



СПРАВОЧНИК --- МЕТАЛЛИСТА

В ⑤ ТОМАХ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ

Редакционный совет:

Б. Л. БОГУСЛАВСКИЙ,

А. Н. МАЛОВ (председатель),

М. П. НОВИКОВ,

А. Г. РАХШТАДТ,

С. А. ЧЕРНАВСКИЙ

МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1976

СПРАВОЧНИК --- МЕТАЛЛИСТА

ТОМ ②

Под редакцией
д-ра техн. наук А. Г. РАХШТАДТА
и канд. техн. наук В. А. БРОСТРЕМА

МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1976

6ПЗ.4

С74

УДК 621.002.2 (031)

Авторы: А. Ю. Акимова, Б. Н. Арзамасов, И. А. Арутюнова, В. Л. Балкевич, А. М. Борздыка, В. А. Брострем, Е. В. Васильева, Б. К. Вульф, Ю. А. Геллер, А. С. Гуляев, Г. М. Гуняев, М. Е. Дриц, В. Н. Евсеев, В. К. Ефремов, М. И. Жебин, В. В. Зимин, О. С. Квурт, Ю. М. Лахтин, Л. И. Леви, Э. Н. Либерман, А. В. Мельников, А. К. Николаев, А. С. Николаев, К. И. Портной, Я. М. Потак, Д. А. Прокошкин, В. С. Раковский, А. Г. Рахштадт, Е. А. Скороходов, В. А. Федорович, В. М. Шестопал, Г. Е. Шпичинецкий, Е. С. Шпичинецкий, Р. П. Шубин.

Рецензенты: В. В. Белов, Б. К. Вульф, В. Д. Кальнер, Б. А. Клыпин, Б. А. Колочев, Ф. Л. Левин, Э. Н. Либерман, С. Б. Масленников, Г. И. Назаров, А. В. Овчинников, В. М. Розенберг, М. Б. Таубкин, Е. С. Шпичинецкий.

Справочник металлиста. В 5-и т. Т. 2. Под ред.
С74 А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема. М., «Машиностроение», 1976.

720 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: А. Ю. Акимова, Б. Н. Арзамасов, И. А. Арутюнова и др.

Во втором томе приведены справочные сведения по физико-механическим и технологическим свойствам черных и цветных металлов, сплавов и неметаллических материалов, а также новые данные по термической и химико-термической обработке, испытаниям металлов. Справочник предназначен для инженеров-технологов и техников машиностроительных заводов.

С $\frac{31201-604}{038 (01)-76}$ подписное

6ПЗ.4

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I

Механические и технологические свойства машиностроительных материалов и методы их оценки

Методы механических испытаний (<i>В. А. Брострем</i>)	11
Характеристика и виды механических испытаний	11
Испытания на растяжение при комнатной температуре	12
Определение характеристик материала, получаемых при испытании	14
Испытания на растяжение при пониженных температурах (ГОСТ 11150—65)	15
Испытания (кратковременные) на растяжение при повышенных температурах (ГОСТ 9651—73)	16
Испытания на ползучесть (ГОСТ 3248—60)	16
Испытания на длительную прочность (ГОСТ 10145—62)	18
Испытания на кручение (ГОСТ 3565—58)	18
Испытания на изгиб	21
Испытания на усталость (ГОСТ 2860—65)	22
Испытания на ударную вязкость	27
О конструктивной прочности материалов и методах ее оценки	30
Критерии оценки конструктивной прочности	31
Определение твердости	32
Статические методы	33
Динамические методы	37
Технологические свойства машиностроительных материалов	37
Штампуемость (<i>В. В. Зимин</i>)	37
Механические и технологические испытания	38
Технологические испытания	39
Свариваемость (<i>И. А. Арутюнова</i>)	45
Методы оценки	45
Оценка влияния режимов сварки и последующей обработки на структуру и свойства сварных соединений	45
Определение механических свойств сварных соединений	46
Определение сопротивления сварных соединений образованию горячих трещин	47
Определение сопротивления сварных соединений образованию холодных трещин	49
Испытания сварных соединений на сопротивление хрупкому разрушению	50
Паяемость (<i>И. А. Арутюнова</i>)	51

Коррозия и методы защиты металлов от коррозии (А. Ю. Акимова)	57
Определение, типы и виды коррозии	57
Методы коррозионных испытаний и способы оценки коррозии	58
Защита металлов от коррозии	60
Список литературы	63

Глава 2

Черные металлы и сплавы

Сталь (В. А. Брострем)	64
Строение и свойства	64
Диаграмма состояния железо—углерод	64
Фазы и структуры	69
Влияние легирующих элементов на строение и свойства стали	69
Конструкционные стали (Э. Н. Либерман)	73
Сталь углеродистая обыкновенного качества общего назначения	73
Сталь углеродистая качественная конструкционная	86
Низколегированные стали	93
Сталь конструкционная легированная	100
Автоматные стали	101
Сталь листовая углеродистая и низколегированная для котло- строения и сосудов, работающих под давлением	129
Стали северного исполнения	129
Стали для криогенной техники	132
Сталь для отливок (Л. И. Леви)	135
Применение и состояние производства	135
Литейные свойства и особенности конструкции	135
Общая классификация	137
Способы выплавки	139
Влияние состава на свойства	139
Марки и технические требования	141
Инструментальные стали (Ю. А. Геллер)	143
Нетеплостойкие стали высокой твердости	148
Марки, свойства и применение	148
Термическая обработка	152
Нетеплостойкие стали повышенной вязкости	155
Марки, свойства и применение	155
Полутеплостойкие стали высокой твердости	158
Марки, свойства и применение	158
Горячая механическая и термическая обработка	160
Полутеплостойкие стали повышенной вязкости	162
Марки, свойства и применение	162
Горячая механическая и термическая обработка	162
Теплостойкие стали высокой твердости (быстрорежущие стали)	164
Марки, свойства и применение	164
Стали умеренной теплостойкости	165
Стали повышенной теплостойкости	167
Стали высокой теплостойкости	168
Горячая механическая и термическая обработка	168
Теплостойкие стали повышенной вязкости (штамповые)	171
Свойства и применение	171
Горячая механическая и термическая обработка	173
Назначение инструментальных сталей	174

