигать лишь 0,1 %) и повышением предела текучести. Длительная прочность, сопротивление усталости и сопротивление ползучести при этом также существенно снижаются (до половины исходного значения у сталей типа 12Х18Н9).

Явление ВТРО объясняется радиационным стимулированием изменений свойств на границах зерен, приводящих к образованию трещин. Лучшей сопротивляемостью ВТРО обладают аустенитные стали, легированные молибденом и ниобием, например сталь 0Х16Н15М3Б. Однако это улучшение имеет место при ограниченном флюенсе нейтронов. Так, оболочки твэлов из стали 0Х16Н15М3Б имеют относительное удлинение всего ~0,8 % при флюенсе $8{,}5 \cdot 10^{26}$ нейтр./$м^2$ (температура испытаний 700 °С). Повышения остаточной пластичности и прочности при высоких флюенсах быстрых нейтронов можно достичь легированием аустенитных коррозионно-стойких сталей титаном, бором, кремнием. Малую склонность к ВТРО имеют стали ферритного и мартенситного классов.

Радиационное распухание (РР) проявляется при флюенсах более 10^{26} нейтр./$м^2$ в интервале температур облучения 0,3—0,55 абсолютной температуры плавления металла, что обыч-

*) Сплав 1100 — алюминий промышленной чистоты; сплав 6061 — сплав Al — 0,7 % Mg — 0,4 % Si.

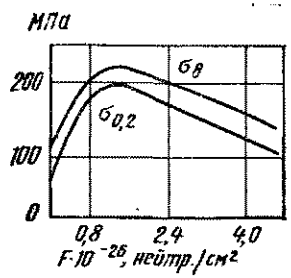


Рис. 12. Зависимость предела прочности и предела текучести сплава 1100 от флюенса нейтронов (50)

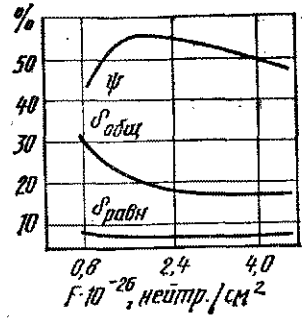


Рис. 13. Зависимость пластических свойств сплава 1100 от флюенса нейтронов [50]

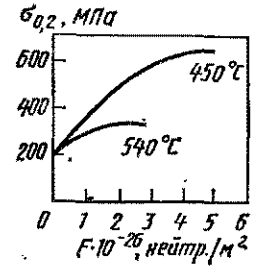


Рис. 14. Влияние облучения на предел текучести стали 304 при различных температурах облучения [50]; отечественный аналог — сталь 08Х18Н10

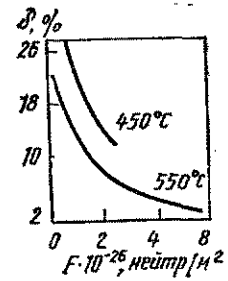


Рис. 15. Влияние облучения на пластичность коррозионно-стойкой стали 304, облученной при различных температурах [50]

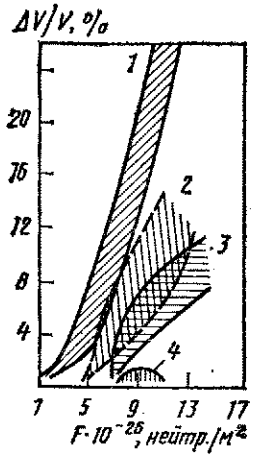


Рис. 16. Влияние облучения на радиационное распухание сталей
1 — 08Х18Н10Т; *2* — 03Х16Н15М3Б; *3* — 0Х16Н15М3Б (модифицированная); *4* — 12Х13 [72]

но соответствует рабочему диапазону конструкционного материала. Для аустенитных коррозионно-стойких сталей РР может достигать больших значений — до 30—40 % при флюенсах быстрых нейтронов (1,5÷2,5) × × 10^{27} нейтр./м². Механизм РР объясняется накоплением в процессе облучения избыточных вакансий, их «конденсацией» и зарождением в металле

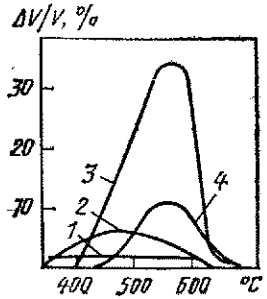


Рис. 17. Влияние температуры на радиационное распухание сталей и сплавов:
1 — ферритная сталь; *2* — высоконикелевые сплавы; *3* — сталь 316, холоднодеформированная (20 %); *4* — аустенитная нержавеющая сталь модифицированная [72]

вакансионных скоплений, имеющих вид сферических микропор. Центрами зарождения пор являются атомы примесей, атомы гелия, образующегося при взаимодействии нейтронов с никелем, хромом, железом.

На рис. 16 и 17 приведены зависимости РР некоторых сталей и сплавов от флюенса быстрых нейтронов и температуры. Действенным дополнительным средством, уменьшающим распухание аустенитных сталей, является поверхностный наклеп материала в результате деформации изделия при комнатной температуре. При флюенсе быстрых нейтронов (1,2÷1,4) × × 10^{27} нейтр./м² увеличение степени холодной деформации с 20 до 30 % для стали типа 316* приводит к снижению распухания с 15 до 4 % при температурах облучения 550—600 °С. Высоконикелевые сплавы (типа нимоника с 40—45 % Ni), а также хромистые коррозионно-стойкие стали ферритного и ферритно-мартенситного классов (12—17 % Cr и не более 0,5 % Ni) имеют меньшее объемное распухание. Однако повышение содержания никеля приводит к усилению ВТРО. Для устранения этого недостатка используют дисперсионное упрочнение и сложное легирование никелевых сплавов молибденом, титаном, алюминием, бором, ниобием, кремнием.

С механизмом вакансионного распухания связана и радиационная ползучесть — свойство постоянного деформирования материала под нагрузкой при температурах, когда не проявляется термическая ползучесть (300—500 °С), при облучении быстрыми нейтронами. Скорость радиационной ползучести пропорциональна флюенсу и приложенному напряжению:

$$\dot{\varepsilon}_{р.\,п} = B\sigma\dot{R},$$

где $\dot{\varepsilon}_{р.\,п}$ — скорость радиационной ползучести, $ч^{-1}$; σ — напряжение, Па; $\dot{R}$ — скорость накопления радиационных повреждений, смещ./(атом × ч); B — эмпирический коэффициент (2 × × 10^{-12} для стали 03Х16Н15М3Б и

* Сталь 316 имеет примерный химический состав 17 % Cr, 13 % Ni, 2,5 % Mo; ≤ 0,10 % C. Близка по свойствам отечественной стали 08Х17Н13М2Т.

$0{,}82 \cdot 10^{-12}$ для стали 08Х18Н10Т). Число радиационных повреждений зависит от флюенса и спектра нейтронов. Для типичного спектра энергетического реактора на быстрых нейтронах флюенсу быстрых нейтронов $1{,}67 \cdot 10^{27}$ нейтр./м² ($E > 0{,}1$ МэВ) соответствует 100 смещ./атом. Материалы с низкой склонностью к радиационному распуханию имеют и малую скорость радиационной ползучести.

Некоторые чистые металлы, керамики и керметы. Сравнение зависимостей раднационного распухання от отношения температуры испытания к температуре плавлеиия для некоторых чистых металлов приведено на рис. 18. Ниобий, молибден, цирконий, тантал, имеющие ОЦК-решетку, обладают повышенной стойкостью против радиационного распухания. Напротив, никель (ГЦК-решетка) оказывается более склонным к радиациоиному распуханию.

Керамики и керметы (Al_2O_3, MgO, ZrO_2, Al—Al_2O_3; B_4C — коррозиоиио-стойкая сталь) более стабильны, чем металлы и сплавы. Радиационное распухание и радиациоииая ползучесть у них проявляются слабее.

Графит обладает способностью эффективно замедлять нейтроны, отличными теплофизическими свойствами, хорошей механической прочностью при высоких температурах, относительно легкой обрабатываемостью. Используемый в реакторных устаиовках графит получают искусственно в процессе графитизации нефтяного кокса. Природный графнт обладает большим количеством примесей и не может быть использован как замедлитель нейтронов. Графит используется для создания газоплотиых конструкцнй, покрытий. Газоплотный графит получают методом пропитки под высоким давлением углеродсодержащей жидкостью искусственно полученного графита и последующей графитизации. Газоплотным оказывается и пиролитический углерод, получаемый в виде отложений на нагретой поверхности углеводородиого газа (метана, беизола). Все искусственные сорта графита обладают высокой анизотропией свойств, связанной с выстраиванием частиц кокса

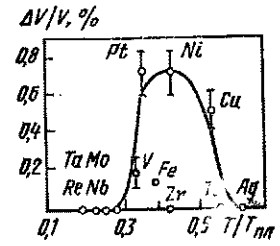


Рис. 18. Зависимость распухания чистых металлов от температуры облучения. Флюенс нейтроиов $3 \cdot 10^{25}$ нейтр./м² ($E >$ > 0,1 МэВ) [50]

при изготовлении брикетов, графитизации отложений из газовой фазы.

Нейтронное облучение повышает прочность на сжатие, твердость и модуль упругости графита. В то же время нейтронное облучение уменьшает теплопроводность при высоких температурах, приводит к нестабильности размеров, уменьшает пластичиость, вызывает накопление энергии в графите. Последние качества важны для выбора конструктивных решений.

Наиболее сильно влияние флюеиса при невысоких температурах (до 200 °С). При флюенсе иейтронов более 10^{24} нейтр./м² теплопроводность графитовых образцов снижается в 40—50 раз (рис. 19 и 20). Уменьшение теплопроводности (электропроводности), рост термического сопротивления связаны с возникиовением дефектов кристаллической структуры, индуцируемых нейтронным потоком.

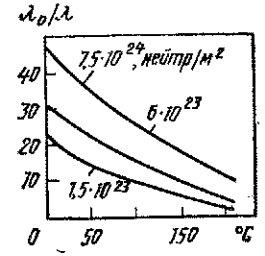


Рис. 19. Зависимость относительной теплопроводиости λ_0/λ графита (λ_0 — исходная теплопроводиость) от температуры облучения и флюеиса тепловых нейтронов [50]

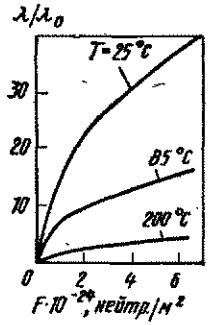


Рис. 20. Зависимость относительного термического сопротивления λ/λ_0 графита от флюенса тепловых нейтронов и температуры [50]

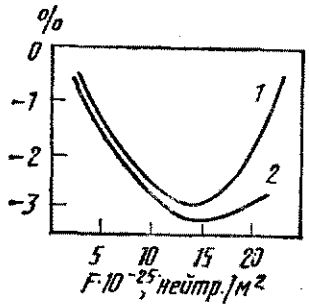


Рис. 21. Зависимость изменения размеров образцов продавленного, почти изотропного графита, вырезанных параллельно оси продавливания, от флюенса быстрых нейтронов и температуры облучения:
1 — 550—600 °С; *2* — 360—400 °С [50]

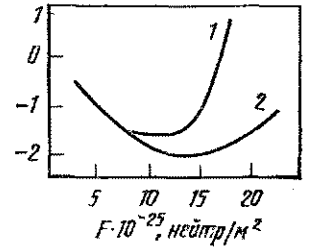


Рис. 22. Зависимость изменения размеров образцов продавленного, почти изотропного графита, вырезанных перпендикулярно оси продавливания, от флюенса быстрых нейтронов и температуры облучения:
1 — 550—600 °С; *2* — 360—400 °С [50]

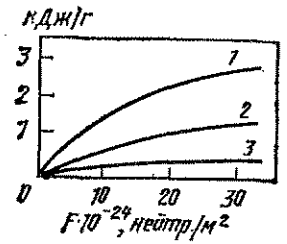


Рис. 23. Зависимость изменения полной накопленной энергии в графите от флюенса тепловых нейтронов:
1 — для облучения при 30 °С; *2* — после отжига в течение 5 ч при 1250°С; *3* — после обжига при 2000° С [50]

Изменения размеров графита зависят от направления (вдоль или поперек оси продавливания), флюенса и температуры. Первоначальное (при умеренных флюенсах) уменьшение размеров сменяется их увеличением. С ростом температуры изменения размеров графита снижаются и при температурах выше 350 °С объем многих образцов сокращается. Изменения размеров анизотропного графита от флюенса быстрых нейтронов при различных температурах в направлениях параллельно и перпендикулярно оси продавливания приведены на рис. 21 и 22.

Уменьшение пластичности является следствием радиационного упрочнения графита. Снижение пластичности приводит к образованию трещин.

Важна способность графита накапливать энергию деформации в кристаллической решетке как следствие радиационных дефектов. Накопленная энергия может проявить себя через выделение теплоты, сопровождающееся резким повышением температуры. Зависимость изменения накопленной энергии от флюенса и влияние отжига на ее уменьшение приведены на рис. 23.

6. МАТЕРИАЛЫ С МАЛЫМ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

К конструкционным материалам, применяемым в вакуумных системах, помимо требований в отношении конструкционной прочности, технологичности и экономичности, предъявляют

дополнительные требования. В их числе малая скорость газовыделения при высокой коррозионной стойкости во влажной атмосфере. Весь этот комплекс свойств определяет выбор материала для различных деталей вакуумных систем. В частности, аустенитные хромоникелевые стали являются основным материалом для высоковакуумных непрогреваемых сварных камер больших размеров благодаря малой скорости газовыделения, высокой коррозионной стойкости, обеспечивающей долговечность, хорошей технологической пластичности и свариваемости.

Развитие отечественной вакуумной техники и создание вакуумных камер больших размеров ограничивает применение аустенитных сталей, содержащих в большом количестве дефицитные легирующие элементы. Это заставляет вести поиск более дешевых и доступных материалов.

Углеродистые и низколегированные стали с коррозионно-стойкими покрытиями являются возможными заменителями аустенитных сталей для низкого и среднего вакуума.

Газовыделение — важное свойство для вакуумной техники. Скорость газовыделения материала — характеристика, необходимая для научно обоснованного расчета вакуумной системы.

В вакууме при 20 °С и ниже происходит выделение газа, растворенного в кристаллической решетке материала — водорода, а также газов, десорбирующихся с поверхности. Источники наводораживания могут быть различными. В прокате металла таким источником является главным образом электрохимическое наводораживание при горячей обработке; в органических материалах — разрушение водородных связей. Газы на поверхности металла адсорбируются либо из атмосферы — N_2, O_2, H_2O, либо появляются в результате химического взаимодействия адсорбированного кислорода с водородом или углеродом — H_2O, CO, CO_2.

Газовыделение материала определяют по «методу потока» с диафрагмой постоянной проводимости [37]. Скорости газовыделения Q_i и парциальные давления p_i рассчитывают по экспериментальным масс-спектрам, которые многократно определяют при длительном вакуумировании в высоком вакууме при постоянной температуре. Расчет выполняют на ЭВМ:

$$Q_i = \frac{p_i^к - (p_i^ф + p_i^н)}{F \cdot w_i},$$

где $p_i^к$, $p_i^ф$, $p_i^н$ — парциальные давления i-газа в камере с образцом, в камере без образца (фон), в насосе, Па; w_i — сопротивление диафрагмы для i — газа, с/м³; F — площадь поверхности образца, м²,

Суммарная скорость газовыделения $Q_\Sigma = \sum Q_i$.

Для предварительной оценки газовыделения используют значения скоростей газовыделения $Q_{экв}$ в азотном эквиваленте, которые рассчитывают по манометрическому давлению в испытательной камере и молекулярной массе азота:

$$Q_{экв} = \frac{p^к - (p^ф + p^н)}{F \cdot w_{N_2}},$$

где p — давление, измеренное манометром, Па; w_{N_2} — сопротивление диафрагмы для азота, с/м³.

Для металлов суммарная скорость газовыделения в 1,5—2 раза больше скорости в азотном эквиваленте.

Кинетика изменения скоростей Q выделения каждого газа, а также суммарной скорости газовыделения для коррозионно-стойкой стали показана на рис. 24.

Скорости газовыделения (суммарные и в азотном эквиваленте) для отожженных углеродистых сталей (табл. 97) уменьшаются с увеличением содержания углерода. Строительная низколегированная сталь 10ХСНД практически имеет те же значения скоростей газовыделения, что и углеродистая сталь с таким же содержанием углерода, но в 3 раза выше коррозионную стойкость во влажной атмосфере. Закалка стали У10, сопровождающаяся полиморфным превращением, резко увеличивает прочность стали, но при этом растет газовыделение [9]. Титан ВТ1, растворяющий водород в больших объемах, имеет очень малые

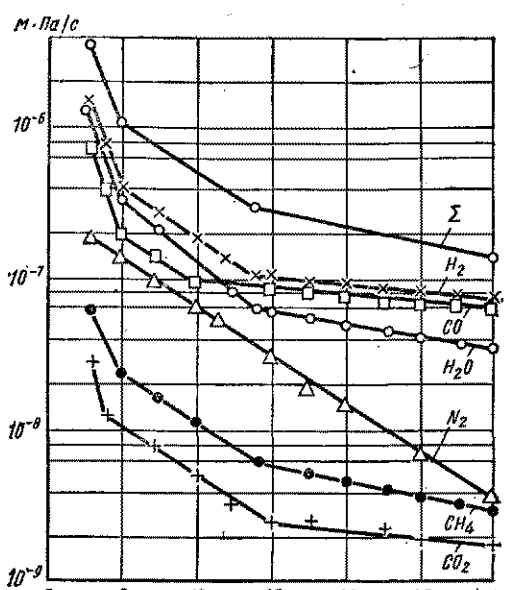


Рис. 24. Кинетика изменения скоростей газоотделения коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т в процессе вакуумирования при 20 °С

97. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С листового проката сталей, меди и титана, обработанных резанием [9, 13, 20]

Материал	Обработка	τ = 5 ч					τ = 30 ч				
		H_2	H_2O	CO + N_2	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	CO + N_2	Сумма	Эквивалент
08	Отжиг	8,0	35	32	75	50	2,0	2,5	4,5	9,0	6,0
10ХСНД		—	—	—	—	29	—	—	—	—	5,0
20, ВСт3		—	—	—	—	20	—	—	—	—	3,0
40		16	4,0	10	30	18	1,5	0,2	1,6	3,3	2,0
У10		2,5	1,3	13	17	5	0,9	0,1	0,8	1,8	0,5
	Закалка	30	8,0	32	70	20	17	0,2	3,0	20	4,0
М1	Отжиг	—	—	—	—	15	—	—	—	—	3,5
ВТ1		Ниже фона	12	7,0	19	25	Ниже фона	2,0	1,5	3,5	2,9

скорости выделения водорода при 20 °С, а следовательно, малые суммарные скорости газовыделения, значения которых, так же как для меди М1, близки к значениям скоростей газовыделения и коррозии для аустенитных коррозионно-стойких сталей. Однако титан и медь, как конструкционный материал, уступают сталям по модулю упругости, вследствие чего снижается жесткость конструкции.

Химическое и термическое окисление листовой коррозионно-стойкой аустенитной стали 12Х18Н10Т (табл. 98) создает тонкие оксидные пленки на поверхности, являющиеся барьером для диффузии водорода, уменьшает скорость газовыделения. Особенно эффективно окисление при 600 °С, 3 ч (выдержка попеременно в водороде и в вакууме по 30 мин).

Хромистые коррозионно-стойкие стали (табл. 99) практически не уступают хромоникелевым аустенитным сталям по уровню газовыделения и коррозионной стойкости. Недостатком их следует считать несколько более низкую ударную вязкость при криогенных температурах.

Способ обработки давлением и способ очистки поверхности влияет на газовыделение листового проката (табл. 100 и 101).

Алюминий и его сплавы являются хорошими конструкционными материалами для вакуумной техники. По скорости газовыделения (табл. 102, 103) и коррозионной стойкости во влажной атмосфере они достаточно близки коррозионно-стойким сталям, уступая им по жесткости, но превосходя в теплопроводности. Окисление, так же как и для коррозионно-стойких сталей, уменьшает скорости газовыделения. По сравнению с техническим алюминием скорость газовыделения несколько больше у силуминов (АЛ2) и сплавов типа АМг.

Диффузионное коррозионно-стойкое хромирование низкоуглеродистых сталей уменьшает скорости газовыделения (табл. 104). Нанесение покрытий проводят при высоких температурах (более 900 °С), что ограничивает применение такого покрытия для сварных конструкций. Ионное насыщение в тлеющем разряде предпочтительнее, так как поверхность металла нагревается до более низких температур. Для оптимальных режимов ионное насыщение хромом из хроморганики (при 550 °С), ионное изотирование (при 600 °С), а также ионное насыщение кремнием из кремнийорганики (при 180 °С) несколько увеличивает скорости газовыделения (в 1,3; 2,5; 2,7 раз соответственно), но создает покрытие коррозионно-стойкое во влажной атмосфере. Эффект повышения коррозионной стойкости наибольший для хромированных покрытий.

Газопламенное напыление алюминием создает на поверхности низкоуглеродистой стали коррозионно-стойкий слой, но для устранения эффекта шероховатости необходимо выглаживание валками или легкое окисление.

Коррозионно-стойкие покрытия эмалями (табл. 105), органические покрытия фторопластом или лаком (табл. 106) эффективно повышают коррозионную стойкость, но скорости газовыделения растут на несколько порядков. Коррозионная стойкость, в отличие от металлов, растет с увеличением толщины покрытия, однако при этом повышаются скорости газовыделения. На скорости газовыделения влияет не только режим нанесения покрытий, но и условия эксплуатации. С увеличением влажности и длительности выдержки в такой среде скорости газовыделения в вакууме растут. Кратковременный низкотемпературный прогрев в таких случаях уменьшает скорости газовыделения.

Скорость газовыделения полимерных материалов (каучук, резина, прорезиненная ткань, фторопласт и др.) больше, чем у сталей, и зависит от толщины материала (табл. 107, 108).

Скорости газовыделения листовых полимерных материалов приведены в табл. 109.

Скорости газовыделения теплоизоляционного и прокладочного вакуумного материала даны при 20 °С (табл. 110). У полиэтилентетрафталата (ПЭТФ) проявляется заметное влияние напыления алюминием на газовыделение. При двустороннем напылении скорости газовыделения при длительном 30-часовом вакуумировании имеют те же

98. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С листового проката стали 12Х18Н10Т [9, 18, 55, 61]

Очистка	Режим окисления	Время до испытания	τ = 5 ч					τ = 30 ч				
			H_2	H_2O	CO + N_2	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	CO + N_2	Сумма	Эквивалент
Травление H_2SO_4	—	13 ч	80	70	80	230	110	10	12	4,0	26	12
Пассивирование HNO_3	—	13 ч	5,0	5,5	4,8	16	9,0	1,2	1,0	0,4	2,7	1,5
	—	90 суток	1,2	4,5	2,0	8,0	4,0	1,0	1,2	0,6	2,9	1,5
	Воздух 100 °С, 1 ч	13 ч	4,0	2,2	1,2	7,8	4,5	0,9	0,47	0,26	1,7	0,9
	Воздух 100 °С, 50 ч	13 ч	3,0	3,5	1,7	7,5	5,0	0,2	0,45	0,12	0,77	0,5
	Вакуум 600 °С, 3 ч	13 ч	0,3	1,0	0,14	1,8	1,0	0,13	0,1	0,03	0,26	0,15
	Вакуум 600 °С, 3 ч	132 суток	0,6	1,2	0,24	2,5	1,5	0,1	0,25	0,1	0,47	0,25
	H_2/вакуум [1] 600 °С, 3 ч	13 ч	0,3	1,0	0,14	2,0	0,8	0,10	0,03	0,02	0,17	0,08

[1] Выдержка по 30 мин попеременно в H_2, затем в вакууме.

99. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С листового проката коррозионно-стойких сталей [18, 22]

Материал	Обработка	τ = 5 ч					τ = 30 ч				
		H_2	H_2O	CO + N_2	Сумма	Эквивалент.	H_2	H_2O	CO + N_2	Сумма	Эквивалент
08Х13	Травление + + пассивирование	5,0	6,0	4,3	16	10	1,3	1,5	0,5	3,4	1,4
		3,5	2,3	2,4	8,3	4,5	0,75	0,45	0,6	1,9	1,0
08Х17Т	Окисление: H_2/вакуум, 600 °С, 3 ч; на воздухе вылеживание 13 ч	1,1	0,4	0,6	2,1	1,0	0,18	0,02	0,04	0,25	0,1
12Х17	Травление + + пассивирование	7,0	5,0	5,0	1,75	7,0	1,2	0,6	0,6	2,5	2,0
15Х25Т	Шлифование	3,5	6,0	7,6	17	12	0,7	0,1	1,0	1,9	1,8
	Травление + + пассивирование	7,0	10	8,0	27	14	3	1,8	1,3	6,2	3,3
	Окисление: воздух, 150 °С, 1 ч; испытание немедленное	1,0	0,9	0,7	2,6	0,5	0,4	0,2	0,3	0,9	0,2
	Окисление: воздух 150 °С, 1 ч; выдержка на воздухе четверо суток	4,0	6,0	8,0	18	10	1,5	1,0	2,1	4,2	3,5

100. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$ м·Па/с) в вакууме при 20 °С листовой стали 12Х18Н10Т для разных способов получения проката [12]

Способ получения проката и очистки	Микронеровности, мкм	τ = 5 ч					τ = 30 ч				
		H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент
Горячекатаная, травление + + пассивирование	Rz = 50,6	3,0	14,0	6,0	23,0	10,0	1,2	2,8	0,7	4,7	2,0
Горячекатаная, травление + + шлифование	Ra = 0,10÷0,26	5,5	3,0	3,0	11,5	11,0	1,5	0,8	0,3	2,6	1,5
Холоднокатаная, травление + пассивирование	Rz = 10,3	4,0	4,5	6,0	16,5	6,5	1,3	1,0	0,7	3,0	1,5
Холоднокатаная, травление + выглаживание валками	Ra = 0,12÷0,20	4,0	6,0	2,4	13,0	6,5	0,4	0,8	0,3	1,5	0,9

101. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С холоднокатаной листовой стали 12Х18Н10Т после химической очистки поверхности [12]

Механическая обработка	Химическая очистка	τ = 5 ч					τ = 30 ч				
		H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент
Шлифование	Бензин + + ацетон	3,0	4,0	6,5	13,5	—	1,0	1,8	0,8	3,6	—
	Бензин + + спирт	5,5	3,0	3,0	11,5	11,0	1,5	0,8	0,3	2,6	1,5
Выглаживание валками	Бензин + + спирт	4,0	6,0	2,4	13,0	6,5	4,0	0,8	0,3	1,5	0,9
	Бензин + + CCl_4	5,0	4,0	2,0	11,0	—	5,0	0,4	0,4	1,3	—

102. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С алюминия и его сплавов [55]

Материал	Обработка	τ = 5 ч					τ = 30 ч				
		H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент
АД1 (листовой прокат)	Травление (NaOH)	200	250	120	570	300	11	7,0	2,0	2,0	12
	Травление + + пассивирование в HNO_3	9	11	10	30	15	2,2	1,4	0,8	4,4	2,6
	Окисление на воздухе 1 ч при 400 °С	0,6	0,7	Ниже фона	1,4	0,7	0,3	0,16	Ниже фона	0,46	0,3
	То же после 2,5 суток во влажной атмосфере	7,1	5,9	9,3	23	6,0	1,1	0,22	0,87	2,2	0,9
АЛ2 (литье под давлением)	Травление и пассивирование	43	33	52	128	80	18	10	4,0	32	18
АЛ2 (вакуумный переплав)		38	33	6,4	77	45	12	8	0,2	20	10
САП (листовой прокат)		14	14	Ниже фона	28	19	2,2	2,2	Ниже фона	4,4	3,2

103. Скорости газовыделения для 10-часового вакуумирования при 20 °С окисленных алюминия и его сплавов [11, 21, 55]

Сплав	Режим окисления			$Q_{H_2} \cdot 10^8$, м·Па/с	$Q_\Sigma \cdot 10^8$, м·Па/с
	t, °С	τ, ч	Среда		
	Без окисления			45	85
АД1	200	1	Воздух, испытание немедленное	6,0	24
	300			1,5	5,0
	400			0,9	3,9
АД1	200	2	Окисление в испытательной камере, вакуум 10 Па	3,0	—
АМц				10	—
АМг				13	—
АМг3				19	—
АМг6				30	—

104. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С коррозионно-стойких слоев и покрытий на низкоуглеродистых сталях [13, 17]

Основа (сталь	Поверхностный слой или покрытие	Толщина и дополнительная обработка	τ = 5 ч					τ = 30 ч				
			H_2	H_2O	$N_2 + CO$	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент
08	—	—	0,8	35	32	75	50	2,0	2,5	4,5	9,0	6,0
	Диффузионное хромирование и выглаживание	500 мкм	4,0	3,5	3,5	12	6,0	0,7	0,3	0,5	1,8	1,0
20	—	—	—	—	—	—	20	—	—	—	—	2,5
	Хроморганика (ионное покрытие, 550 °С)	70 мкм	22	0,6	8,0	31	16	10	0,2	2,0	12	3,3
	Азотирование (ионное N_2 + + 3 % H_2, 400 °С, 1 ч)	100 мкм	90	15	1,5	110	34	13,5	1,5	2,2	17	6,0
	Кремнийорганика ГМДС (ионное покрытие, 180 °С)	6 мкм	520	80	90	690	350	42	28	13	83	40
		Дополнительный прогрев на воздухе, 200 °С, 6 ч перед испытанием	—	—	—	—	50	—	—	—	—	6,6
	Газопламенное напыление алюминием	400 мкм	240	60	38	340	180	30	15	6	51	28
		Окисление на воздухе 400 °С, 1 ч + 2,5 суток на воздухе	10	9,0	4,0	24	9,0	1,5	0,3	4,2	6,0	3,0
		Выглаживание	10	9,7	2,0	21	11	0,9	2,0	—	2,9	1,5

105. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^5$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С коррозионно-стойких эмалей на низкоуглеродистой стали [19]

Эмаль	Цвет	τ = 5 ч					τ = 30 ч				
		H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент
Полиуретановая УР-175	Красный	1,0	1,0	1,0	3,1	2,0	0,7	0,1	0,4	1,2	0,6
	Черный	2,4	1,5	1,2	5,5	3,0	0,5	0,2	0,6	1,3	1,0
	Белый	4,5	5,0	2,7	12,2	7,0	1,0	0,6	0,7	2,3	1,3
	Желтый	18	23	10	52	28	3,7	4,5	2,6	11	8,0
Перхлорвиниловая ХВ-16	Кремовый	—	—	—	—	—	0,5	0,2	0,4	1,2	1,9
	Белый	2,4	3,7	2,4	8,5	9,0	4,4	0,6	0,6	1,3	7,2
	Фисташковый	9	30	3	42	27	2,1	10	2,5	14	6,4

106. Скорости газовыделения ($Q_{газ} \cdot 10^6$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С органических покрытий на стали Ст3 [17]

Материал покрытия		Толщина, мкм	$t_{нагр}$, °С	Время до испытания	τ, ч
Фторопласт 3	Подслой Cr_2O_3	70	400	Одна неделя на воздухе	6,0
	Без подслоя	50			5,8
Поликарбонат	Без подслоя	45	450		5,0
Лак Фторлон 32л	ГМДС	3	150	Один месяц во влажной комнате + 120 °С, 5 ч	0,37
	УР-231	5	80	Одна неделя на воздухе	2,2
		5, один слой	150		0,38 *1
		15, три слоя		Четыре месяца во влажной комнате	0,40
				Одна неделя на воздухе	1,5
				Один месяц во влажной комнате + 120 °С, 5 ч	0,75

Материал покрытия		Время до испытания	τ, ч
Фторопласт 3	Подслой Cr_2O_3	5	22
			45
Поликарбонат	Без подслоя		18
Лак Фторлон 32л	ГМДС		11
	УР-231		7,5
			30 *1
			15
			30
			7,5
			11

*1 Покрытие на стали 08.

107. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^4$, м·Па/с) каучука и резины после вакуумирования при 40 °С, 20 ч

Материал	Цвет	Толщина, мм	H_2	$CO + N_2$	CO_2	H_2O	Сумма	Эквивалент
Каучук ВКИ-3В	Коричневый	0,4	8,0	0,4	0,5	0,4	9,3	6,0
		0,6	3,9	23	0,6	7,7	35	25
		0,8	15	10	1,3	32	60	35
Резина	Зеленый	0,7	18	0,5	0,3	0,1	19	3,5
	Светло-серая	0,7	13	1,8	0,8	0,1	16	5,0
	Белая	1,5	24	5,0	1,0	0,8	31	11
	Двухслойная	1,4	20	15	3,0	1,8	40	14
Прорезиненная ткань 7889	Белая	0,3	8,0	2,0	0,4	0,4	11	4,0
	Серо-зеленая	0,45	5,0	2,5	0,4	0,3	8,3	2,5
	Светло-зеленая	0,6	14	4,0	0,1	1,0	16	8,0
	Темно-зеленая	0,6	40	10	1,4	1,2	53	20
Резина, дублированная тканью	Черная	1,0	60	19	3,0	2,5	85	30
	Желто-красная	1,0	25	5,5	3,5	1,6	38	10
	Красная	0,6	15	2,0	—	0,4	18	6,0

108. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^4$, м·Па/с) резины после длительного вакуумирования

Материал	Цвет	Толщина, мм	t, °С	τ, ч	H_2	$CO + N_2$	H_2O	Сумма	Эквивалент
Резина	Зеленый	0,7	20	10	19	3,0	0,9	23	6,0
				30	6,0	0,7	0,1	6,8	2,0
			40	10	31	1,4	0,6	33	6,0
				30	12	0,5	0,1	13	2,5
Резина, дублированная тканью	Красный	0,6	20	10	10	4,0	0,2	14	7,0
				30	5,0	0,8	0,2	6,0	1,6
			40	10	32	5,0	0,7	38	10
				30	9,0	1,0	0,3	10	2,7

109. Скорость газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С полимерных листовых материалов

Материал	Толщина	τ = 10 ч					τ = 30 ч				
		H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ)	12 мкм	—	—	—	—	1,2	0,1	0,1	0,02	0,2	0,1
Поливинилхлорид	0,2 мм	—	—	—	—	—	11	0,2	3,8	15	6,0
Эпоксидная смола	2 мм	—	—	—	—	90	—	—	—	—	40
Политетрафторэтилен-фторопласт 4Д	2 мм	6,0	90	290	300	180	1,8	40	190	200	140
Кремнийорганическая резина	0,7 мм	—	—	—	—	6000	6000	100	700	6800	2000

110. Скорости газовыделения ($Q \cdot 10^7$, м·Па/с) в вакууме при 20 °С теплоизоляционного ПЭТФ и прокладочного СБШ материала [16, 35]

Материал (толщина)		τ = 5 ч					τ = 30 ч				
		H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент	H_2	H_2O	$CO + N_2$	Сумма	Эквивалент
ПЭТФ (12 мкм)		0,9	1,6	—	2,5	1,2	0,08	0,1	—	0,18	0,05
ПЭТФОА (125 мкм), одностороннее напыление алюминием		3,1	5,8	—	89	5	0,2	0,4	—	0,6	0,3
ПЭТФДА (250 мкм), двустороннее напыление алюминием		23	100	5	128	88	0,9	2,0	—	3,0	1,4
СБШС-Т (плотная стеклобумага)	Без прогрева	5,0	14	—	19	6	0,5	0,9	—	1,4	0,5
	После прогрева 40 °С, 2 ч	10	4,0	13	27	12	1,4	0,2	1,4	3,0	1,7
СБШ-Т (рыхлая стеклобумага)	После прогрева 40 °С, 2 ч	3,0	1,0	11	15	24	1,4	0,2	2,4	4,0	2,4

значения, что и у листового алюминия. Стеклобумага после кратковременного прогрева при 40 °С заметно увеличивает скорости газовыделения из-за углеводородсодержащих газов.

7. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ И ЖАРОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ

Коррозия металлов — самопроизвольное разрушение в результате взаимодействия с окружающей средой.

Электрохимическая коррозия развивается в металлических материалах, которые работают во влажной атмосфере, почве, речной и морской воде, водных растворах солей, щелочей и кислот.

Первым направлением защиты от электрохимической коррозии является нанесение на поверхность деталей электроположительных (иногда благородных) металлов. Второе, более распространенное направление, — нанесение на металлические материалы покрытий из металлов или сплавов, способных пассивнзироваться в коррозионной среде, что позволяет значительно (в несколько или десятки раз) снизить коррозионное разрушение. Третье направление состоит в использовании диэлектрических покрытий на металлических материалах, которые исключают работу гальванических пар.

Конструкционные материалы в процессе обработки и эксплуатации при высоких температурах (500—600 °С) подвержены химической коррозии, которая развивается в сухих газах и жидких неэлектролитах. Наиболее часто химическое взаимодействие проявляется в кислородсодержащих средах: сухом воздухе, углекислом газе, водяном паре, кислороде, продуктах сгорания различного топлива. Активная коррозия наблюдается в среде сернистых газов и галоидных средах. Скорость химической коррозии растет с увеличением температуры, интенсивности движения газовой среды, под действием циклических напряжений, термоударов, при наличии движущихся частиц в газовой фазе, радиации и электромагнитных полей.

Для защиты от электрохимической и химической коррозии используются покрытия на металлической и неметаллической основах, органические и неорганические.

Освоены следующие способы нанесения покрытий:

окрашивание с последующей сушкой для нанесения лакокрасочных покрытий — контактный способ;

нанесение обмазки с последующим отжигом для нанесения металлических, эмалевых и композиционных покрытий — шликерный способ (вжигание);

электрохимическое осаждение покрытий из водных растворов, в расплавах солей —катодное восстановление (гальванический способ);

химическое осаждение из растворов и расплавов солей — химический способ;

напыление покрытий: плазменным, детонационным плазменным, ионно-плазменным способами;

плакирование прокаткой, газопрессовой сваркой;

осаждение покрытий из газовой фазы в порошковых смесях — порошковый способ, из газового потока — прямоточным или циркуляционным методом [1];

осаждение покрытий из паровой фазы в вакууме [52];

погружение деталей в жидкие металлы и сплавы.

Качество и защитные свойства большинства покрытий определяются сплошностью, равномерностью, постоянством состава покрытия на занимаемой поверхности, сцеплением с основой, в отдельных случаях чистотой поверхности покрытия, декоративным цветом и блеском.

Наиболее жесткие требования к сплошности предъявляются к катодным коррозионно-стойким покрытиям, которые изготовляют из более электроположительного материала, чем основа, а также к жаростойким покрытиям.

Катодные покрытия экранируют анодные участки. Вследствие электроположительности они долговечны, но не допускают сквозных пор, царапин, механических повреждений. При наличии несплошности в покрытии основной металл разрушается интенсивнее, чем без покрытия.

Анодные покрытия из электроотрицательных элементов при наличии несплошностей сохраняют защитные свойства.

Для контроля качества покрытий используют методы: визуальные, химические [77], электрофизические и металлографические.

Выбор покрытий должен начинаться с достаточно точного определения состава и состояния коррозионной среды. Детальное изучение микро- и макроусловий является существенным при выборе покрытий.

Важно определить способ нанесения для получения качественного покрытия и при этом не вызвать значительного изменения структуры, физических и механических свойств основы, коробления деталей.

При нанесении покрытия методом погружения кроме деформации возможен отжиг (например, латуни и меди при горячем лужении); наводораживание и охрупчивание при электрохимических видах осаждения; образование хрупких переходных зон при высокотемпературном образовании покрытий и т. д.

Возможность применения того или иного способа нанесения покрытий должна быть определена конструктором также с учетом размеров и геометрических параметров деталей. За исключением окраски с последующей сушкой или отжигом, плазменного напыления, защитные покрытия другими методами могут быть нанесены на детали мелких и средних размеров. При большинстве способов, кроме порошкового, циркуляционного и химического осаждения, получение равномерных покрытий в отверстиях, внутренних полостях, на наружных поверхностях сплошной формы невозможно или технически затруднено.

При проектировании деталей, требующих защиты от коррозии, необходимо учитывать, что они должны быть просты по конструкции, без узких и глубоких отверстий, острых углов.

Покрытия, получаемые плазменным напылением, окунанием в жидкие расплавы, детонационным напылением по равномерности, сплошности, адгезии уступают диффузионным покрытиям из газовой фазы.

Подготовка поверхности деталей перед нанесением покрытий является обязательной операцией, влияющей на сплошность, адгезию и защитные свойства покрытий. Основное требование— прочность сцепления между основой и покрытием — может быть достигнуто, если между ними нет посторонних загрязнений в виде жиров и окалины. В зависимости от состояния поверхности и метода нанесения покрытия подготовку ведут различными способами травления и обезжиривания [36, 43].

В качестве коррозионно-стойких покрытий наиболее широко используются цинк, кадмий, алюминий, хром, никель, свинец, реже олово, благородные металлы, титан и др. Применяются комплексные и многокомпонентные покрытия на их основе [14].

Цинк сравнительно медленно корродирует в атмосфере со скоростью от 1 до 15—20 мкм в год. Оцинкованная металлопродукция является наиболее распространенным материалом с защитным покрытием и используется в атмосферных условиях для защиты листового проката, метизных изделий. Толщина цинковых покрытий на стали при эксплуатации в течение пяти лет составляет в атмосфере промышленных объектов 30 мкм, в сельской местности 7 мкм, в приморских районах 15 мкм, в закрытых помещениях 7—15 мкм.

Хром обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и воде. Хромирование находит широкое применение для защиты от коррозии и эрозии деталей выпускной системы двигателей внутреннего сгорания, коллекторов отсоса газов, реакторов, баков, нейтрализаторов, отбелочных колонн и других деталей химической аппаратуры, сварных конструкций теплообменников, крепежных изделий, стальных труб, листов из низкоуглеродистой стали, деталей гидронасосов для перекачки воды, нефти, масел, растворов кислот, щелочей, для повышения коррозионной стойкости электротехнических сталей.

Алюминий стоек в атмосфере. Скорость коррозии в промышленной атмосфере 2—5 мкм в год и со временем затухает. Алюминий, как правило, непригоден для защиты в морской воде,

но стоек в мягкой чистой воде, в почве и кислой химической среде. Интенсивно корродирует в местах малого доступа кислорода, склонен к контактной коррозии со сталью и медными сплавами.

Скорость коррозии кадмия под воздействием коррозионной среды линейно зависит от времени; срок действия покрытия пропорционален толщине. Кадмий обеспечивает хорошую защиту стали при воздействии конденсата в замкнутом пространстве, при погружении в стоячую или мягкую нейтральную воду, в щелочной или кислой средах. Кадмиевое покрытие толщиной 25 мкм защищает сталь в промышленной атмосфере в течение года, а в морской воде — до пяти лет. Благодаря низкому сопротивлению скручивающим усилиям кадмий используется для изделий, имеющих резьбу и подвергающихся частой сборке и разборке. Кадмий предотвращает контактную коррозию деталей с алюминием.

Свинец обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, почве, воде, серной кислоте. Покрытия получают электролитически из растворов кислых фторборатов, фторсиликатов и сульфатов. Толщина свинцовых покрытий может быть 10—100 мкм и более. Свинец надежно защищает от коррозии подземные силовые электрические коммуникации.

Свинцово-оловянистые покрытия устойчивы в атмосфере диоксида серы и оксидов азота.

Наряду с гальваническими покрытиями для защиты сталей от электрохимической коррозии получили распространение диффузионные покрытия Zn, Cr, Al и другими элементами [14].

Диффузионные покрытия могут быть использованы для защиты от коррозии и повышения коррозионной стойкости алюминиевых, медных, титановых и других сплавов [14].

Различные способы, режимы нанесения и защитные свойства коррозионно-стойких покрытий на деталях из стали, алюминия и меди приведены в табл. 111—113.

Высокими защитными свойствами в атмосферных условиях при воздействии кислот и щелочей обладают неметаллические покрытия, в качестве которых используются полиэфиры, винилы, полиэтилен, стеклоэмали, эпоксидные смолы. Основные недостатки таких покрытий связаны со слабой адгезией покрытия с подложкой, отслаиванием и растрескиванием покрытий, развитием коррозии под защитным покрытием при недостаточном сцеплении. В табл. 114 приведены способы нанесения, материалы и защитные свойства неметаллических покрытий.

Жаростойкие металлические и неметаллические покрытия используют для защиты деталей энергетического оборудования, испытывающих воздействие окислительной среды при высоких температурах (табл. 115).

Экономическая эффективность применения покрытий должна удовлетворять соотношению [36]

$$100\frac{\Delta T}{T}\left(1-\frac{L}{C}\right)-100\frac{\Delta C}{C}>0,$$

где ΔT — увеличение срока службы конструкции, годы; T — срок службы конструкции, годы; L — стоимость замены конструкции; C — стоимость материалов конструкции; ΔC — добавочная стоимость мероприятий по нанесению покрытий.

Приложение. Условные обозначения способов получения покрытий.

ВИМ. Вакуумная металлизация с индукционным нагревом испаряемого металла отличается от ВРМ более эффективным использованием электроэнергии, однако приходится защищать индуктор от испаряемых металлов с температурой плавления более 1000 °С. Возникает проблема выбора материала для тигля.

ВРМ. Вакуумная металлизация с радиационным нагревом испаряемого металла осуществляется в камере с остаточным давлением не более 0,0133 Па. Пары легкоплавких металлов или сплавов, осаждаясь на насыщаемый материал, образуют покрытие.

ВЭМ. Вакуумная металлизация с электронно-лучевым нагревом электронными пушками позволяет испарять тугоплавкие металлы, располагаемые в медном водоохлаждаемом цилиндре. Все разновидности вакуумной металлизации (ВРМ, ВИМ, ВЭМ) для получения всестороннего покрытия требуют вращения обрабатываемой детали и подогрева ее для лучшего сцепления покрытия с подложкой.

ДВКС. Диффузионное насыщение в виброкипящем слое осуществляется в специальных установках с вибрирующим контейнером, в которые загружают твердые частицы и детали. В случае азотирования в нагретый контейнер подается аммиак.

ДГП. Прямоточный способ диффузионного насыщения из газовых смесей имеет две разновидности. В первом варианте через печную камеру с диффундирующим элементом или его сплавом пропускают галогенид водорода, галоиды или их смеси с водородом или нейтральными газами. Образующиеся при нагреве галогениды диффундирующего элемента потоком газа переносятся во вторую камеру, где расположены нагретые насыщаемые детали. Отработавшая газовая смесь удаляется в атмосферу или в лучшем случае нейтрализуется. При втором варианте в первую камеру установки загружают готовые галогениды или гидриды диффундирующего элемента, через которые пропускают водород или нейтральные газы (аргон, азот).

ДГЦ. Циркуляционный способ диффузионного насыщения. В замкнутой рабочей камере установки отсутствуют нейтральные (балластные) составляющие газовой смеси. Перенос диффундирующего элемента на обрабатываемые детали осуществляется в результате обратимых химических реакций. По сравнению с порошковым и прямоточным способами циркуляционный является более производительным, безвредным и экономичным.

ДКС. Диффузионное насыщение в «кипящем слое». Псевдоожиженная среда в тигле печи получается в результате продувки газом засыпки, состоящей из твердых мелких частиц (например, корунда). Продувая соответствующие газы, в «кипящем слое» проводят цементацию или нитроцементацию стальных изделий. Продувая смесь аргона с йодом через слой, состоящий из порошка оксида алюминия и кремния (10 %), получают силицидное покрытие на молибдене.

ДПМ. Разновидность диффузионного насыщения из порошковых смесей. Источником диффундирующего элемента является его оксид. В состав смеси входят восстановитель — алюминий — и активатор. Во избежание перегрева для поглощения теплоты алюмотермической реакции восстановления в смесь вводят «балластную» добавку в виде порошка оксида алюминия.

ДПО. Обычный способ диффузионного насыщения из порошковых смесей с активаторами. Герметизированные контейнеры с обрабатываемыми деталями, засыпанными порошковой смесью, загружают в печь для изотермической выдержки. Порошковая смесь состоит из диффундирующего элемента или сплава на его основе, порошка шамота или оксида алюминия. В качестве активаторов в количестве 1—7 % (по массе) добавляют галогениды аммония, чаще хлористый аммо-

111. Коррозионно-стойкие покрытия [14, 43, 48, 73. 78, 80, 81, 83, 85] (способ получения покрытия см. приложение к параграфу 7)

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ОЭГ	Кадмий, 3—6	Посадочные поверхности стальных деталей	В цианистых электролитах (CdO, Cd, NaCN) с температурой 20—35 °С при плотности тока J = 0,015÷0,02 А/м	Внутри помещений
ОЭГ	Цинк, 6—9	Стальные детали	В щелочных электролитах [$Zn(CN)_2$, NaCN, NaOH] с температурой 40—50 °С при плотности тока J = 0,01÷0,02 А/м	То же
ОЭГ	Кадмий, 21—24	Стальные штампованные детали	То же	Тропический климат, внутри помещений
ОЭГ	Кадмий, цинк, 3—9	Стальные резьбовые и крепежные детали с шагом резьбы 0,4—0,8 мм	»	Внутри помещений
ХОР	Фосфатное	Стальные пружины, детали сложной формы	Из растворов, содержащих препарат МАЖЕФ	То же
ПНП	Медь, 100—200	Стальные детали	Распыление пистолетом-металлизатором	Защита стали от цементации в науглероживающей среде
ПНП	Алюминий, 100—200	Стальные металлоконструкции	То же	*Защита от коррозии в атмосферных условиях*
ПНП	*Цинк, до 200; кадмий, до 300*	*Детали, элементы конструкций мостов, портовых и гидротехнических сооружений, морских и речных судов. Опоры электрических передач*	То же	В атмосферных условиях, при воздействии паров пресной и морской воды
ДРМ	Цинк, 20—40	Стальные трубопроводы, нефтепроводы, шайбы, болты, детали сложного профиля	Диффузионное цинкование с последующим хроматированием	В условиях влажной атмосферы, воздействия морской воды
ОЭГ	Кадмий, цинк, 9—12	Стальные пружины с диаметром проволоки до 1 мм	—	В атмосфере и внутри помещений
ОЭГ	Кадмий, цинк, 12—15	Стальные пружины с диаметром проволоки более 1 мм	—	То же
ОЭГ	Цинк, кадмий, 6—30	Стальные детали, требующие защиты от коррозии при сохранении электропроводности	—	То же
ОЭГ	Олово, 9—12	Стальные детали	Из кислых или щелочных электролитов	В среде сероуглерода и при контакте с серой
ОЭГ	Свинец, 200	Стальные детали	Из сульфатных и фторборатных электролитов	Химическое производство, серная кислота
ХОР	Никель, 9—24	То же	Осаждение никеля из раствора $NiCl_2 \cdot 6H_2O, Na_2H_2PO_2 \times \times 10H_2O, CH_3COONa$	Детали машин и приборов сложной формы и с глухими отверстиями

Продолжение табл. 111

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ДГП	Слой оксинитридов и оксикарбонитридов	Детали из сталей и титановых сплавов	Обработка в среде аммиака с автоматическим поддержанием степени диссоциации при температуре 400—600 °С	Повышение коррозионной стойкости и износостойкости
ПНП	Сплавы никеля и кобальта	Детали из чугуна и инструмент	Нанесение покрытий с помощью плазменной установки Colmoloy Fusewelder путем напыления порошка и одновременного оплавления	Повышение коррозионной стойкости, термостойкости, износостойкости. Восстановление изношенных деталей
ДРС	Нитриды и сульфиды железа	Детали из чугуна и сталей	Процесс SUR—SULF диффузионное нитросульфидирование в соляных ваннах при 560—570 °С	Повышение износостойкости и коррозионной стойкости
КЭП	Сплав (90—93) % Ni + + (7—10) % P с дисперсными включениями синтетических алмазов диаметром 0,1—10 мкм	Стальные детали	Электролитическое осаждение	Повышение коррозионной стойкости и износостойкости деталей насосов, текстильного оборудования
ПНП	Молибден и другие тугоплавкие металлы	Стальные и чугунные детали, порошковые кольца, пальцы цилиндров	Плазменная металлизация	Повышение коррозионной стойкости и износостойкости

ДИО, ДГИ	Хром, азот, 80—120	Детали из сталей 12Х18Н9Т, работающие в условиях повышенных температур, эрозионного изнашивания	Хромирование в смеси: 70 % Cr, 29 % Al_2O_3, 1 % NH_4Cl при 1060 °С, 15—18 ч. Азотирование при 1060 °С, 3 ч в среде азота особой чистоты	—
ДМП	Хром, 60—90	Алюминиевые сплавы АЛ2, Д16	Хромирование в смеси: 98 % (30 % Al_2O_3 + 70 % (85 % Cr_2O_3 + 15 % Al)) + 2 % NH_4Cl при 500 °С, 10 ч	Скорость коррозии сплава АЛ2 в 10 %-ной HNO_3 снижается в 2 раза, сплава Д16 в 1,5 раза; в 30 %-ной H_2SO_4: сплава АЛ2 — в 4 раза, сплава Д16 — в 1,5 раза. Испытании в течение 75 ч
ДМП	Хром, 28	Алюминиевый сплав АМц	То же	Скорость коррозии в 10 %-ной HNO_3 снижается в 1,5 раза, в 30 %-ной H_2SO_4 — в 2 раза
ДМП	Железо, титан	Медь М1, латунь Л62	Ферротитанирование при 700 °С, 6 ч	Снижение скорости коррозии сплава М1 в 20 %-ной HCl в 30 раз, сплава Л62 в 4 раза при времени испытания 300 ч
ДМП	Титан	Стали 35Л, 45, чугуны СЧ18, ВЧ 50	Титанирование при 1000—1200 °С, 4—6 ч в смеси: 93 % (30 % Al_2O_3 + 70 % (70 % TiO_2 + 30 % Al)) + + 5 % AlF_3 + 2 % NH_4Cl	Практически не корродируют, наблюдаются следы коррозии
ДМП	Кремний, хром, 185	Титан ВТ1	Диффузионное насыщение при 900 °С, 4 ч	Снижение скорости коррозии в 35 %-ной HCl при 20 °С за время 50 ч в 2 раза

Продолжение табл. 111

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ДПО	Хром	Железо	Состав смеси: 96,2 % (21 % Al_2O_3 + 79 % Фх025) + + 3,8 % NH_4Cl; 1200 °С; 6 ч	Δm, г/м²: 20 — в HNO_3, 2 — в NaCl за 75 ч при 20 °С
	»	У8	Состав смеси: 97,2 % (27 % Al_2O_3 + 73 % Фх025) + 2,7 NH_4Cl; 1075 °С, 6 ч	97 — в HNO_3, 1 — в NaCl за 75 ч при 20 °С
ДПМ	Хром, алюминий	Железо	Состав смеси: 95,8 % (37,5 % Al_2O_3 + 62,5 % (62 % Cr_2O_3 + 38 % Al)) + 4,2 % NaF; 1060 °С; 6,5 ч	Δm, г/м²: 973 — в HNO_3, 17 — в NaCl за 75 ч при 20 °С
»	То же	У8	Состав смеси: 95,8 % (37 % Al_2O_3 + 63 % (63 % Cr_2O_3 + + 37 % Al)) + 4,2 % NaF; 1040 °С; 5,5 ч	Δm, г/м²: в HNO_3 — 87, в NaCl — 15 за 75 ч при 20 °С
»	Алюминий, кремний	Железо	Состав смеси: 97 % (50 % Al_2O_3 + 50 % (65 % SiO_2 + + 35 % Al)) + 3 % NaF; 1000 °С, 6 ч	Δm, г/м²: 1540 — в HNO_3, 5 — в NaCl за 75 ч при 20 °С
	То же	У8	То же	Δm, г/м²: 463 — в HNO_3, 2 — в NaCl за 75 ч при 20 °С
»	Хром, кремний	Железо	Состав смеси: 98 % (40 % Al_2O_3 + 60 % (25 % Al + + 75 % (85 % Cr_2O_3 + 15 % SiO_2))) + 2 % NH_4Cl; 1050 °С, 7 ч	Δm, г/м²: 23 — в HNO_3, 2 — в NaCl за 75 ч при 20 °С
	То же	У8	То же	Δm, г/м²: 10 — в HNO_3, 3 — в NaCl за 75 ч при 20 °С
»	Титан, алюминий	Железо	Состав смеси: 96,6 % (36,5 % Al_2O_3 + 63,5 % (41 % TiO_2 + + 59 % Al)) + 3,4 % AlF_3; 1080 °С, 7 ч	Δm, г/м²: 266 — в HNO_3, 2 — в NaCl за 75 ч при 20 °С

Обозначение. Δm — потеря массы.

112. Коррозионно-стойкие покрытия для деталей из алюминия и его сплавов [43, 48]

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемые детали	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение
ОЭГ	Медь—никель; общая толщина 15—27	Детали приборов и машин, требующие декоративной отделки и защиты от коррозии	Медь из цианистых, пирофосфатных и фторборатных электролитов, никель из электролита типа Уоттса	В любых условиях
	Кадмий, 9—12	Детали, находящиеся в контакте с медными деталями	—	Внутри помещений и в условиях повышенной влажности
ОЭГ	Свинец, 51—54	Детали машин	Из сульфаматных и фторборатных электролитов	В контакте с H_2SO_4
	Хром, 51—54	Детали машин из литейных сплавов	—	В контакте со щелочами
ХОР	Оксидно-фосфатное, 2	Детали из деформируемых и литейных сплавов	—	Внутри помещений и в атмосфере
	Оксидное и с наполнением в хромпике, 10	Детали из коррозионностойких сплавов АМг, АМц, деформируемых сплавов АК-4, АК-6, Д16, В95	Анодное окисление в хромпике	Внутри помещений
	Оксидное	Детали, требующие декоративной обработки	Анодное окисление в H_2SO_4 с последующим окрашиванием в различных красителях	В атмосферных условиях

113. Коррозионно-стойкие покрытия для деталей из меди и медных сплавов [43, 48, 82]

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемые детали	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ОЭГ	Никель, 3—6	Детали высокой точности	В ванне: $H_2SO_4 \cdot 7H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, H_3BO_3 при плотности тока $J = 0{,}025 \div 0{,}1$ А/м²	Внутри помещений
ОЭГ, ХОР	Кадмий, 9—24	Детали, сопрягаемые с алюминием и коррозионно-стойкими сталями	Гальваническое осаждение с последующим хроматированием	Снижение контактной коррозии. Внутри помещений. В атмосфере и внутри помещений тропического климата
	Олово, 3—12	Резьбовые детали в контакте с алюминием и коррозионно-стойкими сталями	В щелочном электролите при плотности тока $J = 0{,}09 \div 0{,}1$ А/м и температуре 60—90 °С	Внутри помещений
	Никель, 6—12	Детали с точностью 3—7-го квалитета	В высокохлористом электролите типа Уоттса	То же
	Никель, 3—12	Резьбовые детали	То же	В атмосфере и внутри помещений
	Никель, 3—12	Пружины, мембраны	»	То же
	Кадмий, 6—12; олово, 9—12	Пружины	—	»

ОЭГ	*Никель + хром; общая толщина 3—6, 9—12*	*Детали высокой точности, резьбовые детали*	Никель в электролите типа Уоттса, хром в стандартном электролите CrO_3, H_2SO_4	Внутри помещений
	Никель, хром, 6—9, 21—24	Детали со свободными размерами	То же	Внутри помещений, во влажной атмосфере
	Золото, 1—2, 6—9, 12—15, 18—21	Ювелирные изделия, корпуса часов	В цианистых калиевых электролитах	В любых условиях
	Никель, 6, кадмий, 3; общая толщина 9—12	Детали, работающие при температурах до 300 °С	—	—
	Кадмий, 24—30	Детали машин и приборов	В цианистых электролитах	Влажная атмосфера, морские условия
	Хром, 30—33	Детали машин	В электролите CrO_3, H_2SO_4 при плотности тока 0,1 А/м и температуре 45—50 °С	Контакт с паром
ХОР	Никель, 9—15	Детали сложной формы	—	Внутри помещений и в условиях повышенной влажности
	Оксидное черное, до 2	Детали приборов, крепежные детали	Химическое оксидирование	Внутри помещений

114. Коррозионно-стойкие неметаллические покрытия [24, 33, 79, 82]

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ПЛ	Поливинилхлорид, 200—300	Листовая сталь шириной до 1 м, толщина $(0{,}5 \div 1{,}0) \times 10^{-3}$ м	Приклеивание поливинилхлоридной пленки на предварительную поверхность листа клеем ВИЛАД-6К	Устойчив в 50 %-ной H_2SO_4, 5—10 %-ной HNO_3 и HCl, 10 %-ной NaCl, в хромовом ангидриде, аммиаке, бензине. Теплостойкость +70 °С. Хладостойкость —40 °С
ДШ	Эмаль	Стальные трубы	Отжиг шликера скоростным печным нагревом	Устойчив в условиях атмосферной и подземной коррозии. Срок службы в 4—5 раз выше, чем труб из стали типа Х18Н10Т
—	Полиэтилен, 2050—5000	Стальные трубы диаметром до 1,5 м	—	Устойчив в агрессивных средах; хладостойкость до —80 °С. Недостаток — слабая адгезия к стали, возможно растрескивание при транспортировании газа и нефти под большим давлением
	Стеклоэмаль	Трубы горячего водосиабжения		*Увеличение срока службы теплопроводов в 5—6 раз. Подземные трубопроводы*

	Эпоксидные смолы ЭД-16, 70—20; титановый порошок	Стали, железобетон	Окрашивание поверхности слоем 0,8—1 мм с последующей полимеризацией в течение 12—16 ч	Увеличение срока службы в 5—6 раз. Строительные конструкции, емкости гальванических ванн
ДШ	Полиэфиры, винилы, эпоксидные смолы с наполнителем в виде стеклянных чешуек. Толщина покрытий до 3 мм	Стали	Окрашивание поверхности шликером с последующей сушкой или полимеризацией	Устойчивы в условиях химической и электрохимической коррозии. Нефтехимические производства, мостостроение
ПЛ	SiO_2 на растворной связке, 10—15	Электропроводящие материалы, материалы термоэлектрических датчиков	Отжиг при 850 °С, 30 с	Устойчивы в условиях электрохимической и газовой коррозии
	Al_2O_3 на растворной связке, 10—15		Отжиг при 800 °С, 30 с	
	Cr_2O_3 на растворной связке		Отжиг при 800 °С, 25 с	
	Виниловая пленка на клеевой основе, 100—250	Стальные и алюминиевые листы	Приклеивание пленки	Материал с покрытием характеризуется гибкостью при деформировании, допускает глубокую вытяжку
—	Эпоксидная смола с добавками отвердителя, пигментов наполнителя и других компонентов	Стальные трубы больших диаметров	Нанесение порошка на горячий металл с одновременным оплавлением	Устойчиво в условиях атмосферной и подземной коррозии, высокая механическая прочность

Продолжение табл. 114

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ПН	Эпоксидная смола	Стальные трубы диаметром 0,2—2 м	Одновременная намотка стальной ленты эпоксидной смолы и стеклоткани	Трубопроводы для питьевой воды, сточных вод, транспортирование газа и нефти под давлением
—	Покрытие на основе смолы PUR/TAR, 1500	Трубы	—	Высокая коррозионная стойкость, износостойкость, теплостойкость, эластичность, хорошая адгезия к металлу
ПН	Покрытие «Poliken»: слой грунтовки, противокоррозионная липкая лента, внешняя защитная пленка	Стальные трубы	—	Устойчив к химической и электрохимической коррозии и механическим повреждениям
ПЛ	Полиэтилен	Глубоководные основания мостов и морских причалов из коррозионно-стойкой стали	Приклеивание полиэтиленовой пленки с помощью модифицированных полиэтиленовых клеющих веществ	Срок службы в 4 раза выше, чем труб из коррозионностойкой стали

115. Жаростойкие покрытия [15, 32, 38, 39, 56, 60, 63, 72, 84]

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ДПО	Кремний, 110—120	Молибден	Силицирование в порошковой смеси (60 % Si + 35 % шамота + 3 % NH_4Cl) при температуре 1100 °С, 8 ч	Жаростойкость при 1700 °С, 50 ч
ДРМ	Кремний, 340	Молибден	Силицирование в расплаве медь — 16,5 % Si при температуре 1300 °С, 2 ч	Жаростойкость при 1600 °С, 250 ч
ДГП	Кремний и бор	Молибден с 0,5 % титана	1. Борирование в потоке трехфтористого бора с расходом газа 2 л/мин при 1100 °С, 1 ч 2. Силицирование в тетрахлориде кремния при 1100 °С, 6 ч	Жаростойкость при 1200 °С, 2942 ч
ДГЦ	Кремний, 120	Молибден М4	Силицирование циркуляционным методом в исходной среде ($SiCl_4 : H_2 = 1 : 1$, аргон, кристаллический кремний) при общем давлении 10^5 Па в течение 8—9 ч. Температура молибдена 1125 °С, кремния 1200 °С	Жаростойкость при 1300 °С, 220 ч

Продолжение табл. 115

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ДГЦ, ИХТО	Кремний, 100—120	Молибден М4	Силицирование циркуляционным методом в тлеющем разряде в среде $SiCl_4$, Si при давлении 200—260 Па в течение 2—2,5 ч. Температура молибдена 1300 °С, кремния 1100 °С	Жаростойкость при 1300 °С, 450 ч
ДРМ	Алюминий, кремний, хром 200—300	Сплав ВМ1	Диффузионное насыщение из расплава с температурой 830—850 °С в течение 8 мин	Жаростойкость при 1300 °С, 250 ч
ДПО	Кремний, 40	Вольфрам	Силицирование в порошковой смеси (кремний + + 10 % NaF + 5 % NH_4Cl) при 1065 °С, 8 ч	Жаростойкость при 1815 °С, 10 ч
ДПО	Кремний, титан, 38—76	Ниобий и его сплавы	Насыщение из порошковой смеси (67—75 % кремния и титана в отношении 1 : 1, 20—25 % Al_2O_3, 5—9 % AlF_3) в токе аргона при 930—1040 °С, 16 ч. Окислительный отжиг при 980 °С, 25 ч	Жаростойкость при 982 °С, 5000 ч
ДПО	*Кремний, бор, хром,* 50	С103 (Nb + 10 % Hf + Ti), Д31 (Nb + 10 % Ti)	Насыщение из порошковой смеси в две стадии: 1. силицирование в смеси (60 % Si, 6—10 % активатора, остальное Al_2O_3) при 1150 °С, 16 ч; 2. хромоборирование в смеси (30 % Cr, 30 % ферробора, 4 % активатора, остальное Al_2O_3) при 1200 °С, 16 ч	Жаростойкость при 1425 °С, 11,4—14,5 ч (при испытании образцы через каждый час охлаждали с 1425 °С и снова нагревали)
ДПО	Бор, кремний, 100	Ta + 30 % Nb + 7,5 % V	Насыщение из порошковой смеси в две стадии: 1. борирование с добавкой NaF при 1205 °С, 4 ч; 2. силицирование с добавкой NaF при 1315 °С, 6 ч	Жаростойкость при 1480 °С, 115 ч
ПНП	Al_2O_3 со стекловидной плейкой	Ниобий, тантал	Al_2O_3 наносится плазменным методом, затем наносится стекловидный шлак в воде и спекается при 1482 °С	Стойкость покрытия при 1370 °С 150 ч, высокая термостойкость
ДПО	Алюминий	Жаропрочные сплавы	Насыщение алюминием из смеси (98 % ферроалюминия + 2 % NH_4Cl). Размер гранул порошковой смеси 2—4 мм	Покрытие используется при температурах 850—1100 °С для лопаток газовых турбин
ДПО	Алюминий, хром, кремний	То же	Насыщение в смеси (45 % Al_2O_3 + 50 % (70 % Al + + 15 % Cr + 15 % Si)) + + 5 % NH_4Cl при 850 °С, 5 ч	Высокая жаростойкость и сопротивление сульфидной коррозии

Продолжение табл. 115

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ДПО	Алюминий, хром	Жаропрочные сплавы	Состав смеси для нанесения покрытия на внутреннюю поверхность лопаток: 45 % Cr, 10 % Al, 0,5 % NH_4Cl, остальное Al_2O_3. Смесь для внешней засыпки: 20 % Cr, 11 % Al, 14 % Si, 0,5 % NH_4Cl, остальное Al_2O_3. Покрытие наносится при 982 °С, 5 ч в среде водорода	Повышение жаростойкости внутренних и наружных поверхностей полых лопаток ГТД
ДШ	Алюминий, хром, р. з. м.	То же	Шликер состава (25—50 % Cr, остальное соединения алюминия с р. з. м.) на органической связке отжигается при 1100 °С, 2—3 ч в водороде	Повышение жаростойкости лопаток турбин путем улучшения сцепления оксидной пленки с покрытием
ДШ	Алюминий, хром, иттрий	То же	Состав шликера: 85—91 % Al, 8—10 % Cr, 1—5 % никельиттриевой лигатуры с 20 % иттрия	Лопатки турбин
ОЭГ	Платина, 7; алюминий. Общая толщина покрытия 50—70	То же	Платина наносится в электролите гексахлороплатиновой кислоты, фосфорнокислого аммония и динатрийфосфата. Алитирование в смеси (5 % Al + 95 % Al_2O_3) при 1100 °С, 2,5 ч в среде водорода	Высокая жаростойкость. Улучшение сцепления оксида с покрытием. Снижение напряжений в оксидной пленке. Лопатки турбин
ДШ	Алюминий, платина	То же	Состав шликера: 50 % Al, 50 % Pt. Отжиг в вакууме при 1200 °С, 0,5 ч	Большой расход платины
ВЭМ	Никель + 20—35 % Cr + 15—20 % Al + + 0,5—0,3 % Y, 120—150	То же	Покрытие наносят на спецоборудовании в вакууме $1{,}33 \cdot 10^{-2}$ Па при температуре деталей 950 ± 30 °С, 5—10 мин. Для устранения радиальных пор покрытие подвергается наклепу стеклянными шариками диаметром 200 мкм	Высокие жаростойкость и пластичность. Наличие пор и невысокая связь покрытия с подложкой
ВЭМ	Кобальт + 26—32 % Cr + 3—9 % Al + 0—1 % Y	То же	То же	Повышенная термостойкость покрытий. Лопатки турбин
ВЭМ	Никель + 26÷35 % Co + 14÷22 % Cr + + 10÷13 % Al + + 0,01÷1,0 Y	То же	»	Стойкость к сульфидной коррозии в 2—2,5 раза выше алюминидных покрытий из порошков. Лопатки турбин
КИБ	Кобальт — хром — алюминий — иттрий	То же	Катодное распыление ионами аргона материала покрытия в вакууме $1{,}3 \cdot 10^{-1}$ Па с последующим осаждением его на подложку	Отличное сцепление с подложкой. Отсутствие пор в покрытии

Продолжение табл. 115

Способ получения покрытия	Материал, толщина покрытия, мкм	Защищаемый материал	Условия и режимы получения покрытий	Защитные свойства и рекомендуемое применение покрытий
ПНП в вакууме	Кобальт + 29 % Cr + + 6 % Al + 1 % Y, 127—178	Жаропрочный сплав IN — 738	Напыление в потоке аргона и гелия порошком сплава с размером частиц 37 мкм; закалка в вакууме при 1121 °С, 2 ч и старение в аргоне при 843 °С, 24 ч	При температуре 871 °С стойкость в 5 раз выше, чем у незащищенного сплава
ДШ, ДПО	Кобальт — хром — алюминий — никель — иттрий	Жаропрочный сплав Реиэ 125	Нанесение шликера (55 % Co, 20 % Ni, 25 % Cr, 0,5 % Y) с отжигом в порошковой смеси для алитирования. Покрытие содержит 15—17 % Al	Защитные покрытия аналогичны электроиио-лучевому покрытию подобного состава
ВЭМ	Никель + 18 % Cr + + 12 % Al + 0,3 % Y, 123	Жаропрочный эвтектический сплав: никель + + 19,7 % Nb + 6 % Cr + + 2,5 % Al		Стойкость к газовой коррозии при циклической смене температуры 1000 ч при 1093°С
ДРМ	Алюминий — хром — кремний	Молибден ВМ1	Покрытие наносится в расплаве Al—Cr—Si—Mo при 830—850 °С, 8 мин	Жаростойкость при 1350 °С, 250 ч; при 1500 °С, 30 ч
ДПО	Алюминий — хром — кремний, 50	Ниобиевые сплавы: 1. Nb + 1 % Zr 2. Nb + 10 % Hf + 1 % Ti 3. Nb + 10 % Mo + 10 % Ti	Диффузионное насыщение в две стадии: силицирование в смеси (60 % Si, 6—10 % активатора, Al_2O_3 остальное) при 1150 °С, 16 ч; хромоалитирование в смеси (35 % Cr, 20 % Al, 4 % активатора, Al_2O_3 остальное) при 1260 °С, 16 ч	При термоциклировании по режиму: 1425 ⇄ 25 °С, стойкость покрытий на сплавах: 1. 8,8 ч 2. 9,0 ч 3. 10,9 ч

ДПО	*Алюминий — кремний*	Медные сплавы	Насыщение при 600—800 °С, 2—6 ч в смеси 50 % (40—60 % Al + (60—40 %) Si) + + 48 % Al_2O_3 + 2 % NH_4Cl	При 900 °С жаростойкость в 4 раза выше, чем алитированных
ДГП, ДПО	Алюминий — хром	Медь	Алитирование прямоточным методом при 950 °С, 2 ч в среде $AlCl_3$; хромирование при 1000 °С, 8 ч в порошковой смеси (50 % Cr + 43 % Al_2O_3 + 7 % NH_4Cl)	Повышение стойкости сопла плазмотрона в 2—4 раза
ДПО	Алюминий, 70—210	ХН35Т, ХН10К, Х16Н25М6	Алитирование при 1050 °С, 6—8 ч в смеси (99 % FeAl + + 1 % NH_4Cl); старение при 750—800 °С, 6—10 ч	Детали энергетического оборудования
ДПО	Хром — борид циркония ZrB_2	Таитал	—	При 2100 °С стойкость 6—20 мин
ДПО	Двухслойное: первый слой — хром или CrAl; второй слой — кремний или SiCr	Молибден	—	При 1600 °С стойкость 3—5 ч
ДКС	Кремний	Ниобиевый сплав FS—82	Насыщение деталей в среде йода и порошка кремния при 1040 °С, 3 ч в герметичной реторте	При 1500 °С стойкость покрытия 3 ч

ний, которые значительно ускоряют процесс диффузионного насыщения вследствие образования субгалогенидов диффундирующего элемента.