Твердые сплавы (В. С. Раковский)	178
Общая характеристика	178
Марки, составы и свойства твердых сплавов	179
Основные принципы изготовления твердосплавного инструмента	184
Подшипниковые стали (Р. П. Шубин)	185
Пружинные стали и сплавы (А. Г. Рахштадт)	194
Классификация пружинных сталей и сплавов	195
Стали общего назначения	195
Пружинные стали и сплавы специального назначения	208
Высокопрочные стали (Я. М. Потак)	215
Среднелегированные стали	215
Термическая обработка	218
Требования при конструировании и разработке технологии	220
Сварки и сварные соединения	223
Интенсивно стареющая (мартенситно-стареющая сталь H18K9M5T)	225
Коррозионностойкие стали	226
Коррозионностойкие стали и сплавы (А. Ю. Акимова)	229
Общие сведения	229
Хромистые стали мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного классов	230
Высокопрочные хромоникелевые стали аустенитно-мартенситного класса	233
Хромоникелевые и хромомарганцевоникелевые стали аустенитно-ферритного и аустенитного классов	238
Стали аустенитно-ферритного класса	238
Хромоникелевые стали аустенитного класса	238
Хромомарганцевоникелевые и безникелевые стали аустенитного класса	242
Коррозионностойкие (кислотостойкие) сплавы	243
Жаропрочные стали и сплавы (А. М. Борздыка)	245
Стали и сплавы с особыми физическими свойствами (В. А. Федорович)	259
Электротехнические стали	259
Магнитно-мягкие сплавы	262
Магнитно-твердые сплавы	266
Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения	271
Сплавы с высоким электрическим сопротивлением	274
Стали специальных способов выплавки (А. С. Николаев)	277
Характеристика специальных способов выплавки	277
Влияние специальных способов выплавки на свойства стали	279
Основные области применения	287
Сортамент продукции	288
Перспективы развития	288
Термическая обработка стали (Ю. М. Лахтин)	289
Основные виды термической обработки	289
Нагрев для термической обработки	289
Охлаждение при термической обработке	306
Отпуск	320
Химико-термическая обработка стали (Ю. М. Лахтин)	323
Цементация	323
Технология цементации	327
Термическая обработка стали после цементации и свойства цементованных деталей	334

Свойства цементованного слоя	336
Азотирование	338
Технология газового азотирования	341
Азотирование в тлеющем разряде (нонное азотирование)	347
Свойства азотированной стали	348
Азотирование в жидких средах (низкотемпературное цианирование, углеродоазотирование, тенифер-процесс)	352
Азотирование с добавками углеродосодержащих газов (низкотемпературная нитроцементация, углеродоазотирование, никотрирование)	356
Высокотемпературная нитроцементация (азотонауглероживание, карбонитрирование)	356
Высокотемпературное цианирование (азотонауглероживание)	360
Борирование	361
Диффузионное насыщение стали металлами	363
Алитирование (алюминирование)	363
Хромирование	365
Силицирование	365
Цинкование	368
Чугун (В. М. Шестопал, М. И. Жебин)	368
Классификация	368
Механические свойства	373
Жаростойкость и жаропрочность	373
Химические свойства	380
Физические свойства	383
Технологические свойства	390
Список литературы	392

Глава 3

Цветные и тугоплавкие металлы и сплавы

Припои и подшипниковые материалы (О. С. Квурт, А. С. Гуляев)	395
Припои	395
Подшипниковые материалы	407
Медь, никель и их сплавы (Р. Е. Шпичинецкий, Е. С. Шпичинецкий)	415
Медь	415
Латуни	431
Бронзы	441
Медноникелевые сплавы	447
Никель	455
Никелевые сплавы	459
Жаропрочные сплавы меди (А. К. Николаев)	464
Алюминий и его сплавы (А. В. Мельников)	464
Алюминий	465
Деформируемые алюминиевые сплавы	465
Коррозионностойкие свариваемые сплавы на основе систем Al—Mn и Al—Mg	465
Коррозионностойкие сплавы на основе системы Al—Mg—Si	468
Конструкционные сплавы на основе системы Al—Cu—Mg	472
Жаропрочные сплавы на основе системы Al—Cu—Mn	479
Жаропрочные ковочные сплавы на основе системы Al—Cu—Mg—Ni—Fe	479
Ковочные сплавы на основе системы Al—Cu—Si—Mg—Mn (AK6, AK8)	483

Конструкционные высокопрочные сплавы на основе системы Al—Zn—Mg—Cu	483
Литейные алюминиевые сплавы	487
Сплавы на основе системы Al—Si	487
Сплавы на основе системы Al—Si—Cu	491
Сплавы на основе системы Al—Mg	491
Сплавы на основе системы Al—Cu	491
Сплавы на основе сложных систем	498
Цинк и его сплавы (О. С. Каурт, А. С. Гуляев)	498
Сплавы на основе цинка	501
Цинковые антифрикционные сплавы	503
Магний и его сплавы (М. Е. Дриц)	506
Сверхлегкие магниевые сплавы	521
Магниевые сплавы со специальными физическими и химическими свойствами	523
Титан и его сплавы (Б. К. Вульф)	525
Титан	525
Титановые сплавы	530
Тугоплавкие металлы (Д. А. Прокошкин, Е. В. Васильева)	547
Ниобий	548
Тантал	551
Молибден	554
Вольфрам	558
Химико-термическая обработка металлов для защиты от окисления (Б. Н. Арзамасов)	561
Список литературы	582

Глава 4

Композиционные и неметаллические материалы

Волокнистые композиционные материалы конструкционного назначения (К. И. Портной, Г. М. Гуняев)	584
Пластические массы (В. К. Ефремов, В. Н. Евсеев)	599
Основные сведения	599
Методы испытаний	601
Общие свойства	602
Классификация пластмасс по механическим свойствам	603
Качественная оценка, методы переработки и области применения основных конструкционных пластмасс (табл. 6)	604
Физико-механические и теплофизические свойства термопласти- ческих пластмасс низкой прочности (табл. 7)	628
Изменение свойств термопластов низкой прочности под действием внешних факторов (табл. 8—17)	636
Физико-механические и теплофизические свойства термореактив- ных пластмасс низкой прочности (табл. 18)	641
Физико-механические и теплофизические свойства термопласти- ческих пластмасс средней прочности (табл. 19)	646
Изменение свойств реактопластов низкой прочности под действием внешних факторов (табл. 20)	648
Изменение свойств термопластов средней прочности под влиянием внешних факторов (табл. 21—30)	649