ДРМ. Диффузионное насыщение из легированных металлических расплавов. Протравленные и промытые изделия после небольшой выдержки в слое флюса погружают на некоторое время в расплав. После охлаждения на воздухе для ответственных изделий проводят диффузионный отжиг при 950—1000 °С.

ДРС. Диффузионное насыщение из расплавов солей. В расплав, состоящий из смеси солей хлористого бария и натрия, добавляют диффундирующий элемент и его галогениды. Во время изотермической выдержки деталей при 1000—1200 °С происходит диффузионное насыщение (например, хромирование).

ДШ. Диффузионное насыщение из суспензий (шликерный способ) заключается в том, что суспензию наносят окраской, окунанием или пульверизацией на хорошо очищенные поверхности деталей, а после сушки на воздухе отжигают в вакууме, аргоне или в воздушной атмосфере. Температура и время отжига в печах определяют толщину диффузионного покрытия. Суспензию приготовляют из тонких порошков диффундирующих элементов и органического (жидкого) связующего.

ДЭП. Диффузионное насыщение из паст отличается от шликерного способа высокой производительностью вследствие скоростного электронагрева ТВЧ поверхности обрабатываемой детали, на которую нанесен слой пасты. Пасту приготовляют из тонких порошков диффундирующего элемента, флюса (например, криолит) и связующего (например, гидролизированный этилсиликат). В состав различных паст входят, как правило, галоидные соединения, которые активизируют диффузионное насыщение.

ДЭС. Электролизный способ диффузионного насыщения из расплавов солей основан на пропускании постоянного тока через расплав соли. Обрабатываемая деталь является катодом, а графитовый электрод или тигель печи — анодом. В результате протекающих в ванне электролизных процессов диффузионное насыщение интенсифицируется. Наиболее разработанным является способ электролизного борирования в расплаве буры.

ИЛ. Ионное легирование (имплантация) поверхности становится возможным при больших энергиях бомбардирующих ионов. Ускорители, дающие пучки ионов бора с энергией в несколько сот килоэлектронвольт, позволяют получить глубину имплантации в кремний всего 1 мкм. Для более тяжелых ионов и больших глубин имплантации требуются более мощные ускорители. Можно «вбивать» атомы любого элемента в любой материал.

ИХТО. Ионная химико-термическая обработка — прогрессивный способ азотирования, цементации, нитроцементации, силицирования, алитирования и т. д. в ионизированных газовых средах. В специальных установках все поверхности обрабатываемых деталей (катодов) бомбардируются ионами диффундирующих элементов в плазме тлеющего разряда, в результате чего происходит очистка, разогрев и диффузионное насыщение деталей. Для высокотемпературных процессов (цементация, силицирование и др.) вводится дополнительный радиационный нагрев деталей. В результате автоматизированного управления процессом получаются диффузионные покрытия высокого качества.

КИБ. Конденсация покрытия при ионной бомбардировке осуществляется в специальных установках («Булат», «Пуск» и др.). После ионной очистки обрабатываемой поверхности (катода) распыленные электродугой частицы металла соединяются с подаваемым в установку газом (например, азотом) и осаждаются на изделие (например, в виде нитрида титана).

КЭП. Композиционные электролитические покрытия отличаются от обычных гальванических тем, что содержат мелкие твердые частицы (до 100 мкм), придающие покрытию износостойкие или антифрикционные свойства. В электролит вводят карбиды, нитриды, бориды, оксиды, сульфиды и другие частицы в зависимости от назначения покрытия.

ЛПЛ. Лазерное поверхностное легирование позволяет осуществлять локальную химико-термическую обработку при скоростном нагреве поверхности лазерным лучом. Диффундирующий элемент в виде порошка, составляющей пасты или гальванического покрытия наносится на обрабатываемую поверхность детали или поступает из окружающей ее газовой среды.

ОЭГ. Электролитическое осаждение металлов (гальваническое покрытие). Перед нанесением гальванического покрытия поверхность детали необходимо тщательно очистить (обезжирить и протравить). Плотность тока на поверхности катода (детали), температура и состав электролита обеспечивают заданное качество покрытия. Гальваническим способом можно осаждать не только металлы, но и сплавы.

ПЛ. Плакирование листами металла. Осуществляется на прокатных станах при соответствующей подготовке плакируемой поверхности. Полимерные листы приклеивают к защищаемой стальной поверхности.

ПН. Плакирование намоткой. Производится на специальных станках. Используется металлическая или полимерная лента.

ПНП. Плазменное напыление покрытий. Этот способ отличается большой производительностью и универсальностью, так как в плазменную высокотемпературную струю аргона, направленную на обрабатываемую поверхность изделия, можно вводить смеси порошков любых тугоплавких материалов. Однако и плазменные покрытия имеют значительную пористость (около 10 %).

СД. Детонационный способ позволяет получить беспористые покрытия на наружных поверхностях изделий. Обрабатываемую поверхность обстреливают горячими частицами (около 3000 °С) материала покрытия. В стволе специальной установки периодически взрывается смесь ацетилена с кислородом.

ХОГ. Химическое осаждение из газовых смесей осуществляется в реакторах при 700—1000 °С, куда загружаются обрабатываемые детали. Через реактор с определенной скоростью продувается газовая смесь, которая, например, при осаждении нитрида титана может состоять из тетрахлорида титана, водорода и азота, а при осаждении оксида алюминия — из треххлористого алюминия, углекислого газа и водорода. Этим способом получают многослойные по-

крытия на твердых сплавах, состоящие, например, из слоев оксида алюминия, нитрида титана и карбида титана.

ХОР. Химическое осаждение из растворов. Основано на выделении металлов из солей химическими восстановителями. Например, никелирование осуществляется в результате взаимодействия хлористого никеля с гипофосфитом.

ЭПЛ. Электроискровое поверхностное легирование основано на электрофизическом переносе материала анода на катод — деталь. Слои покрытия формируются в короткое время при больших скоростях нагрева и охлаждения из жидкой и паровой фазы с вкраплениями твердых частиц при взаимодействии с кислородом и азотом воздуха. На обкладках конденсатора установки вначале накапливается электрическая энергия, которая затем мгновенно освобождается между вибрирующим анодом и деталью.

8. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ

Криогенная техника используется в металлургии, химической промышленности, ракетной и авиационной технике, приборостроении, криобиологии, криомедицине и т. д.

Криогенная техника по функциональному назначению связана с получением сжиженных газов (кислорода, азота, водорода, гелия, инертных, а также природных на основе органических соединений), их транспортированием и хранением в сжиженном состоянии или использованием в качестве рабочих тел.

Ниже указаны температуры кипения сжиженных газов при нормальном давлении, которые одновременно указывают на температурные области применения конструкционных материалов в криогенной технике.

Газ	Метан	Кислород	Аргон	Фтор
$t_{кип}$, °С	—161	—183	—185	—188
Газ	Азот	Неон	Водород	Гелий
$t_{кип}$, °С	—196	—246	—253	—269

Основными требованиями к сталям и сплавам, работающим при низких температурах, являются следующие:

малая чувствительность к хрупкому разрушению при низких температурах, определяемая запасом пластичности и вязкости;

высокая прочность при 20 °С, которая определяет надежность и металлоемкость конструкций, а также количество хладагента, требуемого для их захолаживания;

технологичность при металлургическом и машиностроительном переделе.

При решении вопроса о пригодности материала по механическим свойствам обычно определяют предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение и сужение на гладких образцах и образцах с концентратором напряжений в виде надреза или трещины, ударную вязкость, порог хладноломкости, критерии Ирвина K_{1c} и G_{1c}, критическое раскрытие трещины.

В зависимости от назначения к стали и сплаву могут предъявляться требования по коррозионной стойкости, магнитности или немагнитности, значению коэффициента линейного расширения, теплопроводности, вакуумплотности и т. д.

В криогенной технике широко используются стали различных классов, сплавы на основе алюминия, меди, реже титана.

Стали. Среди сталей аустенитного класса наибольшее распространение нашли стали типа 18-10 (химический состав по ГОСТ 5632—72) (08Х18Н9Т, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 03Х18Н11, 12Х18Н9). На рис. 25 показаны механические свойства этой группы материалов при 20, —196 и —253 °С в зависимости от содержания никеля. Изменения механических свойств отражают влияние никеля на структуру стали в диапазоне от 20 до —253 °С; это влияние выражается

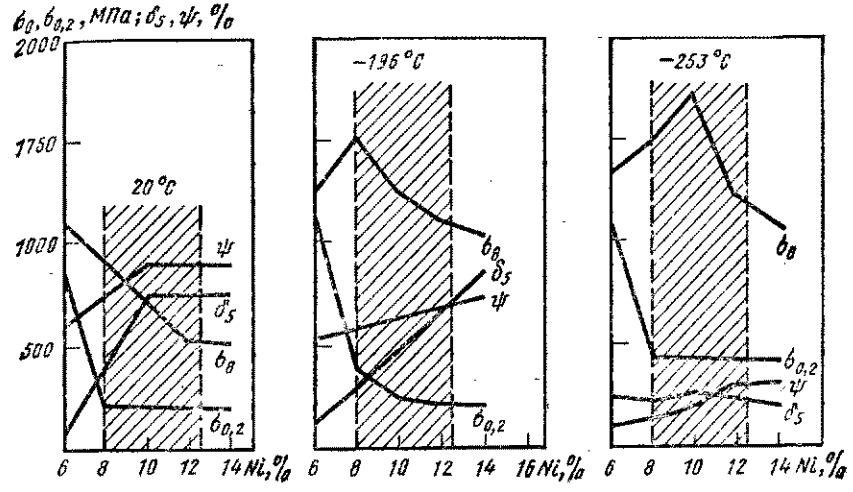


Рис. 25. Механические свойства стали с 0,03 % С и 18 % Cr и различным содержанием никеля при 20, —196 и —253 °С; термическая обработка — закалка с 1050 °С в воду; заштрихованные области — возможное содержание никеля в сталях типа 18—10 [71]

в стабилизации аустенита относительно ($\gamma \rightarrow \delta$)-превращения при нагреве под закалку, а также относительно мартенситного превращения при охлаждении и пластической деформации.

Стали 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 03Х18Н11 используют для создания широкой номенклатуры изделий, работающих при температуре от 800 до —269 °С, изготовляемых методами горячей и холодной пластической деформации с использованием различных видов сварки и пайки. Термическую обработку сварных и паяных соединений, как правило, не применяют.

Сталь 12Х18Н9 используют для изготовления упругочувствительных элементов, работающих при криогенных температурах (пружины, мембраны, сильфоны и т. д.); эта сталь хорошо шлифуется и полируется; однако сварные и паяные соединения из этой стали почти всегда требуют термической обработки во избежание снижения пластичности и охрупчивания при криогенных температурах. Механические свойства, типичные для наиболее распространенной стали 12Х18Н10Т, приведены в табл. 116 и 117.

Сталь 07Х21Н5АГ7 (ЭП 222) (химический состав по ГОСТ 5632—72) предназначена для изготовления сварных и несварных изделий, работающих при температуре от 400 до —253 °С. Типичные изделия: подвески в кислородных установках, крепеж, цепи, шпиндели, тонкостенные сварные и паяные конструкции, изготовляемые методами горячей и холодной деформации.

По сравнению со сталями типа 18-10 сталь 07Х21Н5АГ7 обладает более высокой прочностью.

После закалки от 1000—1050 °С сталь имеет аустенитную структуру с 5—15 % δ-феррита; при нагреве до 600—800 °С в аустените преимущественно по границам зерен выделяется карбидная фаза типа $Cr_{23}C_6$; присутствие карбидной сетки оказывает отрицательное влияние на ударную вязкость, особенно при низких температурах. В связи с этим изделия, которые подверглись в процессе технологических операций нагреву в интервале 600—800 °С, должны подвергаться термической обработке, состоящей в закалке с 1000—1050 °С в воду.

116. Механические свойства прутковой стали 12Х18Н10Т при температуре от 20 до —269° С [71]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_в^н$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	*KCU*	*KCT*
	МПа			%		МДж/м²	
20	647	832	268	75	84	3,6	2,8
—70	1005	1335	315	53	79	3,5	2,7
—100	1077	1502	322	50	77	3,2	2,2
—196	1467	2067	402	46	71	3,0	1,7
—253	1850	2095	490	40	63	2,8	1,3
—269	1871	2097	495	41	57	—	—

Примечание. $\sigma_в^н$ — образец с надрезом.

117. Механические свойства тонколистовой стали 12Х18Н10Т [71]

Обработка	$t_{исп}$, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5, %	*KCU*	*KC*
		МПа			МДж/м²	
Закалка с 1100 °С на воздухе	20	650	260	46	2,1	0,9
	—196	1470	470	37	2,5	0,7
	—253	1520	540	26	2,3	0,6
Нагартовка прокаткой на 60 % при 20 °С	20	1330	1200	10	0,5	0,2
	—196	1770	1530	32	0,6	0,2
	—253	1840	1630	24	0,8	0,2

118. Механические свойства стали 07Х21Н5АГ7 при температуре от 20 до —253° С [71]

t, °С	$E\times10^{-4}$	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в^н$	δ	ψ	*KCU*	*KCV*	*KCT*
		МПа			%		МДж/м²		
20	20,7	760	420	630	59	60	1,50	1,40	1,20
—70	20,9	880	635	805	52	55	—	—	—
—196	21,6	1300	1000	1140	48	34	1,4	1,2	0,9
—253	22,1	1530	1240	800	12	10	1,20	0,95	0,80

Механические свойства стали 07Х21Н5АГ7 представлены в табл. 118 и 119.

Сталь 07Х21Н5АГ7 технологична при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом с присадкой и без присадки, плавящимся электродом в среде гелия высокой чистоты, при автоматической сварке под флюсом АН-26. В качестве присадочного материала применяют проволоку марок Св-10Х16Н25АМ6 и Св-08Х15Н23В7Г7М2; сталь удовлетворительно сваривается со сталями 12Х18Н10Т, 12Х21Н5Т, 07Х16Н6 и др.

119. Влияние холодной пластической деформации на механические свойства стали 07Х21Н5АГ7 [71]

Степень обжатия, %	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5, %	Степень обжатия, %	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5, %
	МПа				МПа		
0	766	463	59	40	1250	1180	12
10	830	675	42	60	1365	1299	7
20	1104	1104	20				

Сталь 03Х20Н16АГ6 предназначена для изготовления сварных крупногабаритных емкостей и резервуаров, находящихся длительное время под давлением при периодической смене температур от 20 до —269 °С; допускается применение стали при температуре от 600 до —259 °С без ограничения давления.

Химический состав следующий (мас. доли, %): C ⩽ 0,025; Si ⩽ 0,6; Mn 6—7,5; Cr 20—25; Ni 15—16,5; N 0,15—0,28; S ⩽ 0,02; P ⩽ 0,025.

Для стали 03Х20Н16АГ6 характерна стабильно аустенитная структура во всем диапазоне температур: от нагрева под горячую пластическую обработку до температуры сжиженного гелия (—269 °С). Пластическая деформация при 20 °С и криогенных температурах также не вызывает фазовых превращений мартенситного типа. По указанным причинам сталь остается немагнитной.

Единственной фазовой реакцией, протекающей в стали, является выделение карбидной и нитридной фаз ($Cr_{23}C_6$ и CrN) при нагреве в интервале 600—850 °С; первые выделения этих фаз по границам зерен обнаруживаются после выдержки 1 ч, что приводит к снижению ударной вязкости при криогенных температурах. Легирование стали азотом и наличие стабильного аустенита дает возможность получить одновременно достаточно высокую для аустенитной стали прочность при 20 °С и высокий запас пластичности и вязкости при низких температурах (табл. 120 и 121).

Сталь 03Х20Н16АГ6 сваривается ручной дуговой сваркой, ручной и автоматической аргонодуговой, автоматической сваркой под флюсом. Стойкость стали к образованию трещин удовлетворительная.

Сталь 07Х16Н6 (*ЭП 288*) аустенитно-мартенситного класса (химический состав по ГОСТ 5632—72) применяется для изготовления нагруженных деталей, работающих от 20 до —253 °С,

120. Механические свойства стали 03Х20Н16АГ6 при температурах от 20 до —269° С (термическая обработка: закалка с 1000° С в воду) [71]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в^н$	$\sigma_в^{тр}$	$\sigma_в^{тр}/\sigma_в$	δ_5	ψ	*KCU*	*KCV*	*KCT*
	МПа					%		МДж/м²		
20	780	410	1280	670	0,86	52	75	2,20	1,60	1,40
—196	1550	900	2000	1250	0,81	48	44	1,20	1,00	1,00
—253	1930	1360	2700	1290	0,67	31	27	1,0	0,9	0,8
—269	1500	1000	—	—	—	25	21	0,80	—	—

121. Влияние холодной пластической деформации на механические свойства стали 03Х20Н16АГ6 (термическая обработка: закалка с 1000° С в воду) [71]

Степень обжатия, %	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5, %
	МПа		
0	675	370	52
10	780	590	38
20	880	820	18
40	1060	950	8
60	1200	1160	5

При кратковременной выдержке максимальная температура эксплуатации стали 500 °С, а при длительной выдержке 400 °С.

После нагрева до 1000 °С и охлаждения в воде или на воздухе до 20 °С структура стали состоит из 10—50 % мартенсита (остальное аустенит). Охлаждение предварительно нормализованной или закаленной стали до —70 °С в течение 2 ч повышает содержание мартенситной составляющей до 70—80 %; охлаждение до более низких температур, например до —196 °С, к дополнительному превращению не приводит; обратное превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ начинается в стали примерно при 500 °С.

В интервале 600—800 °С по границам аустенитных зерен выделяются карбиды хрома ($Cr_{23}C_6$); карбидная реакция может начаться уже при медленном охлаждении в данном интервале температур, тем более при изотермической выдержке. Образование карбидной сетки приводит к снижению пластичности и ударной вязкости при криогенных температурах.

Механические свойства стали 07Х16Н6 приведены в табл. 122.

Сталь 07Х16Н6 обладает хорошей технологичностью при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом без присадки и с присадкой, плавящимся электродом в среде гелия и смеси аргона с 15—20 % углекислого газа. Для выполнения сварных соединений, подвергаемых упрочняющей термической обработке, в качестве присадочного материала применяют сварочную проволоку 07Х16Н6; при этом минимальная температура эксплуатации сварных соединений —253 °С.

122. Механические свойства стали 07Х16Н6 при низких температурах [71]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в^н$	$\sigma_в^{тр}$	K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$	$\sigma_в^{тр}/\sigma_в$	δ_5	ψ	$\psi^н$	KCU	KCV	KCT
	МПа						%			МДж/м^2		

Прутки диаметром 15 мм; термическая обработка: закалка с 980 °С, воздух, обработка холодом при —70 °С, 2 ч, отпуск при 250 °С, 1 ч, воздух

20	1230	1040	2100	1240	105	1,0	21	67	30	1,30	1,00	0,85
—70	1340	1150	2350	1230	138	0,92	20	68	35	1,10	0,84	0,64
—100	1420	1230	2440	1280	—	0,90	25	68	28	0,96	0,80	0,60
—196	1690	1490	2890	1500	126	0,89	23	66	27	0,80	0,60	0,35
—253	1920	1760	3000	920	130	0,50	12	50	8	0,70	0,50	0,25

Прутки диаметром 16 мм; термическая обработка: закалка с 1000 °С, вода, обработка холодом при —70 °С, 3 ч, отпуск при 410 °С, 1 ч

20	1270	1100	2080	—	—	—	10	67	—	—	—	—
—196	1730	1480	2740	—	—	—	17	58	—	—	—	—
—253	2060	1830	2190	—	—	—	15	51	—	—	—	—

123. Механические свойства стали 0Н9 при низких температурах [71]

t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	KCU, МДж/м^2	B *1, %
	МПа		%			
Режим 1						
20	720	520	28	82	2,53	100
—196	1100	820	26	65	1,29	90
Режим 2						
20	600	450	27	79	1,96	100
—196	900	800	22	62	0,98	70

*1 B — доля волокна в изломе ударного образца.

Сталь 0Н9 [химический состав (мас. доли, %): С ≤ 0,10; Mn 0,3—0,60; Si 0,15—0,35; Ni 8,5—10,0; S ≤ 0,15; P ≤ 0,02] широко применяется за рубежом и в меньшей степени у нас; она предназначена для изготовления крупногабаритных и других сварных резервуаров, используемых для хранения и транспортирования сжиженных газов с температурой кипения не ниже —196 °С.

После нормализации с температуры Ac_3 + 30 °С сталь имеет структуру мартенсита с 10—15 % аустенита.

Термическая обработка стали 0Н9 может осуществляться по двум режимам:

1. Двойная нормализация с 900 и 790 °С, высокий отпуск при 550—600 °С.

2. Закалка с 810—830 °С в воду, высокий отпуск при 550—600 °С.

Механические свойства стали 0Н9 приведены в табл. 123.

Смягчающей термической обработкой для стали 0Н9 является длительный отпуск при 500—550 °С.

Сварку листов или других полуфабрикатов, прошедших окончательную термическую обработку, ведут с присадочным материалом из аустенитной стали.

Сплав 36НХ относится к типу инварных, т. е. имеет малоизменяющийся и низкий температурный коэффициент линейного расширения (рис. 26). Сплав применяют в сварных конструкциях, работающих в условиях циклической смены температур от 20 до —253 °С, например, для изготовления бескомпенсационных криотрубопроводов. Химический состав сплава следующий (мас. доля, %): С ≤ 0,05; Si ≤ 0,3; Mn 0,3—0,6; Ni 35,0—37,0; Cr 0,4—0,6; Cu 0,25; S 0,02; Fe — остальное. В закаленном состоянии (800—1000 °С) сплав имеет структуру γ-твердого раствора, которая устойчива против мартенситного превращения при длительном нагружении при температурах до —253 °С.

Для максимальной стабилизации коэффициента рекомендуется следующий режим: закалка с 840—850 °С; отпуск для снятия внутренних напряжений при 310—330 °С, 1 ч, воздух; стабилизирующий отпуск при 100 °С, 48 ч, воздух.

Хранение изделий на открытом воздухе допускается только в упакованном виде с применением ингибиторов.

Механические и физические свойства сплава 36НХ приведены в табл. 124 и 125.

Сплав 36НХ толщиной до 4 мм сваривается аргонодуговой сваркой проволокой 36НГТ и 36НГ6 и неплавя-

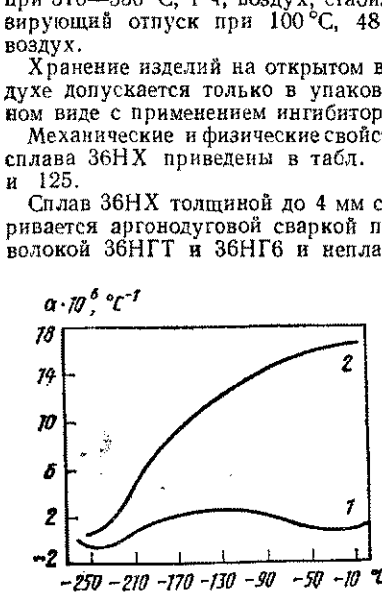


Рис. 26. Температурная зависимость коэффициента теплового линейного расширения сплава 36НХ (*1*) и стали 12Х18Н10Т (*2*) [71]

124. Влияние режима термической обработки на механические свойства сплава 36НХ [71]

Термическая обработка	t, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
Закалка с 950 °С, 5 мин, вода	20	428	257	50,0	80	2,82
	—196	843	571	42,6	72,6	2,04
	—253	987	705	62,9	67,0	1,69
Закалка с 950 °С, 5 мин, воздух	20	447	272	44,0	80,9	3,00
	—196	830	572	42,9	72,9	1,91
	—253	976	703	62,4	67,0	1,63
Закалка с 830 °С, 5 мин, воздух	—196	846	584	40,8	76,4	1,70
Закалка с 830 °С, 5 мин, воздух + + 315 °С, 1 ч	—196	865	585	41,4	76,8	—
Закалка с 950 °С, 5 мин, воздух + + 315 °С, 1 ч	—196	857	599	39,6	76,9	1,84
Закалка с 1000 °С, 5 мин, вода	—196	821	574	36,2	71,9	1,85
Закалка с 1090 °С, 5 мин, вода + + 760 °С, 5 мин, вода	—196	770	566	40,4	72,4	2,02

125. Температурный коэффициент линейного расширения ($\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$) сплава 36НХ после различных режимов термической обработки [71]

Термическая обработка	$\alpha_{min\,1}$	$\alpha_{min\,2}$	α_{max}	α	$\alpha_{ср}$
Холодная прокатка с обжатием 63 %	—2,3	0,4	1,45	0,6	0,5
Закалка с 850 °С, 3 мин, вода	—	0,7	1,68	0,9	0,7
То же + отпуск при 315 °С, 12 мин	—	0,95	1,92	1,1	0,9
Закалка с 950 °С, 3 мин, воздух	—	1,3	2,1	1,5	1,4
Отжиг при 950 °С	—1,9	1,55	2,22	1,8	1,6
Отжиг при 600 °С, 5 ч, охлаждение до 100 °С, 90 ч	—1,8	2,26	2,68	2,46	1,8

Примечание. $\alpha_{min\,1}$ — минимальный коэффициент линейного расширения в интервале —248÷—240 °С; $\alpha_{min\,2}$ — минимальный коэффициент линейного расширения в интервале —23÷—3 °С; α_{max} — максимальный коэффициент линейного расширения в интервале —153÷—123 °С; α — коэффициент линейного расширения при 20 °С; $\alpha_{ср}$ — средний коэффициент линейного расширения в интервале —253÷+20 °С.

щимися электродами. Сварные соединения не требуют термической обработки.

Алюминий и его сплавы. В металлоконструкциях криогенной техники доля алюминия и его сплавов составляет примерно 30 % общего объема используемого металла.

Для алюминия характерно отсутствие порога хладноломкости, сохранение высокой пластичности с понижением температуры (а иногда даже ее повышение), малая зависимость прочности от температуры ниже нуля, коррозионная стойкость на воздухе и в окислительных средах, высокая тепло- и электропроводность. Эти свойства алюминия в той или иной степени наследуются его сплавами; это и оправдывает их широкое распространение в криогенной технике.

В табл. 126 приведены механические свойства отожженного алюминия АД1 (1013) (химический состав по ГОСТ 4784—74). Термическая обработка технического алюминия заключается в отжиге при 350—400 °С с охлаждением на воздухе.

Технический алюминий хорошо сваривается газовой, аргонодуговой, контактной сваркой.

Технический алюминий используют во всем диапазоне температур ниже 150 °С для труб теплообменных аппаратов и других малонагруженных деталей и узлов. Среди деформируемых сплавов алюминия в криогенной технике наибольшее распространение получили сплавы системы Al—Mg — магналии (АМг5, АМг6 и др.), а также сплавы на основе более сложных систем легирования: с добавками меди, магния, марганца и др. (АВ, Д16, 1201, АК6 и др.).

В криогенной технике применяют также литейные алюминиевые сплавы, главным образом силумины, легированные 6—13 % Si. Ниже приведена характеристика наиболее употребляемых сплавов алюминия.

Сплав АМг5 (химический состав по ГОСТ 4784—74) применяют для нагруженных деталей, в том числе сварных: обечаек, днищ, фланцев, трубных решеток и других металлоизделий, работающих при температуре —253÷—150 °С.

126. Механические свойства отожженного алюминия АД1 [57]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
20	70	30	36	89	0,9
—196	160	40	50	60	1,6
—253	250	50	40	50	2,0

Термическая обработка сплава: отжиг при 305—340 °С, охлажденне на воздухе. После такой обработки сплав имеет механические свойства, указанные в табл. 127.

Чаще всего для изготовления сварных металлоизделий применяют аргонодуговую сварку.

Сплав Д16 (химический состав по ГОСТ 4784—74) обладает высокой прочностью; однако при этом он имеет пониженную стойкость против равномерной и межкристаллитной коррозии, а также коррозии под напряжением.

В криогенной технике сплав Д16 применяют для нагруженных несвариваемых деталей (крепежа, фланцев и т. д.), работающих в интервале температур —253÷230 °С. Промежуточная термическая обработка сплава Д16 состоит в отжиге при 380—430 °С с охлаждением до 275—250 °С со скоростью не более 30°/ч, далее на воздухе.

Окончательная термическая обработка состоит в закалке с температуры

127. Механические свойства сплава АМг5 при низких температурах [57]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
20	300	130	23	42	0,40
—183	390	150	40	39	0,30
—196	420	160	44	37	0,30
—253	520	170	33	28	0,30

128. Механические свойства сплава Д16 при низких температурах (термическая обработка: закалка + + естественное старение) [57]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5, %
20	470	300	19
—73	490	300	22
—196	560	380	27
—253	660	450	16

129. Механические свойства сплава 1201 при низких температурах [термическая обработка (лист): закалка, правка листа с деформацией 1—3 %, искусственное старение при 180 °С, 18 ч] [57]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в^н$, МПа	δ, %	$\sigma_в^н/\sigma_в$
20	440	350	550	8	1,25
—196	550	400	650	10	1,18
—253	650	470	710	12	1,11

130. Механические свойства отожженной меди М3 при низких температурах [57]

t, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
20	200	60	45	85	1,70
—183	300	80	50	84	2,10
—196	330	80	52	83	2,10
—253	470	130	58	74	2,10

500 °С в воду и естественного старения при 20 °С в течение 90—100 ч (табл. 128); нагартованные листы после холодной прокатки непосредственно подвергают искусственному старению при температуре 130 °С в течение 20 ч.

Сплав 1201 [химический состав (мас. доли, %): Cu 5,8—6,8; Mn 0,2—0,4; Zr 0,10—0,25; V 0,05—0,15; Ti 0,02—0,10] принадлежит к упрочняемым свариваемым сплавам алюминия. Сплав 1201 применяют для изготовления сварных металлоизделий: обечаек, днищ, фланцев и т. д., работающих в интервале температур —253÷200 °С (в случае кратковременного нагружения до 300 °С).

Смягчающей термической обработкой сплава является отжиг при температуре 350—370 °С в течение 2—4 ч с охлаждением на воздухе.

Упрочняющая термическая обработка состоит в закалке с температуры 540 °С в воду с последующим искусственным старением при 150—190 °С, 18 ч (табл. 129).

Сплав 1201 сваривают аргонодуговым, гелиево-дуговым, электронно-лучевым, шовным и точечным способами.

Медь и ее сплавы являются материалами, которые одними из первых стали применяться в криогенной технике. Для меди характерна высокая пластичность и вязкость до температур, близких к абсолютному нулю; при испытаниях в области криогенных температур медь не показывает даже признаков хрупкого разрушения; чистая медь имеет высокую теплопроводность и коррозионную стойкость в атмосферных условиях и многих агрессивных средах.

Техническая медь М1, М2, М3 (химический состав по ГОСТ 859—78) применяется для изготовления металлоизделий криогенной техники, работающих при температурах от абсолютного нуля до 250 °С, в том числе днищ, обечаек трубчатых теплообменников. Листовую медь используют для внутренних емкостей и экранов сосудов Дьюара для хранения и транспортирования сжиженных газов.

В табл. 130 представлены механические свойства технической меди при низких температурах.

Техническая медь применяется в отожженном (мягком) состоянии (температура отжига составляет 500—700 °С), а также после холодной нагартовки.

Основной вид соединений — пайка на мягких (типа ПОС) и твердых (типа

131. Механические свойства латуни Л63 при низких температурах (пруток диаметром 10—12 мм) [57]

Термическая обработка	t, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
Без термообработки	25	430	220	25	68	—
	—196	570	300	32	61	—
	—269	670	380	36	66	—
Отжиг	20	360	135	55	62	1,20
	—104	410	152	72	67	1,30
	—196	510	183	79	66	1,50

ПСр) припоях. Можно получать и сварные соединения, что, однако, связано с рядом трудностей. В криогенной технике применяют ручную сварку плавящимся электродом (например, «Комсомолец-100»); применяется сварка под слоем флюса и в защитных газах. При толщине сечения изделия более 10 мм сварку проводят с подогревом.

Латунь Л63 (химический состав по ГОСТ 15527—70) применяется в криогенной технике при температурах —253÷250 °С в мягком и полутвердом состоянии (обечайки, днища, фланцы и др.). После холодной деформации латунь Л63 подвергают отжигу при 600—700 °С; для снятия внутренних напряжений применяют отжиг при 270—285 °С.

Механические свойства этой латуни приведены в табл. 131.

Сплав имеет удовлетворительную свариваемость; применяют автоматическую сварку с присадочным материалом из бронзы БрОЦ4—3 и флюсом АН-20. При сварке деталей сложной конфигурации или толщиной более 10 мм необходим предварительный нагрев.

Латунь Л63 проявляет хорошую технологичность при пайке оловянисто-свинцовыми припоями (ПОС 40) и свинцово-серебряными типа ПСр1,5.

Бронза БрАЖМц 10—3—1,5 относится к деформируемым и литейным материалам на основе системы медь—алюминий (10 %) — железо (3 %) — марганец (1,5 %) (химический состав по ГОСТ 18175—78). Сплав используют для изготовления деталей, работающих при —196÷150 °С в условиях статической и циклической нагрузок, когда требуется малый коэффициент трения (шестерни, втулки, арматура, фасонное литье и т. д.).

В деформированном состоянии сплав применяется непосредственно после горячей пластической деформации и после закалки с отпуском (табл. 132).

Смягчающей термической обработкой для сплава БрАЖМц 10—3—1,5 является отжиг при температуре 700 °С ± 50 °С с охлаждением с печью.

Соединения из сплава выполняются сваркой и пайкой.

При сварке деталей толщиной до 4 мм применяются все виды дуговой сварки без предварительного подогрева; при автоматической сварке используют флюс АН-20 и проволоку близкого состава.

Пайку осуществляют на низкотемпературных оловянисто-свинцовых и высокотемпературных серебряных припоях.

Титан и его сплавы. Для криогенной техники титан и его сплавы относительно новые материалы, однако их применение с каждым годом расширяется. Титан и его сплавы, обладая достаточно высокой прочностью при 20 °С (на уровне аустенитных и других сталей), имеют удовлетворительную пластичность и ударную вязкость при криогенных температурах.

Преимуществом титана является малая плотность (4500 кг/м³), что обес-

132. Механические свойства бронзы БрАЖМц 10—3—1,5 при низких температурах [57]

Полуфабрикат	Термическая обработка	t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
			МПа		%	
Пруток прессованный диаметром 65 мм*1	Без термической обработки	20	580	200	28	31
		—183	710	280	24	32
		—196	730	300	26	32
Пруток диаметром 65 мм, перекованный на квадрат размером 12×12 мм	Без термической обработки	20	760	410	23	30
		—183	920	510	22	30
		—196	950	560	16	21
	Закалка с 850 °С в воду	20	830	340	17	20
		—183	980	480	16	19
		—196	1000	460	12	17
	Закалка с 850 °С в воду, отпуск при 400 °С	20	820	340	22	35
		—183	930	420	—	—
		—196	950	450	—	—
	Отжиг при 700 °С	20	620	310	29	36
		—183	730	390	27	29
		—196	740	400	26	27

*1 Ударная вязкость, МДж/м²

t, °С	20	—183	—196
KCU	1,0	0,90	0,85
KCV	0,65	0,55	—

печивает его сплавам удельную прочность более высокую, чем прочность многих сталей и алюминиевых сплавов. Высокая удельная прочность сплавов титана необходима для изготовления деталей и узлов летательных аппаратов.

Титан немагнитен и, следовательно, может применяться в криоэнергетике для изготовления электрических машин, использующих сверхпроводящие материалы.

Технический титан ВТ1—0 (химический состав по ОСТ 1-90013—78) применяют для изготовления несварных и сварных конструкций (обечаек, фланцев и т. д.), работающих под давлением в интервале температур —269÷250 °С.

Технический титан используется в отожженном состоянии; отжиг выполняется при 520—540 °С; желательно нагрев полуфабрикатов или деталей осуществлять в вакуумных печах или в печах с защитной атмосферой.

В отожженном состоянии технический титан имеет механические свойства, приведенные в табл. 133.

Технический титан хорошо сваривается; при этом сварку осуществляют аргонодуговым способом при малой погонной энергии. Для однородных соединений или соединений с алюминием применяют пайку в вакууме, аргоне, диффузионную. Наилучшие свойства паяных соединений достигаются присадкой серебра.

Титан обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и окислительных средах.

Сплав ВТ5—1 (химический состав по ОСТ 1-90013—78) предназначен для изготовления деталей и узлов, в том числе сварных, работающих под давлением в интервале температур —253÷500 °С. Сплав в основном используется в отожженном состоянии; отжиг проводится при 700—750 °С.

После отжига сплав ВТ5—1 имеет механические свойства, указанные в табл. 134.

Сплав технологичен при сварке: аргонодуговой под слоем флюса, электрошлаковой и др. При изготовлении из сплава ВТ5—1 крепежа последний подвергается оксидированию при 890 °С в течение 6 ч.

Сплав ОТ4—1 (химический состав по ГОСТ 1-90013—78) предназначен для изготовления деталей и узлов, в том числе сварных, сосудов и т. д., работающих при —196÷350 °С; в от-

133. Механические свойства технического титана ВТ10— при низких температурах (термическая обработка: отжиг) [57]

Полуфабрикат	t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
		МПа		%		
Лист толщиной 1 мм	20	460	380	30	—	—
	—196	870	690	50	—	—
	—253	1200	820	43	—	—
Пруток диаметром 20 мм	20	470	400	30	**65**	2,0
	—196	920	700	48	**60**	2,2
	—253	1310	920	24	**17**	1,3

134. Механические свойства сплава ВТ5—1 при низких температурах (термическая обработка: отжиг при 720 °С) [57]

Полуфабрикат	t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
		МПа		%		
Пруток диаметром 20 мм	20	820	800	21	**55**	1,0
	—196	1320	1310	16	**27**	0,40
	—253	1580	1400	15	**9**	0,40
Лист толщиной 2 мм	20	940	770	13	—	—
	—196	1440	1220	27	—	—
	—253	1780	1550	8	—	—
	—269	1630	1590	2,5	—	—
Лист толщиной 3 мм	20	780	—	13	—	—
	—196	1300	—	14	—	—
	—269	1400	—	3	—	—

135. Механические свойства сплава ОТ4—1 при низких температурах [57]

Полуфабрикат	t, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
		МПа		%		
Лист отожженный при 650 °С	20	700	580	11	—	—
	—196	1150	940	15	—	—
	—253	1390	1130	7	—	—
	—269	1330	1090	11	—	—
Лист отожженный при 750 °С	20	650	510	21	42	50
	—196	1080	830	17	21	23
	—253	1370	1150	15	11	27

дельных случаях, когда содержание легирующих элементов (алюминия и марганца) находится на нижнем пределе, допускается применение сплава, начиная с —253 °С.

Сплав используется в виде труб, листа и других полуфабрикатов в отожженном состоянии; температура отжига 740—760 °С.

Для снятия наклепа применяют отжиг при 640—660 °С, а для снятия внутренних напряжений — при 520—560 °С.

Свойства отожженного сплава ОТ4—1 приведены в табл. 135.

Сплав ОТ4—1 сваривается аргонодуговой сваркой, сваркой под слоем флюса, контактной сваркой; термообработка сварных соединений не обязательна.

Список литературы

1. **Арзамасов Б. Н.** Химико-термическая обработка в активизированных газовых средах. М.: Машиностроение, 1979. 224 с.

2. **Баиых О. А., Ковнеристый Ю. К., Зудин И. Ф.** Хромомарганцевые теплоустойчивые стали с алюминием. М.: Наука, 1965. 103 с.

3. **Беляев Р. А.** Окись бериллия. М.: Атомиздат, 1980. 224 с.

4. **Бобро Ю. Г.** Легированные чугуны. М.: Металлургия, 1976. 288 с.

5. **Бобылев А. В.** Механические и технологические свойства металлов: Справочник. М.: Металлургия. 1987. 208 с.

6. **Билобжевский А. В., Цирлин М. С., Красилов Б. И.** Высокотемпературная коррозия и защита сверхтугоплавких металлов. М.: Атомиздат, 1977. 224 с.

7. **Васильева Е. В., Воронова Т. А., Горбова А. С.** Новые способы повышения прочностных свойств ниобия// Труды МВТУ. 1983. № 280. С. 27—37.

8. **Ватрушин Л. С., Осинцев В. Г., Козырев А. С.** Бескислородная медь. М.: Металлургия. 1982. 192 с.

9. **Влияние** концентрации и параметров диффузии на выделение водорода из металлов в вакууме при температурах 20 ... 500 °С/В. И. Макарова, Г. В. Скибина. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. Харьковский физико-технический институт АН УССР, 1983. Вып. 2. С. 70—73.

10. **Влияние** оксидирования в различных средах на газовыделение стали 12Х18НФ0Т в вакууме/В. И. Макарова, А. Н. Сафонов, Г. В. Скибина, В. И. Ерохина//Изв. вузов. Машиностроение. 1979. № 10. С. 110—114.

11. **Влияние** поверхностных окислов на диффузию водорода и газовыделения алюминия/В. Г. Антонов, А. А. Зябрев, В. И. Макарова, А. Н. Сафонов, Г. В. Скибина: Электронная техника. Серия Материалы, 1977, вып. 8. С. 23—28.

12. **Влияние** различных способов обработки поверхности на газовыделение стали 12Х18Н10Т в вакууме/В. И. Макарова, А. Н. Сафонов, Г. В. Скибина//Изв. вузов. Машиностроение. 1980. № 1. С. 92—96.

13. **Возможности** применения хромированной малоуглеродистой стальной ленты/А. Н. Сафонов, Ю. К. Белов, В. И. Макарова, Г. В. Скибина// Изв. вузов. Машиностроение. 1978. № 7. С. 116—120.

14. **Ворошнин Л. Г.** Антикоррозионные диффузионные покрытия. Минск: Наука и техника, 1981. 296 с.

15. **Высокотемпературные** неорганические покрытия/Под ред. Дж. Гуменика: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1968. 330 с.

16. **Газовыделение** алюминиевой полимерной пленки в вакууме при пониженных температурах/А. Н. Сафонов, В. И. Макарова, В. П. Шатохин, Г. В. Скибина, В. И. Ерохина// Электронная техника. 1982. Вып. 2, С. 68—70.

17. **Газовыделение** покрытий из алюминия, нанесенного газопламенным методом/В. И. Макарова, Г. В. Скибина, А. И. Жигулев. М.: 1987. 6 с. Деп. в ВИНИТИ 17.07.87 № 5207—В87.

18. **Газовыделение** коррозионных сталей, подвергнутых высокотемпературному оксидированию/В. И. Макарова, А. Н. Сафонов, Г. В. Скибина, В. И. Ерохина//Электронная техника. Материалы. 1979. Вып. 6. С. 31—35.

19. **Газовыделение** малоуглеродистой стали с коррозионно-стойкими покрытиями/Г. В. Скибина, Е. В. Андронов, В. И. Макарова, А. Н. Сафонов, В. И. Ерохина//Электронная техника. Материалы. 1981. Вып. 5. С. 4—7.

20. **Газовыделение** и закономерность процесса выделения водорода из металлов в вакууме при 20 °С/В. И. Макарова, Г. В. Скибина//Вопросы атомной науки и техники. Серия Общая и ядерная физика. Харьковский физико-технический институт АН УССР. 1980. Вып. 4. С. 72—76.

21. **Газовыделение** нержавеющих сталей и алюминиевых сплавов в динамическом высоком вакууме/В. И. Макарова, А. А. Зябрев, Г. В. Скибина// Электронная техника. Материалы. 1972. Вып. 4. С. 18—23.

22. **Газовыделение** коррозионностойких сталей аустенитного и ферритного классов/В. И. Макарова, А. Н. Сафонов, Г. В. Скибина/Изв. вузов. Машиностроение. 1979. № 9. С. 100—105.

23. **Действие** облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978. 272 с.

24. **Еремина З. И.** Производство и применение металлопродукции с антикоррозионными покрытиями в УССР. Киев: 1984. Сер. II. УкрНИИНТИ, 36 с.

25. **Жаропрочные** сплавы меди: Справочник металлиста. М.: Машиностроение, 1976. Т2. С. 459—463.

26. **Жаростойкие** и жаропрочные стали и сплавы: Каталог продукции черной металлургии. М.: Черметинформация, 1976. 100 с.

27. **Жаростойкость** конструкционных материалов энергомашиностроения/В. И. Никитин, И. П. Комиссарова, М. Б. Ревзюк. Руководящие указания. Л.: НПО ЦКТИ, 1978. Вып. 38, 235 с.

28. **Жук Н. П.** Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.

29. **Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г.** Циркониевые сплавы в атомной энергетике. М.: Энергоиздат, 1981. 232 с.

30. **Захаров М. В., Захарова А. М.** Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия, 1972. 384 с.

31. **Защита** строительных конструкций и технологического оборудования от коррозии: Справочник строителя. М.: Стройиздат, 1981. 180 с.

32. **Г. В. Земсков, Р. Л. Коган.** Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. М.: Металлургия. 1978. 208 с.

33. **Зубарев П. И., Сухарева Л. А.** Структура и свойства полимерных покрытий. М.: Химия, 1982. 256 с.

34. **Ибрагимов Ш. Ш., Кирсанов В. В., Пятилетов Ю. С.** Радиационные повреждения металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат. 1985. 240 с.

35. **Исследования** кинетики газовыделения теплоизоляционных материалов в вакууме при температурах от нуля до 20 °С/В. И. Макарова, В. П. Шатохин, А. Н. Сафонов,

Г. В. Скибина, В. И. Ерохина//Электронная техника. Материалы. 1980. Вып. 6. С. 106—111.

36. **Картер В. И.** Металлические противокоррозионные покрытия: Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1980. 167 с.

37. **Кинетика** газовыделения железа в процессе длительных изотермических выдержек в вакууме/В. И. Макарова, Г. В. Скибина, А. Н. Сафонов// Электронная техника. Материалы. 1975. Вып. 1. С. 9—16.

38. **Коломыцев П. Т.** Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 204 с.

39. **Коломыцев П. Т.** Жаростойкие диффузионные покрытия. М.: Металлургия, 1979. 269 с.

40. **Конструкционные** материалы ядерных реакторов/Под общ. ред. Н. М. Бекоровайного. **М.: Атомиздат,** 1977. 256 с.

41. **Копецкий Ч. В.** Структура и свойства тугоплавких металлов. **М.:** Металлургия, 1974. 206 с.

42. **Коррозионно-стойкие** сплавы на основе железа и никеля/Е. А. Ульянин, Т. В. Свистунова, Ф. Л. Левин. М.: Металлургия, 1986. 262 с.

43. **Лайнер В. И.** Защитные покрытия металлов. М.: Металлургия, 1974. 558 с.

44. **Ланская К. А.** Высокохромистые жаропрочные стали. М.: Металлургия, 1976. 216 с.

45. **Ланская К. А.** Жаропрочные стали. М.: Металлургия, 1969. С. 246.

46. **Лахтин Ю. М., Арзамасов Б. Н.** Химико-термическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1985. 255 с.

47. **Либерман Л. Я., Пейсихис М. М.** Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении. Ч. I, II, III. Л.: ОНТИ ЦКТИ. 1967. 600 с.

48. **Любимов Б. В.** Защитные покрытия изделий. Л.: Машиностроение, 1969. 214 с.

49. **Магниевые** сплавы: Справочник. **Ч.I** /Под ред. М. Б. Альтмана и др. М.: Металлургия, 1978. 232 с.

50. **Ма Б. М.** Материалы ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1987. 408 с.

51. **Масленков С. Б.** Жаропрочные стали и сплавы. М.; Металлургия, 1983. 192 с.

52. **Мовчан Б. А., Малащенко И. С.** Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983. 231 с.

53. **Николаев А. К., Новиков А. И., Розенберг В. М.** Хромовые бронзы. М.: Металлургия, 1983. 177 с.

54. **Промышленные** алюминиевые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1984. 528 с.

55. **Роль** диффузии в процессе выделения водорода из металлов в вакууме при комнатной температуре/В. И. Макарова, Г. В. Скибина, А. Н. Сафонов// Новые сплавы и методы упрочнения деталей машин/Под ред. Арзамасова. МВТУ. 1981. С. 142—157.

56. **Самсонов Г. В., Эпик А. П.** Тугоплавкие покрытия. Изд. 2-е, М.: Металлургия, 1973. 400 с.

57. **Солнцев Ю. П., Степанов Г. А.** Материалы в криогенной технике: Справочник. Л.: Машиностроение, 1982. 312 с.

58. **Солонина О. А., Глазунов С. Г.** Жаропрочные титановые сплавы. М.: Металлургия, 1976. 445 с.

59. **Сплавы** для нагревателей/ Л. Л. Жуков, И. М. Племянникова, М. Н. Миронова и др. М.: Металлургия, 1985. 145 с.

60. **Сплавы** на основе тугоплавких металлов//Металловедение и термическая обработка. М.: 1968. 171 с.

61. **Способ** изготовления сварных непрогреваемых вакуумных камер/ В. И. Макарова, А. Н. Сафонов, Г. В. Скибина, Е. С. Фролов, В. И. Куприянов, Е. В. Чубаров, А. Я. Борисов, Е. В. Андронов. Авторс. свид. № 863679 от 14.05.1981. Бюлл. изобрет. 1981. № 34.

62. **Сухотин А. М. и Зотиков В. С.** Химическое сопротивление материалов: Справочник. Л.: Химия, 1975. 408 с.

63. **Тамарин Ю. А.** Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток ГТД. М.: Машиностроение, 1978. 133 с.

64. **Томашов Н. Д.** Титан и коррозионно-стойкие сплавы на его основе. М.: Металлургия, 1985. 80 с.

65. **Томашов Н. Д., Чернова Г. П.** Теория коррозии и коррозионно-стойкие конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1986. 360 с.

66. **Тугоплавкие** и редкие металлы и сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1977. 240 с.

67. **Тугоплавкие** металлы и сплавы/ Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов, К. Б. Поварова и др. М.: Металлургия, 1986. 352 с.

68. **Туфанов Д. Г.** Коррозионная стойкость сталей, сплавов и чистых металлов. М.: Металлургия, 1982. 352 с.

69. **Ульянин Е. А.** Коррозионностойкие стали и сплавы. М.: Металлургия. 1980. 208 с.

70. **Ульянин Е. А., Свистунова Т. В., Левин Ф. Л.** Коррозионно-стойкие сплавы на основе железа и никеля. М.: Металлургия. 1986, 262 с.

71. **Ульянин Е. А., Сорокина Н. А.** Стали и сплавы для криогенной техники: Справочник. М.: Металлургия, 1984. 206 с.

72. **Усынин Г. Б., Кусмарцев Е. В.** Реакторы на быстрых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1985. 288 с.

73. **Химико-термическая** обработка металлов и сплавов: Справочник/Под ред. Л. С. Ляховича. М.: Металлургия, 1981. 424 с.

74. **Чехов А. П.** Коррозионная стойкость материалов: Справочник. Днепропетровск. Промінь, 1980. 150 с.

75. **Щедров К. П., Гакман Э. Л.** Жаростойкие материалы: Справочное пособие. **М.—Л.:** Машиностроение, 1965. 166 с.

76. **Электротермическое** оборудование: Справочник. 11-е изд./Под общей ред. А. П. Альтгаузена. М.: Энергия, 1980. 416 с.

77. **Ямпольский А. М.** Контроль качества защитных покрытий. Изд. 2-е. Л.: Машиностроение, 1966. 155 с.

78. **Diamonds** in nickel wear coating Metal Progress. 1981. 120. N 5. P. 92—94.

79. **Ellinger.** Anticorrosive coatings a rewiew, Finishing Industries. 1982. 6. N 6. P. 26.

80. **Fours** a pour traitements thermiques industriels sous atmosphere protectrice. Проспект фирмы S. A. du Fous Electriqie Delemont (Швейцария).

81. **The Fuseweld** process. Проспект фирмы Wold Colmonoy Ltd. (Англия).

82. **Habib K. H.** Verqleicher verschiden artger Oberflächenschutzschichten. VDI—Berichte. 1984. P. 87—96.

83. SUR—SULF. Проспект фирмы Centre Stephanoide

84. **Meckelburq E.** Schutzuberzuge fur den Betrib bei hohen Temneturen—Fachberichte fur Oberflächen. 1971. 9. N 3. P. 103—105.

85. **Plasma—Pulver** Auftragschweißen wirtschiftlich. Praktiker, 1984. 36. N 4. S. 197.

Глава VII МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

1. МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Общие требования и классификация. Проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением при нормальных условиях не более $0{,}1 \times \times 10^{-6}$ Ом·м называют материалом высокой проводимости (ГОСТ 22265—76). Основными показателями проводниковых материалов являются: высокая удельная электрическая проводимость и обратный ей по величине показатель — удельное электрическое сопротивление; температурный коэффициент удельного электрического сопротивления и работа выхода электрона из проводника (ГОСТ 19880—74).

Материалы высокой проводимости применяют в электротехнике, приборостроении для изготовления обмоточных и монтажных проводов, различного рода токоведущих частей и т. п.

Эти материалы должны обладать следующими свойствами: малым удельным электрическим сопротивлением, высокими механическими свойствами, хорошими технологическими параметрами и стойкостью против окисления.

Материалы высокой проводимости классифицируют по группам: медь, сплавы меди с оловом (бронзы), сплавы меди с цинком (латуни), алюминий, серебро и прочие металлы и сплавы. В особую группу выделяют материалы для электрических контактов. В табл. 1 приведены свойства наиболее распространенных металлов высокой проводимости.

Электрическая проводимость металлов, являясь структурно-чувствительным параметром, в значительной степени зависит от примесей (рис. 1, 2).

Медь является широко распространенным материалом для проводников, так как в полной мере отвечает общим требованиям, предъявляемым к материалам высокой проводимости как по физическим, так и по механическим свойствам и технологичности. Наибольшую электрическую проводимость имеет чистая медь (рис. 2). Химический состав меди и свойства нормированы ГОСТ 859—78. Медь поставляют в мягком (отожженном) и твердом состоянии (табл. 2).

Для электротехнических целей применяют наиболее чистую техническую катодную медь марок МОк (99,95 % Cu), М1к (99,9 % Cu), М1у (99,9 % Cu); бескислородную медь марок МООб (99,9 % Cu), М1б (99,95 % Cu); переплавленную медь марки М1 (99,9 % Cu) и др.

Из меди марок МООб, М1б, М1у изготовляют медные слитки (ГОСТ 193—79). Из медных слитков этих марок и медного сплава с серебром марки МС0,1 (0,08—0,12 % Ag, примеси — не более 0,1 %, остальное — медь) для пластин коллекторов электрических машин, электромеханизмов и электроприборов изготовляют профили трапецеидальной формы высотой, нормированной по размерному ряду в диапазоне 4—112 мм. Твердость по Бринеллю профилей первой категории из медных слитков составляет 700 МПа, из медного сплава — 840 МПа. Прокаткой из слитков получают медную катанку круглого сечения диаметром 6—12 мм. Относительное удлинение катанки диаметром до 10 мм включительно составляет 30—33 %, катанки диаметром свыше 10 мм — 35—37 % [40].

Из медной катанки изготовляют проволоку круглого сечения диаметром 0,020—9,42 мм в мягком (ММ) и твердом (МТ) состоянии и для воздушных линий электрической связи (МС). Сортамент, механические и электрические свойства проволоки — по ГОСТ 2112—79 (табл. 3).

1. Физические свойства металлов высокой проводимости [5]

Металл	$\rho_t \cdot 10^8$, Ом·м	$TK\rho \cdot 10^4$, $°C^{-1}$	λ, Вт/(м·°С)	$\alpha \cdot 10^6$, $°C^{-1}$	Ф, эВ	$T_{пл}$, °С	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³
Серебро Ag	0,016	40	415	19	4,4	961	10,50
Медь Cu	0,0172	43	390	16	4,3	1083	8,94
Золото Au	0,024	38	293	14	4,8	1063	19,30
Алюминий Al	0,028	42	209	24	4,3	657	2,70
Бериллий Be	0,040	60	167	13	3,9	1284	1,85
Магний Mg	0,045	42	167	26	3,6	651	1,74
Иридий Ir	0,054	41	146	6,5	—	2410	22,50
Вольфрам W	0,055	46	168	4,4	4,5	3380	19,30
Молибден Mo	0,057	46	151	5,1	4,2	2620	10,20
Цинк Zn	0,059	—	111	31	—	420	7,14
Кобальт Co	0,062	60	79	12	—	1492	8,71
Никель Ni	0,073	65	95	13	5,0	1455	8,90
Кадмий Cd	0,076	42	93	30	4,0	321	8,65
Индий In	0,090	47	25	25	—	156	7,28
Железо Fe	0,098	60	73	11	4,5	1535	7,87
Платина Pt	0,105	39	71	9	—	1773	21,40
Олово Sn	0,120	41	65	23	4,4	232	7,31

Примечание. $TK\rho$ — температурный коэффициент электрического сопротивления.

2. Физические и механические свойства меди (ГОСТ 859—78)

Марка меди (состоянке)	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	$\sigma_в$, МПа	$T_{пл}$, °С	δ, %
ММ (мягкая отожженная)	8,90	250—300	1083	18—50
МТ (твердая неотожженная)	8,95	350—480	1080	0,5—4

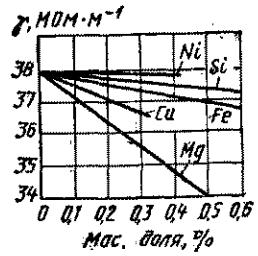


Рис. 1. Влияние примесей на изменение удельной электрической проводимости алюминия [11]

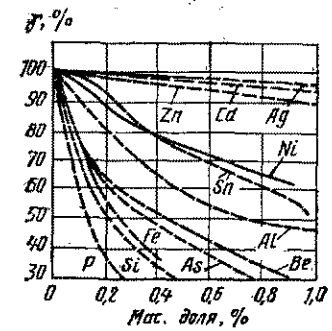


Рис. 2. Влияние примесей на изменение удельной электрической проводимости меди, принятой за 100 % [5]

3. Свойства медной проволоки круглого сечения (ГОСТ 2112—79)

Свойства	Марка проволоки	Диаметр проволоки, мм		
		0,020—1,00	2,0—4,0	1,00—9,42
$\sigma_в$, МПа	ММ	200—290	—	200—270
	МТ	400—450	—	360—400
	МС	—	430—440	—
δ, %	ММ	6—30	—	30—35
	МТ	0,6	—	1,0—2,0
	МС	—	1,5	—
$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м	ММ	0,01724	0,01724	0,01724
	МТ, МС	0,0180	—	0,0177—0,0178

Из медной катанки изготовляют также проволоку прямоугольного сечения (табл. 4), ленты, мягкие и твердые шины нормированных размеров и свойств (ГОСТ 434—78). Размеры поставляемых изделий по сторонам сечения (*a* — меньшая сторона, толщина; *b* — большая сторона, ширина) приведены ниже:

	По стороне *a*, мм
Проволока	0,80—5,60
Ленты	0,10—3,53
Шины	4,00—30,00
	По стороне *b*, мм
Проволока	2,00—30,00
Ленты	8,0—100,00
Шины	16—120.

Горячекатаные и холоднокатаные медные листы и холоднокатаные полосы имеют регламентированные размеры (по ГОСТ 495—77). Диапазон размеров изделий приведен в табл. 5.

Листы и полосы бывают мягкие, полутвердые и твердые из меди марок М1, М1р, М2, М2р, М3 и М3р по ГОСТ 859—78. Механические свойства их приведены в табл. 6.

Для изготовления фольгированных диэлектриков электролитическим осаждением применяют медную фольгу ФМЭ (неоксидированная), ФМЭО (оксидированная нормальной шероховатости), ФМЭОШ (оксидированная повышенной шероховатости). Химический состав фольги соответствует ме-

4. Механические свойства изделий из медной катанки (ГОСТ 434—78)

Размер по меньшей стороне сечения *a*, мм	δ, %, не менее			$\sigma_в$, МПа, не менее	
	Проволока ПММ	Шины ШММ	Ленты ЛММ	Проволока ПМТ	Ленты ЛМТ
До 0,80	—	—	—	301	294
Св. 0,80 до 1,32	30	—	30	301	294
» 1,32 » 3,35	32	—	32	264	264
» 3,35 » 7,00	34	34	34	255	255
» 7,00 » 10,00	35	35	—	255	255
» 10,00	—	35	—	—	—

5. Размеры (в мм) медных листов и полос (ГОСТ 495—77)

Параметр	Холоднокатаные		Горячекатаные листы
	листы	полосы	
Толщина	0,4—12,0	0,4—0,6	3,0—25,0
Ширина	600—1000	40—600	600—3000
Длина	1500—2000	500—2000	1000—6000

ди М1 по ГОСТ 859—78. Фольгу поставляют в виде рулонов и листов регламентированных размеров (по ГОСТ 14958—69). Толщина оксидированного слоя на фольге ФМЭО и ФМЭОШ составляет 0,15—0,35 мм. Фольгу ФМЭО и ФМЭОШ изготовляют из фольги ФМЭ.

Для изготовления деталей методом порошковой металлургии предназначен медный порошок, применяемый в электротехнической, машиностроительной и химической промышленностях. Марки и химический состав порошка регламентированы ГОСТ 4960—75. Порошок поставляют в стабилизированном (марки ПМС) и нестабилизированном (марки типа ПМ) состоянии. Удельное электрическое сопротивление медного порошка ПМА не превышает $25 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Сплавы меди находят широкое применение благодаря лучшим по сравнению с медью механическим свойствам. Важнейшими из сплавов меди являются бронзы (сплавы меди с оловом или некоторыми другими металлами), из них лучшие — бериллиевая и кадмиевая. Бериллиевые бронзы применяют для изготовления токоведущих пружин, щеткодержателей, скользящих контактов, электродов и т. п., кадмиевые бронзы — для изготовления контактов, троллейных проводов и коллекторных пластин. Они обладают большим сопротивлением истиранию, рабочая температура их до 250 °С. Сплавы меди с цинком (латуни) имеют существенно худшие электрические свойства. Из бериллиевой бронзы БрБ2 (1,8—2,1 % Be) изготовляют прутки тянутые в мягком и твердом состоянии и прессованные с механическими свойствами, указанными в табл. 7.

Алюминий применяют для проводов воздушных линий электропередачи, в распределительных устройствах, для кабелей, обмоток трансформаторов и электрических машин, электромагнитов и т. п. Используют его и как кои-

6. Механические свойства медных листов и полос (ГОСТ 495—77)

Способ изготовления	Состояние материала	$\sigma_в$, МПа	δ, % не менее	НВ, МПа
Холоднокатаные	Твердое	290, не менее	3	950
	Полутвердое	250—310	12	750
	Мягкое	200—260	36	550
Горячекатаные	—	200, не менее	30	600

7. Механические свойства прутков из бронзы БрБ2 [40]

Диаметр прутков, мм	Способ изготовления	Состояние металла	$\sigma_в$, МПа	δ, % не менее	НВ, МПа
5—40	Тянутые	Мягкий	400—600	25	1000—1500
5—15	Тянутые	Твердый	750—1000	1,0	1500, не менее
16—40	Тянутые	Твердый	650—900	1,0	1500, не менее
42—100	Прессованные	Прессованный	450	20	—

струкционный и защитный (обмотки кабелей) материал.

Алюминий дешевле меди, которая к тому же является дефицитным материалом. Кроме того, алюминий существенно легче меди (плотности $2{,}70\times\times10^3$ и $8{,}94\cdot10^3$ кг/м^3 соответственно) и стоек к окислению. Большим преимуществом алюминия является возможность анодного оксидирования (анодирования), при котором на его поверхности возникает слой оксидной изоляции, выдерживающей температуру выше температуры плавления алюминия. Недостатком алюминия по сравнению с медью является более низкая удельная электрическая проводимость. Алюминий легко подвержен электролитической коррозии и его механическая прочность на 30 % меньше, чем у меди. По сравнению с медью он труднее паяется из-за окисной пленки на поверхности, имеющей высокое электрическое сопротивление.

Марки и химический состав первичного алюминия нормированы ГОСТ 11069—74. В зависимости от химического состава первичный алюминий подразделяют на алюминий особой чистоты (А999), высокой чистоты (А995, А99, А97, А95) и технической чистоты (А85, А8, А7, А7Е, А6, А5Е, А5, А0).

Из первичного алюминия высокой и технической чистоты изготовляют чушки регламентированного сортамента и массы (ГОСТ 11070—74).

Из алюминия А995, А99, А97, А7Е и А5Е производят слитки, предназначенные для изготовления проволоки для кабелей и проводов, а также проволоки для сварочных и других целей. Форма, размеры и масса слитков нормированы ГОСТ 4004—64.

Прокаткой из слитков получают алюминиевую катанку АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ в полутвердом состоянии; непрерывным литьем и прокаткой получают катанку АКЛП-5Т в твердом состоянии. Катанку изготовляют из алюминия А5Е и А7Е с нормированными размерами, механическими свойствами и удельным электрическим сопротивлением (табл. 8) по ГОСТ 13843—78 Е.

Для неизолированных проводов линий электропередачи из алюминиевой катанки изготовляют проволоку АМ (мягкая), АПТ (полутвердая), АТ (твердая), АТп (твердая повышенной прочности) с нормированными размерами и механическими свойствами (табл. 9) по ГОСТ 6132—79.

Для электротехнических целей из алюминия АД0 и алюминиевого сплава АД31 изготовляют прессованные шины (с термической обработкой и без термической обработки) регламентированных типоразмеров по ГОСТ 15176—89. Механические свойства их приведены в табл. 10.

Для деталей с повышенными механическими свойствами используют сплавы алюминия, в основном сплавы

8. Свойства алюминиевой катанки (ГОСТ 13843—78 Е) (для первой категории)

Диаметр, мм	$\sigma_в$, МПа, не менее			δ, %, не менее			$\rho_t\cdot10^6$, Ом·м, не более	
	АК	АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ	АКЛП-5Т	АК	АКЛП-5ПТ, АКЛП-7ПТ	АКЛП-5ПТ	АКЛП-5ПТ	АКЛП-5Т
9,0; 9,5	83,0	83,0	95,0	15,0	15,0	15,0	0,02815	0,02813
11,5—15,5	78,0	78,0	—	15,0	15,0	—	—	—
18,0—19,0	—	74,0	—	—	15,0	—	—	—
23,0; 25,0	—	64,0	—	—	15,0	—	—	—

9. Механические свойства проволоки диаметром 0,6—10,0 мм из алюминиевой катанки (ГОСТ 6132—79)

Свойства	АТ	АПТ	АМ	АТп *1
$\sigma_в$, МПа	147—167	88—137	73,5—98	167—191
δ, %	1,0—2,0	2,0—3,0	15—25	1,5—2,0
$\rho_t\cdot10^6$, Ом·м	0,0283	0,0283	0,0280	0,0283

*1 Для проволоки диаметром 1,5—4,5 мм.

10. Свойства образцов вырезанных из прессованных шин (ГОСТ 15176—89)

Марка алюминия и сплава	Состояние поставки шин	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	$\rho_t\cdot10^6$, Ом·м
АД0	Без термической обработки	60—70	—	15	0,0290
АД31	Закаленные и естественно состаренные	130	60	13	0,0350
АД31	Закаленные и искусственно состаренные	200	150	8	0,0325

11. Свойства рабочего слоя порошковых контакт-деталей (для первой категории) [40]

Марка контакт-деталей	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	НВ, МПа	$\rho_1 \cdot 10^8$, Ом·м, не более
КМК-Б45	11,8—12,4	1200—1500	7,5
КМК-Б25	13,2—14,4	1800—2200	9,0
КМК-А45	13,4—14,0	1000—1500	4,2
КМК-А25	14,8—15,6	1700—2200	4,6

типа Al—Mg—Si—Fe, Al—Mg—Si—Fe—Zn.

Железо (сталь). В качестве проводникового материала применяют мягкую сталь с содержанием углерода 0,10—0,15 %. Сталь используют для изготовления проводов воздушных линий электропередачи небольших мощностей, для шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог. Поверхность стальных проводов покрывают цинком с целью защиты их от коррозии [5]. В качестве токопроводящей жилы в кабелях используют углеродистую качественную проволоку оцинкованную (тип КО) и без покрытия (тип КС) (ГОСТ 792—67). Проволоку изготовляют диаметром 0,5—6,0 мм из низкоуглеродистой стали по ГОСТ 1050—74 и ГОСТ 4543—71. Временное сопротивление разрыву для проволоки всех диаметров не менее 362 МПа (для оцинкованной проволоки) и 392 МПа (для проволоки без покрытия); удельное электрическое сопротивление проволоки не более $0{,}15 \times 10^{-6}$ Ом·м при 20 °С.

Серебро имеет наименьшее удельное электрическое сопротивление из группы металлических проводников, но является остродефицитным материалом. Его используют в виде микропроводников, гальванических покрытий в ответственных ВЧ- и СВЧ-устройствах, слаботочных контактов.

Материалы для электрических контактов должны одновременно удовлетворять требованиям: иметь высокие значения дугостойкости, твердости, удельной электрической проводимости, теплопроводности, химической стойкости; должны быть устойчивы к атмосферной коррозии и микроклимату, существующему в коммутационном устройстве. Контакты регламентированных типоразмеров изготовляют из материалов на основе порошкового вольфрамо-никелевого сплава, пропитанного жидким серебром или медью; на основе серебра (60—95 %), легированного кадмием, графитом, окисью кадмия, окисью меди, окисью никеля [40]. Для контактов используют также сплавы Cu—Cr, Cu—Ag—Cd, Ag—Pd, Au—Pt—Ag, Pt—Ni, Pt—W, Pt—Ir, Pt—Rh и др. Контакты изготовляют в основном методами порошковой металлургии. Часто используют биметаллические контакты, состоящие из подложки дешевого металла и поверхностного слоя из благородного металла.

В табл. 11 приведены свойства контакт-деталей, изготовленных пропиткой порошковых заготовок из вольфрамо-никелевого сплава.

2. СВЕРХПРОВОДНИКИ

Сверхпроводимость — явление, заключающееся в том, что электрическое сопротивление некоторых материалов исчезает при уменьшении температуры ниже некоторого значения, зависящего от материала и от магнитной индукции.

Сверхпроводник (ГОСТ 19880—74) — вещество, основным свойством которого является способность при определенных условиях быть в состоянии сверхпроводимости. Температура, при которой происходит переход из нормального состояния в сверхпроводящее, называется критической температурой (T_c). Токи, созданные в сверхпроводящих кольцах, протекают без

измеримого изменения в течение года после их начального возбуждения. Сверхпроводящее состояние можно разрушить не только повышением температуры образца, но и помещением его во внешнее магнитное поле. Это поле называется критическим полем (B_c), и его величина зависит от температуры, при которой находится образец. Сверхпроводящее состояние может быть разрушено и магнитным полем, созданным током, протекающим через образец. Плотность тока, при которой разрушается состояние сверхпроводимости, называется критической (J_c). Желательно иметь сверхпроводники с максимально высокими критическими параметрами.

Сверхпроводимость является сверхтекучестью «электронной жидкости», образованной валентными электронами. Электроны имеют полуцелый спин, т. е. являются фермионами и подчиняются статистике Ферми-Дирака. Благодаря взаимодействию электронов проводимости с колебаниями кристаллической решетки (фононами), между электронами возникает притяжение, которое может превзойти силы кулоновского отталкивания. Два электрона, имеющих равные и противоположно направленные импульсы и спины, образуют связанное состояние (куперовскую пару). Куперовские пары имеют целый спин (бозоны) и претерпевают бозе-эйнштейновскую конденсацию с образованием сверхтекучей электронной жидкости. Перестройка электронов проводимости приводит к появлению в спектре электронов на уровне поверхности Ферми энергетической щели, в которой нет квантовых состояний системы. Ширина щели $2\Delta(T)$ равна энергии связи куперовской пары при данной температуре. Она максимальна при —273 °С (порядка 10^{-3}—10^{-4} эВ), уменьшается при повышении температуры и равна нулю при $T = T_c$. При температуре абсолютного нуля все электроны проводимости сверхпроводника связаны в куперовские пары. При повышении температуры число куперовских пар уменьшается и становится равным нулю при $T = T_c$. При наложении внешнего электрического поля связанный коллектив куперовских пар

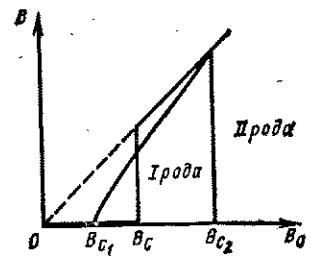


Рис. 3. Зависимость внутреннего магнитного поля от внешнего магнитного поля для сверхпроводников I и II рода

начинает двигаться как единое целое.

Сверхпроводники относятся к двум основным группам: сверхпроводники I рода — все чистые сверхпроводящие металлы (кроме технеция, ванадия и ниобия) и сверхпроводники II рода — чистые технеций, ванадий, ниобий, сверхпроводящие сплавы и соединения.

Сверхпроводники I рода являются идеальными диамагнетиками. Постоянное магнитное поле не проникает в образец (за исключением тонкого поверхностного слоя), находящийся в сверхпроводящем состоянии, и «выталкивается» из образца при переходе в сверхпроводящее состояние во внешнем магнитном поле — так называемый эффект Мейссенера. Следствием эффекта Мейссенера является то, что по поверхности сверхпроводника, находящегося во внешнем магнитном поле, всегда течет ток.

Сверхпроводники II рода, как и сверхпроводники I рода, характеризуются температурой перехода в сверхпроводящее состояние T_c, но имеют два критических поля (рис. 3). Ниже нижнего критического магнитного поля B_{c_1} сверхпроводник ведет себя как сверхпроводник I рода. При внешнем магнитном поле $B_{c_1} < B_0 < B_{c_2}$ внутри сверхпроводника появляется магнитное поле в виде квантовых вихревых нитей. Каждая такая нить представляет собой длинный тонкий цилиндр, вытянутый вдоль направления внешнего магнитного поля. Внутри вихря куперовские пары разрушены и материал находится в нормальном состоянии. Вокруг цилиндра течет незатухающий сверхпроводящий ток

12. Критические характеристики некоторых соединений типа A15 [28]

Соединение	T_c, °C	B_{c_2}, Тл, при 277 °C	Соединение	T_c, °C	B_{c_2}, Тл, при —269 °C
Ta_3Sn	—265	7,24	Nb_3Sn	—255	23,5
Nb_3Ge	—250	34,0 ± 1,0	Nb_3Au	—261	23,5 (—273 °C)
Nb_3Ga	—252	33,6	V_3Si	—256	22,8
Nb_3Al	—254	29,5	V_3Ga	—256	21

(сверхток) такого направления, что создаваемое им магнитное поле совпадает с направлением внешнего магнитного поля. Магнитные вихри образуют в поперечном сечении правильную треугольную решетку, и каждый из вихрей несет один квант магнитного потока, численно равный

$$\Phi = \frac{hc}{2e} = 2{,}07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб.}$$

Такое состояние сверхпроводника называется «смешанным» и характеризуется частичным проникновением магнитного поля в образец. При достижении второго критического поля B_{c_2} вихри заполняют все сечение образца и происходит его переход в нормальное состояние.

В присутствии проходящего («транспортного») тока на вихревые нити потока действует сила Лоренца, которая вызывает движение вихрей в направлении, перпендикулярном току. Это приводит к рассеянию энергии, т. е. к появлению омического сопротивления, и означает, что у однородного сверхпроводника II рода, находящегося в смешанном состоянии, критический ток равен нулю. В неоднородном сверхпроводнике, имеющем дефекты различного вида, превышающие атомные размеры (границы зерен, скопления дислокаций, включения другой фазы и т. д.), вихри могут закрепляться. Эти дефекты называются центрами пиннинга, а закрепление на них вихрей — пиннингом.

Нендеальные сверхпроводники II рода называются жесткими сверхпроводниками или сверхпроводниками III рода. Эти сверхпроводники характеризуются высокими значениями критических плотностей токов и, следовательно, высокими критическими значениями магнитных полей. Отжиг сверхпроводящих материалов после механической обработки, приводящий к уменьшению концентрации центров пиннинга, снижает критическую плотность тока. Кривые намагничивания жестких сверхпроводников в смешанном состоянии имеют петлю гистерезиса.

Известно более 1000 сверхпроводящих сплавов и соединений и число их постоянно растет.

Широко исследованы двухкомпонентные сверхпроводящие сплавы простых монотектических, эвтектических, перитектических систем и систем с непрерывной растворимостью. Исследование систем Nb — Ti и Nb — Zr, образующих ряд твердых растворов в широком диапазоне концентраций, показало, что у многих сплавов при гелиевых температурах сверхпроводимость сохраняется до высоких значений магнитного поля. Критические характеристики сплавов зависят от механической и термической обработки сплавов, а также от наличия примесей и легирующих элементов.

Для систематизации сверхпроводящих соединений их классифицируют по группам с одинаковыми кристаллическими структурами, поскольку этот фактор является одним из фундаментальных. Известные сверхпроводящие соединения принадлежат более чем к пятидесяти структурным типам. Наиболее высокими сверхпроводящими характеристиками обладают соединения типа A15, B1, C15, C14, фазы Шевреля.

В табл. 12 приведены критические характеристики некоторых сверхпроводящих интерметаллических соединений типа A15. В этом классе материалов находятся все сверхпроводники с рекордным значением T_c. В соединениях типа A15 наблюдаются аномалии в температурной зависимости электропроводности и магнитной восприимчивости. У многих соединений, например V_3Si, V_3Ga, Nb_3Sn, происходит низкотемпературный фазовый переход мартенситного типа. Соединения Nb_3Ga, Nb_3Ge и Nb_3Al в сверхпроводящем состоянии с высокой критической температурой являются метастабильными, и именно с метастабильностью этих соединений связывается высокое значение T_c. Промышленное применение нашли сплавы Nb_3Sn и V_3Ga.

Кристаллическую структуру типа NaCl (B1) имеют бориды, нитриды, карбиды и гидриды переходных металлов IIIA—VIA подгрупп Периодической системы элементов. В этом классе материалов находятся сверхпроводящие соединения с самой высокой температурой плавления. Наивысшими T_c обладают карбиды и нитриды VA и VIA подгрупп. Как правило, эти соединения гомогенны в широких областях концентрации: максимальные значения T_c соответствуют стехиометрическому составу с резким падением T_c при отклонении от стехиометрии. Из тройных соединений этого класса наибольший интерес вызывают карбонитриды ниобия состава NbN_xC_{1-x}. Максимум характеристик соответствует составу $NbN_{0,7}C_{0,3}$ (T_c = = —255 °C; $B_{c_2}(0) = 16$ Тл; J_c = = $8 \cdot 10^{10}$ А/м^2). Критическая плотность тока сверхпроводящих материалов на основе карбонитридов ниобия превосходит J_c остальных известных сверхпроводников. Критические характеристики некоторых соединений типа B1 приведены в табл. 13.

Соединения типа фаз Лавеса состава AB_2 с плотноупакованной кубической структурой типа $MgCu_2$ (C15) и гексагональной структурой типа $MgZn_2$ (C14) различаются разной последовательностью чередования одинаковых слоев атомов A- и B-компонентов. Плотнейшая упаковка реализуется при отношении радиусов $r_A/r_B = \sqrt{3}/\sqrt{2}$. В образовании сверхпроводящих фаз Лавеса участвуют практически все переходные металлы (за исключением ниобия) и отсутствуют фазы с участием бора, углерода, азота, фосфора, что свидетельствует о металлическом характере связи в этих фазах. Максимальное значение T_c для фаз Лавеса достигается при стехиометрическом составе. Температуры перехода в сверхпроводящее состояние для некоторых фаз Лавеса приведены в табл. 14.

Фазы Шевреля — кристаллические структуры тройных халькогенидов переходных металлов. Для этих фаз характерно существование сверхпроводимости и антиферромагнетизма; каждый тип упорядочения может предшествовать другому при охлаждении образца. В соединении $PbMo_6S_8$ была установлена критическая температура —258 °C и рекордное значение критического поля B_{c_2} = 60 Тл. Из соединения $PbMo_6S_8$ можно делать как пленки, так и проволоку.

Перспективными материалами являются сверхпроводящие металлические стекла, которые получают быстрой закалкой из жидкого состояния. Эти материалы обладают высокой проч-

13. Критические характеристики некоторых соединений типа B1 [34]

Соединение	T_c, °C	B_{c_2}, Тл	Соединение	T_c, °C	B_{c_2}, Тл, при —273 °C
MoC	—259	5,2 (—269 °C)	ZrN	—262	0,3
NbC	—261	2,0 (—269 °C)	HfN	—264	—
TaC	—263	0,46 (—272 °C)	TaN	—264	—
TiC	—270	—	VN	—264	—
δ—NbN	—256	25,0 (—272 °C)	UN	—267	—

14. Температура перехода фаз Лавеса в сверхпроводящее состояние [28]

Структурный тип C15				Структурный тип C14			
Соединение	T_c, °C	Соединение	T_c, °C	Соединение	T_c, °C	Соединение	T_c, °C
$Hf(V, Nb)_2$	—263	$CaIr_2$	—267	TaJ_2	—263	$ThRe_2$	—268
HfV_2	—264	$LaRu_2$	—267	$ZrTc_2$	—265	YOs_2	—268
ZrV_2	—264	$SrRh_2$	—267	$ZrRe_2$	—266	$ScOs_2$	—268
$ThIr_2$	—267	$BaRh_2$	—267	$HfRe_2$	—267	$ScRe_2$	—269
$CaRh_2$	—267	$SrIr_2$	—267	$HfTc_2$	—267	$LuOs_2$	—270
$GeRu_2$	—267	$ZrIr_2$	—269	$ThTc_2$	—268	$ZrOs_2$	—270

ностью и определенной степенью деформируемости. Максимальная T_c = = —269 °C получена для металлических стекол состава $(Mo_{0,8}Re_{0,2})_{80}P_{10}B_{10}$.

Крупномасштабное применение сверхпроводимости связано с уменьшением массы и габаритов магнитных систем, уменьшением энергетических ватрат при получении магнитных полей высокой напряженности. Термоядерный синтез, МГД-генераторы, индуктивные накопители энергии, генераторы и двигатели переменного и постоянного тока, трансформаторы, ЛЭП постоянного и переменного тока, высокоскоростные поезда, обогащение руд — далеко не полный перечень областей возможного использования сверхпроводящих материалов.

Сверхпроводящие изделия (соленоиды, кабели), изготовленные из сверхпроводящих проводов, имеют более низкие критические токи, чем проволоки, использованные для их изготовления. Это явление получило название деградации. Допустимое значение рабочего тока в сверхпроводящем изделии зависит от потерь энергии в сверхпроводящих проводах. Это гистерезисные потери в сверхпроводящих волокнах; потери, вызванные собственным магнитным полем проволок; вихревые потери в жиле, вызванные индуцированными токами между проволоками и др. Энергетические потери приводят к тепловыделениям в сверхпроводнике, и, если температура поднимается выше критической, в сверхпроводнике возникает участок нормальной фазы, который при недостаточном теплоотводе может привести к переходу всего изделия в нормальное состояние. Для предотвращения разрушения сверхпроводимости вследствие тепловыделений тонкие сверхпроводящие нити располагают в матрице из нормального металла (чаще всего меди), обладающего высокой электрической проводимостью и теплопроводностью. Для больших систем обмотки изготовляют с охлаждающими каналами, обеспечивающими отвод теплоты от проводов через металл-проводник.

15. Сверхпроводящий скрученный многожильный провод из ниобий-титанового сплава НТ-50 [19]

Тип провода	Диаметр провода, мм	Число жил	Диаметр жилы, мкм	Коэффициент заполнения, %	Критический ток в поле 5 Тл при —269 °C, А	Критическая плотность тока $\times 10^{-9}$, А/м² в поле 5 Тл	Шаг скрутки, мм
ПНТ-0,5-37 и т. п.	0,5; 0,7; 0,85; 1,0; 1,2; 1,5	**35**; 55; 61	**40**—200	30—50	60—1300	(1,1—1,5)	25
ПНТ-0,5-24 и т. п.	0,5; 0,7; 0,85; 1,0; 1,2; 1,5	**24**; 37; **48**; 55; 61	30—160	30—50	60—1300	(1,1—1,5)	25
ПНТ-0,45-121	0,45	121	30	50	90—130	(1,1—1,6)	10
ПНТ-0,45-168	0,45	168	25	40	85—110	(1,3—1,6)	10
ПНТ-0,45-199	0,45	199	25	50	100—130	(1,3—1,7)	10
ПНТ-0,5-1045	0,5	1045	10	40	90—140	(1,1—1,7)	5
ПНТ-1,0-1045	1,0	1045	20	40	360—560	(1,1—1,4)	10
ПНТ-0,85-3025	0,85	3025	10	40	250—310	(1,1—1,4)	10
ПНТ-0,33-1	0,33	1	240—250	70	80—100	(1,3—1,7)	—

16. Многожильные сверхпроводящие модули и фольга на основе сплава НТ-50 [19]

Тип изделия	Поперечное сечение, мм	Диаметр сверхпроводящей жилы, мкм	Число жил	Шаг скрутки, мм	Коэффициент заполнения, %	Критический ток в поле 6 Тл при —269 °C, А
МНТ-2/2-456	2×2	40	456	20	15	360
МНТ-3/1-456	3×1	40	456	30	15	390
МНТ-3,5/2-361	3,5×2	80	361	30	30	1480
МНТ-5/2-456	5×2	70	456	50	15	750
МНТ-6/6-1200	6×6	40	1200	50	20	6000
ФНТ-100/0,2	100×0,2	—	—	—	90	$5 \cdot 10^9$ *1, А/м²

*1 Критическая плотность тока без внешнего магнитного поля.

В табл. 15 и 16 приведены основные характеристики типовых многожильных сверхпроводящих проводов и модулей на основе ниобий-титанового сплава НТ-50, выпускаемых серийно в промышленных условиях и изготовляемых методом совместной деформации сверхпроводников с матрицей. Указанные многожильные провода и шины были использованы для изготовления большого числа сверхпроводящих магнитных систем. В табл. 17 приведены характеристики сверхпроводящих шин, полученных методом гальванического сращивания медью

17. Сверхпроводящие электролитические шины на основе сплава НТ-50 [19]

Тип шины	Ширина, мм	Толщина, мм	Диаметр провода, мм	Число сверхпроводников	Коэффициент заполнения, %	Критический ток в поле 5 Тл при —269 °C, А
ШНТ-1,5/1,1 и т. п.	1,5—5,0	1,1	0,5	3—10	15—20	400—1400
ШНТ-2,1/1,3 и т. п.	2,1—7,0	1,3	0,7	3—10	15—20	800—2800
ШНТ-2,6/1,5 и т. п.	2,6—8,5	1,5	0,85	3—10	15—20	1100—4000
ШНТ-3,0/1,6 и т. п.	3,0—10,0	1,6	1,0	3—10	15—20	1600—5600
ШНТ-50/3	50	3,0	0,85	60	10—12	20—24
ШНТ-10/1,2	10	1,2	0,33	30	10—12	800—1200
ШНТ-10/1	10	1,0	0,33	30	10—12	800—1200
ШНТ-10/1,2	10	1,2	0,85	10	30	2600—3100

18. Многожильные сверхпроводящие провода на основе интерметаллических соединений [19]

Тип провода	Сверхпроводящее вещество	Диаметр или сечение, мм	Диаметр жил, мкм	Число жил	Критический ток, А, в поле, Тл				Критическая плотность тока $\times 10^{-8}$, А/м^2, в поле, Тл				
					7,0	8,5	12	16	7,0	8,5	12	16	
ПНО-1-7225	Nb_3Sn	1	5	7225	550	500	240	94	0,7	0,64	0,30	—	0,12
ПВГ-0,24-361	V_3Ga	0,24	5	361	—	28	—	—	—	0,62	—	—	—
ПВГ-0,47-361	V_3Ga	0,47	10	361	—	107	—	—	—	0,6	—	—	—
ПНО-0,16/1,93-6859	Nb_3Sn	0,16×1,93	0,7	6859	—	200	—	—	—	0,65	—	—	0,115
ПНО-1-575	Nb_3Sn	1,0	—	575	1 340	950	340	90	1,7	1,22	0,43	—	0,093
ПНО-1-650	Nb_3Sn	1,0	22	650	750	550	200	73	0,95	0,70	0,25	—	
ШНО-3,5/3,5	Nb_3Sn	3,5×3,5	5	7225×3	1 650	—	720	—	—	—	—	—	
ШНО-30/3	Nb_3Sn	30×3	5	7225×25	12 000	—	6000	—	—	—	—	—	

сверхпроводящих проводов, а в табл. 18 — различных многожильных проводов на основе Nb_3Sn и V_3Ga, полученных по методу «бронзовой технологии».

3. РЕЗИСТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие требования и классификация. Материалом высокого электрического сопротивления (резистивным) называют проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением при нормальных условиях не менее $0{,}3 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

По области применения резистивные материалы разделяют на три основные группы. Первая группа — материалы для резисторов (медные, медно-никелевые, никелевые, никель-хромовые; пленочные, проволочные, углеродистые); вторая группа — материалы для термоэлектродов термопар и удлиняющих проводов (сплавы на основе Ni, Cu—Ni, Pt, Pt—Rh, W—Re; неметаллические порошковые материалы); третья группа — материалы для нагревателей (сплавы на основе Ni—Cr, Fe—Cr—Al, порошковые керамические материалы).

В зависимости от области применения к резистивным материалам предъявляют дополнительные требования, например, по температурному коэффициенту электрического сопротивления $TK\rho$, жаростойкости и др.

Материалы для резисторов (резистивные материалы общего назначения). Основные требования к материалам для резисторов: низкий температурный коэффициент электрического сопротивления, низкая термоэлектродвижущая сила в паре с медью, высокая стабильность электрического сопротивления во времени. Различают сплавы для проволочных, ленточных резисторов (технических и прецизионных) и материалы для непроволочных резисторов (пленочные, углеродистые). Резистивные материалы общего назначения широко используют в приборостроении, электротехнике для изготовления технических резисторов (регулирующие и пусковые реостаты, нагрузочные элементы), для прецизионных резисторов (образцовые сопротивления, различные элементы электроизмерительных приборов, катушки сопротивления, шунты, обмотки потенциометров).

Сплавы для проволочных резисторов. Основными сплавами для технических резисторов являются медно-никелевые (сплав ТБ марки МН16, мельхиор марки МН19, нейзильбер марки МНЦ 15—20); для прецизионных резисторов — сплавы на медной основе (манганин марки МНМц 3—12, МНМцАЖ 3—12—0,3—0,3 и константан марки МНМц 40—1,5) и сплавы на никелевой основе (марки Х20Н80-ВИ, 80ХЮД-ВИ, Х15Н60, ЭП277-ВИ). Для изготовления высокоточных прецизионных сопротивлений используют резистивные сплавы на основе благородных металлов Au, Ag, Pt, Pd; составы сплавов и свойства приведены в [11].

Составы сплавов, сортамент и свойства изделий регламентированы. Химический состав медно-никелевых сплавов определен ГОСТ 492—73, а сплавов на никелевой основе — ГОСТ 10994—74.

Промышленность изготовляет резистивную стандартную проволоку: холоднодеформированную из сплава нейвильбер МНЦ 15—20 диаметром 0,10—5,0 мм в мягком, полутвердом и твердом состоянии (ГОСТ 5220—78); проволоку из сплава манганин МНМц 3—12 в твердом состоянии диаметром 0,020—6,0 мм, а из сплавов МНМц 3—12 и МНМцАЖ 3—12—0,3—0,3 в мягком состоянии диаметром 0,05—6,0 мм (ГОСТ 10155—75); холоднотянутую константановую неизолированную проволоку из сплава МНМц 40—1,5 диаметром 0,020—0,09 мм в твердом состоянии и диаметром 0,09—5,00 в мягком состоянии для работы при температуре не выше 500 °С (ГОСТ 5307—77). Свойства резистивной проволоки из медно-никелевых сплавов приведены в табл. 19, а сплавов на никелевой основе — в табл. 20.

Для малогабаритных резистивных элементов в приборах используют промышленную стандартную проволоку (нантончайшую диаметром 0,009—0,09 мм и тончайшую диаметром 0,09—0,4 мм) из прецизионных никель-хромовых сплавов Х20Н80-ВИ, Н80ХЮД-ВИ, Х20Н80, ЭП277-ВИ. Проволоку поставляют в отожженном состоянии. Сортамент, электрические и механические свойства проволоки в зависимости от диаметра нормированы ГОСТ 8803—77, свойства ее приведены в табл. 20.

Непроволочные резистивные материалы разделяют на пленочные металлические, пленочные на основе оксидов, силицидов, карбидов и неметаллические — углеродистые. Пленочные резистивные материалы используют в микроэлектронике, в микросхемах, интегральных схемах и других устройствах. Непроволочные резисторы широко применяют в автоматике, измерительной и вычислительной технике, в различных областях электротехники. Свойства некоторых пленочных и углеродистых резистивных материалов приведены в табл. 21 и 22.

Материалы для электронагревателей. Общие требования к сплавам для электронагревательных элементов: высокая жаростойкость, высокое электрическое сопротивление в сочетании с низким температурным коэффициентом сопротивления, пластичность для промышленного получения изделий различного сортамента (проката, проволоки, ленты) и нагревателей.

Основные промышленные металлические элементы электрических нагревателей изготовляют из железохромалюминиевых и никель-хромовых прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением марок Х15Ю, Х23Ю5Т, Х23Ю5, Х27Ю5Т, Х15Н60, Х15Н60-Н, Х23Н80-Н (химический состав по ГОСТ 10994—74) и ХН70Ю (химический состав по ГОСТ 5632—72). Механические, физические свойства, живучесть и максимальная рабочая температура сплавов для нагревательных элементов приведены в табл. 23—26 соответственно.

Живучесть прецизионных сплавов с заданным электрическим сопротивлением для электронагревательных элементов определяется по ГОСТ 2419—78 на проволочных образцах диаметром 0,8 мм в условиях частых переменных нагревов до заданной тем-

19. Свойства проволоки из медно-никелевых сплавов

Сплав	Состояние материала	Диаметр проволоки, мм	δ, %	$\sigma_в$, МПа, не менее	$\rho_t \cdot 10^6$, Ом·м
Нейзильбер МНЦ 15—20 (ГОСТ 5220—78)	Мягкое	0,10—0,20 0,25—0,50 0,60—1,0 1,10—5,0	15 20 25 30	343	—
	Полутвердое	0,60—1,00 1,10—5,00	3 5	441	
	Твердое	0,10—0,50 0,60—1,00 1,10—2,00	—	686—1078	
		2,20—5,00		539	
Константан МНМц 40—1,5 (ГОСТ 5307—77)	Мягкое	0,10—0,45 0,50—5,00	15 20	450—650 450—650	0,465 ± ±0,015
	Твердое	0,020—5,00	—	650	0,490 ± ± 0,030
Манганин МНМц 3—12 (ГОСТ 10155—75)	Мягкое	0,05—0,09	10, не менее	—	0,48 ± ± 0,05
	Твердое	0,02—0,04 0,05—6,0	— 9, не более	—	
МНМцАЖ 3—12—0,3—0,3	Мягкое	0,10—6,0	15, не менее	—	0,47 ± ± 0,05

20. Свойства сплавов на никелевой основе для резисторов и тензорезисторов (ГОСТ 8803—77) [24]

Сплав	$\rho_t \cdot 10^6$, Ом·м	$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$	$\sigma_в$, МПа	δ, %	Интервал рабочих температур, °С
ЭП277-ВИ	1,29—1,40	14	>900	12—20	—60—(+150)
Н80ХЮД-ВИ	1,28—1,35	14	900—1000	8—18	—60—(+150)
Х15Н60	1,09—1,12	—	—	12—20	—
Х20Н80, Х20Н80-ВИ	0,98—1,10	—	—	12—20	—
Н63ГХ с Ga	1,7—1,8	15	1100—1300	10—12	+20—(+150)
НМ10ХС	1,5—1,6	14	—	—	—196—(+200)
Х20Н75Ю-ВИ	1,3—1,4	14	850—950	10—18	—70—(+300)
НМ23ХЮ-ИЛ	1,5—1,6	12	>1200	>18	—196—(+430)
НМ20ЮФ с Ge	1,7—1,8	12	>1300	8—15	—269—(+430)
Х20Н73ЮМ-ВИ	1,4—1,5	14	900—1000	10—18	—196—(+430)
НМ10ХЮ с Ge	1,6—1,65	12,5	1100—1250	>18	—196—(+400)
НМ23ЮФ-ВИ	1,5—1,6	12	>1300	8—15	—196—(+430)
Х21Ю5ФМ-ВИ	1,4—1,5	14	>800	8—12	—196—(+480)

21. Свойства пленочных резистивных материалов [11]

Материал пленки	Удельное поверхностное сопротивление ρ_h, Ом	$TK\rho_h \cdot 10^4$, °С$^{-1}$	Допустимая мощность рассеяния $\rho_{доп} \cdot 10^4$, Вт·м^2	Изменение сопротивления за 100 ч $\Delta\rho_h/\rho_h$, %
Металлические пленки				
Хром	200—500	0,6—1,8	2	1,6—3,2
Х20Н80	50—300	—3—(+2)	1	1—1,3
Тантал	10—200	—1—(+1)	2—4	—
Нитрид тантала	10—300	—0,5—(+1)	2—4	⩽0,3
Металлооксидные пленки				
Окисел олова	400—1 000	±5	—	⩽2
Пленки сплавов, содержащих кремний				
РС3001	800—3 000	⩽1	2—5	⩽1
МЛТ-3М	100—20 000	±(1,2—2,4)	1	±0,5

Примечание. $TK\rho_h$ — температурный коэффициент ρ_h.

22. Свойства графита и пиролитического углерода [5]

Материал	$\rho_t \cdot 10^6$, Ом·м	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м^3	$TK\rho \cdot 10^4$	$\alpha \cdot 10^6$
			°С$^{-1}$	
Поликристаллический графит	8	2,26	—10	7,5
Монокристалл графита:				
вдоль базисных плоскостей	0,4	2,24	—9	6,6
поперек базисных плоскостей	100	2,24	—400	2,6
Пиролитический углерод	10—50	2,10	—2	6,5—7,0

пературы и охлаждений до потемнения поверхности. Живучесть определяется временем до перегорания образцов и характеризует жаростойкость материала в условиях частых теплосмен.

Из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением изготовляют: холоднотянутую проволоку диаметром 0,2—7,0 мм; холоднокатаную ленту толщиной 0,1—3,0 мм; круглые калиброванные холоднотянутые профили и теплотянутые профили диаметром 8—10 мм; сортовой горячекатаный прокат круглого сечения диаметром 6—30 мм и теплокатаный прокат квадратного сечения; плющеную ленту толщиной 0,1—1,0 мм и шириной 0,5—5,0 мм (ГОСТ 12766.1—77 — ГОСТ 12766.5—77). Проволоку и ленту поставляют в мягком термически обработанном состоянии. Размеры и предельные отклонения размеров продукции из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением регламентированы ГОСТ 2771—81 — для проволоки, ГОСТ 10234—77 — для плющеной ленты.

Серийно выпускаются нагреватели из керамических матери-

23. Механические свойства прецизионных сплавов для электронагревателей в зависимости от температуры испытания (20, 800, 1200 °С) (ГОСТ 12766.1—77)

Сплав	Термическая обработка	Температура, °С	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %
Х23Ю5, Х23Ю5Т	760 °С, 30 мин, вода	20	645	540	23	72
		800	117	—	58	94
		1200	8,8	—	—	—
Х27Ю5Т		20	663	534	15,9	—
		800	87,1	—	75,9	97,4
		1200	8,8	—	117,7	—
Х15Н60, Х15Н60-Н	950 °С, 30 мин, вода	20	645	264	31,9	59,8
		800	166	127	33,3	50,5
		1200	28,4	—	17,0	32,9
Х20Н80-Н	1200 °С, 20 мин, воздух	20	656	—	45,4	61,0
		800	215	—	70,1	72,5
		1200	22,5	—	101,8	98,0
Х70Ю	1000 °С, 20 мин, вода	10	813	—	37,5	—
		800	392	—	14,0	—
		1200	32,4	—	143,0	—

24. Физические свойства сплавов (ГОСТ 12766.1—77)

Параметр	Сплав: Х15Ю5	Х23Ю5	Х23Ю5Т	Х27Ю5Т	Х15Н60	Х20Н80-Н
$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	7,26	7,25	7,21	7,19	8,2	8,4
$T_{пл}$, °С	1500	1500	1500	1510	1390	1400
Структура	Ферритная				Аустенитная	
Магнитность	Магнитная				Немагнитная	
$\alpha \cdot 10^6$, °С$^{-1}$	16	15	15	15	17	18
λ, Вт/м	16,8	16,8	16,8	16,8	12,6	16,8

алов для печей сопротивления (из карбида кремния и дисилицида молибдена с рабочей температурой до 1500 °С и до 1700 °С соответственно). Типы и размеры электронагревателей из карбида кремния регламентированы ГОСТ 16139—76.

Преимущественное применение находят нагреватели из карбида кремния как более дешевые и термостойкие по сравнению с нагревателями из дисилицида молибдена. Предельные рабочие температуры в различных газовых средах для керамических нагревателей указаны в табл. 27.

25. Живучесть и другие свойства изделий из прецизионных сплавов (ГОСТ 12766.1—77—ГОСТ 12766.5—77)

Сплав	Температура испытания, °С	Живучесть, ч, не менее: номинальная	повышенная	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м	δ, % не менее *1
Х15Ю5	1120	100	—	1,24—1,34	16
Х23Ю5	1200	120	150	1,30—1,40	12
Х23Ю5Т	1200	120	150	1,34—1,45	12
Х27Ю5Т	1300	60	90	1,37—1,47	—
Х15Н60-Н	1120	100	200	1,07—1,17	20
Х20Н80-Н	1175	100	200	1,06—1,17	20
ХН70Ю	1200	80	100	1,25—1,35	15

*1 Для проволочных резисторов диаметром более 6 мм.

26. Максимальные рекомендуемые рабочие температуры (в °С) нагревательных элементов, работающих на воздухе (ГОСТ 12766.1—77)

Сплав	Диаметр или толщина продукции, мм: 0,2	0,4	1,0	3,0	6,0 и более
Х15Ю5	750	850	900	950	1000
Х23Ю5	950	1025	1100	1150	1200
Х23Ю5Т	950	1075	1225	1350	1400
Х27Ю5Т	950	1075	1200	1300	1350
Х15Н60-Н	900	950	1000	1075	1125
Х20Н80-Н	950	1000	1100	1150	1200
ХН70Ю	950	1000	1100	1175	1200

27. Предельные рабочие температуры керамических нагревателей [22]

Газовая среда	Предельная рабочая температура, °С, для нагревателей: SiC	$MoSi_2$	Газовая среда	Предельная рабочая температура, °С, для нагревателей: SiC	$MoSi_2$
Инертные газы (He, Ar, Ne и др.)	1500	1650	Оксид углерода	1300	1500
			Сухой водород	1250	1350
Азот	1470	1500			
Кислород	1400	1700	Влажный водород; точка росы, °С:		
			10	1300	1400
Углекислый газ	1450	1700	20	—	1500
Оксид азота	—	1650	35	—	1600
Диоксид азота	—	1700	Вакуум; $13{,}3 \cdot 10^{-2}$ Па	1200	—
Сернистый ангидрид	—	1600	Вакуум; $6{,}65 \cdot 10^{-2}$ Па	1100	—

Нагреватели из карбида кремния изготовляют следующих типов: сплошные типа КЭН Б, КЭН БС размером соответственно $d = 12 \div 32$ мм, $L_{раб} = 190 \div 560$ мм и $d = 25$ мм, $L_{раб} = 300 \div 400$ мм; трубчатые типа КЭН А, КЭН ВП диаметром 8—30 мм с активной рабочей длиной 200—1200 мм. Нагреватели из $MoSi_2$ изготовляют U-образной формы из-за повышенной ползучести при рабочих температурах и в печи их размещают вертикально. Нагреватели из $MoSi_2$ предназначены для работы в окислительной среде благодаря высокой жаростойкости, которая обеспечивается образованием при нагреве на поверхности непрерывной стекловидной пленки SiO_2. При недостаточном содержании кислорода в рабочей среде защитный слой разрушается. Нагреватели из SiC неработоспособны в среде водорода из-за образования летучих силанов. Нагреватели из SiC и $MoSi_2$ рекомендуется эксплуатировать непрерывно с целью повышения их долговечности. Частые охлаждения способствуют изменению объема в результате превращения при нагреве диоксида кремния, находящегося в порах, и приводят к разрушению нагревателей.

Материалы для термоэлектродов термопар и удлиняющих проводов. Основные требования к материалам для термоэлектродов термопар:

достаточно большая термоэлектродвижущая сила (термоЭДС);

температура плавления выше предельной рабочей температуры не менее чем на 50—150 °С;

коррозионная устойчивость в рабочих средах;

достаточная прочность и пластичность для изготовления проволоки.

Для всех металлических термопар, за исключением имеющих в составе термоэлектродов молибден и вольфрам, образующих при нагреве летучие оксиды, рекомендуемой рабочей атмосферой является окислительная. Термопары, приведенные в табл. 28, могут использоваться в инертной атмосфере и в вакууме. Последние вместе с восстановительной являются рекомендуемой атмосферной средой эксплуатации термопар, содержащих в составе термоэлектродов молибден и вольфрам.

Состав сплавов, свойства и сортамент термоэлектродной проволоки, типы, размеры и свойства термопреобразователей широкого промышленного использования стандартизованы. Химический состав никелевых и медно-никелевых сплавов для термоэлектродов соответствует ГОСТ 492—73. Рабочие температуры термопреобразователей представлены в табл. 28.

Проволоку для термоэлектродов термопар из сплавов хромель Т марки НХ9,5, алюмель марки НМцАК 2—2—1, копель марки МНМц 43—0,5 изготовляют диаметром 0,2—5,0 мм с механическими свойствами, приведенными в табл. 29. Проволоку для термоэлектродов термопар ПР10/0, ПР30/6 изготовляют по ГОСТ 10821—75 из химически чистой платины марки ПлТ и сплавов платины с родием (марок ПР-6, ПР-10, ПР-30) диаметром 0,1—1,0 мм и поставляют в отожженном состоянии. Проволоку из меди марки не ниже М1Е и сплава копель МНМц 34—0,5 для низкотемпературных термопар (от —200 до +100 °С) изготовляют диаметром 0,2—0,5 мм и поставляют в отожженном (мягком) состоянии со свойствами, указанными в табл. 30. Электрическое сопротивление проволоки из сплава копель составляет $(0,47 \pm 0,05)\ 10^{-6}$ Ом·м.

Термопреобразователи термопары для измерения температуры. Для получения информации о температуре в диапазоне $-200 \div 2500$ °С используют термоэлектрические преобразователи с металлическими термопарами типов ТВР, ТПР, ТПП, ТХА, ТХК (по материалу термоэлектродов термопар). Различают термопреобразователи нескольких исполнений: по отношению к внешней среде (обыкновенные, водозащищенные, взрывобезопасные, защищенные от агрессивной среды); по устойчивости к механическим воздействиям (обыкновенные, виброустойчивые); по условиям эксплуатации (кратковременного многократного применения, погружаемые, поверхностные и др.). Диапазоны измеряемых температур

28. Диапазон рабочих температур проволочных термопреобразователей (ГОСТ 3044—84)

Тип термопреобразователя	Марка сплава термоэлектрода и обозначение термопары	Диапазон измеряемой температуры при длительном применении, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С
ТМК	Медь—копель М1—МНМц 43—0,5	—200÷+100	100
ТХК (ГОСТ 1790—77)	Хромель—копель НХ9,5—МНМц 43—0,5	—200÷+600	800
ТХА (ГОСТ 1790—77)	Хромель—алюмель НХ9,5—НМцАК 2—2—1	—200÷+1000	1300
ТПП (ГОСТ 10821—75)	Платинородий—платина ПР10—ПР0 (ПР10/0)	0—1300	1600
ТПР (ГОСТ 10821—75)	Платинородий—платинородий ПР30—ПР6 (ПР30/6)	300—1600	1800
ТВР	Вольфрам—рений ВР5—ВР20 (ВР5/20)	0—2000	2500

Примечание. В обозначении термопары первым (или числителем) указывается положительный термоэлектрод. Указанные ГОСТы нормируют изготовление проволоки соответствующих термоэлектродов.

29. Механические свойства проволоки при температуре 20 ± 5 °С [31] (ГОСТ 1790—77)

Материал	Диаметр проволоки, мм	$\sigma_в$, МПа, не менее	δ, %, не менее
Хромель Т	0,2; 0,3	490	15
	0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0		20
Алюмель	0,2; 0,3	441	20
	0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0		25
Копель	0,2; 0,3	392	15
	0,5; 0,7; 1,2; 1,5; 3,2; 5,0		20
Медь	0,2; 0,3; 0,4; 0,5	200	20

30. Механические свойства проволоки для термоэлектродов при низких температурах [31]

Материал	Температура, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
		МПа		%	
Копель	20	414	135	40	77
	—10	454	126	47	78
	—40	465	144	43	78
	—80	496	152	48	78
	—120	529	165	48	74
	—180	616	181	57	76
Медь	20	215	58	48	76
	—10	219	60	40	79
	—40	231	62	47	77
	—80	264	68	47	74
	—120	282	73	45	70
	—180	400	78	58	77

соответствуют указанным в табл. 28. Устойчивость термопреобразователей к механическим воздействиям определяется ГОСТ 12997—84. У всех термопреобразователей маркируется положительный термоэлектрод.

Кабельные термоэлектрические преобразователи с хромель-алюмелевыми термоэлектродами (типа КТХАС — в стальной оболочке, типа КТХАСп — в оболочке из жаропрочного сплава) используют для измерения температур от —50 до +1300 °С и с хромель-копелевыми термоэлектродами (типа КТХКС) для измерения температур от —50 до +800 °С в газообразных, жидких и твердых средах, не агрессивных к материалу (коррозионно-стойкая сталь или сплав) оболочек термопреобразователя. Типы, конструкции, размеры и основные параметры термопреобразователей соответствуют ГОСТ 23847—79. Кабельные термопреобразователи предназначены для работы в вакууме, при нормальном и избыточном давлении измеряемой среды до 40 МПа. Термоэлектроды однопроволочные из сплавов хромель Т, алюмель или копель изготовляют по ГОСТ 1790—77. Термоэлектроды изолированы друг от друга и от оболочки минеральной изоляцией. У всех кабельных термопреобразователей вывод положительного термоэлектрода закрашивают красной нитроэмалью.

Для измерения низких температур в диапазоне от —259,34 до 0 °С используют платиновые образцовые термометры сопротивления (ГОСТ 12877—76) с чувствительным элементом из платины Пл0.

Температуру в окислительных средах до 2200 °С измеряют с помощью термопар с термоэлектродами из иридия и его сплавов ИР40/0, ИР50/0, ИР60/0 [31].

Для удлиняющих проводов термопар используют проволоку из никелевого и медно-никелевых сплавов. Проволоку изготовляют из сплава хромель К, медно-никелевых сплавов копель, константан и сплава ТП диаметром 0,2—2,5 мм. Отклонения диаметров — по ГОСТ 1791—67. Проволоку поставляют в мягком (отожженном) состоянии с окисленной поверхностью. Основные свойства проволоки для удлиняющих проводов приведены в табл. 31.

Неметаллические высокотемпературные термопары с электродом из тугоплавких соединений. Характеристики термопар приведены в табл. 32. Термопары из

31. Свойства проволоки для удлиняющих проводов термопар (ГОСТ 1791—67)

Сплав	ТермоЭДС в паре с образцом меди при температуре свободного конца проволоки 0 °С и рабочего конца 100 °С, мВ	$\rho_t \cdot 10^6$, Ом·м, при 20 °С	Диаметр проволоки, мм	$\sigma_в$, МПа	δ, %
				не менее	
Хромель К	+2,09	0,67 ± 0,05	0,2; 0,3	490	15
			0,4—2,5		20
Копель	—4,77	0,47 ± 0,02	0,2; 0,3	390	15
			0,4—2,5		20
Константан	—4,10	0,465 ± 0,015	0,2—0,3	390	10
			0,4—2,5		15
ТП	—0,64	0,025 ± 0,003	0,20—0,67	200	20
			0,70—2,50		25

32. Характеристики неметаллических термопар [22]

Термопара	t_{max}, °С	α_T при $t \geqslant 600$ °С, мкВ/°С	Примечания
C/TiC	2500	65	1. α_T — коэффициент термоЭДС.
C/NbC	2500	26	
C/ZrB_2	2000	65	2. В обозначении термопары числитель указывает наружный электрод, знаменатель — внутренний.
ZrB_2/ZrC	2000	9	
$MoSi_2$/WSi_2	1700	8	

33. Свойства сплавов зарубежных фирм для нагревателей [17, 24, 30]

Сплав	Отечественный аналог	t_{max} в воздушной среде, °С	$\rho_t \cdot 10^6$, Ом·м	R_{1000}/R_{20} *	$\sigma_в$, МПа	δ, %, не менее
VDM, Vacuumshmelze (ФРГ)						
Кроникс 80 экстра	Х20Н80-Н	1200	1,09	1,049	635—785	30
Вакхромиум 80	Х20Н80	1250	1,12	—	—	—
Кроникс 70	ХН70Ю	1275	1,16	1,035	700—900	25
Вакхромиум 70	ХН70Ю	1250	1,20	—	—	—
Кронифер 11 экстра	Х15Н60-Н	1200	1,11	1,100	650—750	30
Вакхромиум 60	Х15Н60-Н	1200	1,13	—	—	—

Продолжение табл. 33

Сплав	Отечественный аналог	t_{max} в воздушной среде, °С	$\rho_t \cdot 10^6$, Ом·м	R_{1000}/R_{20} *1	$\sigma_в$, МПа	δ, %, не менее
Кронифер 111 экстра	ХН20ЮС	1150	1,04	1,250	600—750	30
Кронифер 1V экстра	ХН20ЮС	1100	0,95	1,330	600—750	30
Алюхром 0	Х23Ю5Т	1350	1,44	1,035	600—800	12
Алюхром 1	Х27Ю5Т	1300	1,37	1,060	600—800	12
Алюхром W	Х15Ю5	1100	1,25	1,140	600—800	18
Kanthal, Bulten—Kantal (Швеция)						
Никротал 80	Х20Н80-Н	1200	1,09	1,049	635—785	25
Никротал 70	ХН70Ю	1250	1,17	—	—	—
Никротал 60	Х15Н60-Н	1125	1,11	1,110	635—785	25
Никротал 40	ХН20ЮС	1100	1,04	1,230	635—785	25
Никротал 20	ХН20ЮС	1050	0,95	1,320	635—785	25
Кантал А-1 *2	Х23Ю5Т	1375	1,45	1,036	635—835	12
Кантал А *3	Х27Ю5Т	1330	1,39	1,056	635—835	12
Кантал DSD	Х23Ю5	1280	1,35	1,068	635—835	12
Алькротал	Х15Ю5	1050	1,25	1,110	590—685	18

*1 R_{1000}/R_{20} — поправочный коэффициент электрического сопротивления; числа 1000, 20 — температура, °С.

*2 Лента.

*3 Проволока.

тугоплавких соединений широкого распространения не получили, так как требуется градуировка для каждой термопары.

Зарубежные аналоги. Свойства сплавов зарубежных фирм для электронагревателей приведены в табл. 33.

4. МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие требования и классификация. В соответствии с ГОСТ 19693—74 магнитотвердыми называют ферро- и ферримагнитные материалы с коэрцитивной силой по индукции не менее 4 кА/м.

Основными показателями свойств магнитотвердых материалов являются удельная магнитная энергия W, равная половине произведения индукции и напряженности магнитного поля BH, соответствующих заданной точке на кривой размагничивания, и максимальная удельная магнитная энергия $W_{max} = 0{,}5\ (BH)_{max}$. От этого показателя ($W_{max}$) зависит объем магнита, необходимого для создания магнитного поля в заданном воздушном зазоре. Чем больше удельная магнитная энергия, тем меньше объем, а следовательно, и масса магнита. В нормативных документах иногда использована величина $(BH)_{max}$. К основным показателям относят также проницаемость возврата $\mu_в$ — дифференциальную магнитную проницаемость на прямой возврата.

Магнитотвердые материалы должны иметь максимальные значения следующих параметров: коэрцитивной силы H_c, максимальной удельной магнитной энергии W_{max}, остаточной индукции B_r.

Магнитотвердые материалы применяют в станкостроении, автомобилестроении, в электротехнике, приборостроении, радиоэлектронной технике. Их используют для производства машин постоянного тока, для роторов машин, синхронных машин, шаговых двигателей; для элементов с внешней и внутренней памятью; для носителей и аппаратуры магнитной записи и воспроизведения гармонических и импульсных сигналов.

Магнитотвердые материалы классифицируют по составу и основному способу получения на следующие группы: магнитотвердые легированные мартенситные стали; литые магнитотвердые сплавы; деформируемые магнитотвердые сплавы; порошковые магнитотвердые материалы (металлические, ферро- и ферриоксидные, магнитопластические, магнитоэластические); сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов. Табл. 34 позволяет оценить выделенные группы магнитотвердых материалов по диапазону нормированных магнитных параметров.

Легированные мартенситные стали (на основе Fe—Cr, Fe—Cr—W, Fe—Cr—Co и др.) являются наиболее дешевым материалом для постоянных магнитов. Однако они имеют невысокие магнитные свойства, в связи с чем применение их ограничено. В наибольшей степени используют магнитотвердые ферриты и сплавы системы Fe—Al—Ni, Fe—Al—Ni—Co. Эти сплавы имеют хорошие магнитные свойства, но характеризуются высокой твердостью и хрупкостью. Вследствие этого постоянные магниты из них изготовляют литьем или методами порошковой металлургии. Сплавы этой группы, содержащие кобальт, в несколько раз дороже сплавов на бескобальтовой Fe—Al—Ni основе. Широко распространенными материалами для постоянных магнитов являются ферриты.

Магнитотвердая легированная сталь предназначена для изготовления постоянных магнитов неответственного назначения. Легированную магнитотвердую сталь (марки типа Е) изготовляют с содержанием углерода 0,90—1,05 %. Основные легирующие элементы: (2,80—10,0) % Cr, (5,15—16,5) % Co, (5,20—6,20) % W, (1,20—1,70) % Mo, (0,17—0,40) % Si, (0,30—0,60) % Ni. Химический состав, сортамент и свойства (H_{cB}, B_r, HB) изделий нормированы ТУ 14-1-4487—88. Из легированной магнитотвердой стали изготовляют горячекатаные или кованые прутки с диаметром или стороной квадрата до 70 мм включительно и прямоугольные прутки толщиной до 25 мм включительно и шириной до 50 мм включительно. Прутки поставляют в термически обработанном состоянии или без термической обработки. В табл. 35 указаны свойства легированной магнитотвердой стали.

Литые магнитотвердые материалы — это в основном сплавы на основе Fe—Al—Ni, Fe—Al—Ni—Co. Марки сплавов, химический состав, тип кристаллической структуры (равноосная, столбчатая, монокристаллическая), наличие магнитной анизотропии регламентированы ГОСТ 17809—72. Свойства сплавов приведены в табл. 36. Сплавы используют для магнитов измерительных приборов, автоматических и акустических устройств, электрических машин, магнитных муфт, опор, тормозов.

Высококоэрцитивное состояние сплавов обеспечивается выделением при отпуске после закалки сильно высокодисперсной фазы, преимущественно анизотропной. На рис. 4—7 приведены кривые размагничивания некоторых материалов. Прямые на этих рисунках соединяют начало координат с точкой $(BH)_{max}$ (ГОСТ 17809—72).

Деформируемые магнитотвердые сплавы. Предназначены для постоянных магнитов, для активной части роторов гистерезисных электродвигателей, для элементов памяти систем управления автоматизации связи, для носителей магнитной записи информации. Магнитотвердые деформируемые материалы на основе сплавов Fe—Cr—Co предназначены для изготовления постоянных магнитов толщиной не более 50 мм и диаметром не более 100 мм. Материал изготовляют литым (Л), горячекатаным (ГК), холоднокатаным (ХК) и поставляют в виде круглых и квадратных прутков, полос, труб, цилиндров и колец. В зависимости от направленности магнитных свойств

84. Характеристики размагничивания магнитотвердых материалов различных групп *1

Группа	Марка	W_{max}, кДж/м³	B_r, Тл	H_{cB}, кА/м
Легированные стали	ЕХ3	0,595	0,95	4,775
	ЕХ9К15М2	1,035	0,80	11,94
Литые сплавы: Fe—Al—Ni	ЮНД4	3,6	0,50	40
	ЮНД8	5,1	0,60	44
Fe—Al—Ni—Co	ЮНДК15	6,0	0,75	48
	ЮНДК35Т5АА	40	1,05	115
Деформируемые сплавы: Fe—Cr—Co	28Х10К	3,5	0,8	40
	22Х15КА	28	1,5	47
Pt—Co (литой)	ПлК78	39,8—43,8	0,75	270
Порошковые сплавы: Fe—Al—Ni	ММК-1	3,0	0,60	24
	ММК-2	3,5	0,48	39
Fe—Al—Ni—Co	ММК-3	4,0	0,52	44
	ММК-11	16	0,70	128
Феррит бария	4БИ145	2,0	0,17	95
	28БА190	14,0	0,39	185
Феррит строиция	28СА250	14,0	0,39	240
Sm—Co	КС37А	65	0,82	540
Sm, Pr—Co	КСП37А	72,5	0,90	500

*1 Данные приведены для материалов стандартных марок с минимальными и максимальными значениями магнитных параметров W_{max} и H_{cB} среди промышленных стандартизованных сплавов классификационных групп. Свойства сплава Pt—Co не нормированы.

35. Магнитные свойства и твердость термически обработанной стали [24, 33]

Сталь	H_{cB}, А/м	B_r, Тл	НВ, МПа	$(BH)_{max}$, Тл·м/кА	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м	$\sigma_в$, МПа
ЕХ3	4 775	0,95	2290—2850	1,19	0,29	2060
ЕВ6	4 775	1,00	2550—3210	1,31	0,30	2060
ЕХ5К5	7 165	0,85	2690—3410	1,59	0,30	2060
ЕХ9К15М2	11 937	0,80	2850—3410	2,07	0,28	2060

36. Магнитные свойства магнитотвердых литых сплавов на Fe—Al—Ni—Co основе (ГОСТ 17809—72)

Марка сплавов	$(BH)_{max}$, кДж/м³	H_{cB}, кА/м	B_r, Тл	$(B/H) \cdot 10^{-8}$ в точке $(BH)_{max}$, Тл·м/кА
	не менее			
ЮНД4	7,2	40	0,50	12,0—16,0
ЮНД8	10,2	44	0,60	13,0—16,0
ЮНТС	8,0	58	0,43	7,0—10,0
ЮНДК15	12,0	48	0,75	15,5—18,0
ЮНДК18	19,4	55	0,90	15,0—20,0
ЮНДК18С	28,0	44	1,10	22,0—28,0
ЮН13ДК24С	36,0	36	1,30	30,0—33,0
ЮН13ДК24	36,0	40	1,25	25,0—27,5
ЮН14ДК24	36,0	48	1,20	20,0—22,0
ЮН15ДК24	36,0	52	1,15	15,0—17,5
ЮН13ДК25А	56,0	44	1,40	27,5—30,0
ЮН14ДК25А	56,0	52	1,35	24,0—25,0
ЮН13ДК25БА	56,0	48	1,40	26,5—27,5
ЮН14ДК25БА	56,0	58	1,30	21,5—24,0
ЮН15ДК25БА	56,0	62	1,25	16,5—21,5
ЮНДК34Т5	28,0	92	0,75	8,0—11,0
ЮНДК35Т5Б	32,0	96	0,75	8,0—10,0
ЮНДК35Т5	36,0	110	0,75	7,0—8,0
ЮНДК35Т5БА	72,0	110	1,02	8,0—9,0
ЮНДК35Т5АА	80,0	115	1,05	8,0—9,0
ЮНДК38Т7	36,0	135	0,75	4,5—5,5
ЮНДК40Т8	36,0	145	0,70	3,5—4,5
ЮНДК40Т8АА	64,0	145	0,90	4,0—5,0

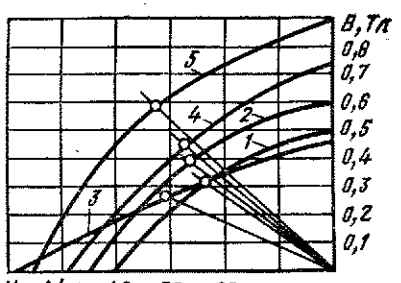


Рис. 4. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — ЮНД4; *2* — ЮНД8; *3* — ЮНТС; *4* — ЮНДК15; *5* — ЮНДК18

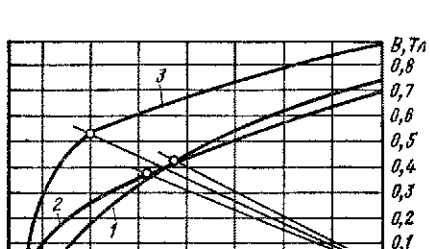


Рис. 5. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — ЮНДК38Т7; *2* — ЮНДК40Т8; *3* — ЮНДК40Т8АА

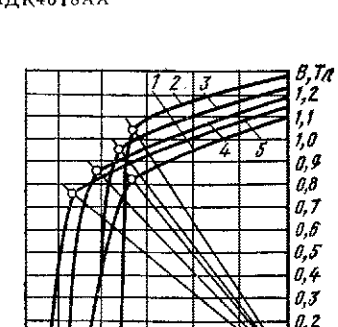


Рис. 6. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — ЮНДК18С; *2* — ЮН13ДК24С; *3* — ЮН13ДК24; *4* — ЮН14ДК24; *5* — ЮН15ДК24

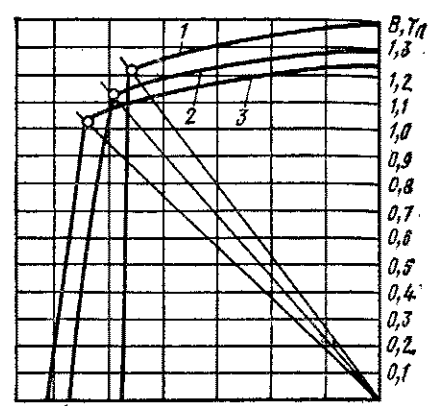


Рис. 7. Кривые размагничивания магнитотвердых сплавов:
1 — ЮН13ДК25БА; *2* — ЮН14ДК25БА; *3* — ЮН15ДК25БА

материалы подразделяют на анизотропные и изотропные. Химический состав сплавов, сортамент и магнитные свойства материалов нормированы ГОСТ 24897—81. Магнитные характеристики материалов приведены в табл. 37, физико-механические — в табл. 38. Высококоэрцитивное состояние Fe—Cr—Co сплавов достигается образованием в результате термической обработки высокодисперсных анизотропных включений сильномагнитной фазы FeCo в слабомагнитной матрице FeCr.

Из прецизионного сплава марки ЭИ708-ВИ изготовляют холоднотянутую проволоку диаметром 0,03 и 0,05 мм, предназначенную для записи и воспроизведения гармонических сигналов, контроля магнитной записи и головок. Химический состав сплава марки ЭИ708-ВИ нормирован ГОСТ 10994—74, рабочие свойства проволоки — ГОСТ 18834—83. Проволока обладает коррозионной стойкостью в условиях морского тумана при влажности 100 %, температуре 40 °С в течение 56 суток. Рабочая температура от —60 до +70 °С. Магнитные свойства: H_c не менее $(47{,}7\cdot10^3 \div 79{,}5\cdot10^3)$ А/м, $B_r = (0{,}2 \div 0{,}5)$ Тл. Механические

37. Магнитные характеристики магнитотвердых деформируемых сплавов (ГОСТ 24897—81)

Сплав	$(BH)_{max}$, кДж/м³	H_{cB}, кА/м	B_r, Тл	$(B/H)\cdot10^{-3}$ в точке $(BH)_{max}$, Тл·м/кА	$\mu_в$
28Х10К	7	20	0,8	30—40	5—8
28Х10КА	26	38	1,1	25—30	3,5—5
25Х15К	10	24	0,9	30—40	5—8
25Х15КА	32	40	1,2	25—30	3,5—5
23Х15К5ФА	38	42	1,25	25—30	3,5—4,5
30Х23К	12	50	0,75	15—20	4—5
30Х23КА	30	55	1,00	15—20	3—4
22Х15КА	56	47	1,5	28—33	3—4
23Х15КА	34	40	1,23	30—35	3,5—5
25Х12К2БА	35	40	1,25	28—33	3,5—5
23Х14К3ФА	36	41	1,27	30—35	3,5—5
32Х12КДТ	24	48	1,05	18—22	3—4,5

38. Физико-механические свойства Fe—Cr—Co сплавов в высококоэрцитивном состоянии (ГОСТ 24897—81)

Состояние материала	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	HRC
	МПа		%		
Литой	196	490	1	3	32—41
Горячекатаный, холоднокатаный	785—883	569—686	3—5	7	32—41

Примечание. Плотность сплавов $(7{,}65 \div 7{,}70)\cdot10^3$ кг/м³.

свойства: $\sigma_в$ — не менее 1960 МПа; δ — не более 2 %.

Порошковые магнитотвердые материалы. Спеканием порошков получают дисперсионно-твердеющие сплавы системы Fe—Al—Ni—Co. Спекание магнитов, формованных из шихты этих сплавов, проводят в вакууме при температуре 1200—1300 °С в течение 1—5 ч; остаточная пористость при этом составляет 3—7 % и приводит к снижению параметра W_{max}. Изготовление беспористых порошковых магнитов методом горячего прессования обеспечивает повышение магнитных свойств.

Спеченные магниты имеют мелковернистую структуру, однородные магнитные свойства и превышают по прочности литые. Порошковая металлургия обеспечивает возможность изготовления магнитов различных типоразмеров. Недостатком этого метода является повышенная стоимость исходных порошков.

Порошковые магниты используют в узлах, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. Магнитные и механические свойства порошковых металлических сплавов приведены в табл. 39.

В табл. 40 представлены свойства магнитотвердых ферритов. Ферриты используют в качестве постоянных магнитов в электротехнике, радиотехнике, станкостроении, автомобилестро-

39. Магнитные и механические свойства порошковых магнитных сплавов Fe—Al—Ni—Co [29]

Магнит		B_r, Тл	H_c, кА/м	W_{max}, кДж/м³	$\sigma_{сж}$	$\sigma_и$
литой	порошковый				МПа	
		не менее				
ЮН	ММК-1	0,60	24	3,0	2000	400
ЮНД4	ММК-2	0,48	39	3,5	2000	400
ЮНДК3	ММК-3	0,52	44	4,0	1700	300
ЮНДК12А	ММК-4	0,76	52	7,5	1700	300
ЮНДК12Б	ММК-5	0,60	44	4,7	1700	300
ЮНДК15	ММК-6	0,65	44	5,0	1700	300
ЮНДК24Т1	ММК-7	1,2	54	14	1200	250
ЮНДК23	ММК-8	1,10	40	14	1200	250
ЮНДК34Т5А	ММК-9	0,75	80	12	1000	200
ЮНДК34Т5Б	ММК-10	0,80	100	15	1000	200
ЮНДК38Т7	ММК-11	0,70	128	16	1000	200

40. Магнитные свойства магнитотвердых ферритов [23]

Феррит	B_r, Тл	H_{cB}	H_{cJ}	W_{max}, кДж/м³	Феррит	B_r, Тл	H_{cB}	H_{cJ}	W_{max}, кДж/м³
		кА/м					кА/м		
4БИ145	0,17	95	145	2,0	25БА170	0,38	165	170	12,5
6БИ240	0,19	125	240	3,0	28БА170	0,39	165	170	14,0
7БИ215	0,21	125	215	3,5	28БА190	0,39	185	190	14,0
7БИ300	0,20	135	300	3,5	21СА320	0,34	240	320	10,5
9БА205	0,24	135	205	4,5	24СА200	0,37	195	220	12,0
14БА255	0,29	185	255	7,0	27СА220	0,38	215	220	13,5
15БА300	0,30	200	300	7,5	28СА250	0,39	240	250	14,0
16БА190	0,30	185	190	8,0	22РА220	0,36	215	220	11,0
18БА220	0,33	210	220	9,0	25РА150	0,38	145	150	12,5
18БА300	0,32	220	300	9,0	25РА170	0,38	165	170	12,5
19БА260	0,33	225	260	9,5	25РА180	0,39	175	180	12,5
22БА220	0,36	215	220	11,0	28РА180	0,40	185	190	14,0
24БА210	0,37	205	210	12,0	11КА135	0,24	130	135	5,5
25БА150	0,38	145	150	12,5	14КА135	0,28	130	135	7,0

Примечание. В обозначении марки ферритов цифры, стоящие перед буквами, соответствуют значению $(BH)_{max} = 2W_{max}$. Первая буква после цифр Б, С, К, Р означает бариевый, стронциевый, кобальтовый и содержащий редкоземельные добавки феррит соответственно; вторая буква означает: И — изотропный, А — анизотропный. Цифры после букв соответствуют значению H_{cJ}.

ения, для создания различного рода технической аппаратуры — магнитных сепараторов, муфт, вентилей. Недостатком ферритов является существенная зависимость характеристик от температуры и недостаточная механическая прочность. Их преимущества по сравнению с металлическими материалами — более высокая коэрцитивная сила, низкая плотность, высокое электрическое сопротивление. Оксидные магниты дешевле и не содержат дефицитных элементов. Наибольшее практическое использование имеют гексаферриты бария и ферриты кобальта. В феррите кобальта со структурой шпинели после термической обработки в магнитном поле формируется одноосевая анизотропия, что и является причиной его высокой коэрцитивной силы. Свойства ферритов регламентируются ГОСТ 24063—80.

Металлопластические магниты изготовляют смешением металлических порошков, например, из сплавов Fe—Al—Ni—Co с диэлектриком, формуют прессованием и обжигают при температуре 120—180 °С. Механические свойства металлопластических магнитов в несколько раз выше, чем у литых, магнитные свойства пониженные.

Металлоэластичные магниты изготовляют на резиновой основе в виде шнура, лент, полос. В качестве наполнителя используют феррит бария, сплавы кобальта с РЗМ, другие высококоэрцитивные порошки. Ориентировочные свойства эластичных магнитов с наполнителем из феррита бария следующие [23]: $B_r = 0{,}245$ Тл, $H_{cB} = 33$ кА/м, $H_{cJ} = 195$ кА/м, $W_{max} = 2$ кДж/м³, $\rho_1 = 10^4$ Ом·м.

Сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов. Магнитотвердые материалы изготовляют на основе сплавов благородных металлов: Ag—Mn—Al, Pt—Fe, Pt—Co, Pt—Pd—Co. Большая коэрцитивная сила сплавов на основе благородных металлов обусловливает высокую стабильность магнитов из этих материалов. Используют сплавы только для постоянных магнитов очень малых размеров, в основном в виде тонких пластин, для точных приборов. Высокая стоимость ограничивает применение этих сплавов.

41. Сортамент сплава ПлК-78 [24]

Вид продукции	Поперечные размеры, мм
Проволока	∅ 0,4—3,2
Полосы	(0,5÷3,7)×(10÷100)
Прутки	∅ 6—20
Трубы	∅ 30×5

Сортамент литого сплава системы Pt—Co марки ПлК-78, содержащего 76,5—79,0 % Pt (остальное кобальт), представлен в табл. 41. Сортамент и химический состав сплава нормируются техническими условиями. Сплав поставляют без термической обработки на высококоэрцитивное состояние. Рекомендуемые режимы термической обработки приведены в [24].

При изготовлении магнитов широко используют порошковую металлургию. Порошковый сплав Pt—Co подвергают холодной деформации; после закалки сплав легко обрабатывается резанием. Рабочая температура для порошковых Pt—Co материалов до 350 °С. Высококоэрцитивное состояние сплавов Pt—Co возникает в результате появления упорядоченной тетрагональной фазы с высокой энергией магнитной анизотропии. Физические свойства Pt—Co сплавов в высококоэрцитивном состоянии приведены в табл. 42.

42. Свойства сплавов Pt—Co

Свойства	Литой сплав [24]	Порошковый сплав [22]
B_r, Тл	0,7—0,8	0,7
H_{cB}, кА/м	225—310	280
$(BH)_{max}$, Тл·м/кА	79,6—87,6	76
H_{cJ}, кА/м	400	—
B_r/B_{max}	0,5	—
$\mu_в$	1,2	—
θ, °С	—	520—530
$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	15,0—16,0	14,8—15,2

43. Магнитные свойства спеченных магнитотвердых сплавов Со-РЗМ (ГОСТ 21559—76)

Марка	B_r, Тл	H_{cB}, кА/м	H_{cJ}, кА/м	$(BH)_{max}$, кДж/м³
	не менее			
КС37	0,77	540	1300	110
КС37А	0,82	560	1000	130
КСП37	0,85	520	800	130
КСП37А	0,90	500	640	145

Методами порошковой металлургии изготовляют сплавы на основе кобальта с редкоземельными элементами марок КС37, КС37А (36,0—38,5 % самария) и марок КСП37, КСП37А (36,0—38,5 % самария с празеодимом). Основные магнитные свойства этих сплавов приведены в табл. 43.

5. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие требования и классификация. Магнитомягким называют магнитный материал с коэрцитивной силой по индукции не более 4 кА/м (ГОСТ 19693—74). Магнитомягкие материалы имеют высокое значение начальной магнитной проницаемости, способны намагничиваться до насыщения и в слабых полях. Используются в основном для изготовления магнитопроводов переменного магнитного поля. Применяются в электромашиностроении, трансформаторостроении, в электротехнической и радиотехнической промышленности, измерительной технике, системах автоматики и телемеханики, вычислительной технике. К магнитомягким материалам относят ферромагнитное особо чистое железо, низкоуглеродистые электротехнические стали (нелегированные и кремнистые), прецизионные низкокоэрцитивные сплавы на железной и железоникелевой основе, порошковые ферро- и ферримагнитные и композиционные магнитодиэлектрические материалы, которые классифицируют по основному нормируемому магнитному параметру.

Низкоуглеродистые электротехнические нелегированные стали. Технически чистым называют железо с суммарным содержанием примесей до 0,08—0,1 %, в том числе углерода до 0,05 %. Железо имеет малое удельное электрическое сопротивление, обладает повышенными потерями на вихревые токи, в связи с чем применение его ограниченно в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока (полюсные наконечники, магнитопроводы реле). Технически чистое железо является основным компонентом большинства магнитных материалов. Магнитные свойства железа (табл. 44) определяются количеством и составом примесей, наиболее вредными из которых являются углерод, кислород, сера, азот и водород.

Особо чистое железо получают двумя методами: электролизом раствора сернокислого или хлористого железа и термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$. Полученное железо называют соответственно электролитическим и карбонильным. Карбонильное железо используют в виде порошка в качестве ферромагнитной фазы высокочастотных магнитодиэлектриков и в виде листов различной толщины.

Электротехническую нелегированную сталь изготовляют в виде горячекатаных листов (толщиной 2,0—3,9 мм), холоднокатаных листов (толщиной 0,5—3,9 мм, шириной 500—1250 мм) и лент (толщиной 0,1—2,0 мм) по ГОСТ 3836—83. Содержание основных элементов в стали не превышает: 0,04 % С, 0,3 % Si; 0,3 % Mn; остальное железо. Сталь применяют в магнитных цепях электрических аппаратов и приборов. Магнитные свойства стали (табл. 45) определяют на термически обработанных образцах: максимальная температура отжига 950 °С, максимальное время охлаждения до 600 °С, 10 ч. Старение (увеличение коэрцитивной силы образца) стали марок 11832, 21832, 11864, 21864, 11880, 11848, 21880, 11895, 21895 не превышает 6 А/м.

44. Состав и магнитные свойства железа [5]

Железо	Содержание примесей, %		Магнитные свойства		
	Углерод	Кислород	$\mu_н$	μ_{max}	H_c, А/м
Технически чистое	0,020	0,060	250	7 000	64,0
Электролитическое	0,020	0,010	600	15 000	28,0
Карбонильное	0,005	0,005	3 300	21 000	6,4
Переплавленное в вакууме электролитическое	0,010	—	—	61 000	7,2
Обработанное в водороде	0,005	0,003	6 000	200 000	3,2
Обработанное в водороде особо тщательно	—	—	20 000	340 000	2,4
Монокристалл чистейшего железа, обработанный в водороде особо тщательно	—	—	—	1 430 000	0,8

Обозначения: $\mu_н$ — относительная начальная магнитная проницаемость; μ_{max} — относительная максимальная магнитная проницаемость; H_c — коэрцитивная сила.

Холоднокатаную ленту и листовую сталь изготовляют без термической обработки (нагартованными). Горячекатаную сталь изготовляют с травленой поверхностью.

Сортовую электротехническую нелегированную сталь изготовляют следующих марок: 10864, 20864, 10880, 20880, 10895, 20895, 11864, 21864, 11880, 21880, 11895, 21895 (ГОСТ 11036—75). Сталь поставляют без термической обработки. В обозначении марки первая цифра указывает класс по виду обработки давлением (1 — горячекатаная и кованая; 2 — калиброванная). Остальные четыре цифры аналогичны обозначениям для марок тонколистовой электротехнической нелегированной стали (указаны в примечании к табл. 45). Магнитные свойства стали, определенные на термически обработанных образцах, приведены в табл. 46. Коэффициент старения стали марок 11880, 21880, 11895, 21895 не более 10 %. Механические свойства приведены в табл. 47.

Электротехническая кремнистая сталь (ГОСТ 21427.0—75) классифицируется по следующим параметрам: по структурному состоянию — первая цифра в обозначении марки (1 — горячекатаная

45. Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 3836—83)

Сталь	Толщина, мм, включительно	H_C, А/м, не более	μ_{max}
10895, 20895, 11895, 21895	0,1—3,9	95	3000
10880, 20880, 11880, 21880	0,1—3,9	80	4000
10864, 20864, 11864, 21864	0,1—3,9	64	4500
10848, 20848, 11848, 21848	0,7—3,9	48	4800
10832, 20832, 11832, 21832	0,7—3,9	32	5000

Примечания: 1. Магнитная индукция при напряженности магнитного поля: 1,38 Тл при 500 А/м; 1,62 Тл при 2500 А/м; 1,71 Тл при 5000 А/м; 1,81 Тл при 10 000 А/м.

2. В обозначении марки (пятизначное число) цифры означают: первая цифра — класс по структурному состоянию и виду прокатки (1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная); вторая цифра — тип по содержанию кремния (0 — сталь нелегированная без нормирования коэффициента старения; 1 — сталь нелегированная с нормированным коэффициентом старения; третья цифра — группу по основной нормируемой характеристике (8— коэрцитивная сила); четвертая и пятая цифры — количественное значение основной нормируемой характеристики (для восьмой группы — значение коэрцитивной силы в целых единицах А/м).

46. Магнитные свойства сортовой электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 11036—75)

Сталь	H_c в разомкнутой цепи, А/м, не более	Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, в замкнутой цепи, А/м		
		500	1000	2500
10895, 20895, 11895, 21895	95	1,32	1,45	1,54
10880, 20880, 11880, 21880	80	1,36	1,47	1,57
10864, 20864, 11864, 21864	64	1,40	1,50	1,60

47. Механические свойства сортовой электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 11036—75)

Сталь	σ_B, МПа, не менее	δ, %	ψ, %	HB, МПа, не более
Горячекатаная (на термически обработанных образцах)	270	24	60	1310
Калиброванная	350	4	—	—

изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой); по содержанию кремния — вторая цифра в марке (содержание кремния в %: цифры 0 — до 0,04; 1 — св. 0,4 до 0,8 включ.; 2 — св. 0,8 до 1,8 включ.; 3 — св. 1,8 до 2,8 включ.; 4 — св. 2,8 до 3,8 включ.; 5 — св. 3,8 до 4,8 включ.); по основной нормируемой характеристике — третья цифра в марке (0 — удельные потери p при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц: 1 — $p_{1,5/50}$; 2 — $p_{1,0/400}$; 6 — магнитная индукция B в слабых магнитных полях при напряженности 0,4 А/м; 7 — B_{10}). Вместе первые три цифры означают тип стали, четвертая — порядковый номер типа стали.