Физико-механические и теплофизические свойства термореактивных пластмасс средней прочности (табл. 31)	658
Изменение свойств термореактивных пластмасс средней прочности под влиянием внешних факторов (рис. 23 и табл. 32, 33)	660
Физико-механические и теплофизические свойства термопластичных и термореактивных пластмасс высокой прочности (табл. 34—37)	662
Керамика и ситаллы (В. Л. Балкевич)	667
Керамика	668
Окисная керамика	668
Фарфор	671
Химически стойкая керамика	672
Каменное литье	673
Ситаллы	674
Сортамент (Е. А. Скореходов)	674
Болванки, заготовки, прутки, профили	682
Листы, ленты, полосы	690
Проволока	699
Трубы (табл. 66, 67)	700
Список литературы	702
Предметный указатель	

Глава I

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИХ ОЦЕНКИ

МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Характеристика и виды механических испытаний

В зависимости от характера напряженного состояния, создаваемого в испытуемом материале, и условий его нагружения различают несколько видов механических испытаний.

Статические испытания — когда нагрузка, прилагаемая к образцу, сравнительно медленно и плавно возрастает. К статическим испытаниям относятся:

а) испытания на растяжение. При этом испытуемый материал находится под действием нормальных S и касательных τ напряжений. Зависимость между максимальными касательными напряжениями и максимальными нормальными растягивающими напряжениями следующая: $\frac{\tau_{\max}}{S_{\max}} = 0,5$;

б) испытания на сжатие. В этом случае $\frac{\tau_{\max}}{S_{\max}} = 2$;

в) испытания на кручение, когда $\frac{\tau_{\max}}{S_{\max}} \approx 0,8$;

г) испытания на изгиб. При этом материал в соответствующих зонах подвергается действию сжимающих и растягивающих напряжений;

д) испытания на твердость. Когда испытываемые объемы материала находятся в условиях неравномерного всестороннего сжатия. Чем больше растягивающие напряжения по сравнению с касательными в испытаниях и чем меньше, следовательно, отношение $\frac{\tau_{\max}}{S_{\max}}$, тем более «жестким» является испытание. Наиболее «жесткий»

вид испытания — испытание на растяжение; среднее по «жесткости» испытание на кручение и наиболее «мягкое» — метод осевого и особенно объемного сжатия. Испытание на изгиб по степени жесткости занимает промежуточное положение между испытанием на растяжение и испытанием на кручение.

Для выбора способа испытания необходимо учитывать свойства испытываемого материала. Один и тот же способ испытания может быть «мягким» для одного материала и «жестким» для другого. Так, испытания на растяжение являются «жестким» способом нагружения для таких хрупких материалов, как чугун и закаленная сталь, и «мягким» способом нагружения для отожженной или высоко отпущенной стали.

Динамические испытания — когда нагрузка прилагается с ударом и с большой скоростью — ударное растяжение, ударный изгиб (ударная вязкость).

Испытания при повторно-переменной нагрузке. При этом нагрузка прилагается статически или динамически многократно, чаще всего в условиях изгиба или кручения (реже сжатия или растяжения).

Статические и динамические испытания в основном проводят при комнатной температуре, но для некоторых материалов применяют испытания при повышенной или пониженной температуре.

Каждое из указанных испытаний не определяет всех механических свойств материала и его поведения в готовых деталях, а лишь обнаруживает те его свойства, которые характерны для него в данном напряженном состоянии. Тем не менее механические испытания образцов стандартных размеров и формы в условиях одинакового напряженного состояния дают основные исходные данные, позволяющие сравнивать и оценивать свойства различных материалов. Далее перечисленные виды испытаний рассмотрены подробнее.

Испытания на растяжение при комнатной температуре (ГОСТ 1497—73)

При растяжении образца на испытательной машине до разрушения фиксируются графически на диаграмме (рис. 1) зависимости между приложенной нагрузкой и удлинением образца — так называемые кривые деформации.

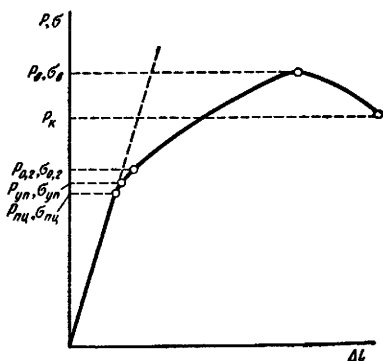


Рис. 1. Диаграмма нагрузка (напряжение) — удлинение

В практике испытания материалов действительно определяемую (фиксируемую) диаграмму в координатах нагрузка — удлинение заменяют обычно диаграммой напряжение — удлинение. Последняя диаграмма не соответствует истинному ходу испытания. Действительно, в этом случае нагрузку, измеряемую при непрерывно изменяющемся сечении, относят к начальному сечению образца, т. е. сечению, которое в момент измерения уже не существует. Таким образом определяют условные напряжения. Если нагрузку относят к действительному сечению, то получают значения истинных напряжений.

При построении диаграммы истинных напряжений в функции удлинения или сужения поперечного сечения получают непрерывное возрастание напряжений вплоть до разрушения образца. Кривые истинных напряжений дают представление о физических процессах, протекающих в материале, и имеют особое значение для прочностных расчетов и технологии обработки металлов давлением.

При испытаниях на растяжение определяют следующие характеристики:

предел пропорциональности (условный);
предел упругости (условный);
предел текучести (физический и условный);
временное сопротивление;
истинное сопротивление;

относительное удлинение и сужение после разрыва.