Сталь предназначена для магнитных цепей электрических машин, трансформаторов, аппаратов и приборов.

Промышленность выпускает холоднокатаную электротехническую тонколистовую анизотропную сталь (ГОСТ 21427.1—83), изотропную сталь (ГОСТ 21427.2—83) и холоднокатаную стальную анизотропную ленту (ГОСТ 21427.4—78). Холоднокатаную анизотропную сталь изготовляют в виде рулонов и листов толщиной 0,27—0,80 мм и лент толщиной 0,05—0,20 мм и 0,27—0,50 мм. Тонколистовую сталь и ленты поставляют в термически обработанном состоянии (за исключением нелегированной стали) с электроизоляционным термостойким покрытием и без покрытия. Магнитные свойства стали соответствуют указанным в табл. 48 и 49.

Электрическое сопротивление холоднокатаной анизотропной электротехнической стали составляет $(0{,}45 \div 0{,}50)\ 10^{-6}$ Ом·м.

Прецизионные сплавы. Прецизионные магнитомягкие сплавы классифицируют на восемь групп (ГОСТ 10160—75), из них семь групп — классы по основному магнитному параметру, восьмая группа — коррозионно-стойкие сплавы. В табл. 50 приведены свойства прецизионных магнитомягких сплавов. Химический состав сплавов соответствует ГОСТ 10994—74. Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов приведены в табл. 51—57 по классификационным группам и в табл. 58 — для сплавов на основе Fe—Al—Si.

Ферримагнитные материалы. Низкокоэрцитивные ($H_c < 4$ кА/м) ферриты — оксидные ферримагнетики делят на четыре класса: 1) магнитомягкие ферриты никель-цинковой и марганец-цинковой систем для радиочастот; 2) ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ); 3) магнитострикционные ферриты; 4) сверхвысокочастотные ферриты (СВЧ).

Ферриты изготовляют методами порошковой металлургии по технологии, включающей операции синтезирования ферритового порошка из исходных компонентов (оксидов, солей), формование прессовок (заготовок) и высокотемпературное спекание. Особовысокоплотные ферриты с регулируемым размером зерна изготовляют с использованием метода горячего прессования.

48. Свойства электротехнической холоднокатаной изотропной тонколистовой стали при толщине листа 0,5 мм

Сталь	Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, А/м			$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м
	$p_{1,0/50}$	$p_{1,5/50}$	1000	2500	10 000	
2011	3,5	8,0	1,49	1,60	1,80	0,14
2012	2,9	6,5	1,50	1,62	1,82	0,14
2013	2,5	5,6	1,54	1,65	1,85	0,14
2014	2,2	5,0	1,52	1,62	1,82	0,14
2111	3,5	8,0	1,46	1,58	1,78	0,17
2112	2,6	6,0	1,46	1,60	1,77	0,17
2211	2,6	5,8	1,40	1,56	1,76	0,25
2212	2,2	5,0	1,42	1,60	1,77	0,25
2311	1,9	4,4	1,38	1,54	1,74	0,40
2312	1,75	4,0	1,40	1,56	1,74	0,40
2411	1,6	3,6	1,37	1,49	1,73	0,50
2412	1,3	3,1	1,35	1,50	1,70	0,50
2413	—	2,9	1,35	1,50	1,70	0,50

49. Свойства электротехнической холоднокатаной анизотропной стали

Сталь	Удельные магнитные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, А/м		
	$p_{1,5/50}$	$p_{1,7/50}$	$p_{1,5/400}$	100	400	2500
Тонколистовая сталь (ГОСТ 21427.1—83) (для листа толщиной 0,35 мм)						
3411	1,75	—	—	—	—	1,75
3412	1,50	—	—	—	—	1,80
3413	1,30	—	—	1,58	—	1,85
3414	1,10	—	—	1,60	—	1,80
3415	1,03	—	—	1,61	—	1,90
3404	—	1,60	—	1,60	—	—
3405	—	1,50	—	1,61	—	—
3406	—	1,43	—	1,62	—	—
3407	—	1,36	—	1,68	—	—
3408	—	1,30	—	1,71	—	—
Стальная лента (ГОСТ 21427.4—78) (для ленты толщиной 0,15 мм)						
3421	—	—	23,0	—	1,30	1,70
3422	—	—	20,0	—	1,40	1,75
3423	—	—	19,0	—	1,55	1,82
3424	—	—	18,0	—	1,55	1,82
3425	—	—	17,0	—	1,65	1,82

50. Свойства и другие параметры прецизионных магнитомягких сплавов (ГОСТ 10160—75)

Сплав	*HB*	$\sigma_в$	$\sigma_т$	*E*, ГПа	δ	ψ	θ, °С	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м
	МПа				%			
Группа I. Сплавы с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых полях								
79НМ	2100/1200	1050/500	1000/150	210	3/50	—	430	0,55
80НХС	2400/1300	950/550	900/150	—	4/40	15	330	0,62
83НФ	—	950/550	—/150	220	—	—	360	0,70
81НМА	2600/1600	1300/650	1250/250	210	2/50	—	260	0,80
Группа II. Сплавы с высокой магнитной проницаемостью и повышенным удельным электрическим сопротивлением								
50НХС	1900/1250	900/500	850/150	—	2/40	—	360	0,90
Группа III. Сплавы с повышенной магнитной проницаемостью и повышенной индукцией технического насыщения								
45Н	1700/1300	750/—	750/—	200	3/—	15/—	450	0,54
50Н	1700/1300	800/450	700/150	160	3/35	15/60	500	0,45
Группа IV. Сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса (обладают анизотропией магнитных свойств)								
50НП	1700/1300	800/450	700/150	160	3/35	15/60	500	0,45
68НМП	2300/1200	950/550	—/150	—	3/50	5/—	580	0,45
34НКМП	1550/1300	950/550	900/—	—	4/40	5/40	580	0,50
35НКХСП	1700/1300	900/500	900/150	170	4/40	—	560	0,60
40НКМП	—/1000	1000/550	1000/150	180	4/50	—	580	0,55
65НП	2000/1300	900/550	900/150	190	3/40	—	600	0,25
Группа V. Сплавы с высокой магнитной индукцией технического насыщения								
27КХ	HRC 40/HRB 90	1100/600	—/300	220	2/20	—	940	0,20
49КФ, 49К2ФА, 49К2Ф	HRC 35/HRB 90	1350/500	—/350	220	1/1	—	960	0,40
Группа VI. Сплавы с низкой остаточной магнитной индукцией								
47НК	1600/1300	900/500	—/150	200	3/40	—	700	0,20
47НКХ	—	900/500	—	—	3/35	—	600	0,48
64Н	2000/1300	900/550	900/150	190	3/40	10/—	600	0,20
Группа VII. Сплавы с высокой магнитной проницаемостью при однополярном намагничивании								
78Н3М	2100/1200	1050/500	1000/150	210	3/50	—	460	0,50
Группа VIII. Сплавы с высокой коррозионной стойкостью								
16Х	1850/—	400/250	—/200	220	5/25	—/65	680	0,44
36КНМ	1700/—	—/500	—/250	—	—/45	—/70	570	0,48

Примечание. В числителе приведены свойства сплавов до термической обработки, в знаменателе — после нее.

51. Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов I группы марок 79НМ и 80НХС (ГОСТ 10160—75)

Толщина или диаметр, мм	Сплав 79НМ			Сплав 80НХС		
	$\mu_н$	μ_{max}	H_c, А/м, не более	$\mu_н$	μ_{max}	H_c, А/м, не более
	не менее			не менее		
Холоднокатаные ленты и листы (класс 1)						
0,005	7 000	30 000	8,0	8 000	30 000	8,0
0,01	14 000	60 000	5,6	14 000	50 000	5,6
0,02	16 000	70 000	4,0	18 000	70 000	4,0
0,05; 0,08	16 000	90 000	3,2	20 000	90 000	3,2
0,10; 0,15	20 000	120 000	2,4	22 000	120 000	2,4
0,20	22 000	130 000	1,6	28 000	130 000	1,6
0,35; 0,5	25 000	150 000	1,6	35 000	150 000	1,2
1,0	25 000	150 000	1,6	30 000	170 000	1,0
1,5	22 000	130 000	1,6	25 000	150 000	1,2
2,0; 2,5	22 000	130 000	1,6	25 000	150 000	1,2
Горячекатаные листы (класс 1)						
3—22	20 000	80 000	3,2	20 000	70 000	3,2
Прутки						
8—100	20 000	80 000	3,2	—	—	—

52. Магнитные свойства прецизионных магнитомягких сплавов II группы марки 50НХС и III группы марки 50Н (ГОСТ 10160—75)

Толщина или диаметр	Сплав 50НХС			Сплав 50Н		
	$\mu_н$	μ_{max}	H_c, А/м, не более	$\mu_н$	μ_{max}	H_c, А/м, не более
	не менее			не менее		
Холоднокатаные ленты (класс 1)						
0,005	—	—	—	1000	8 000	56
0,01	—	—	—	1300	10 000	40
0,02	—	—	—	1500	15 000	20
0,05; 0,08	2000	20 000	20	2000	20 000	16
0,10; 0,15	2300	25 000	16	2500	25 000	13
0,20	2300	30 000	12	3000	28 000	10
0,35; 0,5	2600	35 000	10	3200	30 000	8
1,0	3000	30 000	12	3000	20 000	10
Горячекатаные листы (класс 1)						
3—22	2500	20 000	24	—	—	—
Прутки						
8—100	2500	20 000	24	—	—	—

53. Магнитные свойства некоторых сплавов IV группы (ГОСТ 10160—75)

Толщина или диаметр, мм	B_r/B_{800}	μ_{max}	H_c, А/м, не более	B_r/B_{800}	μ_{max}	H_c, А/м, не более
	не менее			не менее		
Холоднокатаные ленты (класс 1)						
	Сплав 50НП			*Сплав 34НКМП*		
0,005	0,80	15 000	40	0,90	15 000	80
0,01	0,83	20 000	32	0,92	35 000	24
0,02	0,85	40 000	20	0,90	40 000	16
0,05	0,85	40 000	18	0,87	60 000	12
0,1	0,85	40 000	18	0,85	100 000	8
0,2	—	—	—	0,85	120 000	6,4
0,35; 0,5	—	—	—	0,85	120 000	6,4
	Сплав 65НП			*Сплав 40НКМ*		
0,01	—	—	—	0,93	100 000	6,4
0,02	0,90	70 000	6,4	0,93	200 000	4,0
0,05	0,90	100 000	3,2	0,92	300 000	3,2
0,1	0,90	200 000	2,8	0,93	400 000	2,4
0,2	0,90	250 000	2,4	—	—	—

Обозначение. B_r/B_{800} — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса при $H_c = 800$ А/м.

54. Магнитные свойства прецизионных сплавов V группы (ГОСТ 10160—75)

Сплав	Толщина или диаметр, мм	B, Тл, в полях, А/м		H_c, А/м, не более
		2500	15 000	
		не менее		
Холоднокатаная лента				
27КХ	0,20; 0,35; 0,70	1,80	2,15	—
49К2Ф	0,20	—	2,25	160
49К2ФА	0,10	2,20	—	140
Прутки и поковки				
27КХ	30—100	1,75	2,05	—
49КФ	10—80	1,90	2,10	160

55. Магнитные свойства прецизионных сплавов VI группы (холоднокатаные ленты) (ГОСТ 10160—75)

Сплав	Толщина, мм	$\mu_н$, не менее	$\mu_{max}/\mu_н$	B_r/B_{800}	$TK\mu$,*1 % · (°C)$^{-1}$
			не более		
47НК	0,01; 0,02; 0,1	900	1,15	0,05	0,06
47НКХ	0,02; 0,1	1500	1,20	0,05	0,03
64Н	0,01; 0,02; 0,1	2000	1,20	0,07	0,06

*1 $TK\mu$ для интервала температур от —60 до +120 °С.

56. Магнитные свойства прецизионных сплавов VII группы (холоднокатаные ленты) (ГОСТ 10160—75)

Сплав	Толщина, мм	B_{800}, Тл, не менее	B_r/B_{800}, не более	Импульсная проницаемость в поле, А/м	
				20	80
79НМ3	0,005	0,8	0,45	5000	—
	0,1	0,8	0,30	7000	—
	0,02	0,08	0,25	8000	—
68НМ	0,02	1,15	0,2	—	6000

Примечание. Температурный коэффициент импульсной проницаемости в интервале температур от —60 до +60 °С, для сталей 79НМ3 и 68НМ составляет 0,25, % · (°С)$^{-1}$.

57. Магнитные свойства прецизионных сплавов VIII группы [24]

Сплав	μ_{max}	B_{100}	B_{2500}	B_{10000}	H_c, А/м
		Тл			
16Х	7 000—15 000	0,6—1,2	1,2—1,45	1,45—1,65	12—64
36КНМ	4 500—6 000	1,3	1,45	—	40—65

Примечание. Цифровой индекс при B указывает напряженность магнитного поля в А/м.

58. Магнитные свойства сплавов на основе Fe—Al—Si [23, 24]

Сплав	$\mu_н$	μ_{max}	H_c, А/м
Альсифер 0,6 Si + 5,4 Al (остальное Fe)	35 400	117 000	1,76
Промышленный альсифер	6000—7000 (после отжига)	—	—
Сплавы альфенол:			
12Ю	1 000	—	24
12Ю-ВИ	10 000	—	—
16Ю-ВИ	5500—8000	40 000—50 000	—

Основные области применения ферритов — радиоэлектронная техника, вычислительная техника, техника связи, приборостроение.

По технологии изготовления, эксплуатационным характеристикам и экономическим показателям ферриты имеют преимущества перед металлическими сплавами. Высокое электрическое сопротивление [$(1 \div 1) \cdot 10^{10}$ Ом·м] обусловливает успешное их использование в полях высокой частоты. Физико-механические свойства в сочетании с технологической возможностью получения структуры с заданным кристаллическим зерном обеспечивают высокую износостойкость ферритов в контакте с абразивным материалом, в частности, при магнитной записи информации.

Промышленность изготовляет ферритовые сердечники кольцевые, трубчатые, дисковые, стержневые, подстроечные, Ш-, П-, Е-, Г-, О-, П-образные, сложной конфигурации, для магнитных головок.

Магнитомягкие ферриты для радиочастот по назначению и магнитным свойствам классифицируют на десять групп [18]. В табл. 59 в соответствии с классификацией приведены плотность и электромагнитные свойства ферритов промышленных марок никель-цинковой (группы марок НН, НТ, ВН, ННС) и марганец-цинковой (группы НМ, МТ, НМС) систем семи групп. Восьмая группа объединяет ферриты для датчиков температуры с заданной точкой Кюри. Эта группа включает ферриты марок 1200НН, 1200НН1, 1200НН2, 1200НН3, 800НН, имеющие точку Кюри (°С) соответственно 70, 90, 60, 75, 185. В девятую и десятую группы входят соответственно ферриты для магнитного экранирования марок 800ВНРП, 200ВНРП и ферриты для перестраиваемых контуров мощных радиотехнических устройств (группы марок ВНП) с магнитной проницаемостью в диапазоне 10—300.

Размерные ряды кольцевых сердечников из магнитомягких ферритов и ферритов ППГ установлены ГОСТ 16541—76. Кольцевые сердечники из магнитомягких ферритов изготовляют с наружным диаметром 3—180 мм, внутренним диаметром 2—115 мм, высотой 1,5—12 мм. Кольцевые сердечники из марганец-цинковых ферритов нетермостабильных марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ, 4000НМ, 6000НМ изготовляют по ГОСТ 14208—77 нормированных размеров, термостабильных марок — по ГОСТ 17141—76. Марганец-цинковые нетермостабильные ферритовые сердечники предназначены для магнитопроводов, применяемых в изделиях электронной техники производственно-технического назначения и народного потребления. Сердечники предназначены для работы в слабых синусоидальных полях напряженностью 8—24,0 А/м и на частотах от 0,06 МГц (для сердечников из феррита марки 6000НМ) до 1,0 МГц (для сердечников из феррита марки 1000НМ). Сердечники могут применяться в элементах и устройствах аппаратуры,

59. Свойства магнитомягких ферритов для радиочастот [18]

Феррит	$\mu_н$	$(\operatorname{tg}\delta/\mu_н)\cdot 10^6$, не более, при H, А/м: 0,8	8	f, МГц	$f_{кр}$, МГц, при tg δ: 0,1	0,002	Параметры петли гистерезиса в статическом режиме: μ_{max}	H, А/м, при μ_{max}	при H = 800 А/м: B, Тл	B_r, Тл	H_c, А/м	ρ_1, Ом·м	θ, °С не менее	$\rho\cdot 10^{-3}$, кг/м³
I группа. Ферриты общего назначения														
100НН	100±20	125	—	7	30	15	850	120	0,44	0,290	56	10^6	300	4,7—5,0
400НН	400^{+100}_{-50}	18	50	0,1	3,50	1,50	1100	64	0,25	0,120	64	10^4	120	4,7—4,9
400НН1	400±80	12	25	0,1	6,0	3,90	1400	100	0,28	0,160	48	10^3	300	4,7—4,9
600НН	600^{+200}_{-100}	22	75	0,1	1,5	0,70	1600	56	0,31	0,140	32	10^4	110	4,8—5,0
1000НН	1000±200	50	150	0,1	0,40	—	3000	32	0,27	0,150	20	10^4	110	4,8—5,1
1000НМ	1000±200	15	45	0,1	0,60	0,20	1800	40	0,35	0,110	20	0,50	200	4,4—4,6
1500НМ	1500±300	15	45	0,1	0,60	0,10	2500	—	0,35	0,110	24	0,50	200	4,4—4,6
2000НН	2000^{+400}_{-200}	85	270	0,1	0,10	—	7000	12	0,25	0,120	8	10	70	4,8—5,1
2000НМ	2000^{+500}_{-300}	15	45	0,1	0,50	0,05	3500	20	0,38	0,130	24	0,50	200	4,4—4,6
3000НМ	3000±500	35	60	0,1	0,10	0,002	3500	20	0,35	0,120	12	0,50	140	4,6—4,8
II группа. Термостабильные ферриты														
7ВН	7±1	680	—	70	220	150	15	4400	0,07	0,06	2240	10^6	450	3,8
20ВН	20±4	300	—	30	120	65	45	2000	0,20	0,10	1000	10^6	450	3,7—4,0
30ВН	30±5	170	—	30	200	110	90	1600	0,26	0,070	520	10^3	450	4,5—4,8
50ВН	50±10	180	—	20	70	40	170	800	0,30	0,200	360	10^4	450	4,5—4,8
100ВН	100±20	135	—	18	35	25	280	480	0,36	0,150	280	10^5	400	4,5—4,8
150ВН	150±20	135	—	12	25,0	15	330	520	0,35	0,150	240	10^4	400	4,5—4,8
700НМ	700±200	80	—	3	5,0	2,0	1900	128	0,38	0,050	240	20	240	4,3
1000НМ3	1000±200	5	15	0,1	1,80	0,60	2000	80	0,33	0,100	28	10	200	4,3—4,7
1500НМ1	1500±300	15	45	0,1	0,60	0,10	3000	32	0,35	0,100	16	5,0	200	4,3—4,7
1500НМ3	1500±300	5	15	0,1	1,50	0,30	3000	48	0,38	0,080	16	20	200	4,3—4,7
2000НМ1	2000^{+800}_{-300}	15	45	0,1	0,50	0,050	3500	32	0,38	0,120	16	5,0	200	4,3—4,7
III группа. Высокопроницаемые ферриты														
4000НМ	$4\,000^{+800}_{-600}$	35	60	0,1	0,10	0,005	7 000	16	0,35	0,130	8	0,50	125	4,6—4,8
6000НМ	$6\,000^{+1000}_{-1200}$	45	75	0,03	0,003	—	10 000	12	0,35	0,110	8	0,10	110	4,6—4,8
10000НМ	$10\,000^{+5000}_{-3000}$	35	90	0,02	0,050	0,020	17 000	8	0,35	0,110	4	0,01	110	4,9—5,0
20000НМ	$20\,000^{+5\,000}_{-5\,000}$	10	30	0,01	0,005	—	35 000	4	0,35	0,11	2,0	0,01	110	4,9—5,1
IV группа. Ферриты для телевизионной техники														
2500НМС1	—	—	—	—	—	0,40	0,16	4800	40	0,45	0,10	16	1,0	200	—
3000НМС	—	—	—	—	—	0,36	0,10	4800	32	0,45	0,10	12	1,0	200	—
V группа. Ферриты для импульсных трансформаторов														
300ННИ	300^{+80}_{-60}	—	—	—	2,00	—	300	240	0,30	0,28	160	10	240	4,7—4,9
350ННИ	350±75	—	—	—	2,50	—	1000	80	0,26	0,12	48	10^7	180	4,7—4,9
450ННИ	450±50	—	—	—	1,00	—	2100	56	0,37	0,160	40	10^3	230	4,7—4,9
1000ННИ	1000^{+300}_{-250}	—	—	—	0,50	—	3000	32	0,30	0,090	16	10^3	120	4,7—4,9
1100ННИ	1100±250	—	—	—	0,40	—	3000	32	0,27	0,080	20	10	110	4,7—4,9
1100НМИ	1100±150	—	—	—	0,30	—	3000	32	0,40	0,150	24	0,10	180	4,7—4,9
VI группа. Ферриты для широкополосных трансформаторов														
50ВНС	50^{+10}_{-5}	—	—	—	80	70	170	800	0,17	0,020	4,8	10^4	480	4,7—4,9
90ВНС	90±10	—	—	—	40	30	340	640	0,28	0,080	152	10^4	400	4,7—4,9
200ВНС	200±20	—	—	—	11	5	650	280	0,31	0,080	64	10^4	350	4,7—4,9
300ВНС	300±30	—	—	—	8	4	850	220	0,32	0,130	80	10^4	250	4,7—4,9
VII. Ферриты для магнитных головок														
500НТ	500±100	—	—	—	0,50	—	—	—	0,35	0,200	32	10^3	150	5,3
500НТ1	500^{+200}_{-100}	—	—	—	2	—	—	—	0,35	0,210	48	10^3	150	5,3
1000НТ	1000^{+400}	—	—	—	0,2	—	—	—	0,32	0,140	16	10^2	140	5,3
1000НТ1	1000^{+400}_{-200}	—	—	—	0,8	—	—	—	0,32	0,150	32	10^3	140	5,3
2000НТ	2000±400	—	—	—	0,10	—	—	—	0,27	0,120	8	10	90	5,3
2000МТ	2000^{+1000}_{-500}	—	—	—	0,20	—	—	—	0,35	0,150	5	1,0	110	5,1
500МТ	500^{+300}_{-150}	—	—	—	—	—	—	—	0,48	—	20	0,10	240	5,1
1000МТ	1000±200	—	—	—	—	—	—	—	0,50	—	20	1,0	240	5,1
5000МТ	5000^{+2000}_{-500}	—	—	—	—	—	—	—	0,35	0,150	5	0,10	110	5,1

Обозначения: tg δ — тангенс угла магнитных потерь; tg $\delta/\mu_н$ — относительный тангенс угла магнитных потерь; $f_{кр}$ — критическая частота; H — напряженность магнитного поля; θ — температура (точка) Кюри.

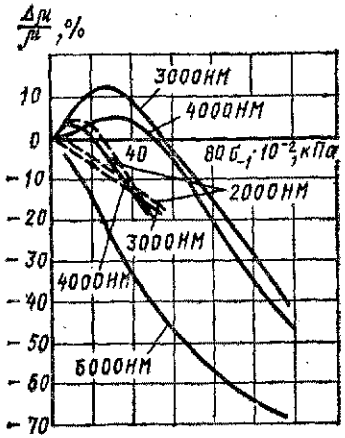


Рис. 8. Зависимость магнитной проницаемости ферритов от механических напряжений:
сплошная линия — $H = 0{,}4$ А/м; штриховая — $H = 8$ А/м

эксплуатирующейся в условиях воздействия на них механических факторов (по ГОСТ 16962—71); вибрационных нагрузок частотой от 1 до 5000 Гц с ускорением не более 392 м/с², одиночных ударов с ускорением не более

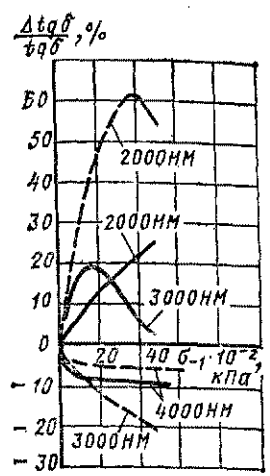


Рис. 9. Зависимость тангенса угла магнитных потерь ферритов от механических напряжений:
сплошная линия — $H = 0{,}8$ А/м; штриховая — $H = 8$ А/м

1471,5 м/с², линейных (центробежных) нагрузок с ускорением не более 4905 м/с².

При воздействии на сердечник механических нагрузок в них возникают механические напряжения, вызывающие отклонение электромагнитных параметров. На рис. 8 и 9 представлены зависимости отклонения магнитных параметров сердечников от сжимающих напряжений, действующих перпендикулярно направлению силовых линий намагничивающего поля при нормальной температуре окружающей среды. Не рекомендуется прикладывать к сердечникам растягивающие или сжимающие нагрузки, действующие параллельно плоскости кольца. Отклонение начальной магнитной проницаемости при воздействии на сердечник механических нагрузок обратимо. После воздействия механической нагрузки значение начальной магнитной проницаемости сразу же возвращается к значению, несколько превышающему исходное (в ненагруженном состоянии сердечника). С течением времени это превышение исчезает. Сердечники могут эксплуатироваться в течение 50 000 ч. Предел прочности сердечников $\sigma \cdot 10^{-3}$, кПа: при растяжении — 9,8; при сжатии — 147; при изгибе — 29,4. Максимальная рабочая температура: 155 °С — для ферритов марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ; 125 °С — для ферритов марок 3000НМ, 4000НМ; 100 °С — для феррита марки 6000НМ. Наименьшее значение температуры окружающего воздуха минус 60 °С.

Сердечники из ферритов марок 400НН, 150ВН, 30ВН, применяемые в магнитных антеннах радиовещательных приемников, изготовляют по ГОСТ 11082—75. Сердечники предназначены для работ на частотах 2,6; 12,0; 100 МГц (соответственно ферритовые сердечники марок 400НН, 150ВН, 30ВН). Сердечники изготовляют двух типов: стержневые круглого сечения (С) и пластинчатые (П) с регламентированным типоразмером. Сердечники выдерживают без разрушения статическую нагрузку, приложенную к середине сердечника перпендикулярно его оси, равную 29,43 Н — для сердечников типа П и 49 Н — для сердечников типа С. Рабочая температура окружающего воздуха от —45 до +70 °С. Длительность эксплуатации сердечников 50 000 ч. При эксплуатации сердечников допускается воздействие нормированных вибрационных нагрузок, одиночных и многократных ударов. Не рекомендуется допускать возникновения в сердечниках статических напряжений, превышающих 3000 кПа.

60. Основные свойства ферритов ППГ [23]

Феррит	H_c, А/м	B_r, Тл	$H_т/H_c$ *1	θ, °С	ρ_1, Ом·м, не менее
Ферриты системы Li—Na					
100П	143—1194	0,2—0,28	0,75	630	$1 \cdot 10^6$
101П	143—1194	0,2—0,28	0,75	630	$1 \cdot 10^6$
104П	143—1194	0,24—0,32	0,75	600	$5 \cdot 10^5$
105	56—1194	0,2—0,32	0,75	500	$1 \cdot 10^6$
Ферриты системы Mg—Mn—Ca					
300П	12—56	0,19—0,27	0,75	250	$2 \cdot 10^3$
Ферриты системы Li—Mg—Mn					
3ВТ	223—227	0,19—0,27	0,75	500	$5 \cdot 10^5$
5ВТ	346—450	0,18—0,26	0,75	500	$1 \cdot 10^6$
Ферриты системы Mg—Mn					
2,1ВТ	151—199	0,16—0,23	0,72	240	$5 \cdot 10^4$
1,3ВТ	92—123	0,18—0,26	0,75	250	$5 \cdot 10^3$
Ферриты системы Mg—Mn—Zn—Ca					
0,9ВТ	64—80	0,20—0,30	0,75	230	$2 \cdot 10^3$
0,3ВТ	20—28	0,17—0,25	0,70	170	$1 \cdot 10^4$
0,27ВТ	17—25	0,16—0,23	0,72	110	$2 \cdot 10^3$
0,16ВТ	10—16	0,16—0,23	0,72	130	$5 \cdot 10^3$
0,12ВТ	7,9—11,0	0,16—0,23	0,65	110	$6 \cdot 10^4$

*1 $H_т/H_c$ — отношение напряженности поля трогания к коэрцитивной силе.

У ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса (ферриты ППГ) отношение остаточной индукции и максимальной индукции на предельной статической петле гистерезиса не менее 0,85 (ГОСТ 23618—79). Сердечники из ферритов ППГ с малой коэрцитивной силой ($H_c < 40$ А/м) применяют, как правило, в переключающих и накопительных элементах и магнитных усилителях, а сердечники с большой коэрцитивной силой (H_c более 40 А/м) — в оперативных запоминающих устройствах. Размерный ряд кольцевых сердечников из ферритов ППГ установлен ГОСТ 16541—76. Кольцевые сердечники имеют наружный диаметр 0,3—10,0 мм и высоту 0,06—5,0 мм включительно. Кольцевые сердечники из ферритов ППГ применяют в устройствах автоматики и вычислительной техники. Ферриты ППГ по химическому составу разделяют на пять групп. В табл. 60 приведены свойства ферритов ППГ. Интервал рабочей температуры этих ферритов от —60 до +70 °С.

Магнитострикционные ферриты имеют сильно выраженную магнитострикцию в слабых переменных магнитных полях. Применяются в прецизионных фильтрах, в том

61. Основные свойства магнитострикционных никель-кобальтовых ферритов [23]

Феррит	$K_{св}$, %	Q	$v_п \cdot 10^{-3}$, м/с	$v_к \cdot 10^{-3}$, м/с	t, °С, для определения ТКЧ	ТКЧ·10^6
601С	13,0	2800	5,4—5,75	—	20—60 20—5	—3÷+15 —10÷+60
602С	12,0	2500	—	3,1—3,6	+20÷—10 20—70 +20÷—10	—15÷+15 —60÷+60
605С	12,0	2800	5,4—5,75	—	+20÷—10 20—50	—12÷+12
	10,0	2000	—	3,1—3,5	+20÷—60 20—85	—25÷+25
	10,0	2000	—	3,1—3,5	+20÷—10 20—50	—14÷+14
606С	12,0	3500	5,4—6,0	—	+20÷—60 20—85	0÷+60 —10÷+10
	10,5	4500	—	3,3—3,6	+20÷—60 20—85	—25÷+25

Обозначения: Q — добротность; $v_п$, $v_к$ — скорости распространения продольных и крутильных колебаний соответственно; ТКЧ — температурный коэффициент резонансной частоты.

числе широкополосных, в качестве преобразователя колебаний магнитного поля в механические (продольные или крутильные) и наоборот. Способность ферритового материала преобразовывать магнитную энергию в упругую оценивают с помощью коэффициента магнитомеханической связи $K_{св}$, определяющего соотношение энергии, превращенной в упругую, и всей подведенной магнитной энергии: $K^2_{св} = W_{упр}/W_{магн}$. Магнитострикционные ферриты изготовляют на основе никелевых ферритов, имеющих отрицательную константу магнитной кристаллографической анизотропии, с различными малыми присадками: CoO ~ 1,25 % мол. доли, CuO — 0,15 % мол. доли, $V_2O_5 \leqslant$ $\leqslant$ 0,5 % мол. доли. Наиболее эффективной является добавка CoO, так как феррит кобальта, обладая положительной константой кристаллографической анизотропии K_1, образует с ферритом никеля твердый раствор, имеющий константу K_1, близкую к нулю. Точка Кюри этих ферритов 530—590 °С. Свойства магнитострикционных ферритов приведены в табл. 61.

Сверхвысокочастотные ферриты (ферриты СВЧ) характеризуются малыми магнитной кристаллографической анизотропией и коэрцитивной силой, очень высоким удельным электрическим сопротивлением (10^4—10^{12} Ом·м). Основным параметром СВЧ ферритов является величина ΔH — ширина кривой ферримагнитного резонанса, определяющая

эффективность использования ферритов в устройствах СВЧ (вентили, фазовращатели, циркуляторы). СВЧ-ферриты используют в диапазоне частот от сотен мегагерц до тысяч гигагерц (длины волн от метров до миллиметров).

СВЧ-ферриты по химическому составу и осиовному рабочему диапазону длин волн разделяют на шесть групп. В соответствии с классификацией в табл. 62 представлены свойства ферритов этих групп.

Магнитодиэлектрические материалы. Магнитодиэлектриком называют магнитный материал, в котором связкой является диэлектрик, а наполнителем — магнитомягкий металлический или ферритовый порошок (ГОСТ 23618—79). В качестве металлического наполнителя применяют карбонильное железо, размолотые сплавы альсифер и пермаллой. Электроизоляционная пленка, создаваемая специальной технологией нанесения на ферромагнитные частицы органического или неорганического материала, снижает потери на вихревые токи магнитодиэлектрических композиционных материалов, тем самым обеспечивая возможность их использования для деталей, работающих при высоких частотах (до сотен мегагерц при высокой стабильности магнитных свойств). Изделия

62. Основные свойства СВЧ-ферритов [23]

Феррит	B_s, Тл	H_c, А/м	μ'	θ, °С	ε'	$tg\delta_\varepsilon \times 10^3$	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	ρ_1, Ом·м	ΔH, кА/м, λ=3 см	ΔH, кА/м, λ=10 см
Иттриевые ферриты-гранаты (для низкочастотной области диапазона СВЧ)										
10СЧ6	0,175	56	100	280	14,8	7	5,02	$1,2 \cdot 10^{10}$	—	4,8
30СЧ3	0,120	64	80	230	14,6	6	5,01	$3,8 \cdot 10^9$	—	5,6
30СЧ6	0,130	80	70	280	15	3	5,40	$3,1 \cdot 10^8$	—	8
40СЧ2	0,075	56	50	180	14,4	5	4,97	$5,1 \cdot 10^{11}$	—	4,8
40СЧ4	0,085	200	30	280	15,5	3	5,60	$9,9 \cdot 10^{10}$	—	13
40СЧ5	0,065	48	—	170	14,5	4	4,96	—	—	4,8
60СЧ	0,047	80	30	150	14	4	4,92	$9,0 \cdot 10^9$	—	4,8
80СЧ	0,030	160	20	120	13,5	3	4,91	$1,6 \cdot 10^9$	—	4,8
90СЧ	0,021	40	—	100	13	3	4,88	—	—	4,0
Литиевый феррит										
10СЧ9	0,070	80	20	180	13	3	4,89	$3,0 \cdot 10^8$	—	15
Магниевые ферриты (для средней части сантиметрового диапазона длин волн)										
2СЧ1	0,200	320	20	300	11,3	—	4,05	$5,0 \cdot 10^6$	42	—
3СЧ	0,178	400	13	320	11,6	—	4,1	$5,5 \cdot 10^6$	52	—
3СЧ1	0,170	480	13	380	8,2	—	3,6	$1,9 \cdot 10^7$	57	—
3СЧ2	0,110	560	10	300	6,5	—	3,1	$4,1 \cdot 10^5$	64	—
3СЧ5	0,230	240	50	260	12,5	—	4,20	$3,9 \cdot 10^8$	32	—
3СЧ6	0,330	32	80	180	13	—	4,70	$1,1 \cdot 10^5$	8	—
3СЧ7	0,190	200	20	320	12,2	—	4,30	$3,2 \cdot 10^8$	24	—
3СЧ9	0,340	32	50	210	13,2	—	4,60	$1,0 \cdot 10^4$	9,6	—
3СЧ15	0,220	160	15	370	12	—	4,50	$4,7 \cdot 10^7$	32	—
4СЧ3	0,110	800	8	350	5,4	—	2,55	$1,6 \cdot 10^5$	64	—
4СЧ4	0,170	280	25	300	10,5	—	3,90	$4,8 \cdot 10^5$	40	—
4СЧ5	0,120	640	15	340	8,0	—	3,05	$7,0 \cdot 10^6$	64	—
4СЧ11	0,220	160	21	300	9,5	—	4,20	—	24	—

Продолжение табл. 62

Феррит	B_s, Тл	H_c, А/м	μ'	θ, °С	ε'	$tg_\varepsilon^\delta \times 10^3$	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	ρ_1, Ом·м	ΔH, кА/м, $\lambda=3$ см	ΔH, кА/м, $\lambda=10$ см
Никелевые ферриты (для миллиметрового диапазона и коротковолновой части сантиметрового диапазона длин волн)										
1СЧ	0,450	200	100	300	12,2	—	4,85	$8{,}2\cdot10^4$	33,5	—
1СЧ2	0,290	320	20	450	12,5	—	4,95	$1{,}7\cdot10^7$	22,0	—
1СЧ3	0,440	240	80	420	11,0	—	4,40	$1{,}3\cdot10^3$	32	—
1СЧ4	0,480	88	80	420	12,3	—	5,05	$4{,}8\cdot10^6$	13,5	—
1СЧ7	0,490	120	140	320	12,5	—	4,95	—	13,5	—
2СЧ	0,220	720	12	500	10,0	—	4,5	$5{,}9\cdot10^4$	56	—
2СЧ4	0,450	120	50	440	12,5	—	5,0	$5{,}3\cdot10^6$	9,6	—
3СЧ8	0,450	320	50	370	11,2	—	4,75	$8{,}7\cdot10^4$	36	—
3СЧ16	0,340	120	—	370	12,7	—	5,10	—	9	—
4СЧ8	0,230	350	12	450	12,2	—	5,05	$7{,}9\cdot10^2$	48	—
4СЧ9	0,320	360	30	450	11,0	—	5,0	$2{,}0\cdot10^6$	22	—
4СЧ10	0,220	320	22	500	12,4	—	5,10	$7{,}8\cdot10^7$	17,5	—
5СЧ	0,310	96	90	350	12	—	5,10	$3{,}0\cdot10^6$	11^6	—
Магниевые ферроалюминаты (для длинноволновой части диапазона СВЧ)										
4СЧ	0,080	440	8	280	4,5	—	3,0	$9{,}0\cdot10^5$	72	—
4СЧ1	0,100	400	10	280	5,5	—	3,20	$4{,}0\cdot10^5$	56	—
4СЧ6	0,120	320	15	280	10	—	3,75	$3{,}6\cdot10^6$	48	—
6СЧ1	0,145	80	65	180	12	—	4,20	$3{,}0\cdot10^5$	—	10,4
8СЧ1	0,175	360	12	280	9,6	3	3,85	$1{,}5\cdot10^5$	—	32
10СЧ	0,080	400	10	270	10	2	4,00	$2{,}0\cdot10^7$	—	32
30СЧ2	0,110	80	30	150	10	15	4,20	$1{,}7\cdot10^6$	—	13
30СЧ4	0,085	160	35	120	10	3	4,00	$7{,}2\cdot10^8$	—	8
Никелевые и магниевые феррохромиты (для длинноволновой части диапазона СВЧ в высоком уровне мощности)										
4СЧ2	0,075	520	9	280	6,2	—	3,00	$5{,}2\cdot10^6$	56	—
10СЧ1	0,065	320	13	160	8	4	3,20	$6{,}8\cdot10^5$	—	24
10СЧ8	0,065	128	20	140	9,5	3	3,80	$5{,}8\cdot10^5$	—	16
10СЧ12	0,110	640	10	300	9,8	7	4,60	$5{,}2\cdot10^4$	—	20
15СЧ	0,120	720	9	320	4,8	6	4,5	$6{,}8\cdot10^4$	—	36
15СЧ1	0,055	200	20	150	6,8	3	3,00	$3{,}2\cdot10^5$	—	24
30СЧ	0,070	280	13	160	9,5	2	3,90	$3{,}3\cdot10^5$	—	17,6
30СЧ1	0,130	240	25	240	11,2	5	4,40	$3{,}0\cdot10^6$	—	13
40СЧ	0,085	72	60	90	10,2	2	4,30	$9{,}7\cdot10^6$	—	7

Примечание. $B_s = \mu_0 J_s$ — измерено при напряженности поля 400—640 кА/м; H_c определено на кольцевых образцах при напряженности поля в образце 4 кА/м; μ' при $f = 1{,}1$ МГц; tg_ε^δ при $f = 3000$ МГц. Все измерения проведены при 20 °С.

Обозначения: μ', ε' — действительные части магнитной и диэлектрической проницаемости соответственно; tg_ε^δ — тангенс угла диэлектрических потерь; ΔH — ширина резонансной кривой.

63. Свойства магнитодиэлектриков

Материал	$\mu_{нд}$	$\mu_{эф}$	Магнитные потери, не более: $tg\,\delta \cdot 10^5$ при $H=4{,}8$ А/м	$tg\,\delta \cdot 10^5$ при $H \leqslant 8{,}0$ А/м	$\delta_г$, м/А	$\delta_в \cdot 10^8$, 1/Гц	$\delta_п \cdot 10^8$	$f_{кр}$, МГц	Температурный коэффициент магнитной проницаемости: $TK\mu \cdot 10^6$, 1/°С, не более	в интервале температур, °С
Кольцевые сердечники из прессованного порошкообразного альсифера (ГОСТ 8763—77)										
ТЧ90	$\mu_н$ 79—91	—	83,5	83,9	$\delta_г \cdot 10^4$ 1,1	—	3,0	0,02	⩽600	20—70
ТЧ60	53—63	—	27,4	27,7	0,81	—	2,0	0,07	⩽400	20—70
ТЧК55	48—58	—	27,4	27,7	0,81	—	2,0	0,07	—150÷+50	20—70
									—450÷+150	20÷—60
ВЧ32	28—33	—	9,9	10,0	0,38	—	1,2	0,20	⩽250	20—70
ВЧ22	19—24	—	4,6	4,7	0,25	25	2,0	0,70	⩽200	20—70
ВЧК22	19—24	—	4,6	4,7	0,25	25	2,0	0,70	—50÷+50	20—70
									—150÷+150	20÷—60
Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа (ГОСТ 13610—79)										
Р-10	μ' 13—15	2,9	—	—	$\delta_т \cdot 10^6$ 3—5	2,0—3,5	0,15—0,25	10	25—180	—60÷+100
Р-20	12—14	2,95	—	—	1,5—2,5	2,0—3,0	0,05—0,1	20	25—150	—60÷+100
Р-100	9—10	1,55	—	—	1,25—1,85	0,15—1,2	0,05—0,1	100	50—100	—60÷+100
Р-100Ф	10,5—12	1,60	—	—	1,2—2,0	1,0—2,8	0,05—0,1	100	30—150	—60÷+100
Кс	11,0—13,0	2,90	—	—	⩽1,5	⩽3,5	⩽0,2	20	25—110	—60÷+100
Магнитодиэлектрики на основе пермаллоя [23]										
П250	$\mu_н$ 230	—	—	—	$\delta_т \cdot 10^5$ 8,2	1000	3	0,03	200	—60÷+85
П140	140	—	—	—	6,3	450	2	—	100	—20÷+70
П100	100	—	—	—	3,1	200	2	—	100	—60÷+85
П60	60	—	—	—	1,9	100	1,5	—	100	—60÷+85
ПК100	100	—	—	—	3,1	200	2	0,2	30±15	—60÷+85
ПК60	60	—	—	—	1,9	100	1,5	—	30±15	—60÷+85

Обозначения: $\mu_{эф}$ — эффективная магнитная проницаемость; $\delta_т$, $\delta_в$, $\delta_п$ — углы потерь на гистерезис, вихревые токи, на последействие соответственно; $TK\mu$ — температурный коэффициент магнитной проницаемости.

64. Свойства магнитомягких сплавов зарубежных фирм с начальной магнитной проницаемостью ⩾40 000 [24]

Сплав	Основные элементы, кроме железа, %	Толщина продукта, мм	$\mu_в$	μ_{max}	H_c, А/м	B_s, Тл	θ, °С	Номер условного обозначения стандарта, фирмы страны *1
PB-2S	45,0 Ni, Mo	—	10 000—40 000	100 000—200 000	—	1,40—1,50	400	4
E4	75,5—78,5 Ni, Mo, Cr, Cu	0,2	40 000	—	—	0,6—0,8	270—400	1
Гиперм 767	75,5—78 Ni, Mo, Cr, Cu	—	45 000	100 000	—	0,8	400	2
Муметалл	75,0 Ni, Mo, Cr, Cu	0,2	45 000	120 000	1,2	0,8	400	3
YEP-*H*	—	—	40 000	100 000	1,6	0,48	—	6
FeNi 77—40	77—76 Ni, Mo, Cr, Cu	—	45 000	120 000	2,0	0,8	410	13
YEP-C	—	—	⩾40 000	⩾150 000	1,6	0,70	—	6
Пермаллой С	77,0 Ni	0,1	25 000—50 000	70 000—150 000	2,4	0,8	380	11
TMG	79,0 Ni, 4 Mo	—	30 000—50 000	200 000—300 000	0,8—1,3	0,83—0,86	460	5
TMC	79,0 Ni, Mo, Cu	0,5	30 000—70 000	100 000—200 000	0,8—1,6	0,65—0,75	350	5
PC-1, PC-2	78,0 Ni, Mo, Cr	—	35 000—80 000	130 000—300 000	1,6—0,4	0,65—0,75	350	4
PC-3	80,0 Ni, Mo	—	35 000—80 000	150 000—350 000	1,6—0,4	0,75—0,85	400	4
P50000	76,9—77,2 Ni; 4,0—4,2 Mo	0,2	50 000	80 000	1,2	0,70	430	12
Гиперм 53	50,0 Ni	0,1	50 000	120 000	—	1,5	470	2
Пермакс М	50,0 Ni	0,1	50 000	125 000	1,2	1,5	—	3
Сатимфи	53,0 Ni	0,1	50 000	125 000	1,2	1,50	—	7
Пермемфи I	78,0 Ni, Mo	0,1	50 000	140 000	1,2	0,8	—	7
НуМи 80	80,0 Ni, 4,0 Mo	Пруток	50 000	200 000	1,6	0,73	460	9
Муметалл	77,0 Ni, Mo	—	50 000	240 000	1,0	0,77	350	8
Пермаллой супер С	77,0 Ni	0,1	50 000—100 000	200 000—300 000	4,8	0,8	380	11
TMH	79,0 Ni, 5 Mo	—	50 000 100 000	300 000 500 000	1,3 0,56	0,86 0,80	—	5
Сплав № 3	75,0—78,0 Ni, 2,0—3,0 Cr, 4,0—6,0 Cu	0,63 0,15	⩾55 000 ⩾65 000	⩾250 000 375 000	⩽1,2 0,64	— —	— —	10

Продолжение табл. 64

Сплав	Основные элементы, кроме железа, %	Толщина продукта, мм	$\mu_в$	μ_{max}	H_c, А/м	B_s, Тл	θ, °С	Номер условного обозначения стандарта, фирмы страны *1
Сплав № 4	79,5—8,0 Ni; 3,75—4,8 Mo	0,63 0,15 0,05	⩾55 000 ⩾80 000 95 000	⩾250 000 ⩾250 000 350 000	⩽1,2 ⩽1,2 0,48	— — —	— — —	10
Гиперном	80,0 Ni; 4,75 Mo	—	60 000	—	—	—	—	9
Вакумент НуМи 800	80,0 Ni; 5,0 Mo	0,025—0,20	60 000	—	—	—	460	9
FeNi 77-60	77—76 Ni, Mo, Cr, Cu	—	65 000	150 000	1,5	0,8	410	13
Криоперм Z	70,0—80,0 Ni	0,1	65 000	160 000	1,2	0,80	—	3
Сатмуметалл	50,0 Ni	0,1	65 000	240 000	2,0	1,5	550	8
P70000	—	0,2	70 000	100 000	0,8	0,70	430	12
Пермемфи 2	78,0 Ni, Mo	0,1	75 000	200 000	0,8	0,8	—	7
Вакоперм 100	75,0 Ni, Mo, Cr, Cu	0,2	75 000	250 000	0,8	0,8	400	3
Гиперм 900	75,5—78 Ni, Mo, Cr, Cu	—	80 000	150 000	0,8	0,8	400	2
FeNi 77-80	77—76 Ni, Mo, Cr, Cu	—	85 000	180 000	1,2	0,8	410	13
YEP-F	—	—	⩾80 000	⩾300 000	0,8	0,70	—	6
FeNi 77-100	77—76 Ni, Mo, Cr, Cu	—	110 000	250 000	1,0	0,8	410	13
Пермемфи 3	78,0 Ni, Mo	0,1	110 000	250 000	0,56	0,8	—	7
Супермуметалл	77,0 Ni, Mo	—	127 000	350 000	0,55	0,77	350	8
Пермемфи 4	78,0 Ni, Mo	0,1	130 000	300 000	0,4	0,8	—	7
Ультраперм 10	75,0 Ni, Mo, Cr, Cu	0,05	130 000	300 000	0,4	0,78	400	3
Гиперм-максимум	75,5—78 Ni, Mo, Cr, Cu	—	140 000	280 000	—	0,8	400	2

*1 1 — DIN 41301—67; ФРГ. 2 — Fr. Krupp, Widia—Fabrik; ФРГ. 3 — Vacuumshmelze; ФРГ. 4 — Sumitomo Special Metals; Япония. 5 — Tohoku Metals Industries; Япония. 6 — Hitachi Metals; Япония. 7 — Société Metallurgique d'Imphy; Франция. 8 — Telcon Metals; Великобритания. 9 — Carpenter Technology; США. 10 — ANSJ/ASTM 0753—78; США. 11 — International Telephone and Telegraph; США. 12 — Csepèti Fémmü; ВНР. 13 — TGL 27010—73; ГДР.

получают путем холодного прессования при давлении 600—2000 МПа с последующей термической обработкой для снятия напряжений и стабилизации магнитных свойств. Магнитодиэлектрики применяют в катушках индуктивности и трансформаторах для аппаратуры проводной связи и радиосвязи, в радиоэлектроных устройствах.

Магнитодиэлектрики изготовляются на основе карбонильного железа (ГОСТ 13610—79), кольцевые сердечники — из прессованного порошкообразного альсифера (ГОСТ 8763—77), магнитодиэлектрики — на основе пермаллоя. Сердечники из порошкообразного альсифера имеют регламентированные размеры: наружный диаметр 15—75 мм, внутренний диаметр 7—46 мм, высоту 4,8—16,8 мм. Предел прочности сердечника при изгибе не менее 4900 кПа. Сердечники можно эксплуатировать в условиях воздействия на них вибрационных нагрузок с диапазоном частот 1—5000 Гц и максимальными ускорениями до 392 м/с². Начальная магнитная проницаемость сердечника от воздействия механических нагрузок практически не зависит. Временная нестабильность магнитной проницаемости сердечников при эксплуатации в регламентированных рабочих режимах за 50 000 ч находится в пределах ±5 %. Свойства магнитодиэлектриков соответствуют указанным в табл. 63.

Зарубежные аналоги магнитомягких сплавов. Свойства магнитомягких сплавов зарубежных фирм представлены в табл. 64.

6. МАТЕРИАЛЫ С ОСОБЫМИ ТЕПЛОВЫМИ СВОЙСТВАМИ

Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Во многих областях техники требуются материалы, позволяющие сохранять стабильные размеры изделий или их регламентированное изменение при определенных температурных диапазонах эксплуатации. Этим требованиям отвечают сплавы, относящиеся к классу материалов с особыми тепловыми свойствами. Основной характеристикой сплавов является температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). В свою очередь все сплавы, в зависимости от физической природы, определяющей ТКЛР, делят на ферромагнитные и немагнитные. Ферромагнитные сплавы разработаны на железоникелевой основе, немагнитные — на основе хрома, никеля, титана, циркония, меди, марганца с добавками различных легирующих элементов.

К ферромагнитным сплавам с минимальным значением ТКЛР относят сплавы с ТКЛР ниже $3{,}5 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Сплавы пластичны, поддаются механической обработке, сварке и пайке. Их применяют для изготовления деталей измерительных приборов, криогенных установок, в качестве составляющих термобиметаллов, базисных деталей лазеров. Марки и сортамент сплавов, выпускаемых промышленностью, представлены в табл. 65.

Химический состав сплавов 36Н, 32НКД, 32НК-ВИ, 35НКТ, 39Н определен ГОСТ 10994—74, нормы ТКЛР, а также химический состав и значения ТКЛР сплавов 32НК-ЭЛ, 35НКГ, 36НГТ приведены в работе [24].

Температурный коэффициент линейного расширения (α) некоторых сплавов приведен в табл. 66.

В качестве материалов с минимальными значениями ТКЛР могут использоваться аморфные металлические сплавы.

Сплавы 35НКТ и 39Н выпускаются в том же сортаменте, что и сплав 36Н.

Ферромагнитные сплавы с низким ТКЛР характеризуются значениями коэффициента α от 3 до $7 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}. Марки сплавов и их сортамент приведены в табл. 67.

Температурные коэффициенты линейного расширения некоторых сплавов представлены в табл. 68.

Химический состав сплавов, за исключением марок 38НК и 30НКФ, приведен в ГОСТ 10994—74. Значения ТКЛР и сортамент, а также химический состав сплавов марок 38НК, 30НКФ даны в справочном материале [24].

Сплавы с низким ТКЛР применяют в соединениях с керамикой, в вакуумно-плотных соединениях со стеклами, низкотемпературными припоями, клеями.

Эффект образования качественного соединения обусловливается тем, что при нагреве сплава на его поверхности образуется оксидная пленка, которая взаимодействует с керамикой или смачивается стеклом при температурной пайке.

Ферромагнитные сплавы со средним значением ТКЛР [до $15 \cdot 10^{-6}$ °C^{-1}] находят применение при создании соединений с керамикой типа 22ХС «Полинкор», высокотемпературными припоями, а также с «мягкими» стеклами. Из сплава 57Н-ВИ, ТКЛР которого близок ТКЛР сталей и чугунов, изготовляют отсчетные шкалы высокоточных координатно-расточных станков. В табл. 69 представлены марки сплавов и их сортамент. Значения ТКЛР некоторых сплавов даны в табл. 70. Химический состав сплавов задан ГОСТ 10994—74. ТКЛР и сортамент для сплавов марок 31НК, 24НК, 50Н3ХЮ даны в справочной литературе [24].

Немагнитные сплавы с минимальным и низким значениями ТКЛР (марки

65. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов с минимальным ТКЛР [24]

Сплав	Сортамент	Толщина или диаметр, мм
36Н и 36Н-ВИ	Лента	0,1—2,5
	Полоса	2,8—2,2
	Шлифованные прутки	10—30
	Горячекатаные прутки	8—200
	Проволока	0,1—3,5
32НКД	Горячекатаные прутки	8—200
32НК-ВИ	Лента	0,1—2,5
32НК-ЭЛ	Холоднокатаные трубы	90
36НХ	Трубная заготовка	85—160 180 215
	Холоднокатаные трубы	25×2; 36×2; 56×2; 70×2; 100×3; 100×2; 150×2,5; 200×2,5; 220×4; 250×4,5
35НКГ	Лента	0,5—0,8
36НГТ	Проволока	2,0—4,0

66. Свойства ферромагнитных сплавов с минимальным ТКЛР [7, 24]

Сплав	Интервал температур, °С	$\alpha \cdot 10^6$, °C^{-1}, не более
36Н	−60÷+100	1,5
32НКД	−60÷+100	1,0
35НКГ	+20÷+100	2,2—2,8
32НК-ВИ	+20÷+100	1,0

67. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов с низким ТКЛР [24]

Сплав	Сортамент	Толщина или диаметр, мм
42Н	Лента	0,1—2,5
42НА-ВИ	Проволока	0,1—36
44Н, 46Н	Лента	0,4—1,0
38НК	Лента Проволока Горячекатаные и кованые прутки	0,3; 0,5 3,0—5,0 13,0—60,0
30НКД	Полоса	2,8—2,2
29НК	Шлифованные прутки Трубка	1,0—30 1,0—70,0
30НКФ	Горячекатаные и кованые прутки	16,2—60

68. Свойства ферромагнитных сплавов с низким ТКЛР [24]

Сплав	$\alpha \cdot 10^6$, $°C^{-1}$, в интервале температур, °С	
	20—300	20—400
38НК	3,0—3,8	5,0—5,8
30НКД	3,3—4,3	3,8—4,6
29НК	4,6—5,5	4,5—5,2

95ХК и 96Х) используют для изготовления изделий с высокой стабильностью размеров, не вносящих искажений в магнитные поля и обладающих высокой твердостью и коррозионной стойкостью. ТКЛР сплавов составляет $(1 \div 6)10^{-6}$ $°C^{-1}$ в интервале температур до 100 °С.

Для создания соединений с «мягкими» стеклами и керамикой, а также в качестве конструкционного материала с заданным ТКЛР используют немагнитные сплавы со средними значениями этого коэффициента. В табл. 71

69. Марки и сортамент ферромагнитных сплавов со средним значением ТКЛР [24]

Сплав	Сортамент	Толщина или диаметр, мм
34НК	Шлифованные прутки	1,0—30
31НК	Лента Полоса	0,3—1,0 5,0
24НК	Лента Полоса	0,8 16,0

Продолжение табл. 69

Сплав	Сортамент	Толщина или диаметр, мм
33НК, 38НКД, 47НХ, 48НХ, 47Н3Х, 47НХР	Горячекатаные или кованые прутки	8—200
50Н3ХЮ	Лента	0,3—0,8
18ХТФ	Лента	0,6—2,5
58Н-ВИ	Полоса Шлифованные прутки Горячекатаные и кованые прутки	2,8—22 1,0—30 8—200
52Н, 47НД	Горячекатаные и кованые прутки	8—200

70. Свойства ферромагнитных сплавов со средним значением ТКЛР [24]

Сплав	$\alpha \cdot 10^6$, $°C^{-1}$, в интервале температур, °С	
	200—300	200—500
34НК	7,4—8,4	7,2—8,0
38НКД	7,1—7,9	8,2—9,0
47НХ	7,6—8,4	8,3—9,5
47НХР	8,4—9,2	10,7—11,5
47НД	9,2—10,1	9,7—10,5

приведены сплавы и поставляемый промышленностью сортамент. Находят также применение сплавы 93ЦТ на циркониевой основе и сплавы 72ТФ, 75ТМ на титановой основе. Свойства некоторых сплавов приведены в табл. 72.

В качестве немагнитных материалов с высоким ТКЛР применяют сплавы 56ДГНХ и 70ГНДХ. Эти сплавы имеют ТКЛР более $15 \cdot 10^{-6}$ $°C^{-1}$ в интервале температур от 20 °С до температуры плавления. Из сплавов изготовляют детали, тепловое расширение которых должно согласованно соответствовать тепловому расширению деталей из

71. Марки и сортамент немагнитных сплавов со средним значением ТКЛР [24]

Сплав	Сортамент	Толщина или диаметр, мм
75НМ-ВИ	Холоднокатаная лента	0,1—0,015
80НМВ	Холоднокатаная лента Кованые прутки Холоднокатаная проволока	0,03—2,5 20—60 1,0—5,0
80НМВХ3	Холоднотянутая проволока	1,0—5,0
76НХВГ		3,0—5,0

72. Свойства немагнитных сплавов со средним значением ТКЛР [24]

Сплав	$\alpha \cdot 10^{-6}$, °C^{-1}, в интервале температур, °C	
	20—300	20—800
75НМ-ВИ	11,5—12,0	—
80НМВ	11,7—12,2	12,8—13,3
80НМВХ3	11,7—12,2	13,0—13,5

73. Свойства сплавов с низким температурным коэффициентом модуля упругости [24]

Сплав	E, ГПа	$\alpha \cdot 10^6$, °C^{-1}
42НХТЮ	177—186	9,5
44НХТЮ	177—181	8,0
42НХТЮА	177—181	9,0
43НКТЮ	167—172	8,2
45НХТ	177—196	7,0
37Н11Х	181	9,0
36Н11Х	177	9,0

алюминиевых сплавов, а также используют их в качестве компонента термобиметаллов.

Сплав 56ДГНХ поставляют в виде кованых прутков диаметром 25—50 мм, сплав 70ГНДХ — в виде кованых полос размером 38×92×300 мм.

Сплавы с заданным температурным коэффициентом модуля упругости. Сплавы характеризуются низким температурным коэффициентом модуля упругости, который весьма чувствителен к химическому составу и термической обработке [7].

Свойства наиболее распространенных сплавов приведены в табл. 73. Они находят применение для изготовления упругих элементов (спирали, пружины, сильфоны и т. д.) высокоточных приборов, обеспечивающих малую температурную погрешность при эксплуатации. Сплавы поставляются по ГОСТ 14117—85, ГОСТ 14118—85, ГОСТ 14119—85, а некоторые из них — по ТУ [24].

7. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводник — это материал, основным свойством которого является сильная зависимость его электрической проводимости от воздействия внешних факторов, таких, как температура, электрическое поле, свет и т. д. (ГОСТ 19880—74).

Полупроводниковый материал предназначен для использования его полупроводниковых свойств (ГОСТ 22622—77).

Полупроводники бывают простые и сложные. Полупроводник, основной состав которого образован атомами одного химического элемента, будет простым. Полупроводник, основной состав которого образован атомами двух или большего числа химических элементов, будет сложным.

В полупроводниках носителями заряда, обусловливающими электрическую проводимость, являются дырки проводимости и электроны. Полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводность, называется собственным полупроводником. Электропроводимость собственно полупроводника в равновесном состоянии обусловлена как дырками проводимости, так и электронами проводимости, причем их концентрации равны. Полупроводник, электропроводность которого определяется примесями, называется примесным полупроводником. Полупроводник, электрическая проводимость которого обусловлена в основном перемещением дырок проводимости, будет дырочным полупроводником. У электронного полупроводника проводимость обусловлена в основном электронами проводимости.

Свойства полупроводников объяснены в зонной теории твердых тел. Для электронов в твердых телах имеются разрешенные и запрещенные зоны энергии. В каждой из разрешенных зон энергия изменяется дискретным образом и число энергетических состояний ограниченно. Если валентная зона заполнена электронами полностью, а следующая зона разрешенных энергий (зона проводимости) — пуста и интервал запрещенных энергий (ширина запрещенной зоны ΔE) не превышает 1—3 эВ, то такие твердые тела будут полупроводниками. При —273 °С электрическая проводимость таких веществ равна нулю. В результате какого-либо энергетического воздействия (температуры, излучения) электроны из валентной зоны могут быть переведены в зону проводимости. В полупроводнике возникают носители заряда: электроны в зоне проводимости и дырки в валентной зоне. Электрическая проводимость полупроводников увеличивается с повышением температуры и определяется соотношением

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT),$$

где ΔE — ширина запрещенной зоны; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура.

Известно около 1000 простых и сложных полупроводников. Многие из них используются для изготовления различных электронных приборов и микросхем, СВЧ-генераторов, фоточувствительных и преобразовательных приборов, лазеров, термисторов, термоэлементов, тензочувствительных элементов, датчиков Холла и др.

Обычно полупроводниковые материалы, предназначенные для использования в электронике, изготовляют в виде монокристаллических слитков согласно ГОСТ 4.64—80.

Свойства полупроводниковых приборов определяются свойствами исходных материалов. Для полупроводниковых материалов, выпускаемых промышленностью, применяются те или иные из показателей качества, установленных ГОСТ 4.64—80 (номенклатура показателей).

Простые полупроводники. Из простых полупроводников наибольшее применение нашли кремний и германий. Некоторые физико-химические свойства германия и кремния приведены в табл. 74.

Для изготовления разнообразных приборов требуются полупроводниковые материалы с различными свойствами. Ниже при описании марок полупроводниковых материалов, выпускаемых промышленностью, после характеристик монокристаллических слитков в скобках приводится условное обозначение характеристики. Для каждого типа полупроводникового материала установлены и контролируются показатели качества, определенные ГОСТ 4.64—80. Группы и подгруппы марок материала имеют различный набор численных значений показателей качества.

Слитки монокристаллического кремния (ТУ 48-4-295—82), предназначенные для производства полупроводниковых приборов и микросхем, получают методом Чохральского (К) (ОКП 17 7211) с ориентацией продольной оси монокристаллического слитка [111], [100], [013] диаметром $42\pm\frac{3}{2}$—$102,5\pm\frac{3}{2}$ мм и базовой длиной 60—150 мм или бестигельной зонной плавкой (БК) (ОКП 17 7221) с ориентацией [111] диаметром 23—46 мм и длиной 40—70 мм. Отклонение плоскости торцового среза слитка кремния от плоскости ориентации (α) не должно превышать 3°. Концентрация атомов оптически активного кислорода (N_{O_2}) должна быть не более $1 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$ в слитках кремния, полученных бестигельной зонной плавкой, и $7 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$ в слитках, полученных методом Чохральского.

Слитки монокристаллического кремния, легированные бором (Б) или алюминием (А), изготовляют дырочного (Д) типа электрической проводимости, и легированные фосфором (Ф), сурьмой (С) или мышьяком (М), а также фосфором и золотом (ФЗ) — электронного типа. Технические требования на слитки могут быть уточнены или изменены по согласованию между изготовителем и потребителем.

Пример условного обозначения слитков: *1А1 кц КДБ 7,5/2,5—76 ТУ 48-4-295—82*, где 1А1 — подгруппа марок; кц — индексы дополнительных требований; КДБ — монокристаллический слиток кремния, выращенный по методу Чохральского, дырочного типа электрической проводимости, легированный бором; 7,5 — номинал удельного электрического сопротивления, Ом·см; 2,5 — время жизни неравновесных носителей заряда, мкс; 76 — диаметр, мм.

В табл. 75 и 76 приведены некоторые электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния.

В зависимости от группы и подгруппы марки техническими условиями допускается: отклонение средних значений удельного электрического сопро-

74. Физико-химические свойства кремния и германия [21, 33, 39]

Свойства	Si	Ge
Относительная атомная масса	28,0855	72,60
Постоянная решетки при 25 °С, нм	0,543072±1·10⁻⁶	0,565754±1·10⁻⁶
ρ·10⁻³ при 25 °С, кг/м³	2,32902	5,32674
Твердость по Моосу	7,0	6,25
Микротвердость, ГПа	10,4	7,6
Температура, °С:		
плавления	1415±3	937,2
кипения	2600	2700
Температурный коэффициент линейного расширения α·10⁶, °С⁻¹	2,33	5,75
Теплопроводность при 25 °С, Вт/(м·°С)	109	58,3
Молярная теплоемкость, Дж/(моль·°С):		
при —193 °С	5,20	11,1
при 27 °С	19,5	22,9
в жидком состоянии	31,0	31,4
Температура Дебая, °С:		
при —193	266	80
при 27	416	133
Молярная теплота плавления, кДж/моль	49,9±0,8	37,1±0,2
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	0,72	0,6
Упругие постоянные, ГПа, при 25 °С:		
C_{11}	167	129
C_{12}	65,2	48,3
C_{44}	79,6	66,8
Скорость распространения продольных звуковых волн, м/с	$9{,}15\cdot10^3$ [111]	$5{,}4\cdot10^3$ [110]
Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, Ом·м	$2{,}3\cdot10^3$	0,68
Концентрация собственных носителей заряда при 20 °С, м⁻³	$3\cdot10^{16}$	$2{,}5\cdot10^{19}$
Ширина запрещенной зоны, эВ:		
при —213 °С	1,21	0,78
при 25 °С	1,12	0,75
Подвижность при 27 °С, м²/(В·с):		
электронов	(1350±100) 10^{-4}	$3800\cdot10^{-4}$
дырок	(480±15) 10^{-4}	$1800\cdot10^{-4}$
Эффективная масса дырок:		
тяжелых	$0{,}5m_0$	$0{,}379m_0$
легких	$0{,}16m_0$	$0{,}042m_0$
Диэлектрическая проницаемость статическая (низкочастотная)	12,5	16
Магнитная восприимчивость	$-0{,}13\cdot10^{-4}$	$-0{,}12\cdot10^{-6}$

75. Основные электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния, полученных методом Чохральского (ТУ 48-4-295—82)

Группа марки	Подгруппа марки	$\rho_н\cdot10^2$, Ом·м	$(\rho_{н1}-\rho_{н2})\ 10^4$, Ом·м	Тип электропроводимости	Легирующий элемент
1А	1—3	От 1 до 15 вкл.	—	Э, Д	Ф, Б
2А	1—3	Св. 15 до 45 »	—	Э, Д	Ф, Д
3А	1—3	От 0,005 до 1	—	Э, Д	Ф, Б
3А	4—5	—	0,002—0,006	Э	М
3Б	1—3	От 0,003 до 0,1	—	Э	С, М

Обозначения: $\rho_н$ — номинальное значение удельного электрического сопротивления (УЭС); $(\rho_{н1}-\rho_{н2})$ — интервал номинальных значений удельного электрического сопротивления.

76. Основные электрофизические параметры слитков монокристаллического кремния, полученного бестигельной зонной плавкой (ТУ 48-4-295—88)

Группа марки	Подгруппа марки	$\rho_н\cdot10^2$, Ом·м	$(\rho_{н1}-\rho_{н2})\times10^2$, Ом·м	Тип электропроводимости	Легирующий элемент	Плотность дислокаций, $см^{-2}$, не более
1А	1—3	От 1 до 15 вкл.	—	Э	Ф	От $2\cdot10^3$ до $5\cdot10^4$
1Б	1—2	» 1 » 15 »	—	Э	Ф	$1\cdot10^4$
2А	1—3	Св. 15 » 45 »	—	Э	Ф	$1\cdot10^4$
2В	1	От 40 » 75 »	—	Э	Ф	$1\cdot10^4$
2Г	1—2	—	50—140	Э	Ф	$1\cdot10^4$
2Д	1	—	100—250	Э	Ф	$1\cdot10^4$
2Е	1—4	—	500—2000 и выше	Д	Б	$5\cdot10^4$
2Ж	1	—	1,5—3,5	Д	Б	$5\cdot10^4$
3А	1—4	От 0,012 до 1 вкл.	—	Э	Ф	От $2\cdot10^3$ до $5\cdot10^4$
4А	1—2	» 0,02 » 0,2 »	—	Д	А	—
5А	1	» 3 » 18 »	—	Э	Ф	От $2\cdot10^3$ до $5\cdot10^4$

тивления торцов от номинального значения $\delta\rho_н = 15\div35\ \%$; радиальное относительное отклонение удельного электрического сопротивления от среднего значения по торцу слитка $\delta\rho_R = 10\div20\ \%$; относительное отклонение средних значений удельного электрического сопротивления по длине слитка 20—35 %.

Кремний монокристаллический, полученный методом бестигельной плавки (ТУ 48-4-466—85), предназначен для производства полупроводниковых приборов (ПЭС, БИС, СБИС). Слитки монокристаллического кремния, легированные фосфором, изготовляют электронного (Э) типа электрической проводимости, а легированного бором —

дырочного (Д). Монокристаллические слитки не должны иметь дислокаций и свирлевых дефектов. Концентрация атомов оптически активного кислорода (N_{O_2}) не должна превышать $5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$, концентрация оптически активного углерода (N_C) — не более $5 \cdot 10^{21}$ м$^{-3}$. Слитки имеют диаметр 78±2 мм и длину не менее 80 мм. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) монокристаллического кремния различных марок и ориентация продольной оси монокристаллического слитка приведены в табл. 77. Допустимое относительное отклонение средних значений УЭС торцов от номинального значения УЭС составляет 20 % для марок КВЭ и 25 % для марок КВД. Допустимое радиальное отклонение УЭС от среднего значения по торцу не более 10 %.

Время жизни неравновесных носителей заряда зависит от номинального УЭС слитка и для электронного типа электрической проводимости составляет (в мкс): для номинального УЭС от 0,01 до 0,5 Ом·м — не менее $400\rho_н$; св. 0,5 до 1,00 Ом·м — не менее $200\rho_н$; св. 1,00 до 1,50 Ом·м — не менее $150\rho_н$; для дырочного типа электрической проводимости от 0,01 до 0,4 Ом·м — не менее $400\rho_н$; св. 0,4 до 1,50 Ом·м — не менее $200\rho_н$.