При испытаниях на растяжение приняты следующие условные обозначения (ГОСТ 1497—73):

- l — рабочая длина образца, мм;
- l_0 — участок образца, на котором определяют удлинение, мм;
- l_k — длина расчетной части образца после разрыва, мм;
- d_0 — начальный диаметр в рабочей части цилиндрического образца, мм;
- d_k — минимальный диаметр цилиндрического образца после разрыва, мм;
- a_0 — начальная толщина в рабочей части плоского образца или полосы, мм;
- b_0 — начальная ширина в рабочей части плоского образца или полосы, мм;
- F_0 — начальная площадь поперечного сечения в рабочей части образца, мм²;
- F_k — минимальная площадь поперечного сечения образца после его разрыва, мм²;
- P — осевая растягивающая нагрузка (кгс), действующая на образец в данный момент испытания;
- σ — напряжение (кгс/мм²), определяемое отношением нагрузки P к начальной площади поперечного сечения образца F_0 ;
- S — истинное напряжение (кгс/мм²), определяемое отношением нагрузки P к действительной для данного момента испытания площади поперечного сечения образца;
- Δl — абсолютное удлинение образца, мм;
- $\sigma_{\text{пц}}$ — предел пропорциональности (условный), кгс/мм² — напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации $P - \Delta l$ в точке $P_{\text{пц}}$ с осью нагрузок, увеличивается на 50% от своего значения на линейном упругом участке;
- $\sigma_{0.05}$ — предел упругости (условный) *, кгс/мм² — напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05% от длины участка образца, равного базе тензометра;
- σ_T — предел текучести (физический), кгс/мм² — наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки;
- $\sigma_{0.2}$ — предел текучести (условный), кгс/мм² — напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,2%;
- σ_B — временное сопротивление, кгс/мм² — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{max} , предшествующей разрушению образца;

* Может быть определен и при меньшем допуске на остаточную деформацию.

S_k — истинное сопротивление разрыву (разрушению), кгс/мм² — напряжение, определяемое отношением нагрузки P_k в момент разрыва к площади поперечного сечения образца в месте разрыва F_k ;

δ — относительное удлинение (%) после разрыва — отношение приращения расчетной длины образца после разрыва к ее первоначальной величине;

ψ — относительное сужение после разрыва, % — отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения образца.

Форма и размеры образцов. Для испытаний на растяжение применяют цилиндрические или плоские образцы с начальной расчетной длиной $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$ (короткие) или $l_0 = 11,3 \sqrt{F_0}$ (длинные) диаметром от 3 и более или толщиной от 0,5 мм и более.

Рекомендуется применять короткие образцы (цилиндрические — в основном диаметром $d_0 = 10$ мм).

Формы, размеры, допускаемые отклонения по размерам образцов должны соответствовать ГОСТ 1497—73.

Определение характеристик материала, получаемых при испытании

Предел пропорциональности $\sigma_{пд}$. Нагружают образцы любым способом, обеспечивающим медленное возрастание нагрузки и возможность приостановки нагрузки с точностью до наименьшего деления шкалы силоизмерителя. До нагрузок, составляющих 70—80% от нагрузки ожидаемого предела пропорциональности, образец нагружают крупными, а далее малыми ($\Delta\sigma \approx 2$ кгс/мм²) ступенями. Когда приращение удлинения при малой ступени нагружения превысит среднее значение приращения на линейном упругом участке в 2—3 раза, испытание прекращают. Находят нагрузку $P_{пд}$, при которой приращение удлинения превосходит приращение удлинения на упругом участке на заданный допуск (50%). Предел пропорциональности (условный) находят по формуле $\sigma_{пд} = P_{пд}/F_0$.

Предел упругости $\sigma_{0,05}$. К испытываемому образцу прикладывают нагрузку, соответствующую напряжению не более 10% от $\sigma_{0,05}$. Устанавливают тензометр и нагружают, а затем разгружают образец до начального напряжения и измеряют остаточную деформацию. Определяют нагрузку $P_{0,05}$, после которой остаточное удлинение составляет 0,05%.

Предел упругости (условный) $\sigma_{0,05}$ вычисляют по формуле $\sigma_{0,05} = P_{0,05}/F_0$.

Допускается определять предел упругости по диаграмме испытаний нагрузка—удлинение.

Для этого по оси деформации в соответствующем масштабе откладывают деформацию 0,05% и из полученной точки параллельно упругому участку до пересечения с кривой деформации проводят прямую. Проекция полученной точки пересечения на ось нагрузки дает $P_{0,05}$.

Предел текучести (физический) σ_T определяется по диаграмме растяжения, а также по явно выраженной остановке стрелки силоизмерителя.

Вычисляют по формуле $\sigma_T = P_T/F_0$.

Предел текучести (условный) $\sigma_{0,2}$ определяют аналогично пределу упругости, но только при определении $\sigma_{0,2}$ остаточная деформация составляет 0,2%.

Находят по формуле $\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0$.

Временное сопротивление σ_B . Образец подвергают растяжению под действием плавно возрастающей нагрузки до разрушения. Наибольшую нагрузку, предшествующую разрушению образца, принимают за нагрузку $P_{\max}$, соответствующую временному сопротивлению.

Временное сопротивление σ_B вычисляют по формуле

$$\sigma_B = P_{\max}/F_0.$$

Истинное сопротивление разрыву S_K . Его определяют по формуле $S_K = P_K/F_K$.

Относительное удлинение δ определяют путем измерения расстояния между метками (кернами), нанесенными на рабочей части образца. При этом разорванный образец необходимо складывать так, чтобы оси его половинок образовали прямую линию. Вследствие влияния головок образца сравнимые величины удлинения можно получить только при условии, что расстояние от места разрыва до ближайшей крайней метки составляет не менее 1/3 расчетной длины при коротких и не менее 1/5 при длинных образцах.

Находят по формуле

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100\%.$$

Относительное сужение ψ . В случае цилиндрических образцов измеряют минимальный диаметр в месте разрыва в двух взаимно перпендикулярных направлениях и по его среднему значению определяют F_K . В случае плоских образцов сужение определяют по наименьшей толщине и ширине.

Вычисляют по формуле

$$\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \cdot 100\%.$$

Испытания на растяжение при пониженных температурах (ГОСТ 11150—65)

Определяют при температуре от 0 до -100°C и при температуре кипения технического жидкого азота (-196°C), а в некоторых случаях жидкого водорода (-259°C) и гелия (-269°C) следующие характеристики: предел текучести (физический и условный), временное сопротивление, истинное сопротивление разрыву (разрушению), относительные удлинение и сужение. Испытуемый образец помещают либо непосредственно в охлаждающую жидкость, представляющую собой смесь этилового спирта (ацетона) с твердой углекислотой, или жидкий азот (водород, гелий), либо в специальные камеры — криостаты.

Методика определения указанных выше характеристик аналогична методике испытаний при комнатной температуре.