Монокристаллический кремний в слитках (ГОСТ 19658—81, ОКП 17 7930), предназначенный для приготовления пластин-подложек, используемых в производстве эпитаксиальных структур и структур металл—диэлектрик—полупроводник, легированный бором (Б) (марки ЭКДБ), изготовляют дырочного типа электрической проводимости (Д), и легированный фосфором (Ф) (марки ЭКЭФ) или сурьмой (С) (марки ЭКЭС) — электронного типа электрической проводимости (Э) с плотностью дислокаций не более 10^5 м$^{-2}$. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка кремния [111] или [100]. Предельное отклонение плоскости торцового среза монокристаллических слитков от плоскости ориентации не должно превышать 3°. Номинальные диаметры слитков $62{,}5^{+3}_{-2}$, $78{,}5^{+3}_{-2}$ и $102{,}5^{+3}_{-2}$ мм. Концентрация кислорода в слитках кремния диаметром 62,5 и 78,5 мм не должна превышать $7 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$, а в слитках диаметром 102,5 мм — $1 \cdot 10^{24}$ м$^{-3}$. Слитки кремния с удельным электрическим сопротивлением более 0,03 Ом·м должны иметь время жизни неравновесных носителей заряда: для электронного типа электрической проводимости — не менее 7,5 мкс, для дырочного — не менее 2,5 мкс. Десять групп марок слитков монокристаллического кремния характеризуются различным номинальным удельным электрическим сопротивлением (0,00005—0,4 Ом·м), относительным отклонением средних значений удельного электрического сопротивления торцов от номинального значения на 20—40 % и различным относительным отклонением удельного электрического сопротивления от среднего значения по торцу слитка на 10—20 %.

Монокристаллический кремний, предназначенный для производства полупроводниковых источников тока (ТУ 48-4-258—80, ОКП 17 7215), изготовляется в виде монокристаллических слитков, полученных по методу Чохральского, диаметром 40—55 мм и длиной не менее 50 мм. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111] или по согласованию с потребителем [100]. Плотность дислокаций для всех марок не должна превышать $5 \cdot 10^8$ м$^{-2}$.

77. Удельное электрическое сопротивление и ориентация продольной оси монокристаллического слитка для различных марок кремния (ТУ 48-4-466—85)

Марка	$\rho_д \cdot 10^2$, Ом·м	Ориентация	Марка	$\rho_н \cdot 10^2$, Ом·м	Ориентация
КВЭ1	От 1 до 50 вкл.	[111]	КВД1	От 1 до 50 вкл.	[111]
КВЭ2	» 1 » 50 »	[100]	КВД2	» 1 » 50 »	[100]
КВЭ3	Св 50 » 150 »	[111]	КВД3	Св. 50 » 150 »	[111]
КВЭ4	» 50 » 150 »	[100]	КВД4	» 50 » 150 »	[100]

Кремний КСД — солнечный дырочного типа электрической проводимости, легированный бором; значения УЭС 0,003—0,03 Ом·м либо 0,05—0,45 Ом·м.

Кремний КСЭ — солнечный электронного типа электрической проводимости, легированный фосфором; значения УЭС 0,006—0,25 Ом·м. Время жизни неравновесных носителей заряда зависит от УЭС слитков.

Монокристаллический кремний, полученный бестигельной зонной плавкой, легированный фосфором в процессе нейтронной активации, предназначенный для производства силовых полупроводниковых приборов, выпускается либо марки БО — бестигельный однороднолегированный (ТУ 48-4-449—83), либо марки КОФ — кремний однородный, легированный фосфором (ТУ 48-4-443—83, ОКП 17 7222).

Слитки монокристаллического кремния марки БО имеют диаметр 54±±0,05 мм, длину не менее 100 мм. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 2°. Слитки имеют электронный тип электрической проводимости, интервал УЭС 1,30—1,50 Ом·м, время жизни неравновесных носителей заряда не менее 70 мкс. Плотность дислокаций не более 10^5 м$^{-2}$. Свирлевые дефекты отсутствуют. Концентрация атомов оптически активного кислорода не более $1 \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$, оптически активного углерода не более $4 \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$.

Слитки монокристаллического кремния марки КОФ имеют диаметр 44, 54, 60 либо 84 мм с погрешностью ±1 мм. Ориентация оси слитка [111], отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3°. Имеются два интервала номинальных значений УЭС: 0,40—2,00 и 2,10—3,50 Ом·м. Время жизни неравновесных носителей заряда (в мкс) должно быть не менее половины УЭС (в Ом·см) для номинальных значений УЭС 0,70—2,00 Ом·м и не менее 30 мкс для номинальных значений УЭС 0,40—0,60 Ом·м. Время жизни неравновесных носителей заряда в слитках с номинальным УЭС 2,10—3,50 Ом·м должно быть не менее 100 мкс. Плотность дислокаций в слитках не более 10^5 м$^{-2}$. Концентрация оптически активных кислорода и углерода не должна превышать $5 \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$. Допустимое относительное отклонение средних значений УЭС торцов от номинального значения и допустимое относительное отклонение УЭС от среднего значения по торцу слитка не должно превышать соответственно 12 и 7 % для слитков с номинальным значением УЭС 0,40—2,00 Ом·м и 15 и 10 % для слитков с номинальным значением УЭС 2,10—3,50 Ом·м.

Монокристаллический кремний для фотоприемников (ТУ 48-4-363—75) получают как методом бестигельной зонной плавки (ОКП 17 724 марки КБ), так и методом Чохральского (ОКП 17 7214 марки КЧ), дырочного и электронного типа электрической проводимости (легированы бором и фосфором соответственно).

Некоторые электрофизические свойства кремния, предназначенного для фотоприемников, приведены в табл. 78. Диффузионная длина неравновесных носителей заряда

$$L = 10^{-2}\sqrt{D\tau},$$

где $D = 35{,}36$ см^2/с для кремния дырочного типа электрической проводимости и $D = 13$ см^2/с для кремния электронного типа электрической проводимости. Концентрация оптически активного кислорода должна быть не более $1 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$ для марок КБ и $7 \cdot 10^{23}$ м$^{-3}$ для марок КЧ. Кроме приведенных величин, слитки кремния различаются геометрическими размерами.

Монокристаллический кремний, полученный методом бестигельной зонной плавки из поликристаллического кремния водородного восстановления (ТУ 48-4-253—73, ОКП 17 7221), предназначенный для производства полупроводниковых приборов, выпускается марки КВД (кремний водородный дырочного типа электрической проводимости).

Слитки монокристаллического кремния марки КВД поставляются диаметром 18—23 мм и длиной не менее 30 мм. Ориентации продольной оси монокрис-

78. Некоторые электрофизические свойства кремния, предназначенного для фотоприемников (ТУ 48-4-363—75)

Кремний	$\rho_{\text{н}} \cdot 10^3$, Ом·м	$(\rho_{н1}-\rho_{н2}) \times 10^2$, Ом·м	Тип электропроводимости	Плотность дислокаций, $м^{-2}$, не более	Диффузионная длина, мм, не менее
КБ1	—	80—140	Э	$1 \cdot 10^5$	0,3
КБ2	—	80—140	Э	$1 \cdot 10^6$—$5 \cdot 10^8$	0,3
КБ3	—	100—250	Э	$1 \cdot 10^5$	0,3
КБ4	—	100—250	Э	$1 \cdot 10^5$	0,3
КБ5	20	—	Э	$1 \cdot 10^5$	0,3
КБ6	20	—	Э	$1 \cdot 10^5$	0,3
КБ7	—	2000 и выше	Д	$5 \cdot 10^8$	0,3
КБ8	От 5 до 50 вкл.	—	Э	$1 \cdot 10^5$	0,16
КБ9	Св. 50 » 100 »	—	Э	$1 \cdot 10^5$	0,25
КБ10	» 100 » 200 »	—	Э	$1 \cdot 10^5$	0,35
КБ11	» 200 » 400 »	—	Э	$1 \cdot 10^5$	0,35
КБ12	» 400 » 600 »	—	Э	$1 \cdot 10^5$	0,35
КЧ1	40	—	Д	$1 \cdot 10^6$	0,3
КЧ2	7,5	—	Э	$1 \cdot 10^7$—$2 \cdot 10^8$	0,5

таллического слитка [111], отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3°. Плотность дислокаций не более $5 \cdot 10^8$ $м^{-2}$; концентрация атомов оптически активного кислорода не более $2 \cdot 10^{22}$ $м^{-3}$.

Монокристаллический моносилановый кремний (ТУ 48-4-504—88), предназначенный для производства pin-диодов и магнитодетекторов, изготовляется методом бестигельной зонной плавки в вакууме или газовой среде электронного или дырочного типа электрической проводимости.

Удельное электрическое сопротивление марок кремния дырочного типа электрической проводимости (КМД) и электронного типа электрической проводимости (КМЭ) приведено в табл. 79. Допустимое относительное отклонение УЭС от среднего значения по длине слитка не более 35 %; время жизни неравновесных носителей заряда не более 500 мкс для всех марок. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111], отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3°. Плотность дислокаций не более $4 \cdot 10^8$ $см^{-2}$; концентрация атомов оптически активного кислорода не более $2 \cdot 10^{22}$ $м^{-3}$.

Поликристаллический зонноочищенный германий (ГОСТ 16154—80) марок ГПЗ 1 и ГПЗ 2 предназначен для изготовления легированных монокристаллов германия, для получения сплавов,

79. Удельное электрическое сопротивление моносиланового кремния (ТУ 48-4-504—88)

Марка	ρ_1, Ом·м, не менее	Марка	ρ_1, Ом·м, не менее
КМД-1	10	КМД-6	60
КМД-2	20	КМД-10	100
КМД-3	30	КМД-20	200
КМД-4	40	КМЭ-1	10
КМД-5	50		

производства заготовок оптических деталей и других целей.

Монокристаллы германия, предназначенные для производства полупроводниковых приборов, легированные сурьмой, изготовляют (ГОСТ 16153—80) электронного типа электрической проводимости (ГЭ) и легированные галлием дырочного типа электрической проводимости (ГД). Диаметр монокристаллических слитков 28—40 мм, длина не менее 50 мм. Интервал номинальных УЭС 0,001—0,45 Ом·м. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111]; предельное отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 2°.

Номинальные УЭС монокристаллических слитков выбирают в соответствии с ГОСТ 8032—84 по следующим рядам: для УЭС 0,0001—0,1 Ом·м — (0,1; 0,12; 0,15; 0,2; 0,25; 0,31; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0)·10^{-2} Ом·м; для УЭС 0,01—0,10 Ом·м — (1,1; 1,4; 1,8; 2,2; 2,8; 3,5; 4,5; 5,6; 7,1; 9,0)·10^{-2} Ом·м; для УЭС 0,10—0,45 Ом·м — (11,2; 14; 18; 22,4; 28; 35,5; 45)·10^{-2} Ом·м.

Монокристаллические слитки германия по допускаемому отклонению удельного электрического сопротивления от выбранного номинала и по плотности дислокаций делят на три подгруппы. Для подгруппы 1 допускаемое отклонение УЭС от выбранного номинала не должно составлять более ±25 %, для подгруппы 2 — более ±20 % и для подгруппы 3 — более ±15 %.

Плотность дислокаций для подгруппы 1 должна составлять не более $5 \cdot 10^8$ $м^{-2}$, для подгруппы 2 — не более $2 \cdot 10^8$ $м^{-2}$, для подгруппы 3 — не более $8 \cdot 10^7$ $м^{-2}$.

Подвижность носителей заряда в монокристаллических слитках германия в зависимости от УЭС и типа электрической проводимости должна соответствовать нормам, указанным в табл. 80.

Монокристаллический германий, легированный золотом (З), сурьмой и золотом (СЗ), галлием и золотом (ГЗ) (ТУ 48-4-291—74, ОКП 17 7441), предназначенный для производства полупроводниковых приборов, поставляется в виде слитков электронного (Э) типа электрической проводимости и дырочного (Д) типа электрической проводимости. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3°. Некоторые электрофизические свойства германия приведены в табл. 81. Монокристаллические слитки выращивают диаметром 18—35 мм и длиной св. 30 мм.

80. Подвижность носителей заряда в монокристаллических слитках германия (ГОСТ 16153—80)

$\rho_1 \cdot 10^3$, Ом·м	Подвижность носителей заряда при температуре (23±2) °С, $м^2/(В \cdot с)$, не менее	
	Электроны	Дырки
От 0,1 до 0,23 вкл.	0,18	0,13
Св. 0,24 до 0,49 вкл.	0,23	0,14
Св. 0,50 до 0,89 вкл.	0,26	0,15
Св. 0,9 до 2,4 вкл.	0,31	0,16
Св. 2,5 до 5,9	0,33	0,17
Св. 6,0 до 15,9	0,34	0,17
Св. 16,0 до 45,0	0,36	0,17

Монокристаллический германий, легированный фосфором, электронного типа электрической проводимости (ТУ 48-4-396—77, ОКП 17 7443), предназначенный для производства подложек эпитаксиальных структур (марки ГЭФ-0,001) и полупроводниковых приборов (марка ГЭФ-0,005), выпускают с номинальным значением УЭС не более 0,000012 и 0,00005 Ом·м соответственно. Монокристаллические слитки германия марки ГЭФ-0,001 имеют диаметр 20 мм и длину не менее 50 мм; слитки германия марки ГЭФ-0,005 имеют диаметр 25 мм и длину не менее 25 мм. Ориентация продольной оси монокристаллических слитков [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости

81. Электрофизические свойства германия (ТУ 48-4-291—74)

Марка	$\rho_н \cdot 10^3$, Ом·м	Отклонение ρ_i от номинала, %	Плотность дислокаций, $м^{-2}$, не более	Расчетная концентрация золота, $м^{-3}$, не менее
ГДЗ 0,6	0,6	±10	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^{21}$
ГДЗ 0,7	0,7	±10	$5 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^{21}$
ГДГЗ 0,6	0,6	±10	$5 \cdot 10^7$	$4{,}5 \cdot 10^{21}$
ГДГЗ 3	3,0	±10	$4 \cdot 10^7$	$(2 \div 5)\ 10^{20}$
ГЭСЗ 0,16	0,16	±20	$5 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^{21}$
ГЭСЗ 0,20	0,20	±20	$5 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^{21}$
ГЭСЗ (2,0÷3,0) ± 15 %	2,0—3,0	±15	$5 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{20}$
ГЭСЗ (2,0÷3,0) ± 20 %	2,0—3,0	±20	$5 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{20}$
ГЭСЗ 6,0 ± 25 %	6,0	±25	$5 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^{20}$

ориентации не более 2°. Плотность дислокаций для марки ГЭФ-0,001 не более $3 \cdot 10^7$ $м^{-2}$, для марки ГЭФ-0,005 не более $5 \cdot 10^8$ $м^{-2}$.

Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$ используются для изготовления диодов, транзисторов, сверхвысокочастотных приборов на основе эффекта Гана, модуляторов инфракрасного излучения, приемников излучения, солнечных батарей, лазеров, датчиков Холла, магниторезисторов и других приборов.

В табл. 82 приведены некоторые физико-химические свойства фосфидов, арсенидов и антимонидов галлия и индия. Эти соединения имеют кубическую решетку типа цинковой обманки (пространственная группа $T_d^2 - F\overline{4}3m$).

Сложные полупроводники типа $A^{III}B^V$ выпускаются промышленностью в широком ассортименте. Для характеристики отдельных марок полупроводников используются буквенно-цифровые обозначения. Первыми двумя буквами обозначается собственно полупроводник: АГ — арсенид галлия, ФГ — фосфид галлия, ГС — антимоинд галлия, ИМ — арсенид индия, ФИ — фосфид индия, ИС — антимонид индия. Справа добавляется буква, обозначающая тип электропроводимости: Э — электронный, Д — дырочный. Для арсенида галлия после АГ добавляется буква Н для слитков, полученных горизонтальной направленной кристаллизацией, или Ч — для слитков, полученных по методу Чохральского. Далее идет буква, обозначающая легирующую примесь: Т — теллур, О — олово, Ц — цинк, Г — германий, К — кремний, Х — хром, М — марганец. После набора прописных букв идут цифры и строчные буквы, характеризующие различные параметры материала. Расшифровка значений марок дана в соответствующих технических условиях.

Арсенид галлия (ОСТ 4.032.015—80) применяется для производства электронных приборов и эпитаксиальных структур. Арсенид галлия выпускается как в виде поликристаллических слитков (марка АГН-1), так и в виде монокристаллических слитков (остальные марки). Выращивают монокристаллы либо горизонтальной направленной кристаллизацией, либо вытягиванием по методу Чохральского из-под флюса. В качестве легирующих примесей используют теллур, олово, цинк и кремний. Монокристаллические слитки, легированные цинком, имеют дырочный тип электрической проводимости, остальные — электронный. Слитки арсенида галлия различных марок различаются концентрацией основных носителей заряда (ОНЗ), допустимым отклонением концентрации ОНЗ (табл. 83) от номинального значения (10—80 %), номинальными значениями диаметров слитков (20—50 мм), плотностью дислокаций ($5 \cdot 10^7$—$8 \cdot 10^8$ $м^{-2}$). Ориентация продольной оси монокристаллических слитков [111], [100], [110]. Отклонение плоскости торцового среза

82. Некоторые физико-химические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ [33, 39]

Параметр	GaP	GaAs	GaSb	InP	InAs	InSb
Относительная молекулярная масса	100,69	144,64	191,47	145,79	189,74	236,57
$\rho_{рентг} \cdot 10^{-3}$, $кг/м^3$	4,07	5,32	5,65	4,78	5,67	5,78
Постоянная решетки при 25 °С, нм	0,54506	0,565315	0,60954	0,58687	0,605838	0,64789
Твердость по минералогической шкале	5	4,5	4,5	—	4	3,8
Микротвердость, ГПа	9,5	7,6	4,7	4,4	3,3	2,35
Температура плавления, °С	1467	1238	706	1058	942	530
Удельная теплота плавления, кДж/кг	1220	730	340	590	390	203
Удельная теплоемкость при 27 °С, Дж/(кг·°С)	437	320	254	312	252	209
Теплопроводность при 27 °С, Вт/(м·°С)	77	44	33	68	27	17
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, $°С^{-1}$	4,7	5,39	6,1	4,6	4,68	4,9
Температура Дебая, °С	173	71	~7	48	—24	—71
Ширина запрещенной зоны, эВ:						
при 27 °С	2,26	1,43	0,70	1,35	0,36	0,18
при —273 °С	2,34	1,52	0,813	1,42	0,425	0,236
Приведенная эффективная масса $m_{эфф}/m_0$:						
электронов	0,35	0,068	0,047	0,073	0,025	0,0155
легких дырок	0,17	0,087	0,052	0,078	0,025	0,02
тяжелых дырок	0,67	0,48	0,35	0,4	0,41	0,4
Подвижность носителей заряда при 27 °С, $м^2/(В \cdot с)$:						
электроны	0,019	0,95	0,40	0,46	3,30	7,80
дырки	0,012	0,045	0,14	0,015	0,046	0,075
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	0,01	0,004	~0,0009	0,005	0,0003	0,00024
Показатель преломления	3,45	3,58	3,79	3,27	3,52	3,96
Низкочастотная диэлектрическая проницаемость	11,12	12,53	15,63	12,35	14,55	17,72
Упругие постоянные, ГПа [4]:						
C_{11}	141,2	118,8	88,5	102,2	86,5	67,2
C_{12}	62,53	53,8	40,4	57,6	48,5	36,6
C_{44}	70,47	59,4	43,2	46,0	39,6	30,2

83. Концентрация основных носителей заряда (ОНЗ) в слитках арсенида галлия (ОСТ.4.032.015—80)

Марка	Концентрация ОНЗ, $м^{-3}$	Марка	Концентрация ОНЗ, $м^{-3}$
АГЧ	Не более $1 \cdot 10^{22}$	АГЧО-1	$1{,}5 \cdot 10^{23}$—$2{,}5 \cdot 10^{24}$
АГН-1	» » $2 \cdot 10^{22}$	АГЧО-2	$1 \cdot 10^{23}$—$4 \cdot 10^{24}$
АГН-2	» » $2 \cdot 10^{23}$	АГЧО-3	$2{,}5 \cdot 10^{24}$—$5 \cdot 10^{24}$
АГЧТ-1	$5 \cdot 10^{22}$—$4 \cdot 10^{24}$	АГЧЦ-1	$1{,}5 \cdot 10^{23}$—$2 \cdot 10^{25}$
АГЧТ-2	$5 \cdot 10^{23}$—$8 \cdot 10^{24}$	АГЧЦ-2	$2 \cdot 10^{25}$—$6{,}5 \cdot 10^{25}$
АГЧТ-3	$4 \cdot 10^{24}$—$1 \cdot 10^{25}$	АГЧЦ-3	$6{,}5 \cdot 10^{25}$—$9 \cdot 10^{25}$
АГНК	$9 \cdot 10^{23}$—$3{,}5 \cdot 10^{24}$	АГЧЦ-4	$9 \cdot 10^{25}$—$1{,}2 \cdot 10^{26}$

84. Подвижность основных носителей заряда (нижний предел) для арсенида галлия, легированного теллуром, оловом, цинком и нелегированного при температуре (23±2) °С (ОСТ 4.032.015—80)

Концентрация ОНЗ, $м^{-3}$	Подвижность носителей заряда, $м^2/(В \cdot с)$, при легирующих примесях			
	Теллур	Олово	Цинк	Нелегированный арсенид галлия
$1 \cdot 10^{22}$	—	—	—	0,50
$2 \cdot 10^{22}$	—	—	—	0,48
$4 \cdot 10^{22}$	—	0,40	—	0,44
$6 \cdot 10^{22}$	—	0,39	—	0,42
$8 \cdot 10^{22}$	0,39	0,38	—	—
$1 \cdot 10^{23}$	0,38	0,37	0,0170	—
$2 \cdot 10^{23}$	0,36	0,34	0,0160	—
$4 \cdot 10^{23}$	0,34	0,31	0,0140	—
$6 \cdot 10^{23}$	0,32	0,29	0,0135	—
$8 \cdot 10^{23}$	0,30	0,28	0,0120	—
$1 \cdot 10^{24}$	0,25	0,22	0,0100	—
$4 \cdot 10^{24}$	0,20	0,16	0,0080	—
$6 \cdot 10^{24}$	0,17	—	0,0065	—
$8 \cdot 10^{24}$	0,14	—	0,0055	—
$1 \cdot 10^{25}$	—	—	0,0050	—
$5 \cdot 10^{25}$	—	—	0,0040	—
$1 \cdot 10^{25}$	—	—	0,0030	—

от плоскости ориентации не более 3°. Подвижность основных носителей заряда должна соответствовать табл. 84.

Арсенид галлия, легированный кремнием, выпускается пяти марок (АГНК-1—АГНК-5) с номинальной концентрацией ОНЗ $9 \cdot 10^{23}$—$3{,}5 \times 10^{24}$ $м^{-3}$; подвижность ОНЗ не ниже 0,12 $м^2/(В \cdot с)$. Плотность дислокаций $1 \cdot 10^6$—$1 \cdot 10^8$ $м^{-2}$.

Выпускаются четыре марки арсенида галлия (полуизолирующий, легированный хромом, кислородом и индием) с УЭС не менее $1 \cdot 10^5$ Ом·м и арсенид галлия для модуляторов марки АГЧПМ с УЭС не менее $5 \cdot 10^5$ Ом·м.

Монокристаллический фосфид галлия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов, изготовляется как электронного, так и

дырочного типа электрической проводимости. В качестве легирующих примесей используются сера, цинк, окись хрома. Для легирования высокоомного фосфида галлия марки ФГВ-1 используются железо, ванадий и марганец. Легирование фосфида галлия марок ФГВ-2 и ФГВ-3 осуществляется хромом. Слитки монокристаллического фосфида галлия выпускаются с номинальными значениями диаметра 35, 40, 45, 50 мм и длиной не менее 30 мм. Ориентация продольной оси монокристаллического слитка [111] или [100]. Некоторые электрофизические свойства монокристаллических слитков фосфида галлия приведены в табл. 85.

Антимонид галлия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов и других целей (ТУ 48-4-464—85, ОКП 17 7591), выпускается в виде нелегированных и легированных теллуром или кремнием монокристаллических слитков, выращенных по методу Чохральского. Длина и диаметр слитков не менее 20 мм. Плотность дислокаций в слитках не превышает $1 \cdot 10^8$ $м^{-2}$. Нелегированный и легированный кремнием антимонид галлия имеет дырочный тип электрической проводимости, а легированный теллуром — электронный. Основные свойства антимонида галлия приведены в табл. 86.

Арсенид индия для производства полупроводниковых приборов и оптических целей (ТУ 48-4-420—80) выпускается в виде поликристаллических слитков, выращенных по методу Бриджмена (марка ИМЭП-0) и по методу Чохральского (марка ИМЭП-1), и в виде монокристаллических слитков, нелегированных и легированных теллуром, оловом, цинком и марганцем, выращенных по методу Чохральского.

Концентрация ОНЗ при —196 °С в образцах поликристаллического арсенида индия не превышает $5 \cdot 10^{22}$ $м^{-3}$; концентрация ОНЗ для различных марок монокристаллического арсенида индия приведена в табл. 87. Марки монокристаллических слитков делятся

85. Электрофизические свойства слитков фосфида галлия [33]

Марка	Концентрация ОНЗ, $м^{-3}$	Подвижность ОНЗ, $м^2/(В \cdot с)$ при 27 °С,		ρ_1, Ом·м	Плотность дислокаций, $м^{-2}$, не более
		не менее	не более		
ФГЭ-1	$1 \cdot 10^{23}$—$8 \cdot 10^{24}$	0,015	0,065	—	—
ФГЭС-1А	$1 \cdot 10^{23}$—$4 \cdot 10^{23}$	0,012	0,050	—	$5 \cdot 10^8$
ФГЭС-1Б	$1 \cdot 10^{23}$—$4 \cdot 10^{23}$	0,012	0,040	—	$4 \cdot 10^8$
ФГЭС-2	$3 \cdot 10^{23}$—$7 \cdot 10^{23}$	0,010	0,035	—	$2 \cdot 10^9$
ФГДЦ-1	$1 \cdot 10^{23}$—$4 \cdot 10^{23}$	0,004	—	—	$2 \cdot 10^9$
ФГДЦ-2	$4 \cdot 10^{23}$—$9 \cdot 10^{23}$	—	—	—	$2 \cdot 10^9$
ФГВ-1	—	—	—	1—10^6	$5 \cdot 10^8$
ФГВ-2	—	—	—	10^4—10^9	$2 \cdot 10^9$
ФГВ-3	—	—	—	Не менее 10^9	$2 \cdot 10^9$

86. Электрофизические свойства слитков антимонида галлия (ТУ 48-4-464—85)

Марка	Концентрация ОНЗ при —196 °С, $м^{-3}$	Подвижность ОНЗ, $м^2/(В \cdot с)$, не менее	Ориентация оси слитка
ГСД	Не более $3 \cdot 10^{22}$	0,200	[211], [111]
ГСДК	Не менее $1 \cdot 10^{24}$	0,015	[111]
ГСЭТ	$3 \cdot 10^{23}$—$1{,}5 \cdot 10^{24}$	0,300	[211]

87. Концентрации основных носителей заряда в монокристаллических слитках арсенида индия при —196 °С (ТУ 48-4-420—80)

Марка	Концентрация ОНЗ, $м^{-3}$	Марка	Концентрация ОНЗ, $м^{-3}$
ИМЭ	Не более $3 \cdot 10^{22}$	ИМЭТ-2	Св. $9 \cdot 10^{23}$ до $2 \cdot 10^{24}$
ИМЭО-1	$5 \cdot 10^{22}$—$9 \cdot 10^{23}$	ИМЭТ-3	» $1 \cdot 10^{24}$ » $5 \cdot 10^{24}$
ИМЭО-2	Св. $9 \cdot 10^{23}$ до $2 \cdot 10^{24}$	ИМДЦ-1	$1 \cdot 10^{22}$—$5 \cdot 10^{22}$
ИМЭО-3	» $1 \cdot 10^{24}$ » $5 \cdot 10^{24}$	ИМДЦ-2	Св. $5 \cdot 10^{22}$ до $1 \cdot 10^{23}$
ИМЭО-4	Св. $5 \cdot 10^{24}$	ИМДЦ-3	» $1 \cdot 10^{23}$ » $1 \cdot 10^{24}$
ИМЭО-5	$7 \cdot 10^{23}$—$2 \cdot 10^{24}$	ИМДЦ-4	» $1 \cdot 10^{24}$ » $8 \cdot 10^{24}$
ИМЭТ-1	$5 \cdot 10^{22}$—$9 \cdot 10^{23}$	ИМДМ	$(1—7) \cdot 10^{22}$

88. Коэффициент оптического пропускания (T) арсенида индия марки ИМЭП-1 для толщины образца $(3 \mp 0,1)$ мм (ТУ 48-4-420—80)

$T = \Phi_{пр}/\Phi_{пад}$	Длина волны, мкм	$T = \Phi_{пр}/\Phi_{пад}$	Длина волны, мкм
0	3,4	0,42	4,7
0,4	4,3	0,40	Св. 5,3

89. Электрофизические свойства монокристаллов фосфида индия

Марка	Концентрация ОНЗ, $м^{-3}$	Подвижность ОНЗ, $м^2/(В \cdot с)$	Плотность дислокаций, $м^{-2}$
ФИЭ-1	$\leqslant 5 \cdot 10^{22}$	0,30	$5 \cdot 10^9$
ФИЭТ-2	$5 \cdot 10^{22}$—$5 \cdot 10^{23}$	0,25	
ФИЭТ-3	$5 \cdot 10^{23}$—$5 \cdot 10^{24}$	0,10	
ФИДЦ-1	$5 \cdot 10^{23}$—$1 \cdot 10^{24}$	—	$1 \cdot 10^9$
ФИДЦ-2	$1 \cdot 10^{24}$—$8 \cdot 10^{24}$	—	

на четыре группы по плотности дислокаций: а — не более $5 \cdot 10^7$ $м^{-2}$; б — $7 \cdot 10^7$ $м^{-2}$; в — $1 \cdot 10^8$ $м^{-2}$; г — плотность дислокаций не лимитирована. Диаметр слитков может изменяться от 25 до 80 мм. Чем больше допустимая плотность дислокаций, тем большего диаметра могут быть получены слитки. Ориентация продольной оси монокристаллических слитков арсенида индия [111]; отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не должно превышать 3°.

Для арсенида индия марки ИМЭП-1 коэффициент пропускания, равный отношению прошедшего светового потока $\Phi_{пр}$ к падающему $\Phi_{пад}$, должен быть не меньше величин, приведенных в табл. 88.

Монокристаллический фосфид индия, предназначенный для производства полупроводниковых приборов, изготовляют электронного (ФИЭ) и дырочного (ФИФ) типа электрической проводимости. В качестве легирующих элементов используют теллур или цинк. Основные электрофизические свойства различных марок фосфида индия приведены в табл. 89.

90. Электрофизические свойства антимонида индия (ТУ 48-4-292—85)

Марка	Концентрация ОНЗ, $м^{-3}$	$(\rho_1—\rho_2)$, Ом·м	Подвижность ОНЗ, $м^2/(В \cdot с)$, не менее	Плотность дислокаций, $м^{-2}$, не более
ИСД-1	$1 \cdot 10^{18}$—$5 \cdot 10^{19}$	0,5—5,0	0,3	$5 \cdot 10^6$
ИСД-2	$3 \cdot 10^{18}$—$3 \cdot 10^{19}$	0,5—3,0	0,4	$5 \cdot 10^6$
ИСД-3	$5 \cdot 10^{18}$—$3 \cdot 10^{19}$	0,5—2,5	0,5	$1 \cdot 10^7$
ИСД-3у	$5 \cdot 10^{18}$—$1,5 \cdot 10^{19}$	0,65—2,0	0,5	$1 \cdot 10^7$
ИСД-4	$3 \cdot 10^{19}$—$1 \cdot 10^{21}$	Менее 0,50	—	$1 \cdot 10^7$
ИСД-5	$1 \cdot 10^{21}$—$1 \cdot 10^{24}$	Менее 0,50	—	$1 \cdot 10^7$
ИСЭ-0	$6 \cdot 10^{21}$—$2 \cdot 10^{20}$	—	70	$5 \cdot 10^6$
ИСЭ-1	$8 \cdot 10^{19}$—$2 \cdot 10^{20}$	—	50	$5 \cdot 10^6$
ИСЭ-2	$2 \cdot 10^{20}$—$3 \cdot 10^{21}$	—	20	$5 \cdot 10^6$
ИСЭ-2у	$6 \cdot 10^{20}$—$3 \cdot 10^{21}$	—	20	$5 \cdot 10^6$
ИСЭ-3	$1 \cdot 10^{19}$—$1,4 \cdot 10^{24}$	Не менее 0,50	2	$1 \cdot 10^7$
ИСЭ-4	$1 \cdot 10^{18}$—$6 \cdot 10^{19}$	0,001—0,1	10	$5 \cdot 10^6$
ИСЭ-5	$6 \cdot 10^{19}$—$2 \cdot 10^{20}$	—	10	$5 \cdot 10^6$
ИСЭП-1	$(1,5—5,0) 10^{24}$	—	—	—
ИСЭП-2	$(4,0—8,0) 10^{24}$	—	—	—
ИСЭВ-1	$2 \cdot 10^{20}$	—	60	$2 \cdot 10^6$
ИСЭВ-2	$2 \cdot 10^{20}$	—	30	$2 \cdot 10^6$

Обозначение. $(\rho_1 — \rho_2)$ — интервал значений удельного электрического сопротивления.

Антимонид индия (ТУ 48-4-292—85) поликристаллический и монокристаллический, предназначенный для производства фотосопротивлений и других полупроводниковых приборов, получают по методу Чохральского с ориентацией продольной оси слитка [211]. Отклонение плоскости торцового среза от плоскости ориентации не более 3°.

Основные электрофизические свойства антимонида индия различных марок приведены в табл. 90. Слитки марок ИСЭ-0, ИСЭ-1, ИСЭ-5 и ИСЭВ-1 изготовляются нелегированными. Образцы с электронным типом электрической проводимости легированы теллуром, а с дырочным — германием. По согласованию с потребителем возможно легирование цинком, марганцем, кадмием. Время жизни неравновесных носителей заряда контролируется для марок ИСЭВ-1 и ИСЭВ-2 и составляет не менее 0,5 и 1 мкс соответственно.

8. АМОРФНЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ

Аморфные металлические сплавы или металлические стекла (МС) являются новым перспективным материалом. По химическому составу они состоят из металлов и элементов аморфизаторов, в качестве которых используют бор, углерод, кремний, азот и другие в количестве до 30 %. Аморфное состояние сплава характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении атомов упаковки. Такое состояние материала достигается сверхбыстрым его охлаждением из газообразного, жидкого или ионизированного состояния. Существуют различные методы получения аморфных сплавов.

1. Высокоскоростное ионно-плазменное и термическое распыление материала с последующей конденсацией паров

на охлаждаемую жидким азотом подложку. Получают слои толщиной до 5 мм.

2. Химическое и электролизное осаждение ионов металлов на подложку.

3. Оплавление тонких поверхностных слоев деталей лазерным лучом, а также лазерная обработка смеси порошков с последующим быстрым отводом теплоты от расплава.

4. Закалка из жидкого состояния. Это основной метод получения МС. Закалка осуществляется различными способами. Для производства лент струя жидкого металла направляется на вращающийся охлаждаемый барабан. Изготовляют фольгу в виде ленты шириной 1—200 мм и толщиной 20—60 мкм. Аморфную тонкую проволоку получают извлечением жидкого металла из ванны быстро вращающимся диском, погружением вертикально торцом в расплав. Этот же способ применяют и для производства аморфных металлических порошков. Гранулометрический состав порошков и их конфигурация задаются профилем рабочей кромки диска. Известен способ аморфизации охлаждением струи расплава в газообразной или жидкой средах. Для изготовления тонких аморфных нитей в стеклянной изоляции металл помещают в стеклянную трубку, расплавляют с помощью токов высокой частоты, вытягивают и быстро охлаждают. Нити имеют диаметр от 5 мкм до нескольких десятков микрометров.

Возможность получения сплавов МС определяется химическим составом и скоростью охлаждения жидкого расплава. Сплавы должны иметь низкую температуру плавления и высокую температуру аморфизации. Скорость охлаждения расплава составляет 10^5—10^{10} °С/с.

Аморфное состояние сплава является метастабильным. Поэтому МС подвергают отжигу, в процессе которого происходит релаксация к более стабильному состоянию стеклофазы. Однако при температурах отжига, превышающих (0,4—0,65) $T_{пл}$, материал кристаллизуется.

Аморфные конструкционные сплавы. МС обладают ценным комплексом механических свойств. Прежде всего их особенностью является сочетание высокой твердости и прочности. Твердость HV может достигать значений более 1000, а прочность — 4000 МПа и выше. Например, сплав $Fe_{46}Cr_{16}Mo_{20}C_{18}$ имеет твердость HV 1150 при прочности 4000 МПа; сплав $Co_{34}Cr_{28}Mo_{20}C_{18}$ — соответственно 1400 и 4100 МПа.

МС характеризуется высокой упругой деформацией — около 2 % и низким значением пластичности $\delta = 0{,}03 \div 0{,}3$ %. Однако сплавы нельзя отнести к категории хрупких материалов, так как их можно штамповать, резать и прокатывать. Сплавы хорошо поддаются холодной прокатке с обжатием 30—50 % и волочению с обжатием до 90 %.

Механические свойства некоторых аморфных сплавов приведены в табл. 91.

Наряду с высокими механическими свойствами МС обладают хорошей коррозионной стойкостью. Возможность использования МС ограничивается относительно низкой температурой ($T_{крист}$) их перехода при нагреве в кристаллическое состояние, наличием отпускной хрупкости, возникающей при кратковременном нагреве до температур существенно ниже $T_{крист}$, а также тем, что сортамент выпускаемых материалов ограничен. Изготовляются только тонкие ленты, фольга и нити. Получать массивные заготовки и изделия можно методами порошковой металлургии. Однако обычная технология — спекание порошковых заготовок — неприемлема из-за низкой термической стабильности аморфных материалов. В экспериментальном порядке образцы из аморфных порошков изготовляют взрывным прессованием.

Срок службы аморфного сплава зависит от температуры эксплуатации. Термическая стойкость аморфных сплавов невысока. Однако имеются материалы с $T_{крист}$ более 725°С. К ним, в частности, относится сплав $Ti_{40} \times \times Ni_{40}Si_{20}$ с высокими механическими свойствами: HV 1070, $\sigma_в = 3450$ МПа и удельной прочностью $\sigma_в/(\rho g) = 58$ км (ρ — плотность; g — ускорение свободного падения).

Высокопрочные нити из МС могут использоваться в композиционных материалах, а ленты — в виде намотки для упрочнения сосудов высокого давления.

91. Механические свойства аморфных металлических сплавов [10]

Сплав	HV	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	E, ГПа	$E/\sigma_в$	δ, %
$Fe_{80}B_{20}$	1100	3130	—	169	54	—
$Fe_{78}Mo_2B_{20}$	1015	2600	—	144	55	—
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$	640	1710	—	144	84	—
$Fe_{80}P_{13}C_7$	760	3040	2300	121	40	0,03
$Fe_{78}Si_{10}B_{12}$	890	3300	2180	85	26	0,3
$Ni_{75}Si_8B_{17}$	860	2650	2160	103	39	0,14
$Ni_{49}Fe_{29}P_{14}B_6Al_2$	—	1960	—	103	53	0,02
$Pd_{80}Si_{20}$	325	1330	850	67	50	0,11
$Cu_{60}Zr_{40}$	540	1960	1350	76	38	0,2
$Ti_{50}Be_{40}Zr_{10}$	730	1860	—	106	57	—
$Pd_{77,5}Cu_6Si_{16,5}$	129	1810	1000	82	45	0,3
$La_{80}Al_{20}$ *1	—	430	—	24	56	0,1—0,2
$Co_{75}Si_{15}B_{10}$	910	2940	—	104	36	—

*1 При —269 °С.

МС — перспективный материал для изготовления упругих элементов. В этой связи заслуживает внимания сплав $Ti_{40}Be_{40}Zr_{10}$, имеющий высокие релаксационную стойкость и запас упругой энергии. По эффективной силе ($F_э = \sigma^2_{уп}/E^2$, где $\sigma_{уп}$ — предел упругости; E — модуль упругости) пружины из этого сплава на порядок превосходят пружины из обычных поликристаллических металлов.

Отсутствие границ зерен, высокая твердость, износостойкость, коррозионная стойкость аморфных сплавов позволяют получать из них высококачественный тонколезвийный инструмент, например бритвенные лезвия.

Аморфизация поверхностных слоев изделий лазерной обработкой с целью повышения их твердости может составить конкуренцию традиционным методам поверхностного упрочнения. Данным методом, в частности, на порядок (HV 1050) повышена поверхностная твердость монокристаллического сплава $Ni_{60}Nb_{40}$ и достигнута твердость HV 1200 на поверхности изделий из чугуна состава: 3,20 % С; 2,60 % Si; 0,64 % Mn, 0,06 % P.

Магнитомягкие и магнитотвердые аморфные сплавы. Аморфные магнитомягкие сплавы применяют в изделиях электронной техники. По химическому составу сплавы подразделяют на три системы: на основе железа, железа и никеля, железа и кобальта. Разработано большое количество составов МС. Однако опытными и опытно-промышленными партиями выпускают сплавы ограниченной номенклатуры.

МС на основе железа отличает высокая индукция насыщения (1,5—1,8 Тл), и в этом отношении они уступают только электротехническим сталям и железокобальтовым сплавам. По сравнению с электротехническими сталями МС имеют в несколько раз более низкие потери. Перспективно использовать МС в силовых трансформаторах. Однако для этого требуется изменить технологию изготовления трансформаторов (намотку ленты на катушки трансформаторов, отжиг в магнитном поле и в инертной среде, особые условия герметизации и пропитки сердечников).

92. Свойства МС на основе железа [24, 35]

Сплав	B_s, Тл	H_c*1, А/м	θ,*1 °С	B_r/H_c*1	B_r/B_s	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м
$Fe_{80}B_{20}$ (Metglas 2605)	1,60	2,4	374	$32 \cdot 10^4$	0,77	1,45
$Fe_{88}B_2C_7$	1,80	12,0	—	—	—	—
$Fe_{78}Si_{10}B_{12}$*2 (Amomet)	1,55	4,8	447	$21 \cdot 10^4$	0,9	1,55
$Fe_{82}Si_8B_{10}$ (Amomet)	1,60	2,4	—	—	0,75	—
$Fe_{81}B_{13}Si_4C_2$ (Amomet)	1,60	0,6	400	$180 \cdot 10^4$	0,90	1,25
$Fe_{81}B_{13}Si_{3,5}C_{1,5}$ (Metglas 26055C)	1,60	4,8	370	$18 \cdot 10^4$	0,70	1,25
9ЖСР—А	1,60	4,7	370	—	0,70	1,25

*1 Данные получены при термической обработке в магнитном поле.
*2 Сплав получен закалкой в валках, остальные — закалкой на диске.

Магнитные свойства некоторых МС группы железа приведены в табл. 92.

Железоникелевые МС (табл. 93) имеют высокую магнитную проницаемость; по индукции насыщения сравнимы с металлическими магнитными сплавами и ферритами, обладают малой коэрцитивной силой и высокой прямоугольностью петли гистерезиса. МС используют для изготовления трансформаторов и электромагнитных устройств, работающих на повышенных частотах, что позволяет уменьшить габариты изделий и удельные потери. Отечественные марки сплавов Н25-А и 10НСР.

93. Свойства поли- и монокристаллических железоникелевых и железокобальтовых металлических стекол (МС) [24, 35]

Сплав	B_s, Тл	H_c, А/м	θ, °С	$\mu_н$	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м
Железоникелевые МС					
$Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ (Metglas 2826)	0,79	1,6	264	$5 \cdot 10^3$	1,80
$Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$ (Metglas 2826 MB)	0,88	0,56	230	$7 \cdot 10^4$	1,50
$Fe_{32}Ni_{36}Si_{18}B_{14}$ (Amomet)	1,30	0,48	310	$2 \cdot 10^4$	1,30
Н25-А	1,30	0,015	435	—	1,20
10НСР	1,35	0,15	430	4700	1,30
Железокобальтовые МС					
$Fe_{4,5}Co_{70,5}Si_{10}B_{15}$ (Amomet)	0,85	1,6	420	$1 \cdot 10^4$	1,5
$Fe_5Co_{66}Cr_9Si_5B_{15}$ (Amomet)	0,63	0,08	210	$2 \cdot 10^5$	1,6
$Fe_{4,5}Co_{66,8}Ni_{1,5}Nb_{2,2}Si_{10}B_{15}$	0,71	0,40	420	$2 \cdot 10^4$	—
45НПР-А	0,78	1,6	250	$3,1 \cdot 10^5$	—
К83-А	0,7	0,08	350	$2 \cdot 10^4$	1,2
К25-А	1,4	0,04	535	—	1,2
24КСР	1,5	0,1	550	—	1,2
71КНСР	0,5	0,008	—	$2 \cdot 10^4$	—
Некоторые традиционные материалы					
4-79Мо (Пермаллой)	0,77	0,80	460	$3 \cdot 10^4$	0,4
Хардпери *1	0,50	0,40	300	$8 \cdot 10^4$	1,00
Сендаст *1	1,00	4,0	500	$3 \cdot 10^4$	0,80
Монокристалл Mn—Zn феррита	0,40	1,6	180	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-1}$

*1 Поликристаллические магнитные материалы.

94. Свойства резистивных материалов [10]

Сплав	$TK\rho \cdot 10^{-4}$, $°C^{-1}$	$\rho_1 \cdot 10^6$, Ом·м
Аморфные сплавы		
$Ni_{68}Si_{15}B_{17}$	0	1,52
$Ni_{68}Si_{10}B_{22}$	3,9	1,42
$Ni_{67}Si_4B_{29}$	4,2	1,39
$Ni_{67}Si_7B_{26}$	—2,6	1,55
$Ni_{68}Si_{12}B_{20}$	—2,3	1,54
$Cu_{77}Ag_8P_{15}$	—123	1,36
$Cu_{79}Ag_6P_{15}$	—93	1,37
$Cu_{80}Ag_6P_{14}$	—90	1,37
Традиционные кристаллические сплавы		
$Cu_{55}Ni_{45}$	±20	0,49
$Ni_{80}Cr_{20}$	70	1,08
$Ni_{64}Cr_{11}Fe_{25}$	180	1,10

Инварные аморфные сплавы. Некоторые МС на основе железа (93ЖХР-А, 96ЖР-А) в определенных температурных интервалах имеют низкий коэффициент линейного расширения [$\alpha < 10^{-6}$ (°С)$^{-1}$]. При комнатной температуре их свойства близки к свойствам поликристаллического сплава 36Н. Они сохраняют низкое значение α вплоть до температуры 250—300 °С, в то время как сплав 36Н — до 100 °С.

Резистивные аморфные сплавы имеют высокое электрическое сопротивление. Из них изготовляют микропровод в изоляции из стекла. Свойства некоторых резистивных материалов приведены в табл. 94.

МС (системы Ni—Si—B) выгодно отличаются по свойствам от кристаллических сплавов. Они имеют на порядок ниже термический коэффициент электросопротивления и в 1,5 раза больше удельное электрическое сопротивление. Сплавы парамагнитны, коррозионно-стойки, обладают линейной температурной зависимостью ЭДС и относительно высокой температурой кристаллизации. Их можно использовать не только для изготовления прецизионных резисторов, но и для тензодатчиков при измерении деформаций и микросмещений и т. д.

9. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Диэлектрик — материал, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле (ГОСТ 19880—74). Диэлектрический материал предназначен для использования его диэлектрических свойств (ГОСТ 21515—76). Важным свойством диэлектриков является их высокое удельное электрическое сопротивление (10^7—10^{18} Ом·м).

Явление поляризации диэлектрика заключается в возникновении электрического момента тела под влиянием внешних воздействий (чаще всего внешнего электрического поля). Количественно электрическая поляризация вещества характеризуется поляризованностью $\vec{p}$ (Кл/м^2) — векторной величиной, равной пределу отношения электрического момента некоторого объема вещества $\vec{p}_i$ к этому объему v_i при стремлении последнего к нулю:

$$\vec{p} = \lim_{v_i \to 0} \frac{\vec{p}_i}{v_i}.$$

Механизм поляризации диэлектриков зависит от строения диэлектрика. Диэлектрики бывают *полярными и неполярными*. Полярный диэлектрик содержит электрические диполи — молеку-

лы, обладающие дипольным моментом и способные к переориентации во внешнем электрическом поле. В отсутствие поля полярные молекулы находятся в хаотическом тепловом движении и ориентированы беспорядочно. При наложении электрического поля дипольные моменты молекул ориентируются преимущественно по полю и диэлектрик становится поляризованным.

Для неполярных диэлектриков характерна электронная поляризация, которая обусловлена упругим смещением и деформацией электронных оболочек относительно ядер в диэлектрике. Электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков и сопровождает другие типы поляризации.

Ионная поляризация — электрическая поляризация, обусловленная упругим смещением разноименно заряженных ионов относительно их положения равновесия в диэлектрике. Этот тип поляризации имеет место у диэлектриков ионного строения.

Диэлектрические свойства материалов характеризуются абсолютной ε_a и относительной ε_r диэлектрической проницаемостью и абсолютной χ_a и относительной χ_r диэлектрической восприимчивостью.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость (ГОСТ 19880—74) — величина, характеризующая диэлектрические свойства диэлектрика, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля электрического смещения ($\vec{D}$) к модулю напряженности электрического поля ($\vec{E}$), и тензорная для анизотропного вещества. Относительная диэлектрическая проницаемость — отношение абсолютной диэлектрической проницаемости ε_a к электрической постоянной ε_0:

$$\vec{D} = \varepsilon_a \vec{E}; \quad \varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r.$$

Электрическая постоянная в системе СИ определяется как величина, обратная произведению магнитной постоянной μ_0 на квадрат скорости света в вакууме:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} \approx 8{,}854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м},$$

а магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м.

Абсолютная диэлектрическая восприимчивость — величина, характеризующая свойство диэлектрика поляризоваться в электрическом поле, скалярная для изотропного вещества, равная отношению модуля поляризованности к модулю напряженности электрического поля, и тензорная для анизотропного вещества. Относительная диэлектрическая восприимчивость — отношение абсолютной диэлектрической восприимчивости к электрической постоянной:

$$\vec{p} = \chi_a \vec{E}; \quad \chi_a = \varepsilon_0 \chi_r.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость связана с относительной диэлектрической восприимчивостью соотношением

$$\varepsilon_r = \chi_r + 1,$$

а электрическое смещение

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость вещества зависит от внешних факторов, таких, как частота приложенного электрического поля, температура, давление. Диэлектрическая проницаемость электронных и ионных диэлектриков обычно не зависит или слабо зависит от частоты приложенного поля. Это связано с тем, что характерные времена поляризации составляют 10^{-13}—10^{-15} с и при частотах, применяемых в современной электротехнике, за время полупериода успевает установиться равновесие. У полярных диэлектриков, время ориентации молекул которых в электрическом поле больше на несколько порядков, чем время поляризации у неполярных диэлектриков, диэлектрическая проницаемость сначала не изменяется с увеличением частоты, а затем уменьшается. Диэлектрическая проницаемость электронных диэлектриков слабо уменьшается с повышением температуры, а ионных диэлектриков сложным образом зависит от температуры, наиболее часто слабо возрастая с увеличением температуры. У полярных диэлектриков диэлектрическая проницаемость проходит обычно через максимум: диэлектрическая проницаемость сначала увеличивается вследствие уменьшения вязкости диэлектрика, а затем падает в результате разорнентирующего действия температуры на электрические диполи.

Низкая электрическая проводимость диэлектриков объясняется низкой концентрацией носителей тока и их малой подвижностью. Носителями тока в диэлектриках являются электроны, ионы и молионы (коллоидные частицы); различают соответственно электронную, ионную и молионную электрическую проводимость. Диэлектрики имеют более широкую запрещенную зону энергий, чем полупроводники, и соответственно более низкую электрическую проводимость. Ионная электрическая проводимость сопровождается явлением электролиза. Молионная электрическая проводимость наблюдается в коллоидных системах и объясняется наличием электрических зарядов на поверхности частиц дисперсной фазы (молионов). Электрическая проводимость диэлектриков приводит к токам утечки, играющим отрицательную роль при использовании диэлектриков в качестве изолирующих материалов. Ток утечки обусловлен приложением не изменяющегося во времени электрического напряжения. С течением времени ток спадает, приближаясь к сквозному току диэлектрика — постоянной составляющей тока утечки.

Электрическая проводимость диэлектриков зависит от внешних факторов, таких, как температура, давление, влажность, а также от наличия примесей в диэлектриках и приложенного напряжения. Электрическая проводимость диэлектриков обычно растет с повышением температуры, может повышаться с увеличением приложенного напряжения и повышением влажности. Для гигроскопичных волокнистых материалов электрическая проводимость может уменьшаться с повышением температуры в результате уменьшения влажности материала и начинает расти только после удаления значительной доли влаги.

При воздействии электрического поля на диэлектрик происходит поглощение электрической мощности в диэлектрике, которая рассеивается, превращаясь в теплоту — так называемые диэлектрические потери. Диэлектрические потери зависят от свойств диэлектрика, величины и частоты приложенного напряжения. Диэлектрические потери на электрическую проводимость составляют часть диэлектрических потерь, обусловленную сквозным током диэлектрика. Величиной, характеризующей потери в диэлектрике, является угол диэлектрических потерь — угол между векторами плотности переменного тока проводимости и тока смещения диэлектрика на комплексной плоскости. Чем больше этот угол, тем больше диэлектрические потери. Тангенс этого угла равен отношению активного и реактивного токов или отношению мощности потерь к реактивной мощности.

При использовании диэлектриков в качестве диэлектрических материалов по отношению к внешним воздействиям учитываются такие характеристики, как нагревостойкость, стойкость к термоударам, холодостойкость, дугостойкость, химостойкость, радиационная стойкость, коронностойкость, трекингостойкость, влагостойкость, водостойкость, водопоглощение, тропикостойкость, плеснестойкость, влагопоглощение и старение диэлектрика.

Наибольшая по количеству и стоимости часть выпускаемой промышленностью диэлектрических материалов предназначена для использования в качестве *электроизоляционных материалов*. Согласно ГОСТ 21515—76 электроизоляционные материалы делятся на следующие виды.

Электроизоляционный слоистый пластик — электроизоляционный материал, состоящий из слоев волокнистого наполнителя, связанных термореактивным связующим. Выпускается листовой электроизоляционный слоистый пластик в виде листов и фасонный электроизоляционный слоистый пластик в виде различных форм поперечного сечения — стержней, трубок, цилиндров. В зависимости от вида волокнистого наполнителя различают гетинакс, текстолит, асботекстолит, асбогетинакс, стеклотекстолит.

Электроизоляционный фольгированный материал — листовой или рулонный электроизоляционный материал, облицованный с одной или двух сторон металлической фольгой.

Слюдосодержащий электроизоляционный материал — листовой или рулонный электроизоляционный материал, состоящий из пластин щипаной слюды или слоев слюдяной бумаги, склеенных связующим веществом.

Слюдовая электроизоляционная бумага — электроизоляционный материал, состоящий из мелких частичек слюды. В зависимости от способа изготовления различают слюдинитовую и слюдопластовую бумаги.

Миканит — слюдосодержащий электроизоляционный материал на основе пластин щипаной слюды.

Слюдинит — слюдосодержащий электроизоляционный материал на основе слюдинитовой бумаги.

Слюдопласт — слюдосодержащий электроизоляционный материал на основе слюдопластовой бумаги.

По назначению различают коллекторный, прокладочный, формовочный, гибкий и ленточный миканит, слюдинит и слюдопласт.

Пленкосодержащий электроизоляционный материал — листовой или рулонный материал, состоящий из полимерной пленки, склеенной с различными электроизоляционными бумагами, тканями, картонами и другими гибкими материалами.

Гибкая электроизоляционная трубка — цилиндрический полый гибкий материал. По способу изготовления и назначению различают лакированные, эластомерные, пластиковые и термоусаживаемые гибкие электроизоляционные трубки.

Электроизоляционный лак — раствор пленкообразующих в органических растворителях, образующий после удаления растворителя и высыхания однородную пленку, обладающую электроизоляционными свойствами. По механизму пленкообразования различают термопластичные и термореактивные лаки, по режиму сушки — лаки естественной и горячей сушки, по назначению — пропиточные, клеящие и покрывные лаки.

Электроизоляционный компаунд — порошкообразный, высоковязкий или жидкий состав без растворителя, применяемый для напыления, заливки или пропитки электроизоляционных материалов, деталей и узлов электрооборудования. По составам различают компаунды термопластичные и термореактивные, по режиму отверждения — компаунды естественного и горячего отверждения.

Электроизоляционная лакоткань — рулонный материал, состоящий из ткани, пропитанной электроизолирующим лаком. По виду применяемой ткани различают лакоткани хлопчатобумажные, шелковые, стеклоткани и резиностеклоткани.

Электроизоляционный препрег — гибкий материал, состоящий из волокнистой основы и частично отвержденного термореактивного связующего. Различают препреги обмоточные и формовочные.

Электроизоляционный пресс-материал — материал в виде порошка, гранул или рыхлых пучков, состоящих из волокнистого наполнителя и частично отвержденного термореактивного связующего.

Большую группу диэлектриков, используемых в качестве изоляционных материалов, составляют *жидкие диэлектрики*.

Значительное развитие получило использование *электрических кристаллов*. Такие кристаллы излучают и принимают звук и ультразвук, стабилизируют по частоте излучение радиостанций, разграничивают частотные диапазоны в высокочастотной телефонии, служат активными элементами в измерительных приборах, управляют лазерным пучком и т. д. Среди электрических кристаллов центральное место принадлежит сегнетоэлектрикам и пьезоэлектрикам.

Сегнетоэлектрик обладает спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено внешним воздействием. Сегнетоэлектрики бывают ионные и дипольные.

Сегнетоэластик — диэлектрик, в котором самопроизвольно возникает деформация, знак которой может быть изменен внешними воздействиями.

Антисегнетоэлектрик при определенной температуре самопроизвольно переходит в такое состояние с упорядоченным распределением диполей, что спонтанная поляризованность остается равной нулю.

Сегнетомагнетик обладает сочетанием упорядоченных электрической и магнитной дипольных структур.

Пьезоэлектрик поляризуется под действием механических напряжений (прямой пьезоэффект) или деформируется под воздействием электрического поля (обратный пьезоэффект).

Пироэлектрик — диэлектрик, на поверхности которого возникают электрические заряды при изменении его температуры.

Электрет — диэлектрик, длительно создающий в окружающем пространстве электростатическое поле вследствие предварительной поляризации или электризации диэлектрика. Электреты в целом можно разделить на две группы: электреты, заряды которых обусловлены в основном остаточной поляризацией, и электреты, заряды которых обусловлены инжектированными зарядами (моноэлектреты). К первым относятся термоэлектреты, хемоэлектреты, криоэлектреты, фотоэлектреты и механоэлектреты; ко вторым — электроэлектреты, радиоэлектреты, трибоэлектреты.

Важнейшей характеристикой электретов, определяемой экспериментально, является эффективная плотность поверхностных зарядов, которая для практически применяемых электретов составляет (10^{-3}—10^{-5}) Кл/м^2. Другим параметром, характеризующим свойства электретов, является время релаксации зарядов (время уменьшения зарядов в e раз). Стабильные электреты, пригодные для практического применения, имеют время релаксации зарядов 3—10 лет и более.

Электреты нашли применение в качестве мембран в конденсаторных (электретных) микрофонах, в электростатических фильтрах, в ткани Петрянова, предназначенной для защиты от производственной и радиоактивной пыли, в отклоняющих системах электронной фокусировки и т. д.

Жидкие кристаллы, относящиеся к полярным диэлектрикам, используют для индикаторов часов и калькуляторов.

10. ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для создания лазера нужен материал с определенными свойствами, в котором в процессе накачки может быть создана активная среда. Такой материал называется *лазерным веществом* (ГОСТ 15093—75).

Наиболее важными процессами, необходимыми для функционирования лазера, являются люминесценция и вынужденное излучение. *Люминесценция* —неравновесное излучение тел, избыточное по отношению к тепловому излучению, причем испускание фотонов происходит самопроизвольно. То же явление, при котором основную роль играет вынужденное излучение, возникающее в среде с инверсной заселенностью, приводит к лазерному эффекту.

В люминесценции участвуют не все частицы, входящие в состав лазерного вещества. Если в люминесценции участвуют частицы, не входящие в основной состав лазерного вещества, то их совокупность называют активатором, а остальное — матрицей. Для того чтобы имела место люминесценция, активные частицы должны быть возбуждены. *Лазерный эффект* может возникнуть в том случае, если в энергетическом спектре частицы ниже уровня или полосы возбуждения находится уровень, безызлучательные переходы с которого маловероятны, т. е. квантовый выход люминесценции близок к единице. На этом люминесцирующем уровне, называемом верхним лазерным уровнем, создается инверсная заселенность. Желательно, чтобы нижний лазерный уровень, на который попадает частица в результате вынужденного излучения, имел низкую заселенность, т. е. чтобы он не был основным и опустошался как можно быстрее с помощью безызлучательных переходов.

Лазерный эффект получен в трех средах: твердых телах, жидкостях и газах, включая чистые газы и пары металлов. Соответственно различают твердотельные, жидкостные и газовые лазеры. Отдельную группу составляют полупроводниковые лазеры.

Наибольшее практическое использование получили *твердотельные лазеры* — лазеры на кристаллах и стеклах. Широкое использование твердотельных лазеров объясняется тем, что они обладают наиболее благоприятной

95. Основные свойства диэлектрических лазерных кристаллов [12]

Свойства	$YAlO_3$	$Y_3Al_5O_{12}$	Al_2O_3
Пространственная группа	D_{2h}^{16} — $Pbnm$	O_h^{10} — $Ia3d$	D_{3d}^6 — $R\bar{3}c$
Параметры элементарной ячейки, без активатора, нм	$a_0 = 0{,}5176$; $b_0 = 0{,}6307$; $c_0 = 0{,}7355$	1,2008	$a_0 = 0{,}47628$; $b_0 = 1{,}30032$
Относительная молекулярная масса $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м^3:	163,88	593,59	101,59
без активатора	5,35	4,55	3,98
с ионами Nd^{3+}	—	4,55	—
с ионами Cr^{3+}	—	—	3,92
Твердость по Моосу	8,5	8,5	9
Твердость по Кнупу, ГПа	9,57 по оси *a*; 11,66 по оси *b*; 16,37 по оси *c*	13,0—13,5	21,0—24,0
Скорость звука $\times 10^3$, м/с	—	8,5630 по [001]; 5,0293 по [001]; 8,6016 по [110]	10,92 по [1120]; 5,79 по [1120]; 6,69 по [1120]
Упругие постоянные, ГПа	220	$C_{11} = 333$; $C_{12} = 111$; $C_{44} = 115$	$C_{11} = 496{,}8$; $C_{33} = 498{,}1$; $C_{44} = 147{,}4$; $C_{12} = 163{,}6$; $C_{13} = 110{,}9$; $C_{14} = -23{,}5$
$\sigma_в$, МПа	—	171—205	—
Температура, °С:			
плавления	1850±30	1930±20	~2040
кипения	—	—	~3500
характеристическая	—	427—477	662—677
Теплопроводность, Вт/(м·°С):			
без активатора	11	13	23 ⊥ оси *c*; 25 ∥ оси *c*
с ионами Nd^{3+}	—	11—14	—
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	420	580—630	760
Коэффициент термического расширения $\times 10^{-6}$, 1/°С:			
без активатора	9,5 по оси *a*; 4,3 по оси *в*; 10,8 по оси *c*	8,2 по [100]; 7,7 по [110]; 7,8 по [111]	6,66 ∥ оси *c*; 5,0 ⊥ оси *c*
с ионами Nd^{3+}	3,37±0,05 по оси *в*	6,96±0,06	—
Коэффициент диффузии, см^2/с:			
без активатора	0,049	0,046	0,084
с ионами Nd^{3+}		0,050	
Область оптической прозрачности, мкм	0,22—6,5	0,24—6,0	0,14—6,5

Продолжение табл. 95

Свойства	$YAlO_3$	$Y_3Al_5O_{12}$	Al_2O_3
Показатели преломления:			
без активатора	$n_\alpha = 1{,}929$; $n_\beta = 1{,}943$; $n_\gamma = 1{,}952$	1,81523 (1,06 мкм)	$n_0 = 1{,}763$; $n_e = 1{,}755$ (0,694 мкм)
с ионами Nd^{3+}	$n_\alpha = 1{,}930$; $n_\beta = 1{,}946$; $n_\gamma = 1{,}954$ (0,589 мкм)	1,81633 (1,06 мкм)	—
Диэлектрические постоянные	—	$\varepsilon = 11{,}7$; $\varepsilon_\infty = 3{,}5$	$\varepsilon = 10{,}55$ ∥ оси *c*; $\varepsilon = 8{,}61$ ⊥ оси *c*; $\varepsilon_\infty = 3{,}1$

совокупностью важнейших параметров — возможностью получения высоких энергетических параметров генерации, способностью работать в разнообразных режимах и надежностью. Из большого числа диэлектрических кристаллов, на которых получен лазерный эффект, практическое применение в коммерческих лазерах нашли только те из них, которые наиболее полно удовлетворяют всем современным требованиям квантовой электроники. К таким кристаллам относятся иттрий-алюминиевый гранат, активированный неодимом $Y_3Al_5O_{12}$—Nd^{3+} алюминат иттрия, активированный неодимом $YAlO_3$—Nd^{3+}, а также рубин Al_2O_3—Cr^{3+}. В этих кристаллах удачно сочетаются удовлетворительные спектрально-генерационные свойства с такими необходимыми свойствами, как механическая прочность, твердость, значительная теплопроводность и прозрачность в широком спектральном диапазоне. Основные характеристики этих кристаллов приведены в табл. 95. Перспективным материалом для использования в твердотельных лазерах являются кристаллы гадолиний-скандий-галлиевого граната с хромом и неодимом ГСГГ—Cr—Nd. На этих кристаллах был создан ряд лазеров, обладающих рекордными параметрами.

Стеклообразные лазерные материалы принадлежат к классам неорганических оксидных и фторидных стекол. Стекло, как материал для лазеров, имеет ряд преимуществ по сравнению с диэлектрическими кристаллами. Стекла можно получать в большем объеме при сравнительно низкой стоимости и изготовлять изделия практически любой формы и размеров. Имеется возможность изменять в значительных пределах физико-химические и спектрально-люминесцентные характеристики стекла с целью их оптимизации. К недостаткам относятся низкая теплопроводность, худшие механические свойства — меньшие твердость, модуль упругости, прочность. У стекол существенно меньше сечение индуцированного излучения. Этот фактор оказывается полезным при работе активных элементов в режиме усиления и модулированной добротности, особенно в мощных системах, так как он позволяет получить большую энергию излучения с одного элемента.

В качестве лазерных стекол используют силикатные, фосфатные, фторбериллатные, боратные, фторфосфатные, германатные и тому подобные стекла, активированные редкими землями и неодимом. Освоены (ОСТ 3-30—77) силикатные (ГЛС-1—ГЛС-14) и фосфатные (ГЛС-21—ГЛС-24) стекла, активированные неодимом. К обозначению марки стекла, сваренного в платиновом тигле, добавляется буква П (ГЛС-1П).

Преимуществом фосфатных стекол по сравнению с силикатными являются больший коэффициент усиления, более

высокое сечение индуцированного излучения, лучшие термооптические свойства; это позволяет использовать фосфатные стекла в мощных системах для усиления сверхкоротких импульсов. Недостатки фосфатных стекол — повышенная стоимость, меньшая механическая и химическая стойкость. Заготовки оптического стекла марок ГЛС изготовляют в форме стержней прямоугольного или круглого сечения и в форме прямоугольных пластин. Заготовки в форме стержней имеют диаметр или наибольшую сторону сечения не более 65 мм и отношение наибольшей стороны сечения к длине не более 1 : 20. Отношение сторон заготовок прямоугольного сечения равно 1 : 3. Максимальный размер заготовок 750 мм. Максимальная масса заготовок стекла марки ГЛС-10 — 1 кг, ГЛС-9 — 3 кг, ГЛС-7 и ГЛС-8 — 5 кг; для всех остальных марок — 10 кг. Оптическое стекло марки ГЛС нормируют по коэффициенту поглощения K_{586} нм, длительности затухания люминесценции τ, показателю преломления n_e или n_D, двойному лучепреломлению, бессвильности, пузырчатости, включениям. По пузырчатости стекло типа ГЛС разделяют на категории, установленные ГОСТ 3514—76. По показателю неактивного поглощения установлено три категории K_{1060} нм: первая — не более 0,0010; вторая — не более 0,0020; третья — не более 0,0025. По химической стойкости к влажной атмосфере силикатные стекла относятся к группе *В*, а фосфатные — к группе *Д* (ГОСТ 13917—82). Некоторые оптические свойства стекол приведены в табл. 96, а физико-химические свойства — в табл. 97.

Основные характеристики твердотельных лазеров регламентированы ГОСТ 19319—82.

К *полупроводниковым* относятся лазеры, в которых используются оптические переходы с участием свободных носителей тока в кристаллах. По способу накачки полупроводниковые лазеры делятся на инжекционные, с оптической накачкой, с накачкой пучком быстрых электронов и с накачкой пробоем в электрическом поле.

Классификация и условные обозначения материалов, используемых в полупроводниковых лазерах, определены ОСТ 11.397.831—83. Наиболее широко в полупроводниковых лазерах используется арсенид галлия, а наибольшая доля серийного выпуска приходится на инжекционные лазеры на основе лазерных гетероструктур GaAlAs/GaAs и InGaAsP/InP.

Основные характеристики полупроводниковых лазеров определены ГОСТ 17490—77.

Для широкого практического применения лазеров и лазерных систем с требуемыми характеристиками и перестраиваемой частотой излучения большое значение имеют материалы, позволяющие управлять лазерным излучением.

В качестве материалов для призм в дальнем ультрафиолетовом диапазоне используются фтористый барий BaF_2, флюорит CaF_2, фтористый литий LiF и др.; в ближней ультрафиолетовой области чаще всего используется кристаллический кварц; в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах — различные флинты, рутил TiO_2, титанат стронция $SrTiO_3$; в области свыше 2—3 мкм — диэлектрические и полупроводниковые кристаллы, такие, как LiF, CaF_2, BaF_2, Ge, Si.

Для управления лазерным излучением широко применяются кристаллы, обладающие электрооптическим эффектом, т. е. изменением поляризационных констант и соответственно показателей преломления под воздействием электрического поля, и оптическими нелинейными свойствами. Это кристаллы, кристаллическая решетка которых не имеет центра симметрии. Наибольшее распространение для управления лазерным излучением получили такие материалы (ОСТ 11.397.831—83), как кристаллы дигидрофосфата калия KH_2PO_4 (*KDP*) и его аналоги: дигидрофосфат аммония $NH_4H_2PO_4$ (*ADP*), дидейтерофосфат калия K_2PO_4 (*DADP*), дигидрофосфат рубидия RbH_2PO_4 (*RDP*) и ряд других кристаллов.

Кристаллы дигидрофосфата калия выращивают в виде блоков. Изделия из кристаллов *KDP* в виде прямоугольных призм, каждый из размеров которых может изменяться от 1 до

96. Оптические свойства неодимовых стекол (ОСТ 3-30—77)

Марка	Коэффициент поглощения K_{586} нм, $мм^{-1}$	Длительность затухания люминесценции, мкс		Квантовый выход люминесценции η при длительности затухания τ, мкс		Показатель преломления	
		Номинальная	Минимальная	η	τ	n_D (λ = 589 нм)	n_λ (λ = 1060 нм)
ГЛС-1	0,190±0,015	450	390	0,78	480	1,534	1,521
ГЛС-2	0,185±0,015	610	480	0,70	525	1,528	1,518
ГЛС-3	0,470±0,050	470	330	0,49	360	1,528	1,518
ГЛС-5	0,100±0,015	800	700	—	—	1,545	$1,533_1$
ГЛС-6	0,175±0,015	790	610	0,75	650	1,550	$1,537_6$
ГЛС-7	0,280±0,050	570	490	0,61	510	1,554	$1,542_6$
ГЛС-8	0,450±0,050	420	320	0,37	320	1,560	$1,547_7$
ГЛС-9	0,400±0,050	—	—	0,58	430	1,527	1,516
ГЛС-10	0,210±0,015	510	500	0,62	510	1,546	1,535
ГЛС-14	0,410±0,050	510	380	0,55	380	1,536	1,524
ГЛС-21	0,185±0,015	320	280	0,73	280	1,593	1,582
ГЛС-22	0,260±0,015	320	280	0,74	300	1,593	1,582
ГЛС-23	0,460±0,050	260	220	0,60	240	1,593	1,582
ГЛС-24	0,770±0,050	220	150	0,44	190	1,592	1,582

97. Физико-химические свойства неодимовых стекол (ОСТ 3-30—77)

Марка	Число ионов $Nd^{3+} \cdot 10^{26}$, $м^{-3}$	Содержание Nd_2O_3, мас. доля %	ρ 10^{-3}, $кг/м^3$, при 20 °С	*E*, ГПа	Коэффициент Пуассона	HV, ГПа	Относительная твердость при сошлифовывании ГЛС-1	Относительная твердость при сошлифовывании К8	α·10^7, $°С^{-1}$, при температуре 20—180 °С	*c*, Дж/(кг·°С), при 50 °С	λ, Вт/(м·°С), при 50 °С
ГЛС-1	1,90	2,0	2,66	73,7	0,229	5,20	1,0	1,0	94	—	—
ГЛС-2	1,90	2,0	2,70	67,8	0,233	—	0,7	0,8	119	690	0,97
ГЛС-3	4,60	5,5	2,70	67,3	0,239	—	—	—	121	—	—
ГЛС-5	0,97	—	2,72	57,8	0,270	—	0,7	0,8	113	—	—
ГЛС-6	1,96	2,0	2,74	56,8	0,260	4,20	0,6	0,7	114	670	0,49
ГЛС-7	3,05	3,0	2,81	61,8	0,260	4,20	0,6	0,7	113	670	0,36
ГЛС-8	5,16	5,0	2,86	62,0	0,260	4,60	0,6	0,7	108	—	—
ГЛС-9	—	4,7	2,66	69,3	0,220	5,50	0,8	0,9	112	690	0,70
ГЛС-10	2,34	—	2,88	62,7	0,270	—	—	—	126	490	0,60
ГЛС-14	4,56	—	2,71	71,0	0,230	—	0,8	0,9	108	—	—
ГЛС-21	1,40	1,11	3,52	55,7	0,280	3,20	0,2	0,2	106	575	0,43
ГЛС-22	2,00	1,63	3,52	55,7	0,280	3,60	0,2	0,2	106	575	0,43
ГЛС-23	3,60	2,90	3,52	55,7	0,280	—	0,2	0,2	106	575	0,43
ГЛС-24	5,70	4,60	3,52	55,7	0,280	—	0,2	0,2	106	575	0,43

150 мм, применяются для изготовления электрооптических затворов и устройств сканирования луча на поперечном и продольном электрооптическом эффекте.

Список литературы

1. **Аморфные** магнитомягкие сплавы для устройств РЭА/Р. Д. Нуралиева, Д. Г. Вербицкий, С. П. Поляков и др. М.: Труды ЦНИИ «Электроника». 1984. Вып. 12. С. 1063—1070.

2. **Аникеев Ю. Г., Жаботинский М. Е., Кравченко В. Б.** Лазеры на неорганических жидкостях. М.: Наука, 1986. 248 с.

3. **Анохов С. П., Марусий Т. Я., Соскин М. С.** Перестраиваемые лазеры/ Под ред. М. С. Соскина. М.: Радио и связь, 1982. 360 с.

4. **Басов Н. Г., Елисеев П. Г., Попов Ю. М.** Полупроводниковые лазеры. УФН, 1986. 148. Вып. 1. С. 35—53.

5. **Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М.** Электротехнические материалы. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1985. 304 с.

6. **Головашкин А. И.** Сверхпроводники с необычными свойствами и возможности повышения критической температуры. УФН. 1986. Вып. 2. С. 363—380.

7. **Головин С. А., Пушкар А. А., Левин Д. М.** Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов. М.: Металлургия, 1987. 192 с.

8. **Елисеев П. Г.** Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука, 1983. 294 с.

9. **Зверев Г. М., Голяев Ю. Д., Шалаев Е. А., Шокин А. А.** Лазеры на алюминиевом гранате с неодимом. М.: Радио и связь, 1985. 144 с.

10. **Золотухин И. В.** Физические свойства аморфных металлических материалов. М.: Металлургия, 1986. 175 с.

11. **Калинин Н. Н., Скибинский Г. Л., Новиков П. П.** Электрорадиоматериалы. М.: Высшая школа, 1981. 293 с.

12. **Каминский А. А.** Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975. 256 с.

13. **Каталог** активных лазерных сред на основе растворов органических красителей и родственных соединений/Под ред. В. И. Степанова. Минск: Институт физики АН БССР, 1977. 239 с.

14. **Кузьмиков Ю. С.** Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением. М.: Наука, 1982. 400 с.

15. **Лазерные** фосфатные стекла/ Н. Е. Алексеев, В. П. Гапонцев, М. Е. Жаботинский и др. М.: Наука, 1980. 352 с.

16. **Лущейкин Г. А.** Полимерные электреты. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1984. 184 с.

17. **Материалы** для электротермических установок: Справочное пособие/ Н. В. Большакова, К. С. Борисанова, В. И. Бурцев и др.; Под ред. М. В. Гутмана. М.: Энергоатомиздат, 1987. 296 с.

18. **Михайлова М. М., Филиппов В. В., Муслаков В. П.** Магнитомягкие ферриты для радиоэлектронной аппаратуры: Справочник /Под ред. А. Е. Оборонко. М.: Радио и связь, 1983. 200 с.

19. **Многожильные** сверхпроводящие материалы для технического использования/А. Д. Никулин, В. П. Потанин, Н. А. Черноплеков и др. Сверхпроводимость. Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости. Т. IV. Сверхпроводящие материалы. М.: Атомиздат, 1977. С. 5—14.

20. **Пластичность** и прочность полупроводниковых материалов и структур/Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов, Э. А. Фаттахов и др. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.

21. **Полупроводниковая** электроника: Справочник/П. И. Баранский, В. П. Клочков, И. В. Потыкевич и др. Киев: Наукова думка, 1975. 704 с.

22. **Порошковая** металлургия: Справочник/И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысельский и др./ Под ред. И. М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1985. 624 с.

23. **Преображенский А. А., Бишард Е. Г.** Магнитные материалы и элементы. М.: Высшая школа, 1986. 352 с.

24. **Прецизионные** сплавы: Справочник/Под ред. Б. В. Молотилова. М.: Металлургия, 1983. 439 с.

25. **Прохоров А. М.** Новое поколение твердотельных лазеров. УФН, 1986. 148. Вып. 1. С. 7—33.

26. **Сверхпроводящие** материалы/ Е. М. Савицкий, Ю. В. Ефимов, Н. Д. Козлова и др. М.: Металлургия, 1976. 296 с.

27. **Сверхпроводящие** соединения переходных металлов/Е. М. Савицкий, Ю. В. Ефимов, Н. Д. Козлова и др. М.: Наука. 1976. 216 с.

28. **Сверхпроводящие** соединения со структурой β-вольфрама: Сборник статей. М.: Мир, 1977. 435 с.

29. **Спеченные** материалы для электротехники и электроники: Справочное издание/Г. Г. Гнесин, В. А. Дубок, Г. Н. Братерская и др. М.: Металлургия. 1981. 344 с.

30. **Сплавы** для нагревателей/ Л. Л. Жуков, И. М. Племянникова, М. Н. Миронова и др. М.: Металлургия, 1985. 144 с.

31. **Сплавы** для термопар: Справочное издание/И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. М.: Металлургия, 1983. 360 с.

32. **Справочник по лазерам**/Под ред. А. М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. Т. 1. 504 с.

33. **Справочник** по электротехническим материалам/Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Т. 3. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. 728 с.

34. **Структура** сверхпроводящих соединений. М.: Металлургия, 1983. 104 с.

35. **Судзуки К., Фуизимори Х., Хасимото К.** Аморфные металлы/Под ред. Ц. Масумото//Пер. с япон. М.: Металлургия, 1987. 328 с.

36. **Тареев Б. М. Физика** диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982. 320 с.

37. **Физика** сегнетоэлектрических явлений/Г. А. Смоленский, В. А. Боков, В. А. Исупов и др. Л.: Наука, 1985. 396 с.

38. **Физико-химические** основы получения сверхпроводящих материалов/ Под ред. Е. М. Савицкого. М.: Металлургия, 1981. 480 с.

39. **Физико-химические** свойства полупроводниковых веществ: Справочник. М.: Наука, 1978. 340 с.

40. **Электротехнические** материалы: Справочник/В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 504 с.

41. **Электрофизические** проблемы использования сверхпроводимости/ И. А. Глебов, Ч. Лаверник, В. Н. Шахтари. Л.: Наука, 1980. 256 с.

Глава VIII ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Для обработки резанием используются различные виды материалов: углеродистые, легированные и быстрорежущие стали, твердые сплавы на основе карбидов вольфрама и титана, сверхтвердые материалы (минералокерамика, алмазы, различные модификации кубического нитрида бора). Наибольший объем снимаемой стружки приходится на инструмент из твердых сплавов и быстрорежущих сталей.

Углеродистые инструментальные стали. Химический состав углеродистых инструментальных сталей по ГОСТ 1435—74.

Углеродистые стали применяют для изготовления режущих инструментов, работающих в условиях, не вызывающих нагрева рабочей кромки свыше 150—200 °С. Они используются также для штамповых и измерительных инструментов.

Основные достоинства углеродистых сталей — получение высокой твердости в поверхностном слое при сохранении вязкой сердцевины. Это в ряде случаев обеспечивает минимальную поводку инструмента и повышение его механических свойств; низкую твердость в отожженном состоянии НВ 1800—2000 МПа, позволяющую использовать высокопроизводительные методы изготовления инструмента (накатку, насечку); закалку с низких температур (770—820 °С); получение после закалки малых количеств остаточного аустенита, что обеспечивает им повышенное сопротивление пластической деформации; сохранение чистой поверхности при закалке вследствие охлаждения в воде, что упрощает очистку инструментов; низкую стоимость.

Вместе с тем недостатки углеродистых сталей существенно ограничивают область их применения: вследствие низкой теплостойкости — способности сохранять твердость лишь при нагреве до температур, не превышающих 170—200 °С. Меньшая прочность по сравнению с быстрорежущими сталями связана с получением более крупного зерна (8—9 балл) при оптимальных температурах закалки. Склонность к росту зерна при незначительных перегревах при закалке приводит к понижению механических свойств. Ограниченная технологическая закаливаемость требует применения высоких скоростей охлаждения в перлитном интервале, что приводит к неоднородной твердости, особенно у инструментов небольшой толщины, а также к большой поводке и термическим трещинам. Стали нельзя применять для относительно крупных инструментов (диаметром или толщиной больше 30 мм), если они предназначены для работы при повышенных давлениях. Стали склонны к отпуску поверхностных слоев при нагреве во время шлифования и заточки.

Углеродистые стали используют для инструментов, не подвергаемых в процессе работы нагреву до температур свыше 150—200 °С и не требующих в процессе изготовления значительного шлифования (напильники, метчики, развертки, ножовки, топоры, колуны, стамески, слесарно-монтажные и хирургические инструменты, а также для некоторых штамповых и измерительных инструментов.

Высокая твердость углеродистых сталей (HRC 62—63) достигается уже при 0,6 % С в инструменте диаметром (толщиной) 1—5 мм.

В инструменте большей толщины такую твердость на поверхности можно получить лишь при 0,8—0,9 % С. С увеличением содержания углерода более 0,9—1,0 % твердость повышается до HRC 65.

1. Критические точки и режимы отжига углеродистых инструментальных сталей [5, 9, 10]

Сталь	Ac_1	Ac_3 (Ac_m)	Ar_3 (Ar_m)	Ar_1	$M_н$	$M_к$	Температура отжига *1
	°С						
У7, У7А	723	765	—	700	280	—	730—750
У8, У8А	720	740	—	700	245	—	730—750
У9, У9А	740	760	—	700	190	—	740—750
У10, У10А	730	800	—	700	210	—	740—750
У11, У11А	730	810	—	700	200	—	750—780
У12, У12А	730	820	—	700	200	—20	750—780
У13, У13А	730	830	—	700	190	—	750—780

*1 После выдержки при 730—780 °С охлаждение со скоростью 50°/ч до 620—660 °С, далее на воздухе.

Оптимальное содержание углерода определяется особенностями работы инструмента, его формой и технологией изготовления. Если инструмент подвергается в основном ударным нагрузкам (деревообрабатывающий инструмент, зубила, некоторые штампы), целесообразно применять доэвтектоидные стали с 0,6—0,7 % С с трооститной структурой. Для остального режущего инструмента более целесообразна мартенситная структура с избыточными карбидами, образующаяся в заэвтектоидных сталях, содержащих 0,9—1,3 % С. Эти стали имеют высокую твердость и износостойкость и удовлетворительные механические свойства. Сталь эвтектоидного состава (0,8 % С) более склонна к росту зерна (перегреву), обладает меньшей стабильностью свойств и в связи с этим находит ограниченное применение.

Предварительная термическая обработка углеродистых инструментальных сталей. Неполный отжиг (нагрев 690—710 °С) с непрерывным охлаждением и сфероидизацию рекомендуется проводить в шахтных или камерных печах (стали У7, У7А, У8, У8А). Продолжительность выдержки после прогрева всей садки до температуры отжига 3—4 ч.

Изотермический отжиг целесообразен для печей непрерывного действия (конвейерных, толкательных). Продолжительность выдержки после прогрева всей садки до температуры отжига 1—2 ч. Изотермическая выдержка при охлаждении 1—2 ч. Отжиг с полной перекристаллизацией (стали У7, У7А, У8, У8А) проводят при необходимости одновременного измельчения структуры. Сфероидизацию (маятниковый отжиг) применяют для получения структуры зернистого перлита.

Высокий отпуск (650—700 °С) следует использовать для снятия наклепа после холодной пластической деформации (так называемый рекристаллизационный отжиг), а также для снятия внутренних напряжений от обработки резанием, предшествующей закалке, перед повторной закалкой изделий, имеющих пониженную твердость после термообработки. Продолжительность выдержки при высоком отпуске 2—3 ч после прогрева всей садки.

Нормализацию применяют для измельчения зерна перегретой стали и для получения небольших параметров шероховатости поверхности при обработке резанием в тех случаях, когда сталь в отожженном состоянии имеет твердость меньше НВ 1830 МПа. Продолжительность выдержки при нагреве в печах 20—30 мин после прогрева всей садки; при нагреве в соляных ваннах — равняется расчетной выдержке для нагрева под закалку. Режимы отжига, механические и физические свойства углеродистых инструментальных сталей приведены в табл. 1—4.

2. Режимы отжига углеродистых сталей на зернистый перлит [9, 10]

Сталь	Температура, °С	
	нагрева	изотермической выдержки при охлаждении
У7, У7А	730—750	600—650
У8, У8А	730—750	600—650
У9, У9А	740—750	600—650
У10, У10А	740—750	600—650
У11, У11А	750—780	620—660
У12, У12А	750—780	620—660
У13, У13А	750—780	620—660

Нагрев под закалку углеродистых инструментальных сталей осуществляется как в воздушных печах, так и в соляных ваннах. Для соляных ванн выдержка 20—25 с, для воздушных печей 60—80 с на 1 мм толщины.

Условия охлаждения при закалке определяются сечением инструмента. Поскольку быстрое охлаждение в воде или водном растворе солей и щелочей нежелательно, инструмент небольшого сечения охлаждают в масле или расплавленных солях при 160—200 °С. Для уменьшения возможности образования трещин и деформаций при закалке в ряде случаев целесообразно проводить охлаждение сначала

3. Механические свойства углеродистых инструментальных сталей после предварительной обработки (отжига) [5, 9, 10]

Сталь	НВ, МПа, не более	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	Феррит	Карбиды *1
		МПа		%		%	
У7, У7А	1870	630	390	21	38	88—90	10—12
У8, У8А	1870	600	—	—	—	87—89	11—13
У9, У9А	1920	600	—	—	—	—	—
У10, У10А	1970	600	—	23	60	84—86	14—16
У11, У11А	1970	—	—	—	—	83—84	16—17
У12, У12А	2070	600—700	350—450	28	45—55	83—83,5	16,5—17
У13, У13А	2170	—	—	—	—	80—81,5	18,5—20

*1 Карбидная фаза представляет собой цементит Fe_3C.

4. Физические свойства углеродистых инструментальных сталей после отжига [5, 9]

Сталь	$H_c \cdot 10^{-3}$, А/м	$\mu_{max} \cdot 10^{-3}$, Гн/м	$4\pi J_s$, Тл	$\rho_1 \cdot 10^{-8}$, Ом·м	ρ, т/м³
У7, У7А	3—10	94	2	0,13	7,83
У8, У8А	4—10	91	2	0,14	7,83
У9, У9А	—	—	—	—	—
У10, У10А	5—13	88	1,95	—	7,81
У11, У11А	—	—	1,8	—	7,81
У12, У12А	6—8	85	1,9	—	7,81
У13, У13А	—	—	—	—	7,80

5. Механические свойства и прокаливаемость углеродистых инструментальных сталей после закалки (охлаждение в воде) и отпуска [5, 9, 10]

Сталь	Температура, °С		Содержание Fe_3C, %	HRC	$\sigma_{изг}$, МПа	Прокаливаемость (критический диаметр d, мм)
	закалки	отпуска				
У7, У7А	800—820	150—160 200—220	0	61—63 57—59	2000	15—20
У8, У8А	780—800	150—160 200—220	—	63—65 57—59	1950 —	15—20
У9, У9А	760—780	150—160 200—220	—	62—63 58—59	— —	15—20
У10, У10А	760—780	150—160 200—250	2—4	62—63 58—59	2400 —	15—20
У11, У11А	760—780	150—160 200—250	4—6	62—63 58—59	2900 —	15—20
У12, У12А	760—780	150—160 200—250	5—7	62—63 58—59	3500	10—20
У13, У13А	760—780	150—160 200—250	6,5—8	62—63 58—59	2150	10—20

в воде с последующим переносом в масло.

Отпуск для сохранения высокой твердости и получения оптимальной прочности и вязкости рекомендуется проводить при 150—160 °С для инструмента толщиной более 5 мм и при 170—180 °С для инструмента меньшего сечения. Такой отпуск сохраняет твердость выше HRC 62 без разложения остаточного аустенита. Для деревообрабатывающего инструмента рекомендуется более высокий отпуск: 275—290 °С для HRC 55—58 (стамески) и 400—450 °С для HRC 44—48 (пилы).

Отпуск проводят в воздушных печах или в жидкостных ваннах продолжительностью 1 ч с последующим охлаждением на воздухе. Для предотвращения трещинообразования отпуск должен быть осуществлен непосредственно после закалки. После шлифования и заточки для снятия напряжений полезен отпуск при 140—160 °С продолжительностью 30—45 мин.

Механические свойства и прокаливаемость углеродистых инструментальных сталей после закалки и отпуска приведены в табл. 5.

Сортамент углеродистых инструментальных сталей по ГОСТ 1133—71 (кованая круглая и квадратная); ГОСТ 2879—88 (горячекатаная шестигранная); ГОСТ 4405—74 и ГОСТ 103—76 (полосы кованые и горячекатаные); ГОСТ 7417—75, ГОСТ 8559—75 и ГОСТ 8560—78 (калиброванная), ГОСТ 14955—77 (со специальной отделкой).

Назначение углеродистых инструментальных сталей приведено в табл. 6.

Легированные стали для режущего и измерительного инструмента. По характеру легирования, свойствам и областям применения стали можно разделить на две группы: 1) небольшой прокаливаемости (7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, 11ХФ, 13Х, ХВ4, ХВ5); 2) повышенной прокаливаемости (9Х, Х, 9ХС, ХГС, 12Х1, 9ХВГ, ХВГ, ХВСГ).

6. Назначение углеродистых инструментальных сталей [5, 9, 10]

Сталь	Назначение
У7, У7А	Инструменты для обработки дерева — топоры, колуны, стамески, долота; пневматические инструменты небольших размеров — зубила, обжимки, бойки. Слесарно-монтажные инструменты — кусачки, плоскогубцы, острогубцы, молотки, кувалды, отвертки, бородки и др.
У8, У8А	Инструменты для обработки дерева — фрезы, зенковки, цековки, топоры, стамески, долота, продольные и дисковые пилы. Накатные ролики. Плиты и стержни для форм литья под давлением оловянно-свинцовых сплавов. Обжимки, кернеры, бородки, отвертки, плоскогубцы, острогубцы, боковые кусачки
У9, У9А	Инструменты для обработки дерева, слесарно-монтажные инструменты, калибры простой формы и пониженных классов точности
У10, У10А	Столярные пилы ручные и машинные, ручные ножовки, спиральные сверла; слесарные шаберы, напильники, накатные ролики; штампы для холодной штамповки деталей небольших размеров и простой формы; калибры простой формы и пониженных классов точности
У11, У11А	То же, а также ручные метчики, холодновысадочные пуансоны и штампы мелких размеров, калибры простой формы и пониженных классов точности
У12, У12А	То же, а также небольшие пресс-формы для пластмасс
У13, У13А	Инструменты повышенной износостойкости, работающие при умеренных и значительных давлениях без разогрева режущей кромки (напильники, бритвенные ножи, лезвия, острые хирургические инструменты, шаберы, гравировальные инструменты)

Химический состав легированных инструментальных сталей приведен в ГОСТ 5950—73.

Стали, входящие в первую группу, по устойчивости переохлажденного аустенита незначительно превосходят углеродистые стали У7—У13, но благодаря легированию хромом (0,2—0,7 %), ванадием (0,15—0,3 %) и вольфрамом (до 4 %) имеют повышенные устойчивость против перегрева, износостойкость и теплостойкость.

Так же как и углеродистые стали У7—У13, они после термической обработки содержат мало остаточного аустенита, что обеспечивает им высокий предел текучести. Большинство из этих сталей с успехом используют при изготовлении инструментов, подвергаемых поверхностной (местной) закалке. Некоторые из сталей небольшой прокаливаемости имеют специализированное применение: сталь 13Х предназначена главным образом для бритвенных ножей, лезвий, хирургического и гравировального инструмента; сталь ХВ4 рекомендуется для резцов и фрез, используемых для обработки резанием с небольшими скоростями материалов высокой твердости; сталь В2Ф используется для изготовления ленточных пил и ножовочных полотен для резки конструкционных сталей средней твердости.

Стали второй группы имеют более высокое содержание хрома (0,8—1,7 %), наряду с которым в ряде марок присутствуют марганец, кремний, вольфрам.

Комплексное легирование даже относительно небольшими количествами элементов существенно повышает прокаливаемость, способствует увеличению дисперсности и однородности распределения карбидов (за исключением сталей типа ХВГ), уменьшает чувствительность к перегреву, способствует сохранению более мелкого зерна при закалке. Стали повышенной прокаливаемости применяют для изготовления инструментов больших сечений, охлаждаемых при закалке в масле или горячих средах. Указанные особенности сталей второй группы (9ХС, ХГС, ХВГ, ХВСГ) позволяют использовать их для изготовления режущего (метчики, плашки, развертки, фрезы, протяжки), а также штампового инструмента более ответственного назначения, чем из углеродистых и низкопрокаливающихся сталей. Отличительной особенностью марганецсодержащих сталей (ХВГ, ХВСГ, 9ХВГ) является их малая деформируемость при термической обработке, обусловленная повышенным содержанием остаточного аустенита. Это позволяет рекомендовать их для изготовления тех инструментов, к которым предъявляются жесткие требования относительно стабильности размеров при термической обработке. Недостатком указанных сталей является повышенная склонность к образованию карбидной сетки по границам зерен в результате выделения карбидов в процессе замедленного охлаждения после горячей пластической деформации или высокотемпературного нагрева. Стали ХВГ и ХВ4 характеризуются также неблагоприятным распределением карбидов в деформированном металле сечением более 30—40 мм. Карбидная неоднородность наблюдается также и в стали Х, которая обладает, кроме того, повышенной чувствительностью к перегреву и существенным колебанием прокаливаемости в различных плавках. К особенностям термической обработки низколегированных инструментальных сталей следует отнести необходимость использования резких охлаждающих сред (водные растворы солей и щелочей) для сталей небольшой прокаливаемости, закаливаемых на максимальную твердость (7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, 11ХФ, 13Х).

Стали повышенной прокаливаемости (9ХС, ХВГ, 9ХВГ, ХВСГ) для уменьшения термических напряжений и коробления у инструментов сложной формы целесообразно подвергать неполной изотермической (выдержка при 180—250 °С длительностью 30—60 мин) или ступенчатой (охлаждение в горячих средах с температурой 150—220 °С с последующим переносом на воздух) закалке.

Продолжительность выдержки при аустенизации низколегированных сталей выбирают из расчета 50—70 с/мм при нагреве в воздушной печи и 35—40 с/мм при нагреве в соляной ванне.

Продолжительность отпуска обычно составляет 1—2 ч плюс 1—1,5 мин на 1 мм толщины крупногабаритного инструмента.

Сортамент поставляемых легированных инструментальных сталей: кованая круглая и квадратная (ГОСТ 1133—71), калиброванная (ГОСТ 7417—75, ГОСТ 8559—75 и ГОСТ 8560—78); прокат горячекатаный круглый (ГОСТ 2590—88), горячекатаный квадратный; полосы горячекатаные и кованые (ГОСТ 4405—74).

Допускаемая глубина обезуглероженного слоя регламентирована ГОСТ 5950—73.

Критические точки, режимы ковки и отжига, режимы окончательной термической обработки и назначение легированных инструментальных сталей приведены в табл. 7—10.

7. Критические точки (температура, °С) легированных инструментальных сталей [9, 10, 12]

Сталь	Ac_1	Ac_m	Ar_m	Ar_1	$M_н$	$M_к$
Стали небольшой прокаливаемости						
7ХФ *1	770	780	740	710	—	—
8ХФ *1	740	750	—	700	215	—
9ХФ	700	—	—	—	215	—
11ХФ	—	—	—	—	195	—
13Х	760	780	740	710	—	—
В2Ф	750	800	690	650	—	—
Стали повышенной прокаливаемости						
9Х	730	860	—	700	270	—
Х	745	900	—	700	240	—
9ХС	770	870	—	730	160	—30
12Х1	750	890	—	—	245	—40
9ХВГ	750	900	—	—	205	—
ХВГ	750	940	—	710	210	—50
ХВСГ	770	785	730	720	200	20
Х6ВФ	815	845	775	625	150	—100

*1 Для сталей 7ХФ и 8ХФ Ac_3 и Ar_c.

8. Режимы ковки и отжига легированных инструментальных сталей [9, 10, 12]

Сталь	Интервал ковочных температур, °С	Режим отжига	НВ после отжига, МПа, не более
7ХФ	1160—850	Нагрев на 780—800 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 640—680 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2290
8ХФ	1150—850	Такой же, как для стали 7ХФ	2550
9ХФ	1180—800	Нагрев на 760—790 °С, далее как для стали 7ХФ	2550
11ХФ	1100—800	Нагрев на 750—790 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670—700 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2290

Продолжение табл. 8

Сталь	Интервал ковочных температур, °С	Режим отжига	НВ после отжига, МПа, не более
13Х	1100—800	Такой же, как для стали 11ХФ	2410
ХВ4	1125—850	Нагрев на 800—820 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2850
В2Ф	1200—900	Нагрев на 780—800 °С, охлаждение со скоростью 50 °С до 710—730 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2850
9Х1	1150—850	Нагрев на 800—820 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670—680 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2290
Х	1150—850	Нагрев на 780—800 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670—720 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2290
9ХС	1140—800	Нагрев на 790—810 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 670—720 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2410
12Х1	1120—850	Такой же, как и для стали Х	2410
9ХВГ	1120—850	Такой же, как и для стали Х	2410
ХВГ	1150—850	Такой же, как и для стали Х	2550
ХВСГ	1140—850	Такой же, как для стали 9ХС	2410
Х6ВФ	1100—850	Нагрев на 830—850 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 700—720 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С	2410

9. Режимы окончательной термической обработки легированных инструментальных сталей [5, 9, 10]

Сталь	Закалка				Отпуск	
	Температура, °С		Охлаждающая среда	HRC	Температура отпуска, °С	HRC
	подогрева	аустенизации				
7ХФ	600—650	820—840 800—820	Масло Вода	62—64	200—220	58—60
8ХФ	600—650	810—820 830—860	Вода	58—59 63—65	200—220	57—58 60—62
9ХФ	600—650	850—880 820—840	Масло Вода	61—64 61—64	200—250	58—60 58—58
11ХФ	600—650	810—830 840—860	Вода Масло	62—65 62—64	150—170	62—65
13Х	600—650	780—820 810—830	Вода Масло	63—65 62—64	150—170	62—65
ХВ4	600—650	830—850 820—840	Масло Вода	63—65 65—67	140—170	62—67
В2Ф	600—650	780—840	Масло Вода	66—67 66—67	100—180	62—65
9Х1	600—650	820—850	Масло	61—63	160—180	59—61
Х	650	840—860	Масло	62—63	130—150 170—210	62—65 58—60
9ХС	650—700	840—860	Масло	62—63	180—250	58—62
12Х1	650—700	850—870	Масло	63—65	120—130	62—65
9ХВГ	650	820—840	Масло	64—66	160—180 170—230 230—275	64 60—62 56—60
ХВГ	650—700	830—850	Масло	62—63	150—200 200—300	62—63 58—62
ХВСГ	650—700	840—860	Масло	62—63	140—160	60—62
Х6ВФ	650—700	980—1000	То же, горячие среды	63—65	150—170 280—300	62—63 56—58

10. Назначение легированных инструментальных сталей [1, 5, 10]

Сталь	Назначение
7ХФ	Деревообрабатывающий инструмент (топоры, долота, зубила), круглые и ленточные пилы со сплющенными и разведенными зубьями, инструмент для чеканки
8ХФ	Ножи для холодной резки металла, обрезные матрицы и пуансоны, кернеры, штемпели
9ХФ	Рамные, ленточные, круглые, строгальные пилы, ножи, обрезные матрицы и пуансоны для холодной обрезки заусенцев, кернеры, штемпели
11ХФ	Метчики и другие режущие инструменты диаметром до 30 мм, закаливаемые в горячих средах, хирургические инструменты, штампы для холодной штамповки, пуансоны, калибры
13Х	Вместо стали У13, У13А для мелких инструментов диаметром 1—15 мм, чтобы иметь возможность проводить закалку в масле; для инструментов диаметром до 30—35 мм (при закалке в воду) получают более глубокий закаленный слой, чем у стали У13, У13А; назначение то же, что и у стали У13, У13А (см. табл. 6)
ХВ4	Инструменты для чистового резания твердых материалов (отбеленный чугун, валки с закаленной поверхностью) с небольшой скоростью, граверный инструмент, прошивные пуансоны
В2Ф	Ленточные пилы по металлу, ножовочные полотна
9Х1	Деревообрабатывающий инструмент, валки холодной прокатки, клейма, пробойники, холодновысадочные матрицы и пуансоны
Х	Токарные, строгальные и долбежные резцы, работающие при небольших скоростях резания; зубила, гладкие цилиндрические калибры и калиберные кольца
9ХС	Сверла, развертки, метчики, плашки, гребенки, фрезы; машинные штемпели; клейма; деревообрабатывающий инструмент
12Х1	Измерительные инструменты (плитки, калибры, шаблоны)
9ХВГ	Резьбовые калибры сложной формы, штампы для холодного деформирования сложной формы, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению

Продолжение табл. 10

Сталь	Назначение
ХВГ	Режущие и измерительные инструменты, в том числе крупных сечений, для которых повышенное коробление при закалке недопустимо (протяжки, длинные метчики и развертки, плашки, резьбовые калибры; деревообрабатывающий инструмент; ножи для бумажной промышленности; холодновысадочные матрицы и пуансоны)
ХВСГ	Инструмент для ручной работы (плашки, сверла, развертки, гребенки, штемпели, клейма); холодновысадочные матрицы и пуансоны; деревообрабатывающий инструмент; ножи для бумажной промышленности
Х9ВФ	Дереворежущий фрезерный инструмент, ручные ножовочные полотна, резьбонакатной инструмент, матрицы и пуансоны холодного деформирования

Быстрорежущие стали — наиболее характерные для режущих инструментов. Они сочетают высокую теплостойкость (600—650 °С в зависимости от состава и обработки) с высокими твердостью (до HRC 68—70), износостойкостью при повышенных температурах и повышенным сопротивлением пластической деформации. Быстрорежущие стали позволяют повысить скорость резания в 2—4 раза по сравнению со скоростями, применяемыми при обработке инструментами из углеродистых и легированных инструментальных сталей.

Быстрорежущие стали широко применяют для режущих инструментов, работающих в условиях значительного нагружения и нагрева рабочих кромок. Инструмент из быстрорежущих сталей обладает достаточно высокой стабильностью свойств, что особо важно в условиях гибкого автоматизированного производства.

Работоспособность инструментов простой формы с массивной режущей кромкой при непрерывном точении лимитируется вторичной твердостью, теплостойкостью и износостойкостью. Для инструментов сложной формы, тонколезвийных, а также для инструментов, используемых при прерывистом точении, большее значение приобретают прочность и вязкость быстрорежущей стали. Повышение того или иного свойства, достигаемое в результате изменения химического состава стали, а также режимов закалки и отпуска, часто сопровождается снижением других показателей. Например, при повышении вторичной твердости и теплостойкости наблюдается, как правило, снижение прочности и вязкости стали.

Высокие режущие свойства быстрорежущих сталей обеспечиваются легированием сильными карбидообразующими элементами (вольфрамом, молибденом, ванадием), элементами, повышающими температуру ($\alpha \rightarrow \gamma$)-превращения (кобальтом, алюминием), и применением специальной термической обработки, заключающейся в закалке с высоких температур (1200—1300 °С) и отпуске, вызывающем дисперсионное твердение.

Для быстрорежущих сталей основным является карбид M_6C.

Для получения высоких теплостойкости и твердости достаточно большая доля распадающегося карбида должна быть переведена при закалке в твердый раствор (аустенит, мартенсит), что насыщает его углеродом, вольфрамом, молибденом, ванадием, хромом.

Последующий отпуск при температурах 550—560 °С повышает твердость до максимальных значений вследствие выделения дисперсных карбидов и распада остаточного аустенита.

В зависимости от химического состава, а следовательно, и уровня основных свойств быстрорежущие стали подразделяют на стали нормальной и повышенной теплостойкости (производительности). Если содержание ванадия не превышает 2 %, их относят к быстрорежущим сталям нормальной теплостойкости (производительности). Это стали Р18, Р9, Р6М5.

Быстрорежущие стали с более высоким содержанием ванадия, а также дополнительно легированные кобальтом относят к сталям повышенной теплостойкости (Р12Ф3, Р6М5Ф3, Р18К5Ф2, Р9К5, Р6М5К5, Р9М4К8 и др.).

По сравнению со сталями нормальной производительности высокованадиевые стали повышенной производительности обладают в основном повышенной износостойкостью из-за наличия высокотвердого карбида типа МС, а кобальтсодержащие стали — более высокими вторичной твердостью, теплостойкостью и теплопроводностью.

К группе быстрорежущих сталей повышенной производительности следует отнести и быстрорежущие дисперсионно-твердеющие сплавы с интерметаллидным упрочнением. Их высокая теплостойкость и режущие свойства обеспечиваются высокими температурами $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения и упрочнением вследствие выделения при отпуске интерметаллидов, имеющих более высокую устойчивость к коагуляции при нагреве, чем карбиды [7]. Наибольшее распространение получил сплав В11М7К23 (ЭП831).

Основные свойства быстрорежущих сталей в состоянии поставки приведены в табл. 11. Режимы окончательной термической обработки и свойства быстрорежущих сталей нормальной и повышенной производительности приведены в табл. 12.

Интенсивно развивается группа низколегированных быстрорежущих сталей с суммарным содержанием вольфрама и молибдена, не превышающим 5—6 %.

Инструменты из быстрорежущих сталей этой группы предназначены в основном для обработки неупрочненных сталей и чугунов, а также цветных металлов и сплавов. Стойкость инструментов из этих сталей при обработке вышеуказанных групп материалов близка к стойкости инструментов из стали Р6М5.

Химический состав некоторых низколегированных быстрорежущих сталей приведен в табл. 13. Наиболее высокими свойствами в этой группе сталей обладают стали Р2М5 и 11М5Ф. Они существенно превосходят стали 11Р3АМ3Ф2 и 9Х4М3Ф2АГСТ как по основным свойствам (табл. 14), так и по шлифуемости (табл. 15).

Особенно перспективно использование низколегированной безвольфрамовой стали 11М5Ф. Сталь 11М5ФЮС с 1 % Al имеет более высокую теплостойкость и режущие свойства, чем быстрорежущая сталь Р6М5.

Карбидная неоднородность. Быстрорежущие стали относятся к ледебуритному классу. Избыточные карбиды быстрорежущих сталей входят в состав эвтектики, образующейся по границам зерен аустенита или δ-феррита.

Литая сталь из-за присутствия эвтектики имеет высокую хрупкость и низкую прочность. Существенное улучшение структуры и прочностных свойств достигается после горячей пластической деформации с обжатием выше 90 %.

Однако практически при всех используемых условиях деформации абсолютно равномерного распределения карбидов не наблюдается. Карбидная неоднородность способствует созданию значительной анизотропии свойств в заготовках больших размеров.

Карбидная неоднородность выражена сильнее в сталях с повышенным содержанием вольфрама, ванадия и кобальта. В сталях с молибденом размер карбидных частиц и их скоплений меньше, что оказывает положительное влияние на свойства последних.

Форму, расположение и распределение эвтектических карбидов характеризуют баллом карбидной неоднородности. Для вольфрамовых и

11. Основные свойства быстрорежущих сталей в состоянии поставки [5, 9, 10]

Сталь	ρ, т/м³	Температура, °С				HB, МПа, не более	Мас. доля карбидной фазы, %
		Ac_1	Ar_1	ковки	отжига		
Р18	8,7	820	760	1200—900	840—860	2550	28
Р9	8,3	820	740	1180—850	840—860	2550	17
Р6М5	8,1	815	730	1160—850	840—860	2550	22
11Р3АМ3Ф2	7,9	—	—	1140—850	830—850	2550	—
Р6М5Ф3	8,1	815	—	1180—850	840—860	2690	—
Р12Ф3	8,5	825	—	1160—850	860—880	2690	25
Р18К5Ф2	8,2	830	750	1200—900	840—860	2850	25
Р9К5	8,3	815	725	1150—900	840—860	2690	17
Р6М5К5	8,2	840	765	1160—850	840—860	2690	23
Р9М4К8	8,3	800	750	1140—850	840—860	2850	—
Р2АМ9К5	—	—	—	1150—900	850—860	2690	—
Р18Ф2К8М	8,7	830	750	1160—950	840—860	2930	—
Р12Ф4К5	8,3	820	745	1160—850	850—870	2850	—
Р12М3Ф2К8	8,4	820	750	1160—900	840—860	690	—
Р8М3К6С	8,2	820	750	1160—900	860—880	2850	—
В11М7К23	8,6	915	—	1200—950	860—880	3500	—

Примечание. После ковки хлаждение в колодцах при 750—800 °С. После выдержки при 840—880 °С охлаждение со скоростью 30—40 °С/ч до 720—740 °С, выдержка не менее **4 ч**, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе.

12. Режимы окончательной термической обработки и свойства быстрорежущих сталей нормальной и повышеиной теплостойкости (производительности) [5, 9, 10]

Сталь	Температура, °С		HRC	$\sigma_и$, МПа	Теплостойкость (HRC 58), °С
	закалки	отпуска			
Р18	1270—1290	560—570	63—64	2600—3000	620
Р9	1220—1240	550—570	62—64	2800—3200	620
Р6М5	1200—1230	540—560	63—65	3200—3600	620
Р6М5Ф3	1200—1230	540—560	64—66	2700—3100	625
Р12Ф3	1230—1260	550—570	64—66	2400—2600	630
Р18К5Ф2	1270—1290	560—580	65—67	1800—2200	640
Р9К5	1220—1240	560—580	64—66	2300—2700	630
Р6М5К5	1210—1240	540—560	64—66	2600—3000	630
Р9М4К8	1210—1240	550—570	65—68	2200—2600	630
Р2АМ9К5	1190—1210	540—550	64—66	2600—3000	630
Р18Ф2К8М (ЭП379)	1250—1270	560—580	66—68	1600—1800	640
Р12Ф4К5 (ЭП600)	1230—1260	560—580	66—67	1800—2200	640
Р12М3Ф2К8 (ЭП657)	1220—1250	550—580	66—68	1800—2200	635
Р8М3К6С (ЭП722)	1190—1220	540—560	66—69	1600—1900	635
В11М7К23 (ЭП831)	1250—1270	570—590	66—68	2200—2400	700

Стали Р18Ф2К8М, Р12Ф4К5, Р12М3Ф2К8, Р8М3К6С, В11М7К23 поставляются по техническим условиям.

13. Химический состав некоторых низколегированных быстрорежущих сталей

Сталь	Мас. доля элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	W	V	Mo	Ni
11Р3АМ3Ф2 (ГОСТ 19265—73)	1,02—1,12	До 0,5	До 0,5	3,8—4,3	2,5—3,3	2,2—2,6	2,5—3,0	0,05—0,1
Р2М5 (ЭП894)	0,95—1,05	» 0,5	» 0,5	3,8—4,3	1,7—2,3	0,9—1,3	4,8—5,3	0,05—0,08
9Х4М3Ф2АГСТ (ЭК42)	0,87—0,97	0,55—0,75	0,5—0,7	4,0—4,5	До 0,6	1,6—2,1	2,7—3,2	0,04—0,1
11М5Ф (ЭП980)	1,02—1,1	До 0,4	До 0,5	3,8—4,2	» 0,6	1,3—1,6	5,2—5,8	—

Примечание. Сталь 11Р3АМ3Ф2 дополнительно содержит 0,05—0,2 % Nb. Сталь Р2М5 дополнительно содержит 0,05—0,15 % Zr. Сталь 9Х4М3Ф2АГСТ дополнительно содержит 0,15—0,25 % Ti, до 0,003 % B, до 0,08 % РЗМ, до 0,08 % Ca. Сталь 11М5Ф дополнительно содержит 0,15 % Ce (по расчету).

14. Режимы окончательной термической обработки и свойства низколегированных быстрорежущих сталей [5, 10, 11]

Сталь	Температура, °С		Твердость HRC	Теплостойкость, °С (HRC 58)	$\sigma_и$, МПа
	закалки	отпуска			
11Р3АМ3Ф2	1180—1210	540—560 (2, 3 раза по 1 ч)	63—64	620	3400—3600
Р2М5 (ЭП894)	1140—1160	530—550 (2, 3 раза по 1 ч)	64—65	620	3400—3600
9Х4М3Ф2АГСТ (ЭК42)	1200—1210	550—560 (2, 3 раза по 1 ч)	61—63	610	2600—3000
11М5Ф (ЭП980)	1140—1180	560—570 (3 раза по 1 ч)	64—66	620	3400—3600

15. Относительная шлифуемость быстрорежущих сталей [19, 21]

Шлифуемость	Коэффициент относительной шлифуемости $K_ш$ *1	Сталь	
		по ГОСТ 19265—73	по техническим условиям
Повышенная	0,9—1	Р18	Р2М5 (ЭП894), В11М7К23 (ЭП831), В14М7К28 (ЭП723), ЗВ20К18Ф (ЭП634)
Нормальная	0,7—0,9	Р6М5, Р6М5К5, Р12	11М5Ф (ЭП980), Р6М5-МП*2 Р6М5Ф3К8-МП *2 Р6М5К5-МП *2
Средняя	0,55—0,7	Р9М4К8	Р9М3К6С (ЭП722)
Пониженная	0,35—0,55	Р6М5Ф3, Р9, Р9К5, Р12Ф3, Р18Ф2К5	Р6М5Ф6-МП *2 Р9М3К6С (ЭП722) Р12М3Ф2К8 (ЭП657)
Низкая	До 0,35	11Р3АМ3Ф2	9Х4М3Ф3АГСТ (ЭК41) 9Х4М3Ф2АГСТ (ЭК42) Р12Ф4К5 (ЭП600) Р12М2Ф3К10 (ЭП682)

*1 Коэффициент относительной шлифуемости равен отношению удельной производительности шлифования исследуемой стали к удельной производительности шлифования стали Р18.

*2 Стали, полученные методом порошковой металлургии.

вольфрамомолибденовых быстрорежущих сталей существуют две восьмибалльные шкалы (соответственно шкалы 1 и 2, ГОСТ 19265—73), определяющие карбидную неоднородность.

Карбидная неоднородность существенно влияет на прочностные свойства деформированной стали после закалки и отпуска. По мере увеличения карбидной неоднородности прочностные свойства ухудшаются (табл. 16), что приводит к снижению стойкости инструмента в результате выкрашивания режущей кромки или его поломки.

Существуют три основных пути уменьшения карбидной неоднородности:

1) увеличение скорости кристаллизации расплавленной стали; этот путь самый перспективный, поскольку позволяет существенно уменьшить толщину эвтектической сетки (например, при электрошлаковом переплаве) или вообще устранить ее образование, как у сталей, полученных прессованием порошков (гранул) из распыленного жидкого металла;

2) повышение степени деформации и изменение характера деформирования (например, при прессовании литой стали);

3) применение высокотемпературного гомогенизирующего отжига; при этой обработке у быстрорежущих сталей почти полностью устраняется эвтектическая сетка, но увеличиваются размеры избыточных карбидов.

В зависимости от состава и способа производства размеры наиболее крупных (избыточных карбидов) быстрорежущих усталей различаются значительно (от 1 до 25 мкм и более). Крупные карбиды менее эффективно задерживают рост зерна, слабее связаны с матрицей и быстрее выкрашиваются из рабочей кромки инструмента при его эксплуатации. При увеличении размеров карбидов с 8—10 до 15—20 мкм наблюдается снижение стойкости инструмента до 2 раз в тех случаях, когда радиус закругления режущей кромки соизмерим с размерами крупных карбидов и когда инструмент работает с малыми толщинами среза.

Наиболее эффективный путь уменьшения размеров карбидов — изготовление сталей посредством прессования порошков, полученных распылением расплавленного металла. В этом случае размеры карбидов не превышают 1—3 мкм. Быстрорежущие стали, полученные этим способом, обладают повышенными механическими свойствами, стойкостью и шлифуемостью.

Быстрорежущие стали, полученные способом порошковой металлургии, наиболее целесообразно использовать для инструментов, работающих в условиях гибких автоматизированных производств, поскольку этот инструмент обладает более высокой стабильностью свойств.

Нагрев под закалку быстрорежущих сталей проводится при температурах и выдержках, обеспечивающих растворение специальных карбидов и легирование аустенита, для получения оптимальной теплостойкости при усло-

16. Связь между распределением карбидов и прочностью быстрорежущей стали Р18 [5]

Балл карбидной неоднородности	Характеристика распределения карбидов по шкале	Диаметр прутка, мм	$\sigma_и$*1, МПа, в направлении	
			продольном	поперечном
1	Тонкая полосчатая структура	10—15	3300—3400	—
2	Полосчатость с большим числом полос	15—25	3000—3200	—
3А	Полосчатость, более сильно выраженная	25—40	2800—3000	—
3Б	Остатки разорванной карбидной сетки	25—40	2400—2700	—
4А	Полосчатость резко выраженная	40—60	2400—2700	—
4Б	Сетка слабо выраженная, разорванная	40—60	2400—2700	—
5А	Грубая полосчатость	60—75	2300—2500	1800—2000
5Б	Сетка явно выраженная, разорванная	60—75	2300—2500	1800—2500
6А	Полосчатость грубая, резко выраженная и скопления карбидов	70—90	1800—1900	1500—1600
6Б	Сетка явно выраженная, разорванная, крупные скопления карбидов	70—90	1800—1900	1500—1600
7	Сетка, разорванная в отдельных участках, скопления карбидов	80—100	1600—1700	—
8	Сетка малодеформированная, разорванная и скопления карбидов	90—110	1200—1400	—

*1 Закалка на зерно балла 10 и отпуск при 560 °С, 3 раза.

17. Балл зерна для различных быстрорежущих сталей [5]

Балл зерна	Стали
9	Низколегированные, молибденовые и вольфрамо-молибденовые нормальной производительности, из которых изготовляют крупный инструмент относительно простой формы
10	Быстрорежущие нормальной производительности, низколегированные быстрорежущие, а также быстрорежущие повышенной производительности, из которых изготовляют инструмент относительно простой формы
11	Быстрорежущие повышенной производительности (кобальтовые, ванадиевые), а также быстрорежущие обычной производительности (если они применяются для мелкого инструмента сложной формы), порошковые быстрорежущие

вии, что размер зерна не превышает 10-го балла, при котором достигаются оптимальные механические свойства.

Рекомендуемый балл зерна для различных марок быстрорежущих сталей приведен в табл. 17.

При закалке тонколезвийных инструментов небольших размеров (менее 3—5 мм) температура закалки снижается на 10—20 °С (балл зерна 11—12), при закалке крупногабаритного инструмента (сверла диаметром более 20 мм, резцы) можно повысить температуру закалки на 10 °С (балл зерна 9—10).

Для предупреждения образования трещин и повышенных термических напряжений нагрев под закалку ведут с одним или двумя подогревами. Первый подогрев при 400—500 °С, второй при 800—850 °С. Выдержку при окончательном нагреве выбирают из расчета 10—15 с на 1 мм диаметра (толщины) для инструмента диаметром 5—30 мм.

Для инструментов меньшего диаметра время выдержки увеличивают (общее время выдержки не менее 30 с).

Время выдержки при подогреве обычно берут удвоенным по сравнению с выдержкой при окончательном нагреве.

Подогрев и окончательный нагрев под закалку быстрорежущих сталей, как правило, проводят в электродных соляных ваннах. Среда нагрева: при подогреве — смесь 78 % $BaCl_2$ и 22 % NaCl ($T_{пл}$ = 640 °С), при окончательном нагреве — в расплаве $BaCl_2$ ($T_{пл}$ = 962 °С). Для предохранения от окисления (обезуглероживания инструмента) ванну раскисляют фтористым магнием.

Эти рекомендации особенно существенны для быстрорежущих сталей с молибденом и кобальтом, которые обладают повышенной склонностью к обезуглероживанию.

Переохлажденный аустенит быстрорежущих сталей устойчив, вследствие чего они могут охлаждаться в любой среде — воздухе, масле, горячих средах при 500—560 °С.

Вместе с тем при замедленном охлаждении в интервале температур 1000—500 °С возможно выделение карбидов по границам зерен, вследствие чего инструмент, охлажденный таким образом, будет иметь пониженную вязкость и теплостойкость. Вследствие этого охлаждение инструментов крупных размеров на воздухе нежелательно.

Отпуск быстрорежущих сталей выполняется при температурах 550—570 °С, 2—3 раза по 1 ч.

Двухкратный отпуск можно применять для сталей с небольшой устойчивостью остаточного аустенита. Быстрорежущие стали с большой устойчивостью остаточного аустенита требуют трех- и даже четырехкратного отпуска.

При отпуске происходит выделение упрочняющих карбидов и распад остаточного аустенита. В результате быстрорежущая сталь получает высокую твердость, прочность и теплостойкость.

Свойства быстрорежущих сталей после закалки и отпуска приведены в табл. 12 и 14.

Шлифуемость является важным технологическим свойством, которое определяет качество готового инструмента. Стоимость шлифования достигает 50—60 % общей стоимости изготовления инструмента. Чем хуже шлифуемость стали, тем более трудоемким является процесс изготовления из нее инструмента. По этой причине многие быстрорежущие стали находят ограниченное применение.

Используют два метода определения шлифуемости стали. Механический метод заключается в определении отношения объема металла, снятого в единицу времени, к объему одновременно изношенного абразива.

Структурный метод характеризует шлифуемость по количеству остаточного аустенита в шлифованном слое. Чем хуже шлифуемость, тем выше температура его разогрева, тем больше в слое аустенита.

Неправильно выполненное шлифование, при котором в шлифованном слое из-за высоких температур образовалось большое количество аустенита, приводит к значительному снижению стойкости инструмента.

Шлифуемость сталей определяется главным образом количеством карбидов ванадия VC в структуре стали. Наиболее низкую шлифуемость имеют быстрорежущие стали с повышенным содержанием ванадия. Шлифуемость быстрорежущих сталей можно существенно повысить, если их получать методами порошковой металлургии.

Способы улучшения поверхностного слоя. Качество инструмента в значительной мере определяется свойствами поверхностного слоя. В процессе термической обработки или в результате шлифования при несоблюдении технологических режимов свойства поверхностного слоя могут существенно снижаться (в частности, вследствие обезуглероживания или чрезмерного нагрева при шлифовании).

Наиболее эффективно свойства поверхностного слоя могут быть повышены в результате химико-термической обработки, поскольку возрастают твердость, теплостойкость, стойкость против коррозии, в ряде случаев уменьшается коэффициент трения.

Химико-термическая обработка целесообразна для инструментов, сохраняющих улучшенный слой после переточки полностью (резьбовые и червячные фрезы, долбяки, протяжки, фасонные резцы, метчики и др.) или частично (сверла, зенкеры).

Выбор способа химико-термической обработки обусловлен не только требованиями, предъявляемыми к поверхностному слою, но и температурой, при которой выполняется эта обработка, и теплостойкостью стали. Наиболее универсальными и эффективными методами упрочнения поверхностного слоя инструментов из быстрорежущих сталей является жидкое цианирование, карбонитрация, ионное азотирование и вакуумно-плазменное нанесение износостойких покрытий. Основные способы химико-термической обработки, применяемые в качестве заключительной операции для повышения стойкости инструментов из быстрорежущих сталей, приведены в табл. 18.

В том случае, если инструмент после шлифования не подвергается химико-термической обработке, его целесообразно дополнительно отпускать. Отпуск снимает напряжения, способствует превращению аустенита, образовавшегося в поверхностном слое при шлифовании, и поэтому повышает стойкость инструмента. Температура отпуска 350—400 °С, выдержка 30—60 мин.

Примерное назначение быстрорежущих сталей приведено в табл. 19.

Твердые сплавы. Спеченные твердые сплавы представляют собой гетерогенные материалы, состоящие из зерен высокотвердых тугоплавких со-

18. Способы химико-термической обработки быстрорежущих сталей

Способ химико-термической обработки	Условия обработки	Свойства слоя или назначение обработки
Газовое азотирование	При 520—580 °С и степени диссоциации аммиака 25—30 % (при 520—540 °С) и 35—40 % (при 560—570 °С) с выдержкой 0,5—2 ч	Твердость HV 11—12 ГПа, толщина 0,02—0,03 мм
Ионное азотирование	При 350—400 °С в специальных установках в полностью диссоциированном аммиаке или смеси азота с водородом	Твердость HV 11—12,5 ГПа
Вакуумно-плазменное нанесение износостойких покрытий	После ионной очистки на поверхность инструмента методом ионной бомбардировки наносят слой нитридов титана или других металлов	Для повышения износостойкости рабочей поверхности инструмента вследствие высокой твердости этих соединений (HV 25—45 ГПа, толщина слоя 5—20 мкм)
Карбонитрация	В расплаве смесей: 70 % $KCNO$ + 30 % K_2CO_3 или 55 % $CO(NH_2)_2$ (мочевины) и 45 % K_2CO_3 или Na_2CO_3 при 560—580 °С 5—30 мин. Поверхность насыщается углеродом и азотом	Твердость слоя HV 10—11 ГПа, толщина 0,01—0,02 мм
Низкотемпературное цианирование	В расплаве солей NaCN (KCN) при 560—580 °С в течение 5—30 мин. Поверхность насыщается углеродом и азотом. Соли ядовиты	Твердость HV 10—11 ГПа, толщина 0,01—0,02 мм
Сульфоцианирование	В ваннах для жидкого цианирования с добавлением 2 % K_2S или 25 % Na_2SO_4 и 5 % $Na_2S_2O_3$. Поверхность насыщается углеродом, азотом и серой	Твердость HV 10—11 ГПа. Слой имеет пониженный коэффициент трения
Оксидирование	Жидкое оксидирование выполняют в ванне, содержащей 30 % KNO_2 и 70 % $NaNO_3$ при 480—510 °С в течение 20—30 мин. При обработке перегретым паром процесс ведут при 550—570 °С в течение 30—60 мин	Для улучшения товарного вида и повышения стойкости инструмента после шлифования, а также после азотирования или цианирования

19. Примерное назначение быстрорежущих сталей [1, 5, 10]

Сталь	Прочность, износостойкость, особенности стали	Примерное назначение
Р18	Удовлетворительные прочность и шлифуемость, широкий интервал закалочных температур	Для всех видов инструментов, особенно подвергаемых значительному шлифованию, при обработке конструкционных материалов с прочностью до 1000 МПа
Р9	Повышенная износостойкость, более узкий интервал оптимальных закалочных температур, повышенная пластичность при горячей пластической деформации. Шлифуемость пониженная	Для изготовления инструментов простой формы, не требующих большого объема шлифования, применяемых для обработки конструкционных материалов
Р6М5	Повышенная прочность, более узкий интервал (чем у стали Р18) закалочных температур, повышенная склонность к обезуглероживанию. Шлифуемость удовлетворительная	Для всех видов инструментов при обработке конструкционных материалов с прочностью до 1000 МПа
Р12Ф3	Повышенная износостойкость, теплостойкость, удовлетворительная прочность. Шлифуемость пониженная	Для чистовых инструментов (резцов, зенкеров, разверток, сверл, протяжек и др.) при обработке на средних режимах резания вязких аустенитных сталей, а также материалов, обладающих повышенными режущими свойствами
Р6М5Ф3	Повышенная износостойкость, удовлетворительная прочность. Шлифуемость пониженная	Для чистовых и получистовых инструментов (фасонных резцов, разверток, протяжек, фрез и др.), предназначенных для работы на средних скоростях резания, преимущественно обрабатывающих углеродистые и легированные инструментальные стали

Продолжение табл. 19

Сталь	Прочность, износостойкость, особенности стали	Примерное назначение
Р9К5, Р6М5К5, Р18К5Ф2	Повышенная вторичная твердость, теплостойкость, удовлетворительная прочность и вязкость. Шлифуемость пониженная	Для изготовления черновых и получистовых инструментов (фрез, долбяков, метчиков, сверл и т. п.), предназначенных для обработки углеродистых и легированных конструкционных сталей на повышенных режимах резания, а также некоторых труднообрабатываемых материалов. Инструменты из сталей Р6М5К5 и Р18К5Ф2 имеют более высокую стойкость, чем из стали Р9К5
Р9М4К8, Р8М3К6С (ЭП722), Р12М3Ф2К8 (ЭП657), Р12Ф4К5 (ЭП600), Р18Ф2К8М (ЭП379)	Повышенная вторичная твердость, теплостойкость. Пониженная прочность (особенно у стали Р18Ф2К8М) и шлифуемость (особенно у стали Р12Ф4К5)	Все виды инструментов для обработки высокопрочных коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов (в условиях повышенного нагрева режущей кромки), конструкционных материалов повышенной твердости
11Р3АМ3Ф2, Р2М5 (ЭП894), 9Х4М3Ф2АГСТ (ЭК42), 11М5Ф (ЭП980)	Повышенная прочность, удовлетворительная шлифуемость (стали Р2М5, 11М5Ф). Пониженная шлифуемость (стали 11Р3АМ3Ф2, 9Х4М3Ф2АГСТ)	Все виды инструментов для обработки неупрочненных сталей и чугунов, а также цветных металлов и сплавов
В11М7К23 (ЭП831)	Повышенная твердость, теплостойкость. Удовлетворительная прочность, шлифуемость	Все виды инструментов для обработки титановых сплавов, некоторых высокопрочных коррозионно-стойких сталей и сплавов

20. Период стойкости инструментов (в мин) при точении стали 50 в зависимости от скорости резания и марки режущего сплава (глубина резания 1 мм, подача на оборот 0,08 мм) [13]

Скорость резания, м/мин	Сплав				
	ВК8	ВК9	ВК10М	Т5К10	Р18
30	200	85	90	40	110
50	240	110	100	—	53
70	80	61	200	20	17
100	100	76	74	17,4	15,9
120	40	11	37	22	6,5
150	8	4,5	7,5	7,5	0,5

единений (карбидов, реже, нитридов или боридов переходных металлов), сцементованных пластичным металлом — связкой. В качестве тугоплавкой фазы твердых сплавов наиболее широко используются карбиды вольфрама, титана, тантала, хрома или их смеси, а в качестве связки кобальт, никель, реже железо и их сплавы.

Достижение высоких физико-механических и эксплуатационных свойств твердых сплавов возможно лишь при использовании методов порошковой металлургии. При этом из дисперсных смесей порошков тугоплавкой фазы и связки прессованием и последующим спеканием прессовок при температурах, существенно более низких, чем температура плавления тугоплавкой фазы, получают изделия необходимой формы и размеров. При спекании связующая фаза плавится, растворяя некоторую долю тугоплавкой фазы либо изменяя состав поверхностных слоев зерен последней. Твердые сплавы имеют высокую твердость в зависимости от состава (HRA 80—92) и теплостойкость (до 900—1000 °С), что обеспечивает им существенно более высокие режущие свойства по сравнению с быстрорежущими сталями (табл. 20).

В соответствии с ГОСТ 3882—74 металлокерамические твердые сплавы делятся на три группы: вольфрамовые, титановольфрамовые и титаниотанталовольфрамовые.

Химический состав и свойства твердых сплавов по ГОСТ 3882—74 приведены в табл. 21.

Безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбида и карбонитрида титана по прочностным свойствам, износостойкости и режущим свойствам при чистовом и получистовом точении находятся на уровне вольфрамсодержащих твердых сплавов. Физико-механические свойства безвольфрамовых твердых сплавов, освоенных промышленностью, приведены в табл. 22.

Нанесение износостойких покрытий. Повышение режущих свойств неперетачиваемых пластин из твердых сплавов, прикрепляемых к державке резца механическим способом, достигается путем нанесения на них износостойких покрытий из карбида, нитрида, карбонитрида титана либо других высокотвердых соединений. Освоен промышленный выпуск неперетачиваемых пластин различных форм и размеров с покрытиями.

Существуют три основных метода нанесения покрытий: термодиффузионный (ДТ), газофазовый (ГТ) и вакуумно-плазменный (КИБ).

Условия получения некоторых покрытий из газовой фазы (метод ГТ) приведены в табл. 23.

Толщина износостойкого покрытия составляет 5—10 мкм. Стойкость инструмента из твердого сплава с покрытием повышается в 2—4 раза.

Классификация спеченных твердых сплавов по областям применения. Область применения различных марок твердых сплавов для режущих инструментов (ГОСТ 3882—74) приведена в табл. 24.

21. Состав и свойства твердых сплавов для режущих инструментов [3, 17]

Группа	Марка	Мас. доля компонентов, %				Физико-механические свойства				
		WC	TiC	TaC	Co	$\sigma_{и}$, МПа, не менее	HRA, не менее	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м³	λ, Вт/(м·°С)	E, ГПа
Вольфрамовая	ВК3	97	—	—	3	1200	89,5	15—15,3	50,2	643
	ВК3-М	97	—	—	3	1200	91,0	15—15,3	—	647
	ВК4	96	—	—	4	1550	89,5	14,9—15,2	50,2	638
	ВК4-В	96	—	—	4	1500	88,0	14,9—15,2	—	638
	ВК6	94	—	—	6	1550	88,5	14,6—15,0	62,8	628
	ВК6-М	94	—	—	6	1450	90,0	14,8—15,1	67,0	633
	ВК6-ОМ	92	—	2	6	1300	90,5	14,7—15,0	—	—
	ВК8	92	—	—	8	1700	87,5	14,4—14,8	50,2	598
	ВК10	90	—	—	10	1800	87,0	14,2—14,6	67,0	574
	ВК10-М	90	—	—	10	1650	88,0	14,3—14,6	—	—
	ВК10-ОМ	90	—	—	10	1500	88,5	14,3—14,6	—	—
	ВК15	85	—	—	15	1900	86,0	13,9—14,1	67,0	559
Титановольфрамовая	Т30К4	66	30	—	4	1000	92,0	9,5—9,8	12,6	422
	Т15К6	79	15	—	6	1200	90,0	11,1—11,6	12,6	520
	Т14К8	78	14	—	8	1300	89,5	11,2—11,6	16,7	520
	Т5К10	85	6	—	9	1450	88,5	12,4—13,1	20,9	549
	Т5К12	83	5	—	12	1700	87,0	13,1—13,5	20,9	549
Титанотанталовольфрамовая	ТТ17К12	81	4	3	12	1700	87,0	13,0—13,3	—	—
	ТТ8К6	84	8	2	6	1350	90,5	12,8—13,3	—	—
	ТТ10К8-Б	82	3	7	8	1650	89,0	13,5—13,8	—	—
	ТТ20К9	67	9,4	14,1	9,5	1500	91,0	12,0—12,5	—	—

22. Физико-механические свойства карбидотитановых твердых сплавов (ТУ 48-19-223—76), выпускаемых промышленностью [17]

Сплав	Мас. доля, %			ρ, т/м³	$\sigma_{и}$, МПа	HRA
	TiC	Ni	Mo			
ТН-20	79	15	6	5,4—5,8	1000	89,5
ТН-30	69	23	29	5,6—6,0	1100	88,5
ТН-50	61	29	10	5,7—6,2	1150	87,0

Для характеристики областей применения различных марок твердых сплавов принята также международная классификация, в соответствии с которой все сплавы делятся на группы в зависимости от обрабатываемого материала. Внутри группы сплавы подразделяются по конкретным условиям применения (табл. 25). Сплавы для обработки резанием материалов,

23. Условия получения покрытий из газовой фазы на инструменте из твердых сплавов [17]

Материал покрытия	Рабочий газ	Химическая реакция	Температура, °С
TiC	CH_4, $TiCl_4$	$TiCl_4 + CH_4 \rightarrow TiC + 4HCl$	980—1050
TiN	$TiCl_4$, H_2, N_2	$2TiCl_4 + N_2 + 2H_2 \rightarrow 2TiN + 8HCl$	1100—1250
Ti (C, N)	$TiCl_4$, CH_4, N_2	$2TiCl_4 + 2CH_4 + N_2 \rightarrow 2Ti(C, N) + 8HCl$	1000—1300
TiB_2	$TiCl_4$, BCl_3, H_2	$TiCl_4 + 2BCl_3 + 5H_2 \rightarrow TiB_2 + 10HCl$	1000—1300

24. Область применения твердых сплавов для обработки материалов резанием [17]

Сплав	Применение
ВК3	Чистовое точение с малым сечением среза, окончательное нарезание резьбы, развертывание отверстий и другие аналогичные виды обработки серого чугуна, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов (резины, фибры, пластмассы, стекла, стеклопластиков и т. д.). Резка листового стекла
ВК3-М	Чистовая обработка (точение, растачивание, нарезание резьбы, развертывание) твердых, легированных и отбеленных чугунов, цементованных и закаленных сталей, а также неметаллических материалов
ВК4	Черновое точение при неравномерном сечении среза, черновое и чистовое фрезерование, рассверливание и растачивание нормальных и глубоких отверстий, черновое зенкерование при обработке чугуна, цветных металлов и сплавов, титана и его сплавов
ВК6-ОМ	Чистовая и получистовая обработка твердых, легированных и отбеленных чугунов, закаленных сталей и некоторых марок коррозионно-стойких высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена (точение, растачивание, развертывание, нарезание резьбы, шабрение)

Продолжение табл. 24

Сплав	Применение
ВК6-М	Получистовая обработка жаропрочных сталей и сплавов, коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, специальных твердых чугунов, закаленного чугуна, твердой бронзы, сплавов легких металлов, неметаллических материалов, пластмасс, бумаги, стекла. Обработка закаленных сталей, а также незакаленных углеродистых и легированных сталей при тонких сечениях среза на весьма малых скоростях резания
ТТ8К6	Чистовое и получистовое точение, растачивание, фрезерование и сверление серого и ковкого чугуна, а также отбеленного чугуна. Непрерывное точение с небольшими сечениями среза стальных отливок, высокопрочных, коррозионно-стойких сталей, в том числе закаленных. Обработка сплавов цветных металлов и некоторых марок титановых сплавов при резании с малыми и средними сечениями среза
ВК6	Черновое и получерновое точение, предварительное нарезание резьбы токарными резцами, получистовое фрезерование сплошных поверхностей, рассверливание и растачивание отверстий, зенкерование серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов
ВК8	Черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, строгание, черновое фрезерование, сверление, черновое рассверливание, черновое зенкерование серого чугуна, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов. Обработка коррозионно-стойких, высокопрочных и жаропрочных труднообрабатываемых сталей и сплавов, в том числе сплавов титана
ВК10-ОМ	Чистовая и получистовая обработка твердых, легированных и отбеленных чугунов, некоторых марок коррозионно-стойких, высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена. Изготовляют некоторые виды монолитного инструмента
ВК10-М	Сверление, зенкерование, развертывание, фрезерование и зубофрезерование стали, чугуна, некоторых труднообрабатываемых и неметаллических материалов цельнотвердосплавным, мелкоразмерным инструментом
ВК15	Режущие инструменты для обработки дерева
Т30К4	Чистовое точение с малым сечением среза (типа алмазной обработки); нарезание резьбы и развертывание отверстий в деталях из незакаленных и закаленных углеродистых сталей

Продолжение табл. 24

Сплав	Применение
Т15К6	Получерновое точение при непрерывном резании, чистовое точение при прерывистом резании, нарезание резьбы токарными резцами и вращающимися головками, получистовое и чистовое фрезерование сплошных поверхностей, рассверливание и растачивание предварительно обработанных отверстий, чистовое зенкерование, развертывание и другие аналогичные виды обработки углеродистых и легированных сталей
Т14К8	Черновое точение при неравномерном сечении среза и непрерывном резании, получистовое и чистовое точение при прерывистом резании; черновое фрезерование сплошных поверхностей; рассверливание отверстий в литых и кованых деталях, черновое зенкерование и другие подобные виды обработки углеродистых и легированных сталей
Т5К10	Черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, фасонное точение, отрезка токарными резцами; чистовое строгание; черновое фрезерование прерывистых поверхностей и другие виды обработки углеродистых и легированных сталей, преимущественно в виде поковок, штамповок и отливок по корке и окалине
Т5К12	Тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами при наличии песка, шлака и различных неметаллических включений, при неравномерном сечении среза и наличии ударов. Все виды строгания углеродистых и легированных сталей. Сверление отверстий в стали
ТТ17К12	Тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами при наличии песка, шлака и различных неметаллических включений при равномерном сечении среза и наличии ударов. Все виды строгания углеродистых и легированных сталей. Тяжелое черновое фрезерование углеродистых и легированных сталей
ТТ10К8-Б	Черновая и получистовая обработка некоторых труднообрабатываемых материалов, коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, низкомагнитных сталей и жаропрочных сталей и сплавов, в том числе титановых
ТТ20К9	Фрезерование стали, фрезерование глубоких пазов и других видов обработки, предъявляющих повышенные требования к сопротивлению сплава тепловым и механическим циклическим нагрузкам

25. Соответствие марок твердых сплавов международной классификации [17]

Основные группы резания		Группы применения			Соответствующая марка по ГОСТ 3882—74
Обозначение	Цвет маркировки	Обозначение	Обрабатываемый материал и тип снимаемой стружки	Вид обработки и условия применения	
P	Синий	P01	Сталь, стальные отливки, дающие сливную стружку	Чистовое точение, растачивание, развертывание. Высокая точность обработки и высокое качество поверхности изделия. Отсутствие вибрации во время работы	T30K4
		P10	Сталь, стальные отливки, дающие сливную стружку	Точение, точение по копиру, нарезание резьбы, фрезерование, рассверливание, растачивание	T15K6
		P20	Сталь, стальные отливки, ковкий чугун и цветные металлы, дающие сливную стружку	Точение, точение по копиру, фрезерование, чистовое строгание	T14K8
		P25	Нелегированная, низко- и среднелегированная стали	Фрезерование, в том числе фрезерование глубоких пазов, другие виды обработки, при которых предъявляются повышенные требования к сопротивлению сплава тепловым и механическим нагрузкам	TT20K9
		P30	Сталь, стальные отливки, ковкий чугун, дающие сливную стружку	Черновое точение, фрезерование, строгание. Для работ в неблагоприятных условиях *1	T5K10
		P40	Сталь, стальные отливки с включениями песка и раковинами, дающие сливную стружку и стружку надлома	Черновое точение, строгание. Для работ в особо неблагоприятных условиях *1	T5K12, TT7K12
		P50	Сталь, стальные отливки со средней или низкой прочностью, с включениями песка и раковинами, дающие сливную стружку и стружку надлома	Точение, строгание, долбление при высоких требованиях к прочности твердого сплава в связи с неблагоприятными условиями резания *1. Для инструмента сложной формы	TT7K12
M	Желтый	M10	Сталь, стальные отливки, высоколегированные стали, в том числе аустенитные, жаропрочные труднообрабатываемые стали и сплавы, серый, ковкий и легированный чугуны, дающие как сливную, так и стружку надлома	Точение и фрезерование	BK6-OM, BK6-M, TT8K6
		M20	Стальные отливки, аустенитные стали, марганцовистая сталь, жаропрочные труднообрабатываемые стали и сплавы, серый и ковкий чугуны, дающие как сливную, так и стружку надлома	Точение и фрезерование	TT10K8-Б

Продолжение табл. 25

Основные группы резания		Группы применения			Соответствующая марка по ГОСТ 3882—74
Обозначение	Цвет маркировки	Обозначение	Обрабатываемый материал и тип снимаемой стружки	Вид обработки и условия применения	
М	Желтый	М30	Стальные отливки, аустенитные стали, жаропрочные труднообрабатываемые стали и сплавы, серый и ковкий чугуны, дающие как сливную, так и стружку надлома	Точение, фрезерование, строгание. Условия резания неблагоприятные *1	ВК10-ОМ, ВК10-М, ВК8
		М40	Низкоуглеродистая сталь с низкой прочностью, сталь высокой обрабатываемости резанием и другие металлы и сплавы, дающие как сливную, так и стружку надлома	Точение, фасонное точение, отрезка преимущественно на автоматах	ТТ7К12, ВК10-ОМ
К	Красный	К01	Серый чугун, преимущественно высокой твердости, алюминиевые сплавы с большим содержанием кремния, закаленная сталь, пластмассы, керамика, стекло, дающие стружку надлома	Чистовое точение, растачивание, фрезерование, шабрение	ВК3, ВК3-М
		К05	Легированные и отбеленные чугуны, закаленные стали, коррозионно-стойкие высокопрочные и жаропрочные стали и сплавы, дающие стружку надлома	Чистовое и получистовое точение, растачивание, развертывание, нарезание резьбы	ВК6-М, ВК6-ОМ
		К10	Серый и ковкий чугуны преимущественно повышенной твердости, закаленная сталь, алюминиевые и медные сплавы, пластмассы, стекло, керамика, дающие стружку надлома	Точение, растачивание, фрезерование, сверление, шабрение	ТТ8К6
		К20	Серый чугун, цветные металлы, прессованная древесина, пластмассы, дающие стружку надлома	Точение, фрезерование, строгание, сверление, растачивание	ВК6, ВК4
		К30	Серый чугун низкой твердости и прочности, сталь низкой прочности, древесина, цветные металлы, пластмасса, плотная древесина, дающая стружку надлома	Точение, фрезерование, строгание, сверление. Работа в неблагоприятных условиях *1. Допустимы большие передние углы заточки инструмента	ВК8, ВК4
		К40	Цветные металлы, древесина, пластмассы, дающие стружку надлома	Точение, фрезерование, строгание. Допустимы большие передние углы заточки инструмента	ВК8, ВК15

*1 Неблагоприятными условиями следует считать работу с переменной глубиной резания, с прерывистой подачей, с ударами, вибрациями, с наличием литейной корки и абразивных включений в обрабатываемом материале.