Испытания (кратковременные) на растяжение при повышенных температурах (ГОСТ 9651—73)

При кратковременных статических испытаниях при повышенных (до 1200°С) температурах определяют следующие характеристики:

предел текучести (физический) σ_T^t , кгс/мм²;

предел текучести (условный) $\sigma_{0,2}^t$, кгс/мм²;

временное сопротивление σ_B^t , кгс/мм²;

относительное удлинение δ^t , %;

относительное сужение ψ^t , %.

Для испытаний используют цилиндрические и плоские образцы (см. ГОСТ 9651—73).

Продолжительность нагрева до температуры испытания должна быть не более 1 ч, время выдержки 20—30 мин. Отклонения от заданной температуры испытания не должны превышать: при нагреве до 600°С — ±3°С, от 600 до 900°С — ±4°С, от 900 до 1200°С — ±6°С. Скорость перемещения подвижного захвата при испытании должна составлять 0,04—0,1 от расчетной длины образца за 1 мин. Определяют перечисленные выше характеристики таким же образом, что и при испытаниях на растяжение при комнатной температуре (см. с. 14—15). О поведении деталей при повышенных температурах нельзя судить только по результатам кратковременных испытаний, так как с течением времени деформация увеличивается под действием постоянной нагрузки (явление ползучести материалов). Тем не менее предел текучести, определяемый при повышенных температурах, может служить основой для сравнительной оценки материалов, а в некоторых случаях (при сравнительно небольшом сроке службы деталей) и расчетной характеристикой.

Испытания на ползучесть (ГОСТ 3248—60)

Свойство материала медленно и непрерывно пластически деформироваться при постоянном напряжении, которое может быть существенно ниже предела текучести, называется ползучестью. В зависимости от величины приложенной нагрузки, температуры испытания и свойств материала процесс деформации при увеличении его продолжительности может протекать с небольшой скоростью или, наоборот, быстро увеличиваться вплоть до разрушения.

Наиболее часто ползучесть определяют в условиях испытаний на растяжение. Рекомендуется применять цилиндрические образцы (рис. 2) диаметром 10 мм и расчетной длиной 100 и 200 мм и плоские шириной 15 мм и длиной 100 мм. Установленный в захватах испытательной машины и помещенный в печь образец нагревают до заданной температуры и выдерживают не менее 1 ч, после чего к нему прикладывают предварительную нагрузку (нагрузка не должна вызывать напряжения более 1 кгс/мм²) и снимают показания прибора для измерения деформации, а затем плавно нагружают образец до заданной нагрузки, одновременно измеряя деформацию. Определяют предел ползучести при допусках на удлинение от 0,1 до 1% при длительности испытаний 100, 300, 500 и 1000 ч, если по условиям исследования не требуется иная длительность или иной допуск на деформацию. В случае определения

предела ползучести по скорости ползучести продолжительность испытания должна быть не менее 2000—3000 ч, причем прямолинейный участок кривой ползучести должен быть не менее 500 ч.

Процесс испытания изображают в виде первичной кривой ползучести в координатах относительное удлинение — время (рис. 3) и определяют напряжение, соответствующее условному пределу ползучести материала.

Условный предел ползучести — напряжение, которое за установленное время испытания при данной температуре вызывает заданное удлинение образца (суммарное или остаточное) или заданную скорость ползучести на линейном участке кривой ползучести.

Суммарное или остаточное удлинение (δ_c, δ_o) — изменение расчетной длины образца по отношению к первоначальной расчетной длине.

Определяют условный предел ползучести следующим образом: испытывают не менее четырех образцов при данной температуре и разных напряжениях. На основе полученных кривых ползучести (см. рис. 3) строят диаграммы зависимости между напряжением и удлинением или между напряжением и средней равномерной скоростью ползучести на прямолинейном участке в логарифмической системе координат. По этим диаграммам находят искомое напряжение.

После того как искомое напряжение будет найдено не менее чем при трех разных температурах испытания, может быть построена диаграмма зависимости между напряжением и температурой.

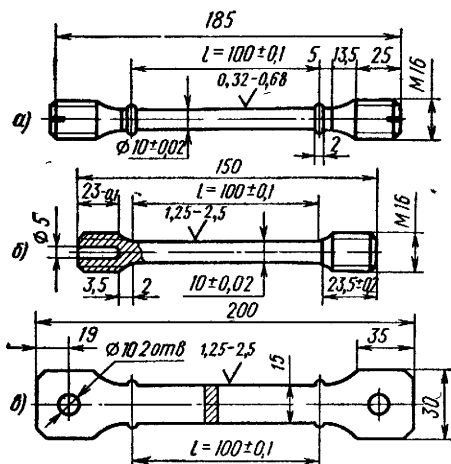


Рис. 2. Образцы, применяемые при испытаниях на ползучесть:

а и б — цилиндрические; в — плоский

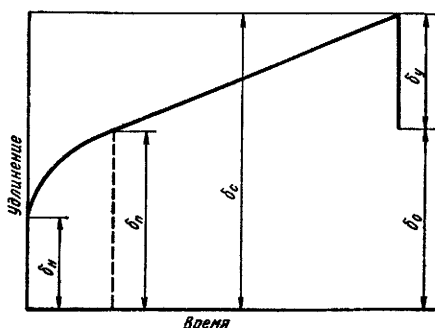


Рис. 3. Кривая ползучести:

δ_n — удлинение при нагружении; δ_p — полное (упругое + остаточное) удлинение; δ_c — суммарное удлинение; δ_y — упругое удлинение; δ_o — остаточное удлинение

Если предел ползучести определяют по величине деформации, то его обозначают буквой σ с тремя числовыми индексами, характеризующими температуру испытания, заданное удлинение и заданную продолжительность испытания. Например $\sigma_{0,2/100}^{700}$ — предел ползучести при допуске на деформацию 0,2% за 100 ч при температуре 700° С. При этом необходимо указать, по суммарной или остаточной деформации определялся предел ползучести.

Если предел ползучести определяют по скорости ползучести, то его обозначают буквой σ с двумя числовыми индексами, обозначающими температуру испытания и заданную скорость ползучести. Например, $\sigma_{1 \cdot 10^{-5}}^{600}$ — предел ползучести при скорости ползучести $1 \cdot 10^{-5}$ %/ч и температуре 600° С. При этом необходимо дополнительно указать время испытания, за которое была достигнута заданная скорость ползучести.