26. Физические и механические свойства алмаза и кубического нитрида бора (эльбора) [17]

Вещество	ρ, т/м³	λ, Вт/(м·°С)	HV, ГПа	Относительная режущая способность
Алмаз	3,51	137,9—146,3	100—120	1
Кубический нитрид бора	3,48	41,86	80—100	0,58—0,64

дающих сливную стружку (сталь, ковкий чугун), обозначаются буквой Р; для материалов, дающих дробленую стружку (серый чугун, цветные металлы и их сплавы, неметаллические материалы), — буквой К и так называемые универсальные сплавы, т. е. пригодные для обработки как сталей, так и чугунов, — буквой М.

Подгруппы сплавов внутри каждой из групп для конкретных условий резания обозначают двузначной цифрой, прибавляемой к соответствующей букве, например Р01, Р10, Р20. Возрастание цифр указывает на повышение прочностных свойств сплавов и снижение их твердости, износостойкости при одновременном снижении скорости резания.

Сменные многогранные твердосплавные пластины для режущего инструмента поставляются по

ГОСТ 19042—80, ГОСТ 19043—80,
ГОСТ 19046—80, ГОСТ 19047—80,
ГОСТ 19048—80, ГОСТ 19049—80,
ГОСТ 19052—80, ГОСТ 19053—80,
ГОСТ 19056—80, ГОСТ 19057—80,
ГОСТ 19059—80, ГОСТ 19061—80,
ГОСТ 19065—80, ГОСТ 19067—80,
ГОСТ 19069—80, ГОСТ 19070—80,
ГОСТ 19085—80, ГОСТ 19086—80,
ГОСТ 24247—80, ГОСТ 24248—80,
ГОСТ 24249—80, ГОСТ 24250—80,
ГОСТ 24254—80, ГОСТ 24255—80,
ГОСТ 24257—80.

Сверхтвердые материалы. К сверхтвердым относят материалы, твердость и износостойкость которых превышает твердость и износостойкость твердых сплавов на основе карбидов вольфрама и титана с кобальтовой связкой и карбидотитановых сплавов на никель-молибденовой связке.

В промышленности применяют инструменты из таких сверхтвердых веществ, как алмаз, нитрид бора, оксид алюминия и нитрид кремния, в монокристальной форме или в виде порошков и спеков порошков в качестве лезвийного инструмента, шлифовальных кругов, паст и др.

К основным группам относятся инструменты на основе алмаза, нитрида бора, минералокерамики.

По твердости сверхтвердые материалы подразделяют на пять подклассов: природные алмазы (HV 98,1 ГПа); синтетические алмазы (HV 88,29—98,1 ГПа); кубический нитрид бора (HV 68,67—78,48 ГПа); вюрцитный нитрид бора (HV 49,05—78,48 ГПа); композиционные материалы (HV до 49,05 ГПа).

Физические и механические свойства алмаза и кубического нитрида бора приведены в табл. 26.

Алмазы имеют теплопроводность, в несколько раз превышающую теплопроводность других инструментальных материалов. Этим объясняется более эффективный отвод теплоты из зоны резания, что существенно улучшает режущие свойства алмазных инструментов.

Кубический нитрид бора (эльбор) обладает твердостью, близкой к твердости алмаза, более теплоустойчив, чем алмаз, и более химически инертен, хотя и менее теплопроводен.

Алмаз начинает графитизироваться уже при 800—900 °С; кубический нитрид бора переходит в графитоподобную модификацию при температурах 1200—1400 °С и только при 1600—1800 °С скорость перехода резко возрастает. Его теплопроводность примерно в 3 раза ниже теплопроводности

27. Степень химического взаимодействия сверхтвердых материалов с некоторыми обрабатываемыми материалами [17]

Материал	Степень химического взаимодействия		
	Стали	Титан и его сплавы	Чугуны
Алмаз	Высокая	Низкая	Низкая
Карбид кремния	»	Средняя	»
Электрокорунд	Не взаимодействует	Высокая	Не взаимодействует
Оксид циркония	То же	Низкая	То же
Эльбор	Низкая	»	»

алмаза, но все же значительно выше теплопроводности других сверхтвердых материалов.

Степень химического взаимодействия некоторых сверхтвердых материалов приведена в табл. 27.

Алмазные резцы из природных монокристаллов, а также из синтетических алмазов типа баллас (АСБ) и карбонадо (АСПК) могут эффективно применяться при обтачивании и растачивании изделий из цветных металлов и их сплавов, а также из неметаллических материалов и пластмасс. Для обработки сталей их применять не рекомендуется из-за сильного химического взаимодействия.

Основным преимуществом алмазного лезвийного инструмента, кроме высокой твердости и износостойкости, является его высокая теплопроводность (см. табл. 26). Несколько уступая по комплексу свойств природным алмазам, балласы и карбонадо значительных размеров позволяют осуществить не только сверхтонкое точение, но также получистовую и даже черновую обработку с глубиной резания до 2—2,5 мм. Структура балласов и карбонадо препятствует доводке режущей кромки инструмента до параметра шероховатости, который достижим природным алмазом.

Для резцов используют кристаллы природных алмазов массой 0,2—0,75 кар. Размеры балласов и карбонадо могут быть существенно большими. Такие кристаллы допускают 6—10 переточек. Монокристальные алмазы, как и поликристаллы типа балласов и карбонадо, хрупки и могут быть использованы лишь при непрерывном точении.

Резцы для алмазного точения бывают двух видов: с напаянными алмазами и механически закрепленными. Для резцов применяют технические кристаллы шестой и третьей групп по техническим условиям 4086—52 Министерства финансов СССР и Министерства цветной металлургии СССР.

Рекомендуемые обрабатываемые материалы и режимы резания при алмазном точении приведены в табл. 28.

Режущие пластины для резцов и торцовых фрез изготовляются из сфалеритной (кубической) и вюрцитной модификации нитрида бора.

Высокая эффективность применения инструмента, оснащенного режущими пластинами из этих модификаций нитрида бора, обусловлена высокой твердостью (HV 40—75 ГПа), т. е. в 2—4 раза больше, чем у твердых сплавов; высокой теплостойкостью (1100—1300 °С); теплопроводностью на уровне теплопроводности твердых сплавов, не снижающейся при повышении температуры; химической инертностью к большинству сплавов железа с углеродом; способностью режущей кромки к самозатачиванию; достаточной ударной вязкостью, обеспечивающей применение при торцовом фрезеровании. Обработка этими материалами характеризуется исключительно высокими скоростями резания и малыми толщинами срезаемых стружек, малыми силами резания, высокой точностью обработки, высоким качест-

28. Рекомендуемые обрабатываемые материалы и режимы резания при алмазном точении [17]

Обрабатываемый материал	Режимы резания		
	v, м/мин	S_0, мм	t, мм
Алюминий	400—500	0,01—0,05	0,01—0,15
Сплавы алюминия	600	0,01—0,05	0,05—0,10
Латунь	400—500	0,02—0,07	0,03—0,06
Баббиты	400—500	0,02—0,05	0,05—0,15
Бронза:			
оловянистая	300—400	0,03—0,05	0,05—0,25
свинцовистая	800	0,02—0,04	0,025—0,05
Медь	350—500	0,01—0,04	0,01—0,03
Титан	100—300	0,02—0,05	0,03—0,05
Пластмасса	500—700	0,03—0,06	0,05—0,03
Специальные пластмассы (типа К211-3)	100—150	0,02—0,03	0,05—0,15

вом тонкого поверхностного слоя детали.

Эльборовые поликристаллические спеки (эльбор-Р, композиты 01, 05) особенно эффективно использовать при изготовлении резцов, предназначенных для обработки стальных и чугунных изделий. При обработке закаленных сталей высокой твердости по износостойкости режущий инструмент из эльбора-Р во много раз превосходит твердосплавный и минералокерамический инструменты и обеспечивает возможность замены шлифования точением или фрезерованием.

Рекомендуемые обрабатываемые материалы и режимы резания при точении и фрезеровании инструментами из эльбора приведены в табл. 29 и 30.

На основе смесей кубического и вюрцитного нитрида бора в ИКФ АН СССР разработаны сверхтвердые материалы типа ПТНБ для лезвийного инструмента. Они могут применяться как для гладкого, так и прерывистого точения. Рекомендуемые обрабатываемые материалы и эксплуатационные характеристики ПТНБ приведены в табл. 31.

Высокими режущими свойствами обладает сверхтвердый гексанит-Р (композиты 10, 10Д), изготовленный из вюрцитной модификации нитрида бора по технологии, разработанной в ИПМ АН УССР. Его фазовый состав представлен вюрцитной модификацией нитрида бора, являющейся высокодисперсной связующей основой, содержащейся в гексаните-Р в количестве, превышающем 50 %, и сфалеритной модификацией — продуктом частичного фазового перехода вюрцитной формы.

На режимах прерывистого точения гексанит-Р превосходит по износостойкости все модификации ПТНБ, однако в условиях непрерывного точения, при обработке особо твердых закаленных сталей, несколько уступает по износостойкости эльбору-Р.

При обработке сталей с твердостью ниже HRC 60 его износостойкость существенно выше.

Гексанитовые резцы рекомендуется использовать при обработке твердых сплавов, наплавок из сормайта, закаленных сталей, чугунов, сплавов цветных металлов и пластмасс.

Режущий инструмент из сверхтвердых материалов на основе нитрида бора выпускается в виде пластин круглой, треугольной, квадратной и ромбической формы по ТУ 2-035-808—81.

Применение инструментов с режущими сменными пластинами из керамики, обладающей высокими тепло-

29. Рекомендуемые режимы резания инструментом из эльбора при точении и растачивании [14, 17]

Обрабатываемый материал	Характер процесса резания	Композит	Режимы резания		
			v, м/мин	S_0, мм	t, мм
Конструкционные и легированные, инструментальные и подшипниковые стали, закаленные до твердости HRC 40—58	Без удара	05; 01	50—180	0,03—0,20	0,05—3,0
	С ударом	10; 10Д	40—120	0,03—0,10	0,05—1,0
Быстрорежущие, инструментальные, цементуемые стали, закаленные до твердости HRC 58—70	Без удара	01	50—120	0,03—0,1	0,05—0,8
	С ударом	10; 10Д	40—100	0,03—0,07	0,05—0,4
Серые и высокопрочные чугуны, НВ 150—300	Без удара	05; 01	400—1000	0,03—0,5	0,05—3,0
	С ударом	10; 10Д; 05; 01	300—800	0,03—0,2	0,05—2,0
Отбеленные, закаленные чугуны, НВ 400—600	Без удара	05; 01	50—200	0,03—0,5	0,05—2,0
	С ударом	10; 10Д	40—90	0,03—0,10	0,05—1,0
Твердые сплавы с содержанием кобальта не менее 15 %, HRA 80—86	Без удара	10; 10; 10Д	5—20	0,03—0,1	0,05—1,0
Износостойкие покрытия на основе никеля (плазменное нанесение), HRC 45—57	По корке	01; 10; 10Д	40—100	0,03—0,15	0,1—0,5

Примечание. Композит 01, 05 — эльбор-Р на основе кубического нитрида бора; композит 10 — гексанит-Р; композит 10Д — двухслойные пластины с рабочим слоем из гексанита-Р.

30. Рекомендуемые режимы резания инструментами из эльбора при торцовом фрезеровании [14, 17]

Обрабатываемый материал	Композит	Режимы торцового фрезерования		
		v, м/мин	S_z, мм	t, мм
Конструкционные и легированные нетермообработанные стали, HRC 30 (в состоянии поставки)	10; 01; 10Д	400—900	0,01—0,1	0,05—1,5

Продолжение табл. 30

Обрабатываемый материал	Композит	Режимы торцового фрезерования		
		v, м/мин	S_z, мм	t, мм
Конструкционные, легированные, инструментальные закаленные стали, HRC 35—55	10; 01; 10Д	200—600	0,01—0,1	0,05—1,2
Закаленные, цементованные стали, HRC 55—70	10; 01; 10Д	80—300	0,01—0,05	0,05—0,8
Быстрорежущие стали, HRC 60—70	01	20—40	0,01—0,05	0,05—0,6
Серые и высокопрочные чугуны, НВ 150—300 (в том числе по литейной корке)	05; 10; 10Д; 01	800—3000	0,01—0,1	0,05—6,0
Отбеленные, закаленные чугуны, НВ 400—600	10; 01; 10Д; 05	200—800	0,01—0,1	0,05—4,0

Примечание. Композит 01, 05 — эльбор-Р на основе кубического нитрида бора; композит 10 — гексанит-Р, композит 10Д — двухслойные пластины с рабочим слоем из гексанита-Р.

31. Эксплуатационные характеристики ПТНБ [17]

Исходный материал для синтеза	Марка	Область применения	Примечание
Смесь КНБ и ВНБ	Р20/25Д	Обработка закаленных сталей, чугунов и сплавов цветных металлов	Непригоден для прерывистого точения
Смесь КНБ и ВНБ	11-5МК	Обработка закаленных сталей, чугунов, стеклопластиков, керметов, никеля и сплавов цветных металлов	Может использоваться как при гладком, так и при прерывистом точении
Смесь активированных КНБ и ВНБ с примесями	11-3МКТ	То же	При прерывистом точении стойкость в 1,3—1,4 раза выше, чем у марки 11-5МК

32. Физико-механические свойства керамики [14]

Марка	Группа	ρ, т/м³	Твердость	$\sigma_и$, МПа
ЦМ-332	Оксидная	3,85	HRA 90	300—400
ВШ-7	»	—	—	500—600
ВЗ	Оксидно-карбидная	4,5—4,6	HRA 92—94	450—750
ВОК-60	То же	4,2—4,3	HRA 92—94	600—750
ВОК-63	»	—	HRA 92—93	650—750
Силинит-Р	Оксидно-нитридная	—	HV 32 ГПа	500—700

Примечание. Оксид — Al_2O_3; карбид — WC, Mo_2C или TiC; нитрид — нитрид кремния.

ст ойкостью (1200—1400 °С), твердостью (до HV 30 ГПа), износостойкостью, химической устойчивостью, обеспечивает обработку деталей из стали и чугуна со скоростями резания в 1,5—8 раз более высокими, чем при использовании инструментов, оснащенных пластинами из твердых сплавов.

Реализация высоких скоростей резания при внедрении инструментов из керамики позволяет уменьшить машинное время обработки деталей, сэкономить дефицитные вольфрамсодержащие твердые сплавы, повысить качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

Интенсивное развитие производства и применение керамики в нашей стране и за рубежом привело к созданию керамических материалов нескольких групп.

1. Оксидная керамика состоит из оксида алюминия (99 %) с незначительными добавками оксида магния или других элементов. К ней относятся марки: ВО-13 (ТУ 48-19-4204—79), ЦМ-332 (белая) и ВШ-75 (ТУ 2-036-788—82).

2. Оксидно-карбидная (черная, смешанная) керамика состоит из оксида алюминия (до 60—80 %), карбидов и окислов тугоплавких металлов. К ней относятся марки ВОК-60 и В-3 по ГОСТ 25003—81.

3. Оксинитридная керамика состоит из нитридов кремния и тугоплавких материалов с включением оксида алюминия и некоторых других компонентов. К этой группе относятся марки: кортинит ОНТ-20 (ТУ 2-036-087—82) и силинит-Р (ТУ 06-339—78).

Физико-механические свойства керамики приведены в табл. 32.

Рекомендуемые марки керамики и режимы резания при обработке чугуна и стали приведены в табл. 33.

2. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

По условиям работы стали можно разделить на четыре группы: 1) высокой и повышенной износостойкости; 2) высокого сопротивления смятию и высокой теплостойкости; 3) высокопрочные с высокой и повышенной ударной вязкостью; 4) для ударных инструментов.

Химический состав штамповых сталей для холодного деформирования приведен в табл. 34, значения критических точек — в табл. 35, а режимы ковки и отжига — в табл. 36.

Достижение экономически целесообразной стойкости инструмента возможно только при четкой специализации штамповых сталей в зависимости от типов технологических процессов и свойств штампуемых материалов.

Для оценки условий работы инструмента при выполнении различных операций холодной штамповки и соответственно правильного выбора сталей для его изготовления необходимо знать основные причины выхода инструмента из строя (табл. 37).

33. Рекомендуемые марки керамики и режимы резания при обработке чугуна и стали

Обрабатываемый материал	Твердость	Режимы резания			Рекомендуемая марка керамики
		v, м/мин	S_o, мм	t, мм	
Чугун:					
серый	НВ 163—241	300—800 *1 / 200—500	0,1—0,2 / 0,2—0,5	0,3—1,0 / 1,4—4,0	ВО-13 / ВШ-75 (ВОК-60) *2
ковкий	НВ 160—270	200—400 / 150—250	0,12—0,25 / 0,2—0,4	0,3—0,8 / 1,0—2,0	ВОК-60 / Кортинит (В-3)
отбеленный	НВ 400—650	40—150 / 15—40	0,8—0,15	0,3—0,8	ВОК-60 / Кортинит (ВОК-63)
Сталь:					
конструкционная неупрочненная	НВ 229	300—700 / 150—300	0,15—0,2 / 0,2—0,5	0,3—0,8 / 1,0—3,0	ВО-13 / ВШ-75 (ВОК-60)
улучшенная цементуемая	НВ 229—380	300—600 / 200—350	0,1—0,2 / 0,15—0,3	0,3—0,8 / 1,0—2,0	ВШ-75 / Кортинит (ВОК-60)
закаленная	HRC 36—48	100—300 / 70—180	0,1—0,15 / 0,1—0,12	0,1—0,3 / 0,2—0,8	ВОК-60 / Кортинит (В-3)
	HRC 48—57	60—150	0,05—0,15	0,1—0,3	ВОК-60 / Кортинит (В-3)
	HRC 57—64	50—120	0,04—0,12	0,1—0,8	ВОК-60 / Кортинит (В-3)

*1 В числителе дроби приведены режимы чистовой обработки, в знаменателе — получистовой.
*2 Марка керамики, которую можно применять альтернативно.

Указанные условия эксплуатации резцов рассчитаны на среднюю стойкость 15 мин.

34. Химический состав штамповых сталей для холодного деформирования (по ГОСТ 5950—73)

Сталь	Мас. доля элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V
Стали высокой и повышенной износостойкости							
Х6Ф4М (ЭП770)	1,70—1,85	0,15—0,40	0,15—0,40	5,70—6,50	—	0,50—0,80	3,50—4,00
Х12ВМФ	2,00—2,20	0,10—0,40	0,15—0,45	11,00—12,50	0,50—0,80	0,60—0,90	0,15—0,30
Х12	2,00—2,20	0,10—0,35	0,15—0,45	11,50—13,00	—	—	—
Х12Ф1	1,25—1,45	0,15—0,35	0,15—0,40	11,00—12,50	—	—	0,70—0,90
Х12МФ	1,45—1,65	0,10—0,40	0,15—0,40	11,0—12,50	—	0,40—0,60	0,15—0,30
Х6ВФ	1,05—1,15	0,15—0,35	0,15—0,40	5,50—6,50	1,10—1,50	—	0,50—0,80
Стали высокого сопротивления смятию и высокой теплостойкости							
8Х4В2МФС2 (ЭП761)	0,80—0,90	1,70—2,00	0,20—0,50	4,55—5,10	1,80—2,30	0,80—1,10	1,10—1,40
11Х4В2МФ3С2 (ДИ-37)	1,05—1,15	1,40—1,80	0,20—0,50	3,50—4,20	2,00—2,70	0,30—0,50	2,30—2,80
Высокопрочные стали с повышенной ударной вязкостью							
6Х4М2ФС (ДИ-55)	0,57—0,65	0,70—1,00	0,15—0,40	3,8—4,40	—	2,00—2,40	0,40—0,60
6Х6В3МФС (55Х6В3СМФ, ЭП569)	0,50—0,60	0,60—0,90	0,15—0,40	5,50—6,50	2,50—3,20	0,60—0,90	0,50—0,80
7ХГ2ВМФ	0,68—0,76	0,20—0,40	1,80—2,30	1,50—1,80	0,55—0,90	0,50—0,80	0,10—0,25
Стали для ударных инструментов							
4ХС	0,35—0,45	1,20—1,60	0,15—0,40	1,30—1,60	—	—	—
6ХС	0,60—0,70	0,60—1,00	0,15—0,40	1,00—1,30	—	—	—
4ХВ2С	0,35—0,45	0,60—0,90	0,15—0,40	1,00—1,30	2,00—2,50	—	—
5ХВ2СФ	0,45—0,55	0,80—1,10	0,15—0,45	0,90—1,20	1,80—2,30	—	0,15—0,30
6ХВ2С	0,55—0,65	0,50—0,80	0,15—0,40	1,00—1,30	2,20—2,70	—	—
6ХВГ	0,55—0,70	0,15—0,35	0,90—1,20	0,50—0,80	0,50—0,80	—	—
6Х3МФС (ЭП788)	0,55—0,62	0,35—0,65	0,20—0,60	2,60—3,30	—	0,20—0,50	0,30—0,60

Примечания: 1. Сталь Х6Ф4М (ЭП770) производят по ТУ 14-1-1227—75.
2. Содержание серы и фосфора не превышает 0,030 % (0,020 %) каждого элемента, а в стали после электрошлакового переплава содержание серы не более 0,015 %.

35. Критические точки (в °С) штамповых сталей для холодного деформирования [10]

Сталь	Ac_1	Ac_m	Ar_m	Ar_1	$M_н$	$M_к$
Х6Ф4М	820	860	800	750	260	20
Х12ВМФ	815	—	—	—	225	—
Х12	810	—	—	755	180	—
Х12Ф1	810	—	—	760	225	0
Х12МФ	830	—	—	750	230	0
Х6ВФ	815	845	775	625	150	—100
8Х4В2МФС2	840	880	820	785	150	—
6Х6В3МФС	875	905	790	755	250	—
7ХГ2ВМФ	765	825	430	310	160	—
4ХС	770	860 *1	—	—	290	—
6ХС	770	830 *1	—	—	250	—
4ХВ2С	780	840 *1	—	—	315	—
5ХВ2ФС	775	860 *1	—	—	295	—
6ХВ2С	775	810 *1	—	—	280	—
6Х3МФС	760—790	950—975 *1	—	—	210—220	—
6ХВГ	780	795 *1	—	675	280	—

*1 Указаны температуры Ac_3.

36. Режимы ковки и отжига штамповых сталей для холодного деформирования [10]

Сталь	Интервал ковочных температур, °С	Режимы отжига	Твердость после отжига НВ, МПа, не более
Х6Ф4М	1140—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 860—880 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 700 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2410
Х12ВМФ Х12	1100—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 830—850 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 720 °С, выдержка 3—4 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2550

Продолжение табл. 36

Сталь	Интервал ковочных температур, °С	Режимы отжига	Твердость после отжига НВ, МПа, не более
Х12Ф1, Х12МФ	1140—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 850—870 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 710 °С, выдержка 3—4 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2550
Х6ВФ	1100—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 830—850 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 710 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2410
8Х4В2МФС2	1150—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 880—900 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 740 °С, выдержка 3—4 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2290
11Х4В2МФ3С2	1150—880, посадка в печь при 600—650 °С, нагрев с печью до 820 °С, выдержка до полного прогрева, затем до температур ковки, охлаждение замедленное	Нагрев со скоростью 100—120 °С/ч до 860—880 °С, выдержка не менее 2,5—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 740—750 °С, выдержка 3—3,5 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2550
6Х6В3МФС	1100—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 860—880 °С, охлаждение со скоростью 30 °С/ч до 770 °С, выдержка 2—3 ч, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2550
7ХГ2ВМФ	1160—800, охлаждение замедленное	Нагрев на 770—790 °С, охлаждение со скоростью 40 °С/ч до 550 °С, далее на воздухе	2550
4ХС	1180—850, воздух	Нагрев на 820—840 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2170

Продолжение табл. 36

Сталь	Интервал ковочных температур, °С	Режимы отжига	Твердость после отжига НВ, МПа, не более
6ХС	1180—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 820—840 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2290
4ХВ2С	1180—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 800—820 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2290
5ХВ2ФС			2550
6ХВ2С			2690
6Х3МФС			2710
6ХВГ	1160—850, охлаждение замедленное	Нагрев на 800—820 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2170

Примечание. Для всех сталей посадка в печь при 600—650 °С.

37. Основные причины выхода из строя и средняя стойкость штамповых инструментов для основных операций холодной штамповки [16]

Характеристика технологических операций	Основные причины выхода из строя	Средняя стойкость, тыс. шт.
Объемное прессование		
Калибровка и чеканка:		
изготовление изделий простой формы из низкоуглеродистых и низколегированных сталей;	Износ рабочих частей	100—350
калибровка и чеканка деталей сложной формы из высокопрочных материалов	Износ и смятие рабочих кромок, хрупкое разрушение	50—100
Высадка:		
изготовление деталей из цветных сплавов, низко- и средиеуглеродистых и легированных сталей (ударные условия нагружения)	Хрупкое разрушение, износ	50—200
Прессование:		
изготовление деталей из цветных сплавов, низко-, среднеуглеродистых и низколегированных сталей при степени деформации 0,4—0,5 и давлении 1400 МПа;	Хрупкое разрушение, износ рабочих частей	30—100
изготовление деталей из низкоуглеродистых и низколегированных сталей при степени деформации 0,5—0,65 и давлении 1400—1800 МПа;	Хрупкое разрушение, смятие и выкрашивание рабочих частей	20—50

Продолжение табл. 37

Характеристика технологических операций	Основные причины выхода из строя	Средняя стойкость, тыс. шт.
однопереходное прессование деталей из конструкционных сталей с большими степенями деформации при давлении 1800—2200 МПа и более	Хрупкое разрушение, смятие и выкрашивание рабочих частей	10—40
Резка		
вырубка и пробивка отверстий в заготовках из конструкционных материалов;	Износ, усталостное разрушение	50—250
прецизионная вырубка изделий электротехнической промышленности	Выкрашивание и износ рабочих кромок, хрупкое разрушение	10—100
Листовая штамповка		
гибка, вытяжка и формовка деталей небольших размеров и простой формы;	Износ	200—250
изготовление деталей повышенной точности сравнительно небольших размеров;	Износ рабочих частей, схватывание	100—250
изготовление крупных изделий сложной формы	Износ и выкрашивание рабочих кромок, схватывание	50—200

Примечание. Значения стойкости даны в осиовиом до первого восстаиовления.

Наименьшая стойкость инструмента наблюдается при выполнении операций объемной штамповки (прессование, высадка, калибровка, чеканка) и резки (вырубка, пробивка, просечка, отрезка) вследствие возникновения больших давлений, неблагоприятного напряженного состояния и нагрева рабочих частей инструментов. Гибка, вытяжка, формовка особых трудностей не вызывают.

Давления при холодном прессовании достигают 2000—2500 МПа, а температура на поверхности инструмента 500—530 °С. При этом из-за низкой теплопроводности высоколегированных сталей в поверхностном слое толщиной около 0,3 мм наблюдается резкий перепад температур [13].

На прессах объемного прессования реализуется плавное нагружение со скоростями 0,1—0,4 м/с, а на чеканочных прессах, холодновысадочных автоматах и быстроходных прессавтоматах ударное нагружение со скоростями 0,5—1,5 м/с.

Хрупкое разрушение может быть не только следствием ударного нагружения, воздействия опасных концентраторов напряжений, но и результатом возрастания удельных нагрузок от смятия или затупления (износа) рабочих частей. При этом интенсивное изменение геометрических размеров связано или с недостаточной теплостойкостью материала, или с абразивным воздействием материала заготовки, или с усталостным выкрашиванием.

38. Количество карбидной фазы в сталях после отпуска на твердость HRC 62—64 [4]

Сталь	Мас. доля, %	
	углерода	карбидной фазы
Х12	2,1	19—20
Х6Ф4М	1,8	15—16 (в том числе 8—9 % МС)
Х12М	1,5	16—17
Х12Ф1	1,3	13—14
Х6ВФ	1,1	12

Кроме приемлемых изиосостойкости, сопротивления малым пластическим деформациям и теплостойкости, прочности и вязкости, стали должны обладать хорошими технологическими свойствами: обрабатываемостью давлением и резанием, устойчивостью против перегрева, малой деформируемостью при термической обработке, малой склонностью к обезуглероживанию, а также по возможности быть экономно легированными.

Условия работы инструмента определяют выбор режимов термической обработки сталей. Высокое качество термической обработки обеспечивается защитой поверхности от обезуглероживания; соблюдением условий и температур нагрева, а также условий охлаждения для достижения оптимального сочетания свойств при наименьшей деформации инструментов.

Лучшее качество поверхности получают при нагреве инструментов в расплавленных солях, раскисленных бурой $Na_2B_4O_7$ (4—5 % от массы соли) или MgF_2 (2—4 %), в печах с защитной атмосферой или в упаковке из чугунной стружки. Склонность к обезуглероживанию повышают кремний, вольфрам и молибден при содержании каждого более 1 %.

Во избежание возникновения чрезмерных термических напряжений из-за низкой теплопроводности сталей перед окончательным нагревом под закалку рекомендуется одноступенчатый (при 650—700 °С) или двухступенчатый (при 300—400 °С — первая ступень и при 800—850 °С — вторая ступень) нагрев.

Время выдержки при температуре аустенитизации для сталей первых трех групп устанавливают из расчета 50—70 с на 1 мм сечения при печном нагреве и 35—40 с при нагреве в ванне. Выдержка при отпуске составляет 1,5—2,5 ч (или 100—150 с на 1 мм наименьшего сечения, но не менее 1 ч); при проведении кратных отпусков и обработке на вторичную твердость выдержку ограничивают 1—1,5 ч.

При обработке инструментов из сталей четвертой группы (для ударных инструментов) время выдержки в камерных печах устанавливают 50—70 с (без учета времени прогрева) на 1 мм толщины детали, а в соляных ваннах 20—30 с. Время выдержки при отпуске определяют из расчета 2 ч плюс 1—1,5 мин на 1 мм толщины.

Инструменты холодного деформирования, работающие в условиях значительного износа, изготовляют преимущественно из сталей с 12 % Cr (Х12ВМ, Х12, Х12Ф1, Х12МФ). Используют также стали с 6 % Cr (Х6Ф4М и Х6ВФ, см. табл. 34).

По относительной износостойкости стали после обработки на твердость HRC 61—62 могут быть расположены в следующий ряд (в скобках указана относительная износостойкость): Х6ВФ (0,5), Х12М (1,0), Х6Ф4М (1,2), Х12 (1,45) [4]. Эти стали относятся к мартенситному классу и ледебуритной группе. Высокая износостойкость определяется повышенным количеством карбидной фазы (табл. 38), типом и морфологией карбидов. Карбиды представлены преимущественно частицами $M_7C_3(Cr_7C_3)$ и небольшим количеством $M_{23}C_6(Cr_{23}C_6)$, МС (VC), а также M_3C при высоком содержании углерода (Х12). Неблагоприятное распределение карбидной фазы, возникающее при кристаллизации слитков и сохраняющееся в горячекованом и горячекатаном состоянии, особенно в прутках диаметром более 40 мм, снижает прочность и ударную вязкость, вызывает выкрашивание рабочих кромок штампов и создает значительную анизотропию свойств. У сталей обязательно контролируют

карбидную неоднородность, чем оценивают одновременно качество ковки. Прочность ледебуритных сталей в термообработанном состоянии при изменении карбидного балла с 3 (диаметр проката 20—35 мм) на 7 (диаметр проката 80—100 мм) снижается в 1,5—2 раза.

Меньшую карбидную неоднородность имеют высокованадиевые стали (Х6Ф4М), но их недостатком является пониженная шлифуемость и повышенная окисляемость при нагреве под ковку, отжиг и закалку.

Термическую обработку сталей с 6 и 12% Cr высокой износостойкости проводят преимущественно на первичную твердость и реже на вторичную.

Оптимальные температуры закалки на первичную твердость устанавливают на основе определенного сочетания характеристик твердости (HRC 62—65), размера зерна (не крупнее 9 по ГОСТ 5639—82 при диаметре до 80 мм и 8 при диаметре 80—140 мм или 4 и 3 по шкале изломов соответственно) и количества остаточного аустенита (15—20%) (табл. 39). Максимальная твердость после закалки достигается при достаточно полном растворении карбидов (сохраняется 6—10%), но таком, чтобы не происходил рост зерна и образование чрезмерного количества остаточного аустенита. У высокохромистых сталей интервал температур закалки небольшой.

39. Влияние температуры закалки на твердость, размеры зерна аустенита и количество остаточного аустенита сталей высокой износостойкости

Сталь (рекомендуемая температура аакалки)	Температура закалки, °С	HRC	Зерно	Количество остаточного аустенита, %
Х6Ф4М (980—1010 °С) [1]	975	63,5	—	8
	1000	64,5	—	10
	1025	64,5	—	17
	1050	64	—	21
	1100	62,5	12	37
	1150	60,5	11—10	55
	1175	59	10	—
Х12 (950—980 °С) [4, 15]	880	57,5	—	—
	930	65	12	—
	980	65	10—10	—
	1030	57	10—11	—
	1100	50	11—9	—
Х12Ф1 (1030—1050 °С) [9, 16]	900	53—54	—	3
	950	58—60	12—13	5
	1000	63	12	10
	1025	64—65	12—11	15—17
	1050	63—64	11—12	22—27
	1100	58—60	9—10	40—60
	1150	52	7—8	65—95

Продолжение табл. 39

Сталь (рекомендуемая температура закалки)	Температура закалки, °С	HRC	Зерно	Количество остаточного аустенита %
Х12МФ (1000—1030 °С) [15]	900	54—55	12—13	3
	950	60—61	12	5
	975	62—63	12—11	8
	1000	64	11—12	12
	1025	64,5	11—10	20
	1050	63	10	40
	1100	54	8—9	74
Х6ВФ (980—1000 °С) [2]	850	53		3
	900	59		5
	950	62,5		9
	1000	64	Св. 9	16
	1050	62		29
	1100	54		52

При закалке с 1010—1060 °С сталь Х12Ф1 прокаливается в сечении до 150—180 мм, а сталь Х12МФ — в сечении более 200 мм при охлаждении в масле и на воздухе.

Температуры отпуска при обработке на первичную твердость устанавливают по сочетанию характеристик твердости, прочности на изгиб и ударной вязкости (табл. 40), чтобы обеспечить наилучшую износостойкость при определенном сопротивлении хрупкому разрушению и выкрашиванию. Отпуск при 300—450 °С резко снижает ударную вязкость вследствие коагуляции карбидов и распада остаточного аустенита. Пониженная ударная вязкость стали Х12 по сравнению

40. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей высокой износостойкости (сечения до 40 мм) [10]

Сталь (рекомендуемая температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_и$, МПа	$a_н$, МДж/м² (ненадрезанный образец)
Х6Ф4М (1000 °С; HRC 62—64)	150	64	3300	0,45
	200	62	3500	0,54
	250	60	3700	0,60
	300	58,5	3750	0,65
	350	58	3800	0,70
	400	58	3500	0,76
	450	57	3200	0,85
	500	55	—	—
	600	40	—	—

Продолжение табл. 40

Сталь (рекомендуемая температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_и$, МПа	$a_н$, МДж/м² (ненадрезанный образец)
Х12ВМФ (1020 °С; HRC 65)	180	**62**	2150	0,2
	200	**60,5**	2330	0,23
	250	**59**	2500	0,30
	300	**58**	2650	0,36
	350	**58**	2740	0,40
	400	**58**	2840	0,44
	450	**58,5**	2750	0,40
	500	**60**	2500	—
	550	**58**	—	—
Х12 (970 °С; HRC 65)	180	**63**	2150	0,08
	200	62	2170	0,10
	250	**60**	2200	0,16
	300	59	2170	0,14
	350	58	2150	0,25
	400	57,5	2050	0,35
	450	56,5	1950	0,10
	500	55	1850	—
	600	**46**	—	—
Х12Ф1 (1040 °С; HRC 63)	**150**	63	2450	0,25
	200	61,5	2500	0,25
	250	60	2550	0,25
	300	59	2580	0,30
	350	58,5	2600	0,35
	400	58	2850	0,65
	450	57,5	3100	0,75
	500	57,5	3000	0,35
	600	49	—	—
Х12МФ (1020 °С; HRC 64)	150	63	2550	0,3
	200	62	2650	0,4
	250	61	2750	0,57
	300	59,5	2920	0,64
	350	59	3100	0,60
	400	58,5	3030	0,50
	450	58	2950	0,40
	500	**59**	2900	0,30
	550	**51**	—	—

Продолжение табл. 40

Сталь (рекомендуемая температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_и$, МПа	$a_н$, МДж/м² (ненадрезанный образец)
Х6ВФ (1000 °С; HRC 65)	150	63	—	—
	200	60	3100	0,85
	250	59	—	1,00
	300	58	3520	—
	350	58	—	—
	400	58	3400	0,80
	450	55	—	—
	500	54	3520	0,60
	550	53	—	—
	600	52	3500	0,80

с другими сталями объясняется ее большей карбидной неоднородностью.

Стали типа Х12, Х12МФ, Х12Ф1, Х12ВМФ иногда обрабатывают на вторичную твердость с целью повышения теплостойкости. Обработка (закалка от 1110—1140 °С с последующим четырехпятикратным отпуском) при 490—530 °С или с обработкой холодом и одно-двухкратным отпуском применима только для малонагруженных штампов, поскольку закалка от столь высоких температур приводит к росту зерна на три-четыре балла, а отпуск или обработка холодом — к распаду остаточного аустенита. Небольшой эффект вторичного твердения после закалки от обычных температур наблюдается только у сталей Х12ВМФ и Х12МФ (см. табл. 40), что обеспечивает им большую теплостойкость по сравнению со сталью Х12. Обработку холодом сталей типа Х12 применяют редко. Вследствие распада остаточного аустенита она повышает твердость, но одновременно и склонность к хрупкому разрушению. Ее целесообразно использовать для получения высокой твердости в массивных штампах. Охлаждение во избежание образования трещин проводят замедленно.

Минимальную деформацию инструмента получают после следующих обработок.

1. Проведение перед окончательной термической обработкой улучшения по режиму: закалка от 880—900 °С, выдержка после нагрева 20—30 мин, масло + отпуск при 620—640 °С, 2—3 ч, воздух.
2. Закалка от температур на 20—30 °С выше, чем при обработке на первичную твердость, для повышения содержания остаточного аустенита (см. табл. 39) + отпуск при 450—480 °С с такой кратностью (1—3 раза), которая обеспечит требуемые размеры (тепловая доводка) [18].
3. Двухступенчатая закалка; например, для стали Х12МФ охлаждение с температуры закалки 1050 °С проводят в печи, имеющей температуру 850 °С (межкритический интервал 810—860 °С) и выдерживают 8 мин (чтобы не допустить чрезмерного снижения твердости и вязкости из-за выделения вторичных карбидов и их коагуляции). Затем следует перенос в печь, нагретую до 400—450 °С (интервал максимальной устойчивости аустенита), выдержка 20—40 мин, охлаждение на воздухе [18].

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки и свойства сталей высокой износостойкости приведены в табл. 41, а их применение — в табл. 42.

41. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей высокой износостойкости [10]

Сталь	Закалка			Отпуск				
	Температура аустенитизации, °С	Охлаждающая среда	HRC	Температура отпуска, °С	Время, ч	HRC	$\sigma_и$, МПа	$a_н$, МДж/м²
Х6Ф4М	**980—1010** **1140—1160**	**Масло**	**62—64** **61—62**	170—190 550	**1,5** Трехкратный по 1 ч	**60—62** **62—64**	**2900** **3100**	**0,25—0,30** **0,45—0,70**
Х12ВМФ	1000—1030	Масло	**63—64**	170—180 320—350	1,5 1,5	**62—63** **58—59**	**2400** **2600**	**0,20—0,30** **0,25—0,40**
Х12	**950—980**	**Масло**	**63—65**	170—200 300—350	1,5 1,5	**60—62** **57—58**	**2150** **2200**	**0,15—0,20** **0,20—0,30**
Х12Ф1	1030—1050	Масло, селитра	62—64	170—200 400—420	1,5 1,5	60—62 56—58	2500 3000	0,25—0,30 0,50—0,60
Х12МФ	1000—1030	Масло, селитра	**62—64**	170—200 320—350	1,5 1,5	60—62 56—58	2600 3100	0,50—0,60 0,40—0,50
Х6ВФ	980—1000	Масло, щелочь, селитра	**63—65**	150—170 280—300	1,5 1,5	60—62 56—58	3000 3500	**0,70—0,80** **0,90—1,00**

Примечания: 1. Температура нагрева инструмента перед аустенитизацией 650—700 °С.
2. Ударная вязкость определена по результатам испытаний образцов без надреза.

42. Рекомендуемые области применения сталей высокой износостойкости [4, 9, 10, 16]

Сталь	Область применения
Х6Ф4М	Матрицы для прессования абразивных и твердых металлических порошков, пуансоны, вырубные и отрезные штампы для труднодеформируемых материалов, шлифуемые кубическим нитридом бора и работающие при давлении 1500—1700 МПа
Х12, Х12ВМФ	Волочильные доски и волоки, глазки для калибрования пруткового металла под накатку резьбы, гибочные и формовочные штампы сложной формы, матрицы и пуансоны вырубных и просечных штампов. Рабочая часть должна быть округлой формы, недопустима работа с ударами. Из стали Х12ВМФ делают штампы более крупные и более сложной формы, чем из стали Х12, которую целесообразно использовать в сечениях до 40—50 мм
Х12МФ, Х12Ф1	То же, что и для стали Х12, но когда требуется большая вязкость; профилировочные рамки сложной формы; секции кузовных штампов сложных форм; сложные дыропрошивочные матрицы при формовке листового материала; матрицы и пуансоны вырубных и просечных штампов сложной конфигурации; пуансоны и матрицы холодного выдавливания, работающие при давлении до 1500—1700 МПа
Х6ВФ	Матрицы и пуансоны холодного прессования, работающие при давлении до 1400—1600 МПа; резьбо- и зубонакатной инструмент

43. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей с высокими сопротивлением смятию и теплостойкостью

Сталь (рекомендуемые температура закалки, твердость после закалки)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_в$, МПа	$a_н$, МДж/м² (ненадрезанный образец)
	Однократный отпуск 1,5 ч			
8Х4В2МФС2 (1075 °С; HRC 64)	170	62,0	3000	—
	200	60,5	3330	0,35
	250	58,0	3700	0,45
	300	57,2	3900	0,90
	350	57,6	3750	1,05
	400	58,5	3500	0,70
	450	59,7	3200	0,45
	480	61,0	3180	0,40
	Трехкратный отпуск по 1 ч			
	500	61,4	3200	0,35
	520	62,2	3250	0,30
	540	61,8	3500	0,40
	560	61,5	3800	0,44

Продолжение табл. 43

Сталь (рекомендуемые температура закалки, твердость после закалки)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_в$, МПа	$a_н$, МДж/м² (ненадрезанный образец)
	Однократный отпуск 1,5 ч			
11Х4В2МФ3С2 (1060 °С; HRC 62)	170	61,0	3800	0,50
	200	60,0	4000	0,57
	250	58,0	4200	0,74
	300	57,5	4300	0,78
	350	57,0	4200	0,75
	400	57,5	4000	0,64
	450	58,5	3600	0,37
	Трехкратный отпуск по 1 ч			
	500	60,4	3600	0,30
	520	61,0	3800	0,30
	540	59,5	3900	0,30
	560	57,6	4100	0,30
	580	55,0	—	0,30
	Однократный отпуск 1 ч			
(1090 °С; HRC 62)	170	60,2	3200	0,35
	200	58,8	3600	0,40
	250	57,7	3600	0,60
	300	56,7	3670	0,65
	350	56,4	3700	0,60
	400	57,0	3500	0,45
	450	58,5	3100	0,30
	Трехкратный отпуск по 1 ч			
	500	61,0	3300	0,22
	520	62,0	3400	0,24
	540	60,2	3600	0,26
	560	58,6	3700	—
	580	56,3	—	—

Стали с высоким сопротивлением смятию и высокой теплостойкостью (8Х4В2МФС2 и 11Х4В2МФ3С2) относятся к мартенситному классу и ледебуритной группе. Эти стали комплексно-легированные и имеют по сравнению со сталями высокой износостойкости пониженное содержание углерода и хрома (см. табл. 34). Поэтому количество карбидной фазы (и особенно крупных избыточных карбидов) в них меньше (10—18 %), а степень дисперсности выше. Это обеспечивает получение высоких механических свойств и лучшей технологичности. По износостойкости сталь 8Х4В2МФС2 близка к сталям Х12МФ и Х12Ф1, а сталь 11Х4В2МФ3С2 превосходит их.

Термическую обработку сталей проводят обычно на вторичную твердость для получения хорошей теплостойкости (520—540 °С), об уровне которой можно судить по изменению твердости при отпуске (табл. 43). Необходимость использования высоких температур закалки связана с высокой термостойкостью карбидов M_6C и МС, растворяющихся выше 1050 °С. После закалки в структуре сохраняется 6—12 % карбидов, что позволяет получить зерно аустенита 10—12. Количество остаточного аустенита после закалки 20—30 %.

При отпуске на вторичную твердость количество карбидов (очень дисперсных) увеличивается до 12—18 %, а ко-

личество остаточного аустенита уменьшается до 2—3 %, чем и объясняется сильное упрочнение при отпуске на 500—540 °С. Сталь 11Х4В2МФ3С2 можно обрабатывать и на первичную твердость.

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки и свойства сталей с высоким сопротивлением смятию и высокой теплостойкостью приведены в табл. 44, а их применение — в табл. 45.

Высокопрочные стали с повышенной ударной вязкостью (6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС и 7ХГ2ВМФ) относятся к мартенситному классу и эвтектоидной группе (см. табл. 34). Стали имеют небольшое количество избыточных карбидов и характеризуются их равномерным распределением, вследствие чего почти полностью отсутствует анизотропия деформации в прокате сечением до 100 мм. В сталях 6Х4М2ФС и 6Х6В3МФС основной карбид $M_{23}C_6$, а в стали 7ХГ2ВМФ избыточными являются карбиды M_3C и МС. Благодаря малой объемной доле карбидной фазы износостойкость сталей пониженная. Прокаливаемость сталей высокая (до 100 мм при охлаждении на воздухе и до 150—200 мм при охлаждении в масле). Вследствие сохранения повышенного количества остаточного аустенита после закалки (до 18—20 %) стали мало деформируются, но чувствительны к образованию шлифовочных трещин. Поэтому их целесообразно шлифовать до закалки.

Лучшее сочетание свойств стали 6Х4М2ФС и 6Х6В3МФС приобретают при обработке на вторичную твердость, а сталь 7ХГ2ВМФ на первичную (табл. 46). Поэтому стали 6Х4М2ФС и 6Х6В3МФС более теплостойкие (до 450—500 °С), износостойки, лучше сопротивляются смятию. Низкая твердость этих сталей в отожженном состоянии (НВ 1600 МПа) позволяет изготовлять инструмент холодной пластической деформацией.

Теплостойкость стали 7ХГ2ВМФ ограничивается 250 °С. Отпуск при 300—350 °С вызывает развитие хрупкости первого рода.

Для уменьшения деформации стали 7ХГ2ВМФ и снижения параметра шероховатости поверхности при резании перед окончательной термической обработкой проводят закалку из межкритического интервала от 770—780 °С и отпуск при 525—600 °С на твердость HRC 28—30. В результате можно отказаться от шлифования. Возможно совмещение отпуска с азотированием (при 520 °С в течение 12 ч; твердость HRC 63—64).

Свойства всех сталей зависят (меньше для 6Х4М2ФС) от химического состава в пределах марочного.

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки,

45. Рекомендуемые области применения сталей с высокими сопротивлением смятию и теплостойкостью [10]

Сталь	Область применения
8Х4В2МФС2	Матрицы и пуансоны штампов холодного объемного деформирования, испытывающие в процессе эксплуатации давление до 2300 МПа, резьбонакатные ролики
11Х4В2МФ3С2	Вырубные штампы, в том числе для обработки холоднокатаных электротехнических сталей с покрытиями типа «карлит»; пуансоны и матрицы холодновысадочных автоматов; пуансоны и выталкиватели для холодного выдавливания, эксплуатируемые при давлениях до 2000 МПа в условиях повышенного износа и нагрева рабочих поверхностей до 400 °С; шлице- и резьбонакатной инструмент

44. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей с высокими сопротивлением смятию и теплостойкостью [10]

Сталь	Закалка		Отпуск					
	Температура аустенитизации, °С	HRC	Температура, °С	Время, ч	HRC	$\sigma_в$, МПа	$a_в$, МДж/м² (ненадрезанный образец)	$\sigma_{0,2}$ / $\sigma_{0,05}$, МПа
8Х4В2МФС2	1060—1090	62—64	530—540	Трехкратный по 1 ч	62—63	3700—3800	0,40—0,60	2700—2800 / 2200—2300
11Х4В2МФ3С2	1000—1030	60—62	200—220	2,5	60—62	3400—3700	0,50—0,60	2500 / 2100
			320—350	2,5	56—58	3800—4000	0,68—0,80	2400 / 2000
	1050—1070	60—62	540	Трехкратный по 1 ч	59—61	3600—3800	0,45—0,50	2700 / 2150
	1080—1100	60—62	540 °С	Трехкратный по 1 ч + 500 °С, 1 ч	61—62	3400—3600	0,30—0,40	2800 / 2250

Примечания: 1. Температура нагрева инструмента перед аустенитизацией 650—700 °С.
2. Охлаждающая среда при закалке — масло.

46. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью

Сталь (рекомендуемая температура закалки, твердость после закалки)	Температура, °С	HRC	$\sigma_в$, МПа	$a_н$, МДж/м² (ненадрезанный образец)
		Трехкратный отпуск по 1 ч		
6Х4М2ФС (1060 °С; HRC 62) [5]	450	56,5	3600	2,1
	500	59	4000	1,6
	525	61	4200	1,2
	550	59,5	4400	1,5
	560	—	4800	1,9
	590	56,5	4000	3,0
		Однократный отпуск 1,5 ч		
6Х6В3МФС (1060 °С; HRC 62,5) [10]	200	61,7	4000	1,6 (21 % $A_{ост}$)
	250	58,0	—	—
	300	56,5	3950	1,6
	350	56,0	3800	—
	400	56,5	3600	1,4
	450	57,5	3600	—
	480	58,5	3600	1,2
	525, 2 ч	59,0—59,5	4100	1,5 (7 % $A_{ост}$)
	550, 2 ч	59—60	4700	1,9 (3 % $A_{ост}$)
	575, 2 ч	57—58	4050	2,1
		Трехкратный отпуск по 1 ч		
	500	59,0	3600	1,25
	520	59,5	4000	1,30
	540	59,0	4150	1,35
	560	56,5	4000	1,30
7ХГ2ВМФ (860 °С; HRC 62) [10]	150	61	2800	0,6
	200	59	—	—
	250	58	3180	0,8
	300	57	3100	0,6
	350	55	3000	0,6
	400	53	3000	1,0
	450	51	—	—
	480	50	—	—

Примечания: 1. Свойства указаны для поковок диаметром 25 мм.
2. Для стали 7ХГ2ВМФ при прокате диаметром 50 мм и твердости HRC 60 $\sigma_в$ = 2000÷2500 МПа, а при твердости HRC 57—58 $\sigma_в$ = 2500÷2600 МПа.
3. $A_{ост}$ — аустенит остаточный.

свойства и применение высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью приведены в табл. 47 и 48.

Инструменты холодного деформирования, работающие в условиях динамического нагружения с изнашиванием или смятием, но без высоких давлений, изготовляют из сталей 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, 5ХВ2СФ, 6ХВ2С, 6ХВГ, 6Х3МФС (см. табл. 34).

Стали относятся к перлитному классу; при содержании 0,4—0,5 % С — к доэвтектоидной группе, а при содержании 0,6 % С — к заэвтектоидной. Основной карбидной фазой является легированный цементит. Высокая вязкость достигается при отсутствии или минимальном количестве избыточных карбидов. Допустимы избыточные карбиды МС, задерживающие рост зерна. Образование карбидов M_7C_3 и M_6C (при повышенной легированности) снижает вязкость. Карбидная ликвация наблюдается в сталях с вольфрамом при 0,6 % С в прокате сечением более 50—60 мм.

В сталях этой группы для повышения вязкости и износостойкости, а также уменьшения деформации целесообразно сохранять значительное количество остаточного аустенита (до 20—25 %). Однако уменьшение твердости инструмента, работающего со значительными ударными нагрузками, допустимо только до HRC 45—48, а работающего при меньших динамических нагрузках — до HRC 55—57. Необходимое количество аустенита высокой устойчивости (до минус 40—60 °С) при твердости HRC 48—55 получают даже в сечениях 50—60 мм при использовании изотермической закалки. Изотермическую закалку в горячих средах проводят при 250—300 °С (выше $M_н$). Для получения твердости HRC 55—50 достаточна выдержка 30—40 мин (табл. 49).

Твердость HRC 58—60 достигается после непрерывной или ступенчатой закалки (количество остаточного аустенита до 9—10 %). Прокаливаемость сложнолегированных сталей при охлаждении в масле 70—80 мм, хромокремнистых 50—60 мм.

Температуру отпуска инструментов выбирают с учетом того, что нагрев

47. Режимы окончательной термической обработки и свойства высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью [10, 16]

Сталь	Закалка			Отпуск					
	Температура аустенитизации, °С	Охлаждающая среда	HRC	Температура, °С	Время, ч	HRC	$\sigma_в$, МПа	$a_н$, МДж/м² (ненадрезанный образец)	$\sigma_{0,2}$, МПа
6Х4М2ФС	1060—1075	Масло, воздух	60—62	520—540	Трехкратный по 1 ч	58—61	4000—4200	1,20—1,40	1800—2000
6Х6В3МФС	1050—1070	Селитра, масло, воздух	60—62	550 °С, 2 ч + 490 °С, 2 ч		58—60	—	—	—
7ХГ2ВМФ	850—870	Воздух, масло	61—62	530	Трехкратный по 1 ч	58—61	3700—4000	0,80—1,20	1800—2000
				150	1,5	59—60	2800	0,60	—
				220	1,5	57—58	3000	0,80	

Примечание. Температура нагрева инструмента перед аустенитизацией 650 — 700 °С.

48. Рекомендуемые области применения высокопрочных сталей с повышенной ударной вязкостью [10, 16]

Сталь	Область применения
6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС	Высадочные пуансоны и матрицы, ножи труборазрубочных машин и гильотинных ножниц для резки высокопрочных сталей и сплавов; чеканочные штампы по твердым металлам; резьбонакатные ролики, зубонакатники, шлиценакатники, обрезные матрицы, пуансоны и другие инструменты, работающие в условиях значительных динамических нагрузок при давлении до 1500 МПа; зубила и долота для обработки твердых металлов, иглы-пуансоны для пробивки мелких отверстий в листах из прочных металлов. Заменяют быстрорежущие стали при изготовлении штампов холодного выдавливания, матриц прессования, работающих при высоких давлениях, но когда не требуется высокая износостойкость
7ХГ2ВМФ	Крупные и сложные инструменты для прецизионной вырубки, пробивки, вытяжки и формовки изделий из цветных сплавов и низкоуглеродистых сталей

в интервале 270—400 °С вызывает развитие отпускной хрупкости первого рода со снижением вязкости. Для стали 6ХС она возникает при отпуске 300—350 °С, для стали 6ХВ2С — при 300—400 °С, для стали 6Х3ФС — при 350—400 °С. Желательно выполнять отпуск либо ниже, либо выше указанных температур.

49. Влияние выдержки при 260 °С стали 6ХС и при 280 °С стали 6ХВ2С на твердость и вязкость [6]

Выдержка, мин	Сталь 6ХС (закалка от 860 °С)		Сталь 6ХВ2С (закалка от 960 °С)	
	HRC	KCU, МДж/м²	HRC	KCU, МДж/м²
5	57	0,12	—	—
10	53	0,29	—	—
15	52	0,36	53	0,49
30	52	0,36	52	0,51
60	52	0,36	52	0,48

Рекомендуемые режимы окончательной термической обработки с использованием непрерывной закалки, а также влияние температуры отпуска на механические свойства сталей для ударных инструментов представлены в табл. 50 и 51.

Вольфрамокремниевые стали чувствительны к обезуглероживанию, и поэтому требуется защита при нагреве под закалку.

Механические свойства сталей для ударных инструментов в зависимости от температуры испытаний приведены в табл. 52, а рекомендуемые области применения — в табл. 53.

50. Режимы окончательной термической обработки сталей для ударных инструментов [10]

Сталь	Закалка		Отпуск	
	Температура аустенитизации, °С	HRC	Температура, °С	HRC
4ХС	880—900	≥57	240—270	52—55
6ХС	840—860	55—59	240—270	52—55
4ХВ2С	860—900	≥53	200—250 430—470	53—58 45—50
5ХВ2СФ	860—900	≥55	200—250 430—470	53—58 45—50
6ХВ2С	860—900	≥57	200—250 430—470	53—58 45—50
6ХВГ	850—900	≥57	200—250 450—480	53—56 44—47
6Х3ФС	980—1020	56—60	180—200	57—59

Примечания: 1. Температура нагрева инструмента перед аустенитизацией 650—700 °С.
2. Охлаждение с температуры аустенитизации в масле.
3. Охлаждение после отпуска на воздухе.
4. Отпуск для предотвращения образования трещин осуществляется непосредственно после закалки.

51. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей для ударных инструментов [10]

Сталь (температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
4ХС (900 °С; HRC 53)	200	53	1700	2100	9	34	0,43
	250	53	1700	2100	9	34	0,43
	300	52	1700	2030	7	36	0,44
	400	48	1530	1730	9	42	0,42
	500	40	1270	1370	14	47	0,43
6ХС (880 °С, HRC 58)	200	57	2100	2400	1	—	0,22
	250	56	2000	2150	1	—	0,24
	300	55	1960	2100	1	20	0,20
	350	53	1900	2050	3	19	0,22

Продолжение табл. 51

Сталь (температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
6ХС (880 °С, HRC 58)	400	50	1780	1960	**4**	25	0,40
	450	48	1600	1700	**5**	26	0,45
	500	42	1250	1440	**9**	30	0,54
4ХВ2С (880 °С; HRC 54)	200	53	1740	1950	4	35	0,23
	250	52	1700	1880	5	35	0,22
	300	51	1650	1800	6	35	0,21
	350	50	1540	1720	7	36	0,24
	400	48	1450	1630	8	37	0,28
	450	45	1380	1520	9	39	0,32
	500	41	1270	1400	10	40	0,36
5ХВ2СФ (880 °С; HRC 57)	200	54	1830	2000	2	15	0,15
	250	53	1800	1920	4	17	0,16
	300	52	1770	1860	5	20	0,17
	350	51	1660	1800	6	22	0,18
	400	50	1560	1700	8	25	0,20
	450	46	1420	1600	9	27	0,22
	500	44	1330	1500	10	30	0,24
6ХВ2С (880 °С; HRC 61)	200	58	1960	2150	2	10	0,10
	250	57	1910	2040	2	11	0,15
	300	54	1870	1950	4	12—28	0,20
	350	52	1770	1880	5	15—26	0,20
	400	50	1650	1770	5	17—26	0,22
	450	47	1600	1700	7	19—31	0,23
	500	42	1550	1640	9	20—33	0,25
	550	40	1440	1520	9	26	0,27
6ХВГ (870 °С; HRC $\geqslant$ 57)	200	55	1850	1870	2	**2**	0,25
	300	54	1740	2040	0	**5**	0,13
	400	50	1500	1750	6	25	0,20
	450	44	1470	1600	10	36	0,45
	500	37	1300	1440	10	30	0,30
	550	32	1180	1300	11	20	0,42
6Х3МФС (1000 °С; HRC 59)	150	58	—	—	—	—	0,25
	200	57	—	—	—	—	0,30
	250	56	—	—	—	—	0,35
	300	55	—	—	—	—	0,35
	350	54	—	—	—	—	0,35
	400	52	—	—	—	—	0,32
	450	51	—	—	—	—	—
	500	50	—	—	—	—	0,30

52. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей для ударных инструментов [5, 10]

Сталь	Температура испытаний, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
	Закалка от 880 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч					
6ХС	—60	—	—	—	—	0,21
	—20÷+150	—	—	—	—	0,25
	Изотермическая закалка от 880 °С при 250 °С					
	—60	—	—	—	—	0,11
	—20	—	—	—	—	0,12
	+20	—	—	—	—	0,35
	+60	—	—	—	—	0,50
	+100÷+200	—	—	—	—	0,55
	Закалка от 880 °С, масло + отпуск 430 °С, 2 ч					
4ХВ2С	20	1350	1450	9	35	0,30
	200	1360	1460	11	48	0,45
	300	1370	1470	14	49	0,42
	400	1280	1400	15	60	0,40
	500	1130	1150	15	60	0,43
	550	800	960	17	66	0,50
	600	600	600	20	80	0,90
	650	300	400	23	86	1,15
	Закалка от 880 °С, масло + отпуск 450 °С, 2 ч					
5ХВ2СФ	20	1600	1700	6	15	0,28
	300	1480	1570	6	20	0,32
	400	1280	1360	10	45	0,24
	450	1200	1300	9	45	0,22
	Закалка от 880 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч					
6ХВ2С	—60	—	—	—	—	0,20
	—20	—	—	—	—	0,22
	+20	—	—	—	—	0,24
	+60	—	—	—	—	0,30
	+100	—	—	—	—	0,34
	+200	—	—	—	—	0,36
	Закалка от 880 °С, масло + отпуск 450 °С, 2 ч					
	20	1700	1820	7	16	0,25
	300	1440	1650	8	10	0,26
	400	1280	1440	10	47	0,23
	450	1100	1240	13	54	0,23
	Изотермическая закалка от 880 °С при 250 °С					
	—60	—	—	—	—	0,35
	—20	—	—	—	—	0,45
	+20	—	—	—	—	0,49
	+60÷+150	—	—	—	—	0,50

Продолжение табл. 52

Сталь	Температура испытаний, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
		МПа		%		
Закалка от 1000 °С, масло + отпуск 150 °С, 2 ч (HRC 58)						
6Х3МФС	—60	—	—	—	—	0,20
	—20÷+200	—	—	—	—	0,22
Закалка от 1000 °С, масло + отпуск 250 °С, 2 ч (HRC 55,5)						
	—60	—	—	—	—	0,30
	—20÷+200	—	—	—	—	0,32
Изотермическая закалка от 1000 °С при 250 °С (HRC 52)						
	—60	—	—	—	—	0,52
	—20	—	—	—	—	0,55
	+20÷+200	—	—	—	—	0,58

53. Рекомендуемые области применения сталей для ударных инструментов [5, 10]

Сталь	Область применения
4ХС	Зубила, обжимки, ножницы для горячей и холодной резки
6ХС	Пневматические зубила и штампы небольших размеров, рубильные ножи
4ХВ2С	Пневматический инструмент, зубила, обжимки, вырубные и обрезные штампы сложной формы, работающие с повышенными ударными нагрузками
5ХВ2СФ	Ножи для холодной резки металла, резьбонакатные плашки, пуансоны и обжимные матрицы, деревообрабатывающий инструмент при длительной работе
6ХВГ	Пуансоны сложной формы при холодной прошивке преимущественно фигурных отверстий в листовом и полосовом материале, небольшие штампы горячей штамповки при необходимости обеспечить минимальное коробление
6Х3ФС	Холодновысадочные штампы, штемпели, клейма, чеканочные штампы, пуансоны, работающие с повышенными динамическими нагрузками, слесарно-монтажный инструмент

3. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Основные причины потери работоспособности штампов горячего деформирования — износ, смятие и разгар. Возможны также усталостное разрушение в местах высокой концентрации напряжений (чаще прессовые штампы), термошоковое разрушение при резких теплосменах (длительный перерыв в подаче смазки, заклинивание поковки), угар поверхностного слоя в результате окисления. Случаи преждевременного выхода инструмента из строя могут быть связаны с ошибками в конструкции или изготовлении штампов, неправильной эксплуатацией (низкая твердость подкладных плит, неэффективная смазка, нарушение температурного режима), неправильной термической обработкой (недостаточная вязкость), дефектами материала (недостаточное металлургическое качество, неблагоприятная ориентировка волокна, недостаточный уков слитка), отсутствием дефектоскопического контроля.

Чтобы обеспечить необходимую стойкость инструмента, стали для горячего деформирования должны иметь: 1) теплостойкость, обеспечивающую необходимое сопротивление пластической деформации (предел текучести, твердость) для сохранения формы гравюры при рабочих температурах; 2) вязкость, особенно при работе с динамическими нагрузками; 3) износостойкость; 4) разгаростойкость, т. е. сопротивление термической и термомеханической усталости; 5) окалиностойкость, определяющую скорость окислительного износа, особенно выше 600 °С; 6) прокаливаемость для достижения равнопрочности по сечению.

Любое решение о необходимом сочетании показателей свойств материала штампа является компромиссным. Правильным будет решение, учитывающее конкретные условия работы инструмента и даже ограниченного участка гравюры, которые определяют преобладающий вид повреждения.

Наибольшая стойкость штампов достигается при таком соотношении параметров температурно-силового воздействия и свойств материала, когда выбраковка связана преимущественно с износом и только небольшим разгарообразованием на поздней стадии эксплуатации. Износ может быть окислительным (нормальный), абразивным и с заеданием (интенсивный). При неблагоприятном соотношении названных факторов происходит интенсивное смятие, раннее разгарообразование или появление крупных термошоковых трещин. Промежуточная стойкость отмечается у штампов, состояние которых к моменту выхода из строя определяется значительным разгарообразованием и истиранием при сопутствующем смятии на отдельных участках.

Наиболее сильное изменение гравюры наблюдается на участках ее поверхности (облойный мостик, бобышка), где удельные силы деформирования максимальны. Они зависят от сопротивления деформированию штампуемого материала, формы и размеров облойной щели, теплового эффекта деформации, свойств окалины, скорости деформации.

Скорости деформирования (соответствующие им средние скорости деформации указаны в скобках) для наиболее распространенных машин следующие: для гидравлических прессов 0,01—0,1 м/с (0,3—0,5 1/с), для кривошипных прессов 0,25—0,50 м/с, для винтовых пресс-молотов 0,5—1,5 м/с, для молотов 4—9 м/с (8—12 1/с). Увеличение скорости деформации при переходе от штамповки на гидравлических прессах к кривошипным повышает сопротивление деформированию в 1,3—1,5 раза, а при переходе к молотам в 2,5—3,5 раза.

Преобладающий вид повреждения может изменяться в зависимости от отношения массы штампа к массе поковки: при малом отношении — смятие, при большом — истирание. С его увеличением уменьшается средняя температура штампа и относительная толщина поверхностных слоев гравюры, прогретых до высокой температуры. Стойкость растет пропорционально этому отношению.

Смена вида повреждения наблюдается и при изменении температурного

режима штампа. Например, при недостаточном охлаждении преобладает смятие, а при избыточном резко ускоряется разгарообразование.

Неравномерная деформация снижает стойкость инструмента. Для обеспечения максимального съема поковок, учитывая тенденцию к стабилизации размеров штампа после съема определенного числа поковок, целесообразно: 1) на некоторые размеры назначать оптимальные минусовые допуски (повышение стойкости на 30—40 %); 2) применять в процессе штамповки на прессах черновой ручей; 3) использовать вставки из более стойких сталей.

Стойкость штампов снижается при увеличении массы поковки до определенного значения. Для молотовых штампов эта зависимость сильнее, чем для прессовых, и стабилизация стойкости наступает при большей массе. Поэтому при некоторой массе поковок стойкость прессовых штампов становится выше молотовых. Это объясняется более интенсивным повышением нагрузки на инструмент при штамповке на молотах из-за увеличения массы падающих частей и соответственно скорости деформирования.

Износ верхнего и нижнего штампов даже при одинаковой конфигурации различен. Гравюра нижнего штампа имеет температуру на 50—125 °С выше верхнего (разница больше при штамповке массивных поковок на прессах) вследствие более продолжительного контакта с поковкой. Чтобы уравнять условия работы, более глубокую полость располагают в верхнем штампе.

Молотовые штампы работают в условиях динамического нагружения и малого времени контакта с поковкой. Поэтому теплостойкость материала может быть принята невысокой, а вязкость и сопротивление пластической деформации (смятию) должны быть повышенными. При массе падающих частей молота до 1 *т* работоспособность в основном лимитируется износом, а свыше — смятием. Заметное разгарообразование проявляется при большой массе падающих частей.

По сравнению с молотовыми прессовые штампы и штампы горизонтально-ковочных машин имеют иные причины выхода из строя. У прессовых штампов резко возрастает роль износа, особенно в случае малых деформирующих сил. При силах более 10 МН проявляются ограничения по стойкости в связи с разгарообразованием и в меньшей мере смятием. Начиная с 15 МН и более нередким становится выход инструмента из строя в результате трещин. Стойкость инструмента горизонтально-ковочных машин при малых размерах заготовки (диаметр до 50 мм) определяется скоростью изнашивания. С увеличением размера (диаметр до 150 мм) у формовочных пуансонов резко усиливается разгарообразование, становится возможным скалывание торцовых поверхностей и смятие, у прошивных пуансонов преобладает смятие и разгар у пережимных вставок — смятие.

По условиям работы и уровню основных свойств стали можно разделить на четыре основные группы: 1) умеренной теплостойкости и повышенной вязкости; 2) повышенных теплостойкости и вязкости; 3) высокой теплостойкости; 4) нетеплостойкие повышенной вязкости.

Химический состав штамповых сталей для горячего деформирования приведен в табл. 54, значения критических точек — в табл. 55, режимы ковки и отжига — в табл. 56.

Стойкость штампового инструмента зависит от правильности выбора и качества выполнения термической обработки. Оборудование и режимы термической обработки крупных штампов и сменного штампового инструмента малых и средних размеров различны.

Отжиг заготовок крупных штампов (высотой 300—400 мм) с целью устранения флокеночувствительности и измельчения зерна аустенита сталей проводят при температурах 760—790 °С для штампов из сталей 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХГМ; 790—820 °С из стали 5ХНВС 800—820 °С из сталей 4ХМФС, 5Х2МНФ; 820—840 °С из стали 3Х2МНФ [24]. Температуры отжига других сталей указаны в табл. 56.

Время выдержки при отжиге 1 ч плюс 1,5 мин на 1 мм толщины. Температура в печи при загрузке не выше 600 °С.

54. Химический состав штамповых сталей для горячего деформирования (ГОСТ 5950—73)

Сталь	Мас. доля элемента, %								
	C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	Ni
1. Стали умеренной теплостойкости и повышенной вязкости								
5ХНМ	0,50—0,60	0,10—0,40	0,50—0,80	0,50—0,80	—	0,15—0,30	—	1,40—1,80
5ХНВ	0,50—0,60	0,15—0,35	0,50—0,80	0,50—0,80	0,40—0,70	—	—	1,40—1,80
5ХНВС	0,50—0,60	0,60—0,90	0,30—0,60	1,30—1,60	0,40—0,70	—	—	0,80—1,20
5ХГМ	0,50—0,60	0,25—0,60	1,20—1,60	0,60—0,90	—	0,15—0,30	—	—
4ХМФС	0,37—0,45	0,50—0,80	0,50—0,80	1,50—1,80	—	0,90—1,20	0,30—0,50	—
5Х2МНФ (ДИ-32)	0,46—0,53	0,10—0,40	0,40—0,70	1,50—2,00	—	0,80—1,10	0,30—0,50	1,20—1,60
3Х2МНФ	0,27—0,33	0,15—0,40	0,30—0,60	2,00—2,50	—	0,40—0,60	0,25—0,40	1,20—1,60
4ХМНФС	0,35—0,42	0,70—1,00	0,15—0,40	1,25—1,55	—	0,65—0,85	0,35—0,50	1,20—1,60
2. Стали повышенной теплостойкости и вязкости								
4Х5МФС	0,32—0,40	0,90—1,20	0,20—0,50	4,50—5,50	—	1,20—1,50	0,30—0,50	—
4Х5МФ1С (ЭП572)	0,37—0,44	0,90—1,20	0,20—0,50	4,50—5,50	—	1,20—1,50	0,80—1,10	—
4Х3ВМФ (ЭИ-2)	0,40—0,48	0,60—0,90	0,30—0,60	2,80—3,50	0,60—1,00	0,40—0,60	0,60—0,90	—
3Х3М3Ф	0,27—0,34	0,10—0,40	0,20—0,50	2,80—3,50	—	2,50—3,00	0,40—0,60	—
4Х4ВМФС (ДИ-22)	0,37—0,44	0,60—1,00	0,20—0,50	3,20—4,00	0,80—1,20	1,20—1,50	0,60—0,90	—
4Х5В2ФС (ЭИ958)	0,35—0,45	0,80—1,20	0,15—0,40	4,50—5,50	1,60—2,20	—	0,60—0,90	—
3. Стали высокой теплостойкости								
5Х3В3МФС (ДИ-23)	0,45—0,52	0,50—0,80	0,20—0,50	2,50—3,20	3,00—3,60	0,80—1,10	1,50—1,80	Nb=0,05—0,15
4Х2В5МФ (ЭИ959)	0,30—0,40	0,15—0,35	0,15—0,40	2,20—3,00	4,50—5,50	0,60—0,90	0,60—0,90	—
2Х6В8М2К8 (ЭП745)	0,22—0,30	0,30—0,60	0,15—0,40	6,50—7,00	7,00—8,00	1,80—2,30	0,10—0,25	Co=7,50—8,50
4. Нетеплостойкие повышенной вязкости								
7Х3	0,65—0,75	0,15—0,35	0,15—0,40	3,20—3,80	—	—	—	—
8Х3	0,75—0,85	0,15—0,35	0,15—0,40	3,20—3,80	—	—	—	—

Примечание. Сталь марки 4ХМНФС должна содержать (по расчету) циркония в количестве 0,03—0,09 % и бора 0,002—0,004 %.

55. Критические точки (в °С) штамповых сталей для горячего деформирования [10]

Сталь	Ac_1	Ac_3 (Ac_m)	Ar_3	Ar_1	$M_н$	$M_к$
5ХНМ	730	780	640	610	230	—
5ХНВ	730	780	—	—	205	—
5ХНВС	760	800	—	—	250	—
5ХГМ	700	800	—	—	215	—
4ХМФС	760	805	710	630	280	100
5Х2МНФ	740	815	730	650	210	40
3Х2МНФ [15]	780	830	—	—	—	—
4Х5МФС	840	870	810	735	300	110
4Х5МФ1С	875	935	815	760	305	140
4Х3ВМФ	800	850	760	730	230	—
3Х3М3Ф	815	875	820	760	340	155
4Х4ВМФС	830	910	750	670	255	105
4Х5В2ФС	800	875	840	730	275	90
5Х3В3МФС	780	920	725	665	330	70
4Х2В5МФ	820	940	840	690	205	100
2Х6В8М2К8	827	890	—	—	180	—
7Х3	760	—	—	730	400	—
8Х3	785	830	770	750	370	110

56. Режимы ковки и отжига (отпуска) штамповых сталей для горячего деформирования [10]

Сталь	Интервал ковочных температур, °С *1	Режимы отжига (отпуска)	Твердость после отжига НВ, МПа, не более
5ХНМ	1180—850	Нагрев на 700—720 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	2410
5ХНВ			2550
5ХНВС	1180—850	Нагрев на 730—750 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	2550
5ХГМ	1180—850	Нагрев на 680—700 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	2410
5Х2МНФ	1200—850	Нагрев на 720—740 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	2550
3Х2МНФ	1180—850	Нагрев на 700—720 °С, охлаждение со скоростью 50 °С/ч до 500 °С, далее на воздухе	2550

Продолжение табл. 56

Сталь	Интервал ковочных температур, °С *1	Режимы отжига (отпуска)	Твердость после отжига НВ, МПа, не более
4Х5МФС; 4Х5МФ1С; 4Х3ВМФ; 4Х5В2ФС	1180—850	Нагрев на 840—860 °С, охлаждение со скоростью 40—50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2410
5Х3В3МФС			2290
4Х2В5МФ			2410
3Х3М3Ф	1180—850	Нагрев на 860—880 °С, охлаждение со скоростью 40—50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2410
4Х4ВМФС			2290
2Х6В8М2К8	1200—900	Нагрев на 900—920 °С, охлаждение со скоростью 40—50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2500
7Х3	1160—850	Нагрев на 790—810 °С, охлаждение со скоростью 40—50 °С/ч до 600 °С, далее на воздухе	2290
8Х3			2410

*1 Замедленное охлаждение.

Возможный режим отжига крупной заготовки: охлаждение от температуры отжига до 250—300 °С со скоростью 50 °С/ч, выдержка 10—12 ч; нагрев до 600—650 °С со скоростью 50 °С/ч, а затем до 850—870 °С со скоростью 60—70 °С/ч, выдержка 10—15 ч; охлаждение до 250—300 °С со скоростью 40 °С/ч, выдержка 8—10 ч, охлаждение на воздухе [5].

Окончательную термическую обработку крупных штампов проводят чаще после полной механической обработки, включая изготовление гравюры (доведение гравюры осуществляют абразивным инструментом после термической обработки). Очень крупные штампы высотой более 400—450 мм сначала подвергают черновой механической обработке, затем закаливают и отпускают (на твердость HRC 34—37), а после проводят чистовую механическую обработку.

Режимы закалки крупных штампов на разных заводах неодинаковые. Температура печи при загрузке может быть 300—450 °С, а при скоростном нагреве — соответствовать температуре закалки (830—880 °С).

Скорость нагрева под закалку и длительность аустенитизации можно устанавливать по нормам, указанным в табл. 57. Выдержку в масле рассчитывают так, чтобы не допустить полного охлаждения. Чтобы избежать коробления и образования трещин, еще не остывшие штампы переносят для отпуска. Очень крупные штампы охлаждают водовоздушной смесью. Температура печи при загрузке крупных штампов для отпуска не выше 300—350 °С; продолжительность нагрева и выдержки при отпуске приведена в табл. 58. Длительность выдержки можно также устанавливать из расчета 2 ч плюс 1,5 мин на 1 мм

57. Продолжительность нагрева в пламенной печи, выдержки и охлаждения штампов при закалке [22]

Операция	Наименьшая сторона штампа, мм					
	300	350	400	500	600	700
Выдержка после загрузки в печь	30 мин	30 мин	1 ч	1 ч 30 мин	2 ч	2 ч
Нагрев до температуры закалки	8 ч 30 мин	10 ч	11 ч	13 ч 30 мин	16 ч	19 ч
Выдержка при температуре закалки	1 ч 50 мин	2 ч 10 мин	2 ч 30 мин	3 ч	3 ч 40 мин	4 ч 10 мин
Подстуживание на воздухе	15 мин	15 мин	20 мин	25 мин	35 мин	40 мин
Охлаждение в масле с температурой 70—75 °С	40 мин	50 мин	1 ч	1 ч 20 мин	1 ч 40 мин	2 ч

Примечание. Указанные нормы нагрева и выдержки при использовании электропечи увеличивают на 30 %.

58. Продолжительность нагрева и выдержка штампов при отпуске в пламенной печи [22]

Наименьшая сторона штампа, мм	Нагрев до температуры отпуска	Выдержка при отпуске	Наименьшая сторона штампа, мм	Нагрев до температуры отпуска	Выдержка при отпуске
250	7 ч 30 мин	1 ч 30 мин	500	15 ч	3 ч
300	9 ч	1 ч 50 мин	550	16 ч 30 мин	3 ч 20 мин
350	10 ч 30 мин	2 ч 10 мин	600	18 ч	3 ч 40 мин
400	12 ч	2 ч 30 мин	700	21 ч	4 ч 10 мин
450	13 ч 30 мин	2 ч 40 мин			

Примечание. Продолжительность нагрева и выдержку в электрической печи увеличивают на 20 %.

толщины штампа. На окончательную термическую обработку сменный инструмент поступает либо с припусками для выполнения заключительного шлифования или доводки, либо без припусков.

Чтобы избежать обезуглероживания и окисления, нагрев под закалку осуществляют в камерных печах с упаковкой его в защитный материал или (для мелкого инструмента диаметром до 170 мм и длиной 250 мм) в соляных ваннах.

Рекомендуется [15, 23] применять следующие защитные материалы:

для сталей, закаливаемых от температур ниже 900 °С — измельченный, просеянный и просушенный древесный уголь (засыпают от 1/3 до 1/2 объема ящика, свободного от деталей); отработавший (при температуре не ниже 930 °С) карбюризатор; смесь свежей и пережженной чугунной стружки (без масел и цветной стружки);

для сталей, закаливаемых от температур выше 900 °С, бумага (2—3 слоя) и сухой древесный уголь; карбюризатор, предварительно отработавший при температуре, превышающей температуру закалки на 50 °С.

Для уменьшения коробления при нагреве (особенно в ваннах) применяют промежуточный нагрев: однократный при 650—680 °С (700—750 °С) или 840—870 °С и двукратный — в обоих температурных интервалах. При медленном нагреве под закалку (в ящиках с защитным материалом) промежуточный нагрев не обязателен.

Время выдержки в камерных печах принимают из расчета 50—70 с на 1 мм толщины или подбирают экспериментально.

Время выдержки в соляных ваннах на 1 мм толщины инструмента: 18—24 с — при нагреве в интервале 650—850 °С и при окончательном нагреве в интервале 820—950 °С; 15—20 с — при окончательном нагреве в интервале 1000—1150 °С сталей с меньшим чем 1,5 % суммарным содержанием вольфрама, молибдена и ванадия; 20—30 с — с содержанием их 1,5—3,0 %; 30—50 с — с содержанием их более 3 %.

Продолжительность выдержки при отпуске устанавливается по табл. 58. Загрузку для отпуска проводят в печь с температурой не выше 300—400 °С с целью уменьшения коробления. Крепежную часть инструмента дополнительно отпускают при 600—700 °С для повышения сопротивления циклическим и ударным нагрузкам.

Стали повышенной вязкости и умеренной теплостойкости (5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНВС, 5ХГМ, 4ХМФС, 4ХМНФС, 3Х2МНФ, 5Х2МНФ) относят к доэвтектоидной или эвтектоидной группе. Применяют их в основном для молотовых штампов, а также для изготовления крупных штампов, контейнеров, бандажей и матриц.

Содержание карбидообразующих элементов в сталях минимально (до 7—9 мас. долей, %), что исключает возникновение карбидной неоднородности даже в крупных сечениях. Основная карбидная фаза — цементит. В небольших количествах (до 3 %) могут образовываться более термостойкие карбиды $M_{23}C_6$, M_6C, MC, вызывающие вторичное твердение. Поэтому теплостойкость сталей невысокая. Стали 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНВС, 5ХГМ сохраняют предел текучести до 1000 МПа при нагреве до 350—375 °С, а стали 4ХМФС, 4ХМНФС, 3Х2МНФ, 5Х2МНФ до 400—425 °С вследствие образования карбидов $M_{23}C_6$, M_6C, MC.

Если теплостойкость сталей после окончательной термической обработки оценивать температурой дополнительного отпуска в течение 4 ч, вызывающего разупрочнение (HRC 35), то по возрастанию теплостойкости их можно расположить в следующий ряд: 5ХНМ (590 °С), 5ХНВ (600 °С), 5ХНВС (610 °С), 4ХМФС (650 °С), 5Х2МНФ (670 °С).

Максимально допустимый размер штампа из выбранной стали определяется ее прокаливаемостью и ударной вязкостью. Стали 5ХНВ и 4ХМФС используют для штампов с наименьшей стороной до 200—300 мм; стали 5ХНВС и 5ХГМ — для средних штампов с наименьшей стороной до 300—400 мм; сталь 5ХНМ и 5Х2МНФ — для крупных штампов сечением до 500 мм со сложной гравюрой; сталь 3Х2МНФ — для наиболее крупных штампов с наименьшей стороной до 400—700 мм. Твердость стали 5ХНМ в середине блока размером 300×300×400 мм лишь на HRC 1—2 ниже, чем у поверхности. Твердость стали 4ХМФС в заготовке диаметром 250—280 мм сохраняется только до глубины 50—70 мм и в середине падает на HRC 5—6.

Оптимальные температуры закалки устанавливают на основе определенного соотношения твердости и зерна аустенита (табл. 59), размер которого существенно влияет на ударную вязкость стали в отпущенном состоянии (табл. 60).

Для молотовых штампов со стороной или диаметром не более 200—250 мм при получении после закалки структуры мартенсита желательно иметь зерно аустенита не крупнее 9—10. При большем размере штампов, когда образуется смешанная бейнитно-мартенситная структура, лучший

59. Влияние температуры закалки на твердость и размер зерна сталей умереннои теплостойкости и повышенной вязкости [15]

Сталь (рекомендуемая температура закалки)	Температура закалки, °С	HRC	Зерно
5ХНМ (840—860 °С)	850	58	10
	900	60	9
	950	60,5	8
	1000	60	7—6
4ХМФС (910—930 °С)	850	46	11—12
	900	48	11
	950	50	10
	1000	51,5	9—8
	1050	52	7—8
	1075	52	—
5Х2МНФ (960—980 °С)	950	59	11
	1000	60	10
	1050	61	8
	1100	58	7
3Х2МНФ (930 °С)	900	44	10—11
	950	50	9—10
	1000	50	8
	1050	49	7

60. Зависимость ударной вязкости стали 5Х2МНФ от величины зерна аустенита после закалки, моделирующей закалку с охлаждением в масле центральных зон заготовки сечением 200×200 мм (числитель) и 500×500 мм (знаменатель), и последующего отпуска на разную твердость [16]

Зерно аустенита	Температура испытаний, °С	*KCU* (в МДж/м²) после отпуска на твердость HRC		
		41—43	44—46	47—49
11	20	0,48 / 0,40	0,44 / 0,25	0,36 / —
	600	1,02 / 0,86	0,94 / 0,75	0,80 / —
10	20	0,50 / 0,34	0,46 / 0,26	0,34 / 0,20
	600	0,93 / 0,75	0,86 / 0,57	0,68 / 0,47

Продолжение табл. 60

Зерно аустенита	Температура испытаний, °С	*KCU* (в МДж/м²) после отпуска на твердость HRC		
		41—43	44—46	47—49
9	20	0,46 / 0,26	0,42 / 0,18	0,28 / 0,10
	600	0,80 / 0,58	0,74 / 0,38	0,54 / 0,32
8	20	0,28 / 0,19	0,20 / 0,08	0,14 / 0,01
	600	0,50 / 0,30	0,48 / 0,20	0,32 / 0,17

комплекс свойств достигается при зерне аустенита не крупнее 10—11.

Отпуск определяет преобладающий вид повреждения штампа, а в конечном итоге его надежность и стойкость. Температуры отпуска назначают в зависимости от габаритов штампов и условий эксплуатации. В отечественной практике принят метод назначения твердости штампов в зависимости от массы падающих частей молота (точнее, от связанного с ним размера штампа) или номинального усилия машины. Найденные многолетней практикой оптимальные соотношения между твердостью и ударной вязкостью для молотовых штампов приведены в табл. 61. Рекомендуемые режимы закалки и отпуска сталей в зависимости от размеров штампов молотов и прессов приведены в табл. 62, а температуры отпуска хвостовиков штампов — в табл. 63. Влияние температур отпуска на свойства сталей показано в табл. 64.

Образование верхнего бейнита (вместо мартенсита) при закалке штампов со стороной более 250—300 мм снижает твердость в отпущенном состоянии на HRC 2—3 и теплостойкость на 20—30 °С. При этом вязкость и пластичность сталей 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНВС сохраняются, а сталей 4ХМФС, 3Х2МНФ, 5Х2МНФ уменьшаются (бейнитная хрупкость). Поэтому во избежание хрупкого разрушения штампы из этих сталей необходимо нагревать до 250—300 °С или отпускать на меньшую твердость для получения необходимой вязкости ($KCU = 0{,}35 \div 40$ МДж/м²). Влияние температуры испытаний на свойства сталей показано в табл. 65.

Средняя стойкость штампов из сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости материала составляет 1500—8000 поковок при штамповке углеродистых и низколегированных сталей. При массе поковок около 5 кг стойкость молотовых и прессовых штампов примерно одинакова. При штамповке более крупных поковок стойкость прессового инструмента выше. Для указанных выше ограничений на размеры стойкость тяжелонагруженных штампов из стали 4ХМФС в 1,5—2 раза, а из стали 5Х2МНФ в 1,5—2,5 раза выше, чем из стали 5ХНМ, вследствие их лучшей теплостойкости.

Крупные инструменты, работающие при длительном нагреве (внутренние втулки, пресс-штемпели, иглы) и кольца-бандажи целесообразно изготовлять из стали 3Х2МНФ, обладающей высокой длительной прочностью (табл. 66) и релаксационной стойкостью (табл. 67). В контейнерах из сталей 5ХНМ и 5ХНВ невозможно создать натяг при рабочих температурах 450—500 °С. Коэффициенты линейного расширения для сталей уме-

61. Ударная вязкость сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости при рекомендуемых значениях твердости штампов для молотов с различной массой падающих частей [24]

Рекомендуемая твердость, HRC	*KCU* (в МДж/м²) для сталей			
Масса падающих частей, т	5ХНМ	5ХНВ	5ХНВС	5ХГМ
41—46 / <1	0,40—0,55	0,30—0,50	0,22—0,35	0,17—0,30
37—41 / 1—3	0,60—0,80	0,50—0,80	0,35—0,60	0,30—0,70
34—38 / 3—4	0,80—1,10	0,60—1,00	0,50—1,10	0,50—1,00
32—36 / 4—6	1,05—1,30	0,85—1,25	0,86—1,35	—
30—33 / >6	1,20—1,35	1,10—1,30	1,23—1,40	—

62. Рекомендуемые режимы закалки и отпуска сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости в зависимости от размеров штампа [5, 16]

Наименьший размер штампа, мм	Температура нагрева (в °С) сталей				HRC
	5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ	4ХМФС	3Х2МНФ	5Х2МНФ	
Для молотов					
<300	820—850 / 480—520	910—930 / 560—600	910—930 / 540—560	960—980 / 600—620	40—45
>300	820—850 / 520—560	910—930 / 600—620	910—930 / 560—580	960—980 / 620—640	38—41
Для прессов					
<300	840—870 / 420—450	920—950 / 530—550	920—950 / 530—550	970—1000 / 580—600	45—47
>300	840—870 / 450—480	920—950 / 580—600	920—950 / 540—560	970—1000 / 600—620	42—44

Примечания: 1. В числителе дроби — температура нагрева для закалки, в знаменателе — для отпуска.

2. Для крупных штампов при большом количестве остаточного аустенита целесообразно проведение второго отпуска при температурах на 30—40 °С ниже и по продолжительности на 25—30 % короче первого.

3. Нагрев до температуры закалки со скоростью 35—25 °С/ч для штампов высотой 250—400 мм и 24—15 °С/ч — высотой 450—700 мм.

4. Штампы со стороной до 250—300 мм, имеющие простую форму, охлаждают в масле; сложной формы — на воздухе; при стороне свыше 300 мм режим охлаждения выбирать по табл. 57.

63. Температуры отпуска и твердость хвостовиков штампов [16]

Наименьший размер штампа, мм	Температуры отпуска (в °С) сталей				HRC
	5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ	4ХМФС	3Х2МНФ	5Х2МНФ	
<300	580—610	630—650	620—640	640—660	34—37
>300	600—630	650—670	640—660	660—680	28—33

64. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [10]

Сталь (температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	*KCU*, МДж/м²
			МПа		%		
5ХНМ (850 °С; HRC 58)	400	46	1400	1600	10	40	0,35
	450	44	1420	1530	9	37	0,38
	500	42	1300	1400	15	37	0,46
	550	38	1200	1350	12	34	0,60
	600	36	—	1170	16	51	0,68
5ХНВ (870 °С; HRC 58)	450	44,5	1300	1460	11	45	0,40
	500	43	1180	1350	12	46	0,55
	550	38	1050	1280	14	52	0,64
	600	34,5	800	1060	16	60	>1,2
5ХНВС (870 °С; HRC 58)	450	48	—	1800	—	28	0,22
	500	46	—	1580	—	30	0,25
	550	42	—	1380	—	36	0,36
	600	38	1030	1300	—	43	0,62
5ХГМ (850 °С; HRC 58)	450	45	1450	1600	7	23	0,26
	500	41	1340	1450	11	34	0,30
	550	38	1240	1400	11	30	0,37
	600	36,5	1100	1200	15	35	0,46
4ХМФС (920 °С; HRC 53—55)	300	48,5	1600	2100	10	40	0,30
	350	47,5	1430	1720	10	36	0,30
	400	46,5	1400	1670	11	38	0,33
	450	46,5	1385	1650	12	40	0,33
	500	46	1375	1630	13	45	0,40
	550	44	1365	1610	13	50	0,50
	600	40	1200	1280	14	52	0,80
	650	40	820	900	22	62	1,6
5Х2МНФ (980 °С; HRC 58—59)	500	47,5	1460	1770	11	39	0,36
	550	47,5	1550	1800	13	43	0,40
	600	47,5	1525	1720	12	44	0,50
	650	43,5	1330	1430	13	48	0,60

Продолжение табл. 64

Сталь (температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
			МПа		%		
3Х2МНФ (930 °С; HRC 54)	450	48	1300	1600	7	12	0,40
	500	48	1320	1520	8	17	0,70
	550	46	1340	1520	9	17	0,80
	600	40	1150	1220	10	25	1,0
	650	27	740	840	18	50	1,7

Примечания: 1. Отпуск в течение 2 ч.
2. Свойства оценивают на образцах, изготовленных из заготовок сеченнем 15×15 мм.

65. Влияние температуры испытаний и размера сечения на механические свойства сталей умереннои теплостойкости и повышениои вязкости [8, 10]

Сталь	Температура испытаний, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU	$a_н$ для образцов с трещиной
			МПа		%		МДж/м²	
5ХНМ	20	44	1410	1520	9	41	0,32	0,12
		33	800	1040	10	42	0,40	0,04
	300	—	1150	1290	14	60	0,70	0,30
			790	1000	10	36	1,20	0,75
	400	38	1000	1250	14	48	0,65	—
	500	30	750	960	18	54	0,45	—
	600	—	360	520	32	92	1,60	0,70
			490	560	21	49	2,00	0,70
5ХНМ	20	39	—	1265	14	45	0,55	—
	200	—	954	1250	—	41	0,52	—
	400	33	829	1170	—	35	0,46	—
	500	29	728	916	—	64	0,39	—
	550	14	463	640	—	74	0,33	—
	600	1560 НВ	257	363	—	66	0,79	—
5ХНВ	20	38	1050	1280	11	45	0,40	—
	200	37	1050	1280	11	45	0,57	—
	300	33	1050	1280	13	44	0,64	—
	400	28	960	1200	18	56	0,70	—
	500	—	900	1070	18	63	0,56	—
	600	—	740	850	21	75	0,75	—

Продолжение табл. 65

Сталь	Температура испытаний, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU	$a_н$ для образцов с трещиной
			МПа		%		МДж/м²	
5ХНВС	20	38	1030	1305	—	—	—	—
	200	—	1030	1305	—	36	0,55	—
	400	33	785	1220	—	28	0,55	—
	500	29	700	900	—	64	0,45	—
	550	20	415	580	—	71	0,40	—
	600	1560 НВ	265	405	—	40,5	0,50	—
5ХГМ	20	44	1450	1600	7	25	0,37	—
	400	35	1080	1300	11	40	0,44	—
	500	30	870	1000	15	54	0,37	—
	600	25	400	710	24	80	0,42	—
5ХГМ	20	40	—	1250	10	32	0,43	—
	100	37	976	1180	—	37	0,36	—
	300	35	996	1152	—	48	0,65	—
	400	32	866	1015	—	62	0,49	—
	500	31	690	784	—	81	0,32	—
	600	21	410	435	—	85	0,38	—
4ХМФС	20	45	1480	1600	12	45	0,45	—
	300	—	1260	1500	12	44	0,45	—
	400	—	1200	1440	13	47	0,50	—
	500	—	1200	1300	13	55	0,45	—
	600	—	970	1080	14	62	0,54	—
4ХМФС	20	43	1350	1510	13	51	0,55	0,08
		43	1310	1480	7	20	0,25	0,02
	300	—	1190	1350	12	50	0,65	0,28
			1210	1370	8	27	0,55	0,23
	600	—	790	890	19	73	0,85	0,23
			780	920	10	45	0,60	0,21
5Х2МНФ	20	47	1500	1750	10	40	0,55	—
	300	—	1300	1470	11	52	0,65	—
	400	—	1140	1320	13	58	0,65	—
	500	—	970	1160	15	64	0,65	—
	600	—	800	1000	17	68	1,00	—
5Х2МНФ	20	43	1380	1480	12	43	0,60	0,16
		42	1290	1450	12	35	0,40	0,04
	300	—	1110	1270	13	55	0,65	0,33
			1140	1320	14	48	0,65	0,40
	600	—	700	820	21	77	0,65	0,30
			710	880	17	68	0,80	0,30

Продолжение табл. 65

Сталь	Температура испытаний, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU	$a_и$ для образцов с трещиной
			МПа		%		МДж/м²	
3Х2МНФ	20	42 / 42	1300 / 1320	1450 / 1470	11 / 10	45 / 40	0,55 / 0,30	—
	300	—	1100 / 1120	1300 / 1320	12 / 12	46 / 45	0,80 / 0,50	—
	600	—	860 / 850	1100 / 1110	13 / 14	52 / 60	0,55 / 0,60	—

Примечание. Значения свойств, приведенных в числителе дроби, получены при испытании образцов, моделирующих закалку заготовки сечением 15×15 мм с охлаждением в масле, а в знаменателе — то же, но для центральных зон заготовки сечением 500×500 мм.

66. Длительная прочность сталей [24]

Сталь	Температура испытания, °С			
	450		500	
	σ, МПа	Время до разрушения, ч	σ, МПа	Время до разрушения, ч
5ХНВ	600	75	400	46
	550	304	350	244
	500	2171	300	366
	—	—	250	377
Типа 4Х3ВМФ	1000	29	1000	5
	900	53	900	12
	800	100	850	19
	650	349	700	40
4Х5В2ФС	1150	94	950	106
	950	435	900	130
	900	259	850	132
	—	—	800	130
4Х2В5ФМ	1150	140	1050	21
	1050	616	950	191
	1000	1549	850	240
	950	1202	—	—
Типа 3Х2МНФ	1000	37	900	3
	900	1777	850	240
	850	830	700	452
	—	—	650	944

67. Релаксация напряжений в сталях (в %) при 500 °С [24]

Сталь	σ, МПа	Время, ч					
		1	63	120	300	500	1000
5ХНВ	750	85,5	92,4	94,0	94,3	95,3	96,5
5ХНМ	600	56,0	—	83,0	—	89,0	92,5
Типа 4Х3ВМФ	750	12,0	21,4	27,5	34,6	Поломка	
	600	8,3	21,4	25,0	30,0	32,7	37,8
4Х5В2ФС	750	15,7	23,4	26,6	30,7	34,4	38,8
	600	11,5	20,3	26,5	29,3	31,7	35,0
4Х2В5ФМ	750	10,8	17,6	19,2	22,8	25,0	30,1
	600	9,1	15,8	20,0	23,0	—	52,0
Типа 3Х2МНФ	750	16,2	27,6	32,0	37,0	38,6	45,3
	600	16,3	28,0	31,4	36,7	39,0	45,0

68. Коэффициент линейного расширения сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [4]

Сталь	$\alpha \cdot 10^6$ (в $°C^{-1}$) в интервале температур			
	100—250	250—350	350—600	600—700
5ХНМ	12,5	14,1	14,2	15
5ХНВС	12,5	14,1	14,6	16,5
30Х2МНФ	12,7	14,2	15,6	15,8

ренной теплостойкости и повышенной вязкости приблизительно одинаковы (табл. 68). Рекомендуемые области применения этих сталей приведены в табл. 69.

Стали повышенной теплостойкости и вязкости (4Х5МФС, 4Х5МФ1С, 4Х5В2ФС, 4Х3ВМФ, 3Х3М3Ф, 4Х4ВМФС) относят к заэвтектоидным, так как содержание первичных карбидов в них мало. Карбидная неоднородность при диаметре до 50 мм обычно не превышает баллов 1—2. В отожженном состоянии доля карбидной фазы ($M_{23}C_6$, M_6C, VC) — 6—12 %. Теплостойкость сталей повышается с увеличением в структуре сталей количества карбидов M_6C и VC, т. е. при повышении концентрации вольфрама, молибдена и ванадия.

После закалки на мелкое зерно (9—10) в структуре сохраняется 2—6 % нерастворившихся карбидов M_6C и VC и 5—12 % остаточного аустенита. Их влияние на свойства незначительно. Выделение вторичных карбидов по границам зерен и образование промежуточных структур снижает вязкость (табл. 70). Поэтому при назначении режима ступенчатой закалки, обеспечивающего минимальное коробление, охлаждение с темпе-

69. Рекомендуемые области применения сталей умеренной теплостойкости и повышенной вязкости [4, 10, 16]

Сталь	Область применения
5ХНМ	Молотовые штампы паровоздушных и пневматических молотов с массой падающих частей свыше 3 т для штамповки цветных сплавов, углеродистых и низколегированных конструкционных сталей; штампы для молотов меньшей мощности со сложной и глубокой гравюрой; прессовые штампы и штампы машинной скоростной штамповки при горячем деформировании легких цветных сплавов; блоки матриц для вставок горизонтально-ковочных машин
5ХНВ, 5ХНВС, 5ХГМ	Молотовые штампы паровоздушных и пневматических молотов с массой падающих частей до 3 т, имеющие неглубокую гравюру, работающие при невысоких давлениях и используемые для штамповки цветных сплавов, углеродистых и низколегированных сталей
4ХМФС	Молотовые штампы паровоздушных и пневматических молотов с массой падающих частей до 3 т при деформации легированных конструкционных и коррозионно-стойких сталей (вместо менее теплостойких сталей 5ХНМ, 5ХНВ); штампы кривошипных горячештамповочных прессов усилием до 40 МН, для штамповки деталей из углеродистых и низколегированных сталей; вставки и пуансоны для высадки деталей из этих материалов на горизонтально-ковочных машинах усилием до 10 МН; прессовый инструмент для обработки алюминиевых сплавов
3Х2МНФ	Крупные молотовые штампы, в том числе для чистовых операций при обработке труднодеформируемых металлов; штампы-контейнеры, работающие при длительном нагружении; кольца-бандажи; крупные внутренние втулки, пресс-штемпели, иглы горизонтальных прессов усилием до 12—20 МН, работающие при длительном нагреве
5Х2МНФ	Крупные штампы (со стороной квадрата или диаметром до 600 мм) для штамповки поковок из конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах с массой падающих частей свыше 3 т и кривошипных прессах усилием 40 МН и более (вместо менее теплостойких сталей 5ХНМ, 4ХМФС); инструменты (зажимные и формирующие вставки, наборные и формовочные пуансоны) для высадки конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), ножи горячей резки; мелкие прессовые и молотовые вставки

70. Влияние скорости охлаждения при закалке на ударную вязкость штамповых сталей [24]

Сталь	Температура испытания, °С	*KCU* (в МДж/м²) при охлаждении от температуры аустенитизации по режиму		
		I	II	III
4Х5В2ФС	20 600	0,45 0,60	0,17 0,45	0,15 0,35
4Х3ВМФ	20 600	0,50 0,60	0,15 0,60	0,10 0,50
4Х4ВМФС	20 600	0,40 0,55	0,20 0,35	0,15 0,30
4Х5МФС	20 600	0,55 0,60	0,15 0,45	0,12 0,45
3Х3М3Ф	20 600	0,20 0,50	0,07 0,45	0,07 0,35
4Х2В5МФ	20 600	0,35 0,45	0,07 0,25	0,07 0,27
5Х3В3МФС	20 600	0,25 0,40	0,05 0,20	0,10 0,17

Примечания: 1. Закалка от оптимальных температур. Отпуск сталей от 4Х5В2ФС до 3Х3М3Ф (по порядку записи) на твердость HRC 47—49, остальных — на твердость HRC 45—46.

2. Скорость охлаждения: I — образцов размерами 10×10×55 мм в масле; II — центра заготовки диаметром 200 мм в масле; III — центра заготовки диаметром 120 мм на воздухе.

ратуры аустенитизации до температур изотермической выдержки 450—500 °С в области наибольшей устойчивости аустенита проводят быстро (расплав солей). После выравнивания температуры по сечению следует опять быстрое охлаждение (в масле), чтобы избежать образования бейнита.

Стали повышенной теплостойкости и вязкости устойчивы против перегрева до 1020—1070 °С вследствие высокой термостойкости карбидов M_6C и VC, препятствующих росту зерна аустенита, и в зависимости от состава закаливаются на твердость HRC 48—59 (табл. 71). Лучшее сопротивление хрупкому разрушению и разгаростойкость получают при закалке на зерно ие крупнее 9—10. Для получения высокой теплостойкости и износостойкости целесообразна закалка от повышенных температур с получением зерна 7—8 (бандажированные штампы). Нагрев длительностью до 1 ч в интервале принятых температур закалки мало изменяет получаемые после закалки балл зерна, твердость и другие свойства. Однако более длительные выдержки снижают основные свойства.

Для исправления крупнозернистой структуры можно рекомендовать проведение перед закалкой изотермического отжига вместо режимов отжига, указанных в табл. 56.

Отпуск проводят на вторичную твердость (выделяются карбиды MC и M_2C), температуру назначают в зависимости от условий работы инстру-

71. Влияние температуры закалки на твердость и величину зерна сталей повышенной теплостойкости и вязкости [16]

Сталь (рекомендуемая температура закалки)	Температура закалки, °С	HRC	Зерно аустенита
4Х5МФС (1010 °С)	950	45	12
	1000	49	10
	1050	51	9—8
	1075	50,5	8—7
	1100	50,5	7
	1125	50,5	6—7
	1150	51	6—5
4Х3ВМФ (1050 °С)	950	49	11
	1000	52	11
	1050	53	10
	1075	54	9
	1100	54	8
	1125	55	8—7
	1150	56	7
4Х5В2ФС (1040 °С)	950	46	11
	1000	51,5	11—10
	1050	54,5	10—9
	1075	56	9
	1100	56,5	8
	1125	57	8—7
	1150	58	7
3Х3М3Ф (1040 °С)	950	41,5	11
	1000	46	10—9
	1050	47,5	9
	1075	48	8—9
	1100	48	8—7
	1125	48	7
	1150	48,5	7
4Х4ВМФС (1060 °С)	950	54	12
	1000	55,5	11
	1050	57,5	10
	1075	58	10—9
	1100	59	9
	1125	59	8
	1150	59	7

мента. Тяжелонагруженный инструмент с наименьшей стороной 100—120 мм, предназначенный для горячей объемной штамповки, отпускают на твердость HRC 46—50; более крупные штампы — на твердость HRC 44—46; крупные и сложные азотируемые или цианируемые пресс-формы литья под давлением цветных сплавов — на твердость HRC 40—43 и даже HRC 35—38. Для повышения вязкости проводят второй отпуск, назначая температуру на 30—40 °С ниже, а продолжительность на 25—30 % меньше первого. Температура отпуска влияет на свойства сталей (табл. 72). Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей повышенных теплостойкости и вязкости приведены в табл. 73. Если теплостойкость сталей

72. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей повышенных теплостойкости и вязкости [10]

Сталь (температура закалки; твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м²
4Х5МФС (1000 °С; HRC 51)	500	48	1440	1770	12	46	0,52
	550	46,5	1480	1750	10	50	0,57
	600	43	1380	1540	12	53	0,60
	625	35	1100	1320	13	58	0,68
	650	32	980	1120	15	60	0,82
4Х5МФ1С (1020 °С; HRC 52)	300	51	1520	1900	9	28	0,48
	400	53	1600	1910	8	25	0,44
	500	54	1520	2000	8	27	0,20
	600	48,5	1490	1650	10	45	0,46
4Х3ВМФ (1060 °С; HRC 54)	500	48	1500	1760	12,5	45	0,40
	550	47,5	1540	1740	11,5	52	0,48
	600	47	1520	1720	11,5	50	0,56
	625	44	1420	1580	12,5	49	0,50
	650	42	1300	1370	11,5	48	0,47
4Х5В2ФС (1040 °С; HRC 54)	500	52	1700	2040	7	10	0,10
	550	50	1720	1880	11	41	0,14
	600	45	1680	1720	12	46	0,50
	625	40	1250	1450	13,5	50	0,52
	650	35	1060	1300	15	53	0,70
3Х3М3Ф (1040 °С; HRC 49)	500	46	1350	1660	14	46	0,48
	550	46	1480	1700	12	52	0,32
	600	45,5	1540	1700	10	52	0,23
	625	43	1420	1600	12	50	0,40
	650	41,5	1300	1480	10	47	0,47
4Х4ВМФС (1060 °С; HRC 57)	550	55	1880	2100	5	8	0,20
	600	51	1680	1920	7	27	0,45
	620	49	1600	1800	10	40	0,46
	640	45	1400	1600	12	38	0,42
	660	42,5	1200	1400	13	43	0,40

Примечания: 1. Длительность отпуска 2 ч.
2. Свойства приведены для образцов сечением 10×10 мм.

73. Режимы окончательной термической обработки и свойства сталей повышенных теплостойкости и вязкости [10, 18]

Сталь	Закалка		Отпуск					
	Температура аустенитизации, °С	HRC	Температура первого отпуска, °С	Температура второго отпуска, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	KCU, МДж/м²	Теплостойкость (HRC 40), °С
4Х5МФС	1000—1020	50—52	530—560 580—590	500—520 540—550	47—49 44—46	1480 1400	1750 1540	0,57 0,60	600 —
4Х5МФ1С	**1020—1040**	**53—55**	560—580 610—620	520—540 570—580	**47—49** **44—46**	**1490** —	**1650** —	0,46 —	**630** —
4Х3ВМФ	**1040—1060**	**52—54**	560—580 620—630	530—570 590—600	47—49 44—46	1520 1420	1720 1580	0,56 0,50	650 —
4Х5В2ФС	1030—1050	53—56	560—580 600—620	530—540 570—590	47—49 44—46	1690 1430	1760 1550	0,30 0,50	630 —
3Х3М3Ф	1030—1050	**47—50**	580—600 610—620	540—560 570—580	47—48 44—46	1500 1420	1700 1600	0,25 0,30	650 —
4Х4ВМФС	1050—1070	55—60	620—630 640—650	560—580 600—610	47—50 44—46	1500 1300	1700 1500	0,44 0,40	660 —

Примечания: 1. Закалка в масле.
2. Продолжительность первого отпуска 2 ч, второго — на 25—30% меньше первого.
3. Свойства указаны для образцов сечением 10×10 мм.

оценивать по температуре отпуска (после окончательной термической обработки на твердость HRC 47—49) продолжительностью 4 ч на твердость HRC 40, то они могут быть расположены в следующий ряд: 4Х5МФС — 600 °С; 4Х5МФ1С и 4Х5В2ФС — 630 °С; 4Х3ВМФ и 3Х3М3Ф — 650 °С; 4Х4ВМФС — 660 °С.

При твердости HRC 45 ударная вязкость должна быть для большей части штампов не ниже 0,3—0,35 МДж/м² при 20 °С и 0,5 МДж/м² при температуре эксплуатации. Выполнение этого требования осложняется отрицательным влиянием масштабного эффекта (усиление карбидной неоднородности). С увеличением диаметра (стороны) штампа с 20 до 100 мм вязкость снижается в сердцевине более чем на 30—35 %. Для повышения сопротивления хрупкому разрушению штампы перед началом работы надо нагревать до 300—350 °С. Температура испытаний влияет на свойства сталей повышенной теплостойкости и вязкости (табл. 74). Область применения сталей повышенных теплостойкости и вязкости приведена в табл. 75.

Стали высокой теплостойкости (см. табл. 54) относят к заэвтектоидной группе, причем стали 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС образуют подгруппу сталей с карбидным упрочнением, а стали типа 2Х6В8М2К8 — с карбидоинтерметаллидным.

Стали 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС при охлаждении в масле прокаливаются в сечениях 100—150 мм. Уменьшение скорости охлаждения вызывает выделение вторичных карбидов по границам зерен аустенита и образование продуктов промежуточного превращения, что снижает вязкость. Сталь 2Х6В8М2К8 приобретает твердость HRC 53—57 даже при охлаждении на воздухе заготовки диаметром больше 120—150 мм. Замедленное охлаждение вязкость почти не снижает.

Содержание карбидной фазы в сталях 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС — 10—13 % (M_6C и MC), в стали 2Х6В8М2К8 — 6—7 % (Me_6C), но в этой стали дополнительно содержится интерметаллид $(Fe, Co)_7W_6$. Карбидная неоднородность сталей 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС в сечениях до 100 мм, а стали 2Х6В8М2К8 в прутках диаметром до 40—50 мм не превышает 2—3 баллов. При диаметре 100—120 мм балл карбидной неоднородности возрастает до 5—6. Поэтому стали 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС используют для изготовления инструмента с диаметром (стороной) до 100—150 мм, а сталь 2Х6В8М2К8 — до 70—80 мм.

Стали высокой теплостойкости сохраняют мелкое зерно (9—10) до следующих температур аустенитизации: 4Х2В5МФ — 1100 °С, 5Х3В3МФС — 1150 °С, 2Х6В8М2К8 — 1200 °С (табл. 76). При термической обработке штампов на высокую теплостойкость (небольшие динамические нагрузки) температуры закалки устанавливают на 10—20 °С выше, чем при обработке на повышенную прочность и вязкость (табл. 77).

Количество остаточного аустенита в сталях 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС после закалки — 10—15 %; сталь 2Х6В8М2К8 почти не содержит аустенита.

Штампы сложной формы и относительно небольших размеров для уменьшения деформации охлаждают в горячих средах при 350—250 °С (20—40 мин), а затем на воздухе.

Для уменьшения деформации штампов перед окончательной закалкой целесообразно проводить предварительную обработку: закалку из межкритической области (например, для стали 5Х3В3МФС от 810—830 °С) и отпуск при 600 °С.

Деформация штампов из стали 2Х6В8М2К8 незначительна из-за небольшой концентрации углерода.

Отпуск выполняют на вторичную твердость и немедленно после закалки для предотвращения образования трещин. Температура отпуска влияет на свойства сталей высокой теплостойкости (табл. 78). Режимы обработки (табл. 77) назначают в зависимости от условий работы инструмента.

Наиболее приемлемое сочетание свойства при 20 и 600 °С у сталей 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС получают после отпуска на твердость HRC 45—47 (табл. 79). Отпуск на твердость HRC 41—44 выполняют с целью повышения сопротивления хрупкому разруше-

74. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей повышенных теплостойкости и вязкости [10]

Сталь (режим отпуска)	Температура испытаний, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
			МПа		%		
4Х5МФС (560 °С, 2 ч)	20	48	1600	1750	12	54	0,55
	300	—	1370	1580	12	47	0,64
	400	50	1300	1520	12	49	0,65
	500	45,5	1150	1400	10	52	0,58
	550	42	1180	1350	11	50	0,53
4Х5МФ1С (580 °С, 2 ч)	20	—	1500	1700	10	40	0,40
	200	—	1370	1650	12	46	0,55
	300	—	1340	1520	12	45	0,52
	400	—	1340	1450	13	46	0,50
	500	—	1180	1350	13	47	0,43
4Х3ВМФ (580 °С, 2 ч)	20	47,5	1480	1750	12	52	0,50
	300	—	1360	1530	11	52	0,68
	400	44	1300	1450	12	54	0,60
	500	43	1150	1320	11	54	0,57
	550	38	1150	1260	10	52	0,62
	575	—	1020	1200	10,5	52	0,57
4Х5В2ФС (580 °С, 2 ч)	20	50	1540	1850	10	48	0,48
	300	—	1350	1650	9	47	0,62
	400	50	1420	1550	10	51	0,64
	500	44	1220	1390	9	53	0,60
	550	40	1150	1310	8	52	0,58
	600	—	1100	1250	10	53	0,60
3Х3М3Ф (600 °С, 2 ч)	20	47,5	1480	1700	12	50	0,22
	300	—	1280	1470	10	48	0,62
	400	46	1290	1400	10	49	0,62
	500	42,5	1150	1300	10	51	0,57
	550	37	1140	1260	11	52	0,52
	600	33	1000	1150	12	54	0,52
4Х4ВМФС (620 °С, 2 ч)	20	50	1600	1820	8	36	0,45
	300	—	1400	1600	9	39	0,60
	400	—	1360	1500	10	46	0,60
	500	44,5	1200	1400	13	48	0,56
	550	35	1060	1260	14	55	0,55
	600	28	920	1100	17	64	0,65

Примечание. Свойства приведены для образцов сечением 10×10 мм.

75. Рекомендуемые области применения сталей повышенных теплостойкости и вязкости [10, 16]

Сталь	Область применения
4Х5МФС	Мелкие молотовые штампы, особенно чистовой штамповки с наименьшей стороной до 100—125 мм; молотовые (диаметром или толщиной до 200 мм) и прессовые вставки (предварительного и окончательного ручья, знаки, выталкиватели, внутренние втулки, пресс-штемпели, иглы для прошивки труб) при горячем деформировании конструкционных сталей и цветных сплавов в условиях крупносерийного производства; формы литья под давлением алюминиевых и магниевых сплавов со стороной до 70—80 мм
4Х5МФ1С, 4Х5В2ФС	Молотовые и прессовые вставки (толщиной или диаметром до 200—250 мм) с таким же назначением, как и из стали 4Х5МФС; инструмент для высадки заготовок из легированных конструкционных и жаропрочных материалов на горизонтальио-ковочных машинах; пресс-формы литья под давлением алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов
4Х3ВМФ	Мелкие молотовые штампы; молотовые и прессовые вставки (толщиной или диаметром до 300—400 мм); инструмент горизонтально-ковочных машин при горячем деформировании коррозионностойких сталей и жаропрочных сплавов, работающий в условиях повышенных давлений (800—1500 МПа) и нагреве до 650—660 °С; инструмент для высокоскоростной машинной штамповки конструкционных сталей
4Х4ВМФС	Инструмент высокоскоростной машинной штамповки и для высадки на горизонтально-ковочных машинах; вставки штампов для горячего деформирования легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах и кривошипных прессах, работающие в условиях повышенных давлений (800—1500 МПа) и нагрева до 650—660 °С; пресс-формы литья под давлением медных сплавов
3Х3М3Ф	Инструмент горячего деформирования на кривошипных прессах и горизонтально-ковочных машинах, подвергающихся в процессе работы интенсивному охлаждению (как правило, для мелкого инструмента); пресс-формы литья под давлением медных сплавов; ножи для горячей резки

76. Влияние температуры закалки на твердость и зерно сталей высокой теплостойкости [16]

Сталь (рекомендуемая температура закалки)	Температура закалки, °С	HRC	Зерно аустенита
4Х2В5МФ (1050—1080 °С)	1000	49	12
	1050	54	11
	1100	55	9
	1150	55	6
	1200	55	4
5Х3В3МФС (1120—1150 °С)	1000	50	12
	1050	51	11
	1100	53	10
	1150	57	9
	1200	57,5	7

Примечание. Закалка в масле.

нню. Сталь 2Х6В8М2К8 уступает этим сталям по вязкости, но сильно превосходит их по теплостойкости (см. табл. 77).

Температуру второго отпуска для сталей 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС назначают на 30—40 °С ниже, а продолжительность на 25—30 % меньше первого. Для стали 2Х6В8М2К8 рекомендуется предварительный отпуск при 340—360 °С длительностью 1,5—2 ч.

Штампы перед началом работы нагревают до 300—350 °С.

Область применения сталей высокой теплостойкости приведена в табл. 80.

Нетеплостойкие стали 7Х3 и 8Х3 повышенной вязкости (см. табл. 54) применяют для инструмента (пуансонов, матриц) горячей высадки крепежа и заготовок из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей на горизонтально-ковочных машинах, деталей штампов (матриц, пуансонов, выталкивателей) для горячего прессования и выдавливания этих материалов на кривошипных прессах при мелкосерийном производстве, гибочных, обрезных и просечных штампов.

Стали прокаливаются в сечениях до 70—80 мм. Повышенную вязкость и твердость HRC 40—45 получают благодаря проведению отпуска при 480—520 °С, что выше температур интенсивного развития хрупкости первого рода.

77. Режимы окончательной термической обработки сталей высокой теплостойкости [16]

Сталь	Закалка		Отпуск		Теплостойкость (HRC 40), °С
	Температура, °С	HRC	Температура, °С	HRC	
4Х2В5МФ	1080—1100	54—56	640—650	44—47	670
			650—660	41—44	
	1050—1080	52—56	610—630	45—49	660
			630—640	42—45	
5Х3В3МФС	1130—1150	54—58	650—660	44—47	685
			660—680	41—44	
	1100—1120	52—55	640—650	45—49	670
			650—660	42—45	
2Х6В8М2К8	1180—1200	52—54	670—690	48—52	730
			690—710	44—48	

78. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства сталей высокой теплостойкости [10]

Сталь (температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
			МПа		%		
4Х2В5МФ (1080 °С, HRC 50)	550	49	1560	1750	12	48	0,15
	600	50	1630	1780	11	50	0,12
	625	48	1650	1800	10	38	0,25
	650	46	1600	1700	12	43	0,30
	675	43	1420	1560	10	40	0,35
5Х3В3МФС (1150 °С, HRC 56)	600	52,5	1820	2050	8	36	0,30
	630	51,5	1670	1930	9	35	0,26
	650	46	1600	1725	10	30	0,20
	670	45	1400	1570	8	34	0,25
	680	43	1320	1475	10	35	0,30
2Х6В8М2К8 (1200 °С, HRC 54)	650	52	1600	1900	—	—	0,02
	700	48	1340	1640	—	—	0,20
	730	40	1060	1370	—	—	0,80
	750	34	800	1180	—	—	1,28

Примечания: 1. Закалка в масле.
2. Продолжительность отпуска 2 ч.
3. Свойства оценивали на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15×15 мм.

79. Влияние температуры испытаний на механические свойства сталей высокой теплостойкости [16]

Сталь	Температура испытаний, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
			МПа		%		
4Х2В5МФ	20	46	1480	1680	10	42	0,30
	500	41	1120	1230	10	49	0,50
	550	31	—	—	—	—	—
	600	26	900	1000	10	48	0,45
	650	—	730	820	11	37	0,50
5Х3В3МФС	20	47	1500	1680	8	38	0,25
	500	41,5	1120	1280	8	45	0,35
	550	36	1100	1240	7	45	0,32
	600	30	910	1040	10	42	0,40
	650	—	730	850	12	35	0,40

Продолжение табл. 79

Сталь	Температура испытаний, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
			МПа		%		
2Х6В8М2К8	20	—	1450	1750	2	6	0,05
	600	—	950	1200	7	24	0,20
	700	—	800	900	8	25	0,35

Примечания: 1. Закалка сталей 4Х2В5МФ от 1080 °С, 5Х3В3МФС от 1130 °С, 2Х6В8М2К8 от 1180 °С в масле.

2. Стали 4Х2В5МФ и 5Х3В3МФС отпущены на твердость HRC 46—47, сталь 2Х6В8М2К8 на HRC 48—50.

3. Свойства оценивали на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15×15 мм.

80. Рекомендуемые области применения сталей высокой теплостойкости

Сталь	Область применения
4Х2В5МФ	Тяжелонагруженный прессовый инструмент (мелкие вставки знаков, матрицы и пуансоны для выдавливания и т. п.) при горячем деформировании легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов
5Х3В3МФС	Тяжелонагруженный прессовый инструмент (прошивные и формирующие пуансоны, матрицы и т. п.); инструмент для высадки на горизонтально-ковочных машинах и вставки штампов напряженных конструкций для горячего объемного деформирования конструкционных сталей и жаропрочных металлов и сплавов (вместо сталей 3Х2В8Ф и 4Х2В5МФ)
2Х6В8М2К8	Иглы, пуансоны для прессования аустенитных, жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов, а также титановых сплавов при температурах до 650—675 °С, выполняемых без интенсивного охлаждения

Предварительную термическую обработку для уменьшения деформации инструмента проводят по режиму: закалка от 790—800 °С и отпуск при 520—600 °С. В этом состоянии стали получают менее шероховатую поверхность при резании (твердость HRC 22—25).

Режимы окончательной термической обработки сталей 7Х3 и 8Х3 приведены в табл. 81, влияние температуры отпуска на свойства — в табл. 82, а влияние температуры испытаний — в табл. 83.

Штампы КГШП и ГКМ, пресс-формы литья под давлением с целью

81. Режимы окончательной термической обработки нетеплостойких сталей повышенной вязкости [10]

Сталь	Закалка		Отпуск	
	Температура, °С	HRC	Температура, °С	HRC
7Х3	850—880	≥54	480—520	38—44
8Х3	850—880	≥55	480—520	41—46

Примечание. Закалка в масле.

82. Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства нетеплостойких сталей повышенной вязкости [10]

Сталь (температура закалки, твердость)	Температура отпуска, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
			МПа		%		
7Х3 (870 °С, HRC 54)	300	50	1670	1960	4	14	0,15
	400	45	1460	1720	5	24	0,30
	500	38	1260	1350	10	36	0,37
	550	35	—	—	—	—	0,54
8Х3 (870 °С, HRC 55)	300	53,5	1830	2020	3	—	0,19
	400	50	1650	1950	6	10	0,23
	500	42	1280	1360	7	25	0,36
	550	36	1070	1170	10	39	0,48

Примечания: 1. Закалка в масле.

2. Продолжительность отпуска 2 ч.

3. Свойства оценивали на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15×15 мм.

83. Влияние температуры испытаний на механические свойства нетеплостойких сталей повышенной вязкости [10]

Сталь	Температура испытаний, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	KCU, МДж/м²
		МПа		%		
7Х3	20	1060	1150	11	37	0,36
	300	980	1040	12	34	0,72
	400	800	940	16	55	0,66
	500	560	700	18	68	0,52
8Х3	20	1260	1380	6	26	0,35
	200	1100	1280	6	26	0,45
	300	1060	1250	9	28	0,56
	400	950	1120	5	48	0,48
	500	650	830	20	63	0,45

Примечания: 1. Закалка от 870 °С в масле.

2. Отпуск при 500 °С в течение 2 ч.

3. Свойства оценивали на образцах, изготовленных из заготовок сечением 15×15 мм.

повышения стойкости (в 1,5—2,0 раза) целесообразно азотировать или цианировать [10]. Надежность инструмента возрастает при использовании для его изготовления сталей после электрошлакового переплава.

Список литературы

1. **Артингер И.** Инструментальные стали и их термическая обработка. М.: Металлургия, 1982. 312 с.
2. **Бадаева А. А.** Свойства и термическая обработка стали Х6ВФ. М.: ВНИИ, 1960. 46 с.
3. **Баженов И. Ф., Байчман С. Г., Карпачев Д. Г.** Твердые сплавы: Справочник. М.: Металлургия, 1978. 184 с.
4. **Геллер Ю. А.** Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1975. 584 с.
5. **Геллер Ю. А.** Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 525 с.
6. **Геллер Ю. А., Артюхов В. Ф.** МИТОМ, 1976. № 11. С. 17—20.
7. **Геллер Ю. А., Брострем В. А.** Легирование быстрорежущих сплавов с интерметаллидным упрочнением//Металловедение и термическая обработка. 1974. № 1. С. 4.
8. **Горюнов И. И.** Пресс-формы для литья под давлением. Л.: Машиностроение, 1973. 255 с.
9. **Гуляев А. П., Малинина К. А., Саверина С. М.** Инструментальные сплавы: Справочник. М.: Машиностроение, 1975. 272 с.
10. **Инструментальные** стали: Справочник/Л. А. Позняк, С. И. Тишаев, Ю. М. Скрынченко и др. М.: Металлургия, 1977. 168 с.
11. **Кремнев Л. С.** От стали Р18 к безвольфрамовым низколегированным быстрорежущим сталям. МИТОМ. 1986. № 7. С. 27—43.
12. **Материалы** в машиностроении: Справочник. Т. 3/Под ред. Ф. Ф. Химушина. М.: Машиностроение, 1968. 447 с.
13. **Михайленко Ф. П., Грикке А. Х., Демиденко Е. М.** Автоматическая холодная штамповка мелких деталей на быстроходных прессах. М.: Машиностроение, 1965. 187 с.
14. **Номенклатура** режущего инструмента из минералокерамики и сверхтвердых материалов на основе нитрида бора, выпускаемого заводами Минстанкопрома. М: НИИМАШ, 1984. 48 с.
15. **Позняк Л. А.** Штамповые стали для холодного деформирования. М.: Металлургия, 1966. 147 с.
16. **Позняк Л. А., Скрынченко Ю. М., Тишаев С. И.** Штамповые стали. М.: Металлургия, 1980. 244 с.
17. **Порошковая** металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник/Под ред. И. М. Федорченко. Киев: Наукова думка, 1985. 624 с.
18. **Раузин Я. Р.** Термическая обработка хромистой стали. М.: Машгиз, 1961. 384 с.
19. **Сталь** инструментальная быстрорежущая. Технологические свойства в состоянии поставки и в термически обработанном состоянии: Таблица стандартных справочных данных (ГСССД 41—82). М., 1983. 10 с.
20. **Тутов И. Е., Савуков В. П., Панкратов М. Ф., Фимощенко Н. И.**// Материалы для штампов и пресс-форм. М.: МДНТП, 1966. С. 24—44.
21. **Централизованная** заточка режущего инструмента на станкозаводах: Методические указания. М.: НИИМАШ, 1981. 108 с.
22. **Шмыков А. А.** Справочник термиста. М.: Машгиз, 1956. 331 с.
23. **Штамповые** стали и режимы их обработки для инструмента горячей и холодной объемной штамповки: Методические указания. Воронеж: ЭНИКМАШ, 1971. 60 с.
24. **Штампы** для горячего деформирования металла/Под ред. М. А. Тылкина. М.: Высшая школа, 1977. 495 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Алюминневые деформируемые сплавы 234, 236—253
— чугуны 82, 83
Аморфные металлнческие сплавы 581—585
— инварные 585
— конструкционные 582, 583
— магнитомягкие 583—585
— магнитотвердые 583—585
— резистивные 585
Антифрикционные материалы металлические 171—180
— на основе древесины, резин и фторопластовых тканей 185—179
— на основе полимеров 180—185
Антифрикционный чугун 79, 81, 82

Б

Безоловянные бронзы 109—123
— литейные 114, 122, 123
— обрабатываемые давлением 109, 120, 121
Бериллий — Свойства 321, 322, 324—329
— Химический состав 322—324, 326
Быстрорежущие стали 606—616

В

Волокиистые компознцнониые материалы металлические 349—359
— Методы изготовления 349
— Сведения о процессах первичного производства 349—351
— Свойства волокон 352—359
Волокиистые композиционные материалы с иеметаллической матрнцей 365—376
— Свойства 365—369
— Характеристики 369—376
Высокопрочные высоколегированные (мартенситно-стареющие) стали 30—47
— Коррозионно-стойкие 39—42
— Общего назначения 33—39
— Применение 46, 47
— Пути совершенствования свойств 42—46
Высокопрочные средне-легированные стали 23—30
— Общая характеристика 23,24
— Режимы упрочняющей термической обработки 24—28
— Рекомендации конструктору и технологу 28—30
Высокопрочные штамповые стали с повышеиной ударной вязкостью — Режимы окончательной термической обработки 649
— Рекомендуемые области применения 649, 650
Высокопрочный чугуи с шаровидным или вермикулярным графитом 74—77
Высокоэлектропроводные сплавы 222—233

Г

Гибкая электроизоляционная трубка 588

Д

Двойные латуни, обрабатываемые давлением 85—88
Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе алюминия 341, 343, 344
— бериллия 344, 345
— кобальта 347, 348
— магния 345
— никеля 345—347
— хрома 348
Диэлектрики — Механизм поляризации 585
— жидкие 588
— неполярные 585
— полярные 585

Ж

Жаропрочные материалы 423—450
— Аустенитные стали 423—433
— Медные сплавы 445—450

— Сплавы на основе алюминия—меди—магния—железа—никеля 235, 254
— Сплавы на основе вольфрама 440, 441
— Сплавы на основе молибдена 440—443
— Сплавы на основе никеля 433—438
— Сплавы на основе ниобия 443—445
— Сплавы на основе тугоплавких металлов 438—440
Жаропрочные сплавы системы алюминий—медь—магний—железо—никель 235, 254
Жаростойкие материалы 406—423
— Медные сплавы 408
— Сплавы магния 407, 408
— Сплавы на основе железа и никеля 408, 409
— Термически обработанные полуфабрикаты 414—419
— Тугоплавкие металлы 408
— Хромистые стали 408
— Чугуны 419—423

К

Ковкий чугун 77—80
Ковочные сплавы системы алюминий—магний—кремний—медь 255—257
Композиты бериллий—титан 322, 338
Конструкционные высокопрочные и жаропрочные алюминиевые **сплавы** 269, 270
— герметичные алюминиевые сплавы 261, 268, 269
— коррозионно-стойкие алюминиевые сплавы 270—272
Коррозионно-стойкие и жаростойкие покрытия 474—498 — Условные обозначения способов получения 476, 477, 496—498

Л

Лазерное вещество 589
Лазерные материалы 589
Лазерный эффект 589
Лазеры полупроводниковые 592
— твердотельные 589
Литейные алюминиевые сплавы 257—272
— латуни 102—104
Люминесценция 589

М

Магниевые сплавы со специальными физическими и химическими свойствами 273, 289—291
Магний — Свойства 272, 273
Магнитомягкие материалы 544—564
— Зарубежные аналоги 562—564
— Магниодиэлектрические 559, 561
— Низкоуглеродистые электротехнические нелегированные стали 544—548
— Общие требования и классификация 544
— Прецизионные сплавы 547, 549—553
— Ферримагнитные 547, 553—560
Магнитотвердые материалы 536—544
— Деформируемые 537—541
— Легированные стали 537—539
— Литые 537, 539
— Общие требования и классификация 536—538
— Порошковые 541—543
— Сплав на основе благородных редкоземельных металлов 543, 544
Марганцевые чугуны 82, 83
Материалы высокой проводимости 514—520
— Алюминий 517—520
— для электрических контактов 520
— Медь 514, 515
— Общие требования и классификация 514, 515
— Серебро 520
— Сплавы меди 516—518
Материалы высокой твердости износостойкие 135—151
— Керамика 143, 144
— Металлоподобные соединения 139—142
— Наплавочные материалы 146—151
— Неметаллические бескислородные соединения 142, 143
— Сверхтвердые 137—139
— Ситаллы 144
— Твердые сплавы 144—146
Материалы для криогенной техники 498—510
— Алюминий и его сплавы 505, 506
— Медь и ее сплавы 506, 507
— Стали 498—505
— Титан и его сплавы 507—510
Материалы кавитационно-стойкие 167—171
— с малым газовыделением в вакууме 462—474
Материалы с особыми тепловыми свойствами 564—568
— Сплав с заданным температурным коэффициентом модуля упругости 568
— Ферромагнитные сплавы 564—568

Материалы триботехнического назначения — Процесс изнашивания 131—136
— устойчивые к изнашиванию в условиях больших давлений и ударных нагрузок 163, 164
Медно-никелевые сплавы 114, 124, 125, 128—130
Металлические сплавы, устойчивые к воздействию температуры и внешней рабочей среды 379—389
— Алюминий и его сплавы 385, 387
— Благородные металлы 389
— Коррозионно-стойкие сплавы 379—384
— Медь и ее сплавы
— Титан и его сплавы 380, 385— 387
Многокомпонентные латуни, обрабатываемые давлением 88—95

Н

Немагнитные пружинные сплавы 218—221
Неметаллические материалы, устойчивые к воздействию температуры и внешней рабочей среды 389—395
— Винипласт 391
— Кислотоупорный бетон 392
— Минеральные 391
— Полистирол 389
— Поливинилхлорид 391
— Полиэтилен 389—391
— Резины 393—395
— Тефлон 391
— Углеграфитовые 392, 393
— Эбониты 393—395
Низколегированные конструкционные стали 12, 13
— малоперлитные стали 15—22
— стали с карбонитридным упрочнением 13—15
Никелевые чугуны 83, 84

О

Оловянные бронзы 104—113
— литейные 105—109
— обрабатываемые давлением 105
Отливки, изготовляемые в песчаных формах — Группы сложности 51—54 — Относительная стоимость 55, 56
— чугунные — Точность и шероховатость 50, 55

П

Пироэлектрик 589
Пленкосодержащий электроизоляционный материал 588
Покрытия вакуумные ионно-плазменные 153—156
— газотермические 156—160
— жаростойкие 489—495
— коррозионно-стойкие 474—488
— получаемые методами химического осаждения из газовой фазы 152, 153
— получаемые термовакуумным напылением 153
— электроискровые 157
Полимерные материалы — Свойства 338—342
Полупроводниковые материалы 568—581
— Простые полупроводники 569—576
— Сложные полупроводники 576—581
Полуфабрикаты из латуней, обрабатываемых давлением 95—101
Пружинные сплавы — Классификация по назначению 205—233 — Классификация по основным способам упрочнения 205
— общего назначения 205—216
— с низким температурным коэффициентом модуля упругости 219, 222
— специального назначения 215—233

Р

Радиационно-стойкие материалы 445—462
— Алюминий, его сплавы и соединения 458
— Аустенитные коррозионно-стойкие стали 458—461
— Аустенитные никелевые сплавы 458—461
— Бериллий и его соединения 453—457
— Графит 461, 462
— Магний, его сплавы и соединения 456, 457
— Радиационные дефекты 445, 451—454
— Цирконий и его сплавы 457, 458
— Чистые металлы, керамики, керметы 461
Резистивные материалы 526—536 — Общие требования и классификация 526
— для резисторов 526, 527, 529
— для термоэлектродов термопар и удлиняющих проводов 532—536
— для электронагревателей 527, 529—532

С

Сверхлегкие магниево-литиевые сплавы 273, 289

Сверхпроводники 520—526
Сверхтвердые материалы 626—631
Серый чугун с пластинчатым графитом 71—74
Слои поверхностные — Лазерные методы модифицирования и легирования 157, 160, 161
— Химико-термические методы модифицирования 162, 163
Слюдосодержащий электроизоляционный материал 588
Сплавы магния 273—288
— Области применения 273, 280, 282, 283
— Режим термической обработки 273, 277, 284
— Свойства 273—277, 281, 285, 286, 288
— Состав 273—277
— Характеристики свариваемости 273, 279, 287
Сплавы повышенной пластичности и коррозионной стойкости системы алюминий—магний—кремний 254, 255
— системы алюминий—медь—магний 235, 253, 254
— типа алюминий—бериллий и алюминий—магний—бериллий 329—337
Среднеуглеродистые низколегированные стали 22, 23
Стекла неодимовые 591, 593
Стеклообразные лазерные материалы 591

Т

Твердые сплавы 613, 617—626
Теплостойкие материалы 395—406
— Высоколегированные чугуны 402—405
— Теплостойкие стали 395—404
— Цветные сплавы 402, 405, 406
Титан — Свойства 291—296
Титановые сплавы — Применение 319 — Свойства 296—300
— двухфазные ($\alpha + \beta$) — сплавы — Свойства 305—313, 315, 316
— литейные 314, 317, 318
— порошковые 314, 318—320
— псевдо-β-сплавы 314
— с α-структурой 300—305, 306, 320

У

Углеродистые стали 12 — **инструментальные** 596—599

Ф

Фрикционные материалы 189—200
— асбополимерные 192—197
— на железной основе 191
— полученные методом **порошковой** металлургии 191, 192

Х

Хромистые чугуны 82, 83

Ч

Чугуны 49—69 — для отливок 49—57
— Жаростойкость 66—69
— Коррозионная стойкость 64—66
— Магнитные свойства 63, 64
— Коэффициент линейного расширения 60
— Плотность 57—59
— **Теплофизические свойства** 59, 60—63

Ш

Шлифуемость стали 613
Штамповые нетеплостойкие стали 680, 681
Штамповые стали высокой теплостойкости 675—680
Штамповые стали для горячего деформирования 655—682
— Длительная прочность 663, 668
— Критические точки 653, 668
— Режим ковки и отжига 656, 658, 659
— Релаксационная стойкость 663, 669
— Химический состав 656, 657
Штамповые стали для ударных инструментов — Влияние температуры испытаний на механические свойства 650, 653, 654
— Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур на механические свойства 650—652
— Режимы окончательной термической обработки 650, 651
— Рекомендуемые области применения 650, 654
Штамповые стали для холодного деформирования 631—654
Штамповые стали повышенной теплостойкости и вязкости — Влияние температур закалки на твердость и величину зерна 671, 672
— Влияние температур испытаний на механические свойства 675, 676
— Влияние температуры отпуска на механические свойства 671, 673
— Режимы окончательной термической обработки и свойства 672, 674
— Рекомендуемые области применения 675, 677
Штамповые стали умеренной теплостойкости и повышенной вязкости — Влияние закалки на твердость и размеры зерна 661, 662
— Влияние температуры испытаний и размера сечения на механические свойства 663, 666—668
— Влияние температуры отпуска после закалки от оптимальных температур 663, 665, 666
— Коэффициент линейного расширения 663, 669
— Рекомендуемые области применения 669—671
— Рекомендуемые режимы закалки и отпуска в зависимости от размера штампа 663, 664
— Ударная вязкость 663, 664
Штампы — Продолжительность нагрева в пламенной печи, выдержки и охлаждения при закалке 659, 660
— Температура отпуска и твердость хвостовиков 663, 665

Э

Эвтектические композиционные материалы на основе алюминия 359—361
— кобальта 361—364
— никеля 361—364
— ниобия 362—365
— тантала 362—365
Электрет 589
Электрические кристаллы 588, 589
Электроизоляционная лакоткань 588
Электроизоляционный компаунд 588
— лак 588
— препрег 588
— пресс-материал 588
— фольгированный материал 587

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

АРЗАМАСОВ Борис Николаевич, БРОСТРЕМ Владимир Алексеевич, БУШЕ Николай Александрович и др.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Редактор *И. И. Лесниченко*
Переплет художника *Н. А. Игнатьева*
Художественный редактор *С. Н. Голубев*
Технические редакторы: *Н. М. Харитонова, И. Н. Раченкова*
Корректоры: *А. П. Сизова, Л. А. Яегупьева*

ИБ № 5444

Сдано в набор 27.10.89. Подписано в печать 30.03.90. Т-01753.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2.
Гарнитура литературная. Печать высокая.
Усл. печ. л. 43,0. Усл. кр.-отт. 43,0. Уч.-изд. л. 53,99.
Тираж 65 700 экз. Заказ 883. Цена 3 р.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»,
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени издательства «Машиностроение»
при Государственном комитете СССР по печати
193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10