Испытания на длительную прочность (ГОСТ 10145—62)

Предел длительной прочности — наибольшее напряжение, вызывающее разрушение материала за определенное время испытания при постоянной температуре.

Применяют следующие основные образцы:

а) цилиндрические диаметром 5, 7 и 10 мм и длиной 25, 70, 50 и 100 мм (применяют и надрезанные образцы);

б) плоские с начальной расчетной длиной $l_0 = 5,65 \sqrt{F_0}$.

Образец, установленный в захватах испытательной машины, помещают в печь, нагревают до заданной температуры, выдерживают при этой температуре не менее 1 ч, также плавно прикладывают нагрузку.

Время до разрушения при заданной величине напряжения является основным показателем данного вида испытания. Продолжительность испытания устанавливают для каждого материала в зависимости от его назначения. Рекомендуются определять пределы длительной прочности на основе испытаний длительностью 50, 100, 500, 1000, 3000, 5000 или 10 000 ч.

В результате испытаний устанавливают зависимость между напряжением и временем до разрушения, которая может быть выражена графиками, построенными в логарифмической, полулогарифмической или в иной системе координат. По этим графикам путем интерполяции или экстраполяции определяют предел длительной прочности материала. Не рекомендуется проводить экстраполяцию на срок службы, превышающий максимальную продолжительность испытания более чем на один—полтора порядка.

Предел длительной прочности обозначается буквой σ с двумя числовыми индексами, показывающими температуру и продолжительность испытания. Например, σ_{1000}^{700} — предел длительной прочности за 1000 ч испытания при 700° С. Определяют относительные удлинение и сужение обычным порядком.

Испытания на кручение (ГОСТ 3565—58)

Испытания на кручение довольно широко применяют для пластичных, но чаще для малопластичных металлов и сплавов, так как они имеют ряд преимуществ по сравнению с испытаниями на растяжение.

Образцы (рис. 4) при кручении не образуют шейки, вследствие чего крутящий момент возрастает вплоть до разрушения. Пластическая деформация протекает почти равномерно по длине образца. Это позволяет более надежно определять деформации и напряжения в очень пластичных, особенно чистых металлах. При испытаниях на растяжение такие металлы образуют значительную шейку. Происходящее при этом неодинаковое изменение сечения растягиваемого образца затрудняет точный расчет деформаций.

Испытания на кручение являются более мягким способом нагружения, так как касательные напряжения близки по величине к нормальным напряжениям ($\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} \approx 0,8$).

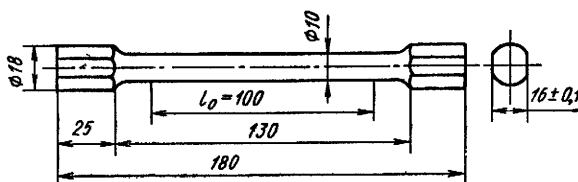


Рис. 4. Образец, применяемый при испытаниях на кручение

Поэтому малопластичные металлы, испытания которых на растяжение связаны со значительными трудностями, приобретают при испытаниях на кручение измеримую деформацию, что позволяет определить их основные механические свойства.

Испытания на кручение позволяют по виду излома образцов определить характер разрушения. Излом, перпендикулярный (или параллельный) к оси образца, указывает на вязкое разрушение (от среза) под действием касательных напряжений. Излом по винтовой линии образца указывает на хрупкое разрушение (от отрыва) вследствие растягивающих напряжений.

При испытаниях на кручение определяют различные характеристики:

Определения модуля упругости G при сдвиге в процессе испытания на кручение. Закрепив в машине образец, нагружают его крутящим моментом, соответствующим начальному касательному напряжению (для стали около 3 кгс/мм², для других металлов — не более 10% от ожидаемого предела пропорциональности), после чего устанавливают тензомер, отметив при этом нулевое значение угла закручивания.

Нагружают образец крутящим моментом, не выводящим напряжение образца за предел пропорциональности.

Модуль упругости при сдвиге вычисляют по формуле

$$G = \frac{Ml}{(\varphi_1 - \varphi_2) J_p},$$

где M — крутящий момент за вычетом начального, кгс/мм; l — расчетная длина, мм; φ_1 и φ_2 — угловые показатели на концах расчетной длины, рад; J_p — полярный момент инерции, мм⁴.

Определение предела пропорциональности при кручении ($\tau_{\text{пн}}$). Начало испытания такое же, как при определении модуля упругости.

Далее образец догружают вначале большими, а затем малыми ступенями нагрузки, отмечая после каждой ступени нагружения угловую деформацию. Когда угловая деформация от нагружения при малой ступени превысит в 2—3 раза деформацию, полученную от первого малого нагружения, испытание прекращают.

Результат испытания вычисляют следующим образом: на участке, где еще не наблюдается отклонение от закона Гука, определяют средний угол закручивания на малую ступень нагружения, найденное значение увеличивают на 50%. Крутящий момент $M_{\text{пц}}$, соответствующий точке этой полуступенной деформации, которую находят на соответствующем участке малой ступени нагружения, и есть искомая величина для расчета предела пропорциональности.

Условный предел пропорциональности вычисляют по формуле

$$\tau_{\text{пц}} = \frac{M_{\text{пц}}}{W},$$

где $M_{\text{пц}}$ — крутящий момент, кгс/мм; W — момент сопротивления, мм³ (для круглого образца $W = \frac{\pi d^3}{16}$).

Определение предела текучести (условного) при кручении $\tau_{0,3}$. Испытания проводят так же, как при определении предела пропорциональности.

Деформацию до предела пропорциональности считают упругой, за пределом пропорциональности — остаточной.

По полученным при испытании значениям моментом M и по угловым показателям $\varphi_1 - \varphi_2$, соответствующим пределу пропорциональности и последующим ступеням, вычисляют значения наибольшего касательного напряжения $\tau = \frac{M}{W}$ в кгс/мм² и относительный сдвиг

$$\gamma = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) d}{2l} \cdot 100\%.$$

По значению $\gamma + 0,3\%$ (допускаемый для предела текучести сдвиг) находят в ряду вычисленных τ и γ (допускается интерполяция) искомое значение предела текучести $\tau_{0,3}$.

Предел текучести может быть найден графически. Для этого строят диаграмму зависимости τ от γ . По оси абсцисс откладывают значение принятого для предела текучести остаточного сдвига, равного 0,3%, и от этой точки проводят прямую, параллельную начальному прямолинейному участку, до пересечения с кривой диаграммы. Ордината точки пересечения — искомый предел текучести $\tau_{0,3}$.

Определение истинного предела прочности при кручении f_k . Для определения f_k образец нагружают до появления заметной пластической деформации. После этого образец догружают небольшими одинаковыми ступенями и отмечают для нескольких ступеней крутящий момент M и соответствующие ему угловые показатели φ_1 и φ_2 .

Для нескольких разностей $\varphi_1 - \varphi_2$, соответствующих точкам кривой непосредственно перед разрушением, вычисляют удельный угол закручивания θ в рад.: $\theta = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l}$, где l — расчетная длина образца.

На основании полученных данных строят участок кривой зависимости M от θ , и для точки, соответствующей наибольшему моменту,

определяют графически величину $\frac{dM}{d\theta}$, равную тангенсу угла наклона касательной в данной точке к оси абсцисс (θ).

Истинный предел прочности определяют по формуле

$$t_k = \frac{4}{\pi d^3} \left(3M_k + \theta \frac{dM}{d\theta} \right),$$

где M_k — наибольший крутящий момент, предшествующий разрушению образца.

Определение условного (относительного) предела прочности при кручении ($\tau_{пч}$). Образец нагружают до разрушения, отметив величину момента кручения, предшествующего разрушению, и угловые показатели φ_1 , φ_2 на концах расчетной длины.

Условный предел прочности при кручении (кгс/мм²)

$$\tau_{пч} = \frac{M_k}{W}.$$

Определение остаточного (относительного) сдвига при кручении. Остаточный сдвиг при кручении (%) определяют по формуле

$$\gamma = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) d}{2l} \cdot 100\%$$

или

$$\gamma = \frac{\theta d}{2} \cdot 100\%,$$

где φ_1 и φ_2 — угловые показатели перед разрушением образца, а

$$\theta = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l}.$$

Для пластичных металлов допускается принимать общий сдвиг за остаточный. Для малопластичных вычитают величину упругой деформации, вычисляемой по формуле

$$\gamma_y = \frac{\tau}{G} \cdot 100\%,$$

где τ — предел прочности при кручении; G — модуль сдвига.

Испытания на изгиб

Испытания на изгиб как более мягкий способ нагружения, чем испытания на растяжение, применяют для малопластичных металлов, главным образом чугунов (ГОСТ 2055—43), а также для закаленных и отпущенных сталей в состоянии высокой твердости (например, для инструментальных сталей).

Для испытаний применяют образцы круглого или прямоугольного (лучше квадратного) сечения.

Испытывать на изгиб можно:

сосредоточенной нагрузкой, приложенной в середине пролета (рис. 5), в этом случае наибольший изгибающий момент

$$M_{изг} = \frac{Pl}{4};$$

двумя разными нагрузками $P/2$, приложенными на равных расстояниях от опор (испытания на чистый изгиб); расстояние от опоры a целесообразно принимать равным $1/3$ расчетной длины образца (см. рис. 5).

При чистом изгибе $M_{изг} = \frac{Pa}{2}$.

Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг} = \frac{M_{изг}}{W}$,

где W — момент сопротивления.

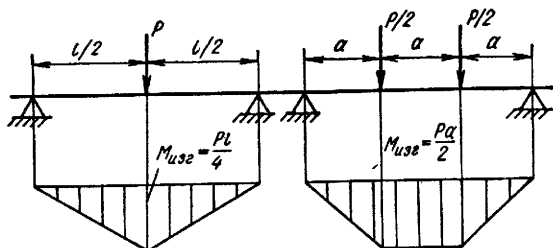


Рис. 5. Схема испытания на изгиб:

a — сосредоточенной нагрузкой; б — чистый изгиб

Для образцов из хрупких материалов, разрушению которых предшествует очень небольшая пластическая деформация, значения момента сопротивления близки к $\frac{bh^2}{6}$ и $\frac{\pi d^3}{12}$ (соответственно прямоугольный и круглый образцы).

Испытания на усталость (ГОСТ 2860—65)

Испытания на усталость применяют (табл. 1), чтобы характеризовать поведение металла в условиях повторно-переменного приложения нагрузки. В таких условиях у металлов более низкая прочность по сравнению с прочностью, определяемой при статических испытаниях. Это происходит вследствие того, что под действием большого числа циклов переменных нагрузок в наиболее нагруженном или ослабленном месте металла зарождается и развивается трещина и образуется участок усталостного излома.

Когда оставшаяся неповрежденной часть сечения уже не сможет выдержать приложенной нагрузки, наступает быстрое (внезапное) разрушение детали, которое проявляется в изломе как зона долома.

Под усталостью понимают процесс постепенного накопления повреждений материала под действием повторно-переменных напряжений, приводящий к уменьшению долговечности, образованию трещин и разрушению.

Свойства материала противостоять усталости называют **выносливостью**.

Наибольшее напряжение, которое выдерживает металл без разрушения при повторении заранее заданного числа циклов переменных нагрузок, называют **пределом выносливости**.

1. Термины, определения и обозначения, принятые при испытаниях на усталость

Термин	Определение
Цикл напряжений	Совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период процесса их изменения; $\sigma = \sigma_m + \sigma_a f(t);$ $\tau = \tau_m + \tau_a f(t),$
Максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max}$	где σ_m, τ_m — среднее напряжение цикла; σ_a, τ_a — амплитуда цикла; $f(t)$ — непрерывная периодическая функция, характеризующая форму цикла и, как правило, близкая к синусоиде Наибольшее по алгебраической величине напряжение цикла; равно алгебраической сумме среднего напряжения цикла и амплитуды (рис. 6); $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a;$ $\tau_{\max} = \tau_m + \tau_a$
Минимальное напряжение цикла $\sigma_{\min}$	Наименьшее по алгебраической величине напряжение цикла; равно алгебраической разности среднего напряжения цикла и амплитуды (см. рис. 6); $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a;$ $\tau_{\min} = \tau_m - \tau_a$
Среднее напряжение цикла σ_m	Статическая (положительная или отрицательная) составляющая цикла напряжений; равно алгебраической полусумме максимального и минимального напряжений: $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \quad \tau_m = \frac{\tau_{\max} + \tau_{\min}}{2}$
Амплитуда напряжений цикла σ_a	Наибольшее (положительное) значение переменной составляющей цикла напряжений; равна алгебраической полуразности максимального и минимального напряжений цикла; $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad \tau_a = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{2}$
Симметричный цикл напряжений	Цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны по величине, но противоположны по знаку (рис. 7)
Ассимметричный цикл напряжений	Цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения имеют разные величины (рис. 7)
Коэффициент асимметрии цикла	Характеристика степени асимметрии цикла напряжений; равен алгебраическому отношению минимального напряжения цикла к максимальному: $R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}; \quad R_\tau = \frac{\tau_{\min}}{\tau_{\max}}$

Термин	Определение
Номинальное напряжение	Напряжение, вычисленное по формулам сопротивления материалов без учета концентрации напряжений, остаточных напряжений и перераспределения напряжений в процессе деформирования (испытания); $\sigma_n = \frac{M_{изг}}{W} \cdot \frac{P}{F} \cdot \frac{M_k}{W_p}$ — соответственно при изгибе, растяжении — сжатии и кручении
Предел выносливости	Характеристика выносливости материала, имеющего горизонтальный участок на кривой усталости. При испытании образцов с постоянным коэффициентом асимметрии цикла (или с постоянным средним напряжением цикла), предел выносливости определяют соответственно как наибольшее значение максимального напряжения цикла (или как наибольшее значение амплитуды напряжений цикла), при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого числа циклов. Предел выносливости выражают в номинальных напряжениях и обозначают σ_R , τ_R , где R — коэффициент асимметрии цикла. При симметричном цикле предел выносливости обозначают через σ_{-1} , τ_{-1}
Предел ограниченной выносливости	Характеристика выносливости материала в пределах спадающего участка кривой усталости
Усталостная долговечность	Характеристика выносливости материала; определяется числом циклов, пройденных образцом перед разрушением при определенном (задаваемом) напряжении

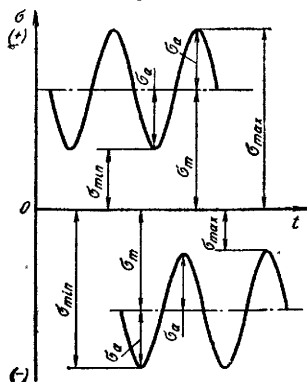


Рис. 6. Параметры циклов напряжений в области растяжения и сжатия

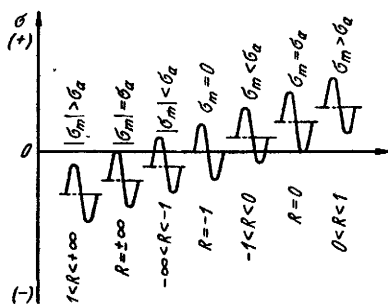


Рис. 7. Разновидности циклов напряжений и соответствующие им значения коэффициентов асимметрии

Испытания на усталость выполняют:
 при простых видах деформирования стандартных образцов (изгиб, растяжение — сжатие, кручение);
 при наличии и отсутствии концентрации напряжений;
 при симметричных и асимметричных циклах;
 в упругой и малоциклового упругопластической области;
 при нормальной (примерно 20°C), повышенной и пониженной температурах;
 при наличии и отсутствии агрессивной среды.

Образцы, условия и порядок проведения испытаний. Для испытания металлов на усталость применяют гладкие образцы круглого и прямоугольного профиля, а для определения чувствительности материала к концентрации напряжений — образцы с надрезами: в виде кольцевой выточки V-образного профиля или двусторонних V-образных вырезов (соответственно для круглых и прямоугольных образцов) и в виде симметричного поперечного отверстия.

Образцы изготовляют по 2-му классу точности с чистотой поверхности, 9—10-го класса.

Испытания образцов проводят при напряжениях (деформациях), близких к синусоидальному закону их изменения во времени.

Нагружение образцов при испытании производят: а) при постоянных заданных максимальных или амплитудных напряжениях цикла в процессе всего испытания образца; б) при постоянных заданных максимальных или амплитудных деформациях цикла в процессе всего испытания образца.

Для построения кривой усталости и определения предела выносливости испытывают не менее 10 одинаковых образцов. При этом каждый образец испытывают только на одном уровне напряжений до разрушения или до базового числа циклов. На уровне предела выносливости должно быть испытано не менее двух образцов.

База испытаний для определения пределов выносливости в обычных условиях должна быть не ниже:

$10 \cdot 10^6$ циклов для материалов и сплавов, имеющих горизонтальный участок на кривой усталости, например, для конструкционных сталей.

$100 \cdot 10^6$ циклов для легких сплавов и других материалов, кривые усталости которых не имеют горизонтальных участков. Основным критерий разрушения при определении пределов выносливости и построении кривых усталости — полное разрушение образца.

Кривые усталости строят в координатах: ординаты — максимальные или амплитудные напряжения циклов в равномерном или логарифмическом масштабе, абсциссы — долговечности образцов в логарифмическом масштабе.

Кривые усталости при асимметричных циклах строят для серии одинаковых образцов, испытанных при одинаковых средних напряжениях или одинаковых коэффициентах асимметрии (рис. 8).

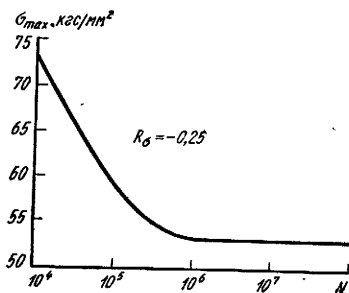


Рис. 8. Кривая усталости

Выносливость материала недостаточно характеризовать только величиной предела выносливости σ_R (τ_R), так как при прочих равных условиях последний зависит от коэффициента асимметрии цикла.

Эту зависимость устанавливают экспериментально (определяют предел выносливости при различных коэффициентах асимметрии R_σ или R_τ) и представляют графически в виде диаграмм предельных напряжений в координатах $\sigma_{\max}$ ($\sigma_{\min}$)/— σ_m (рис. 9). По оси абсцисс диаграммы откладывают средние напряжения цикла σ_m , а по оси ординат—соответствующие предельные значения максимального и минимального напряжений цикла $\sigma_{\max}$ и $\sigma_{\min}$.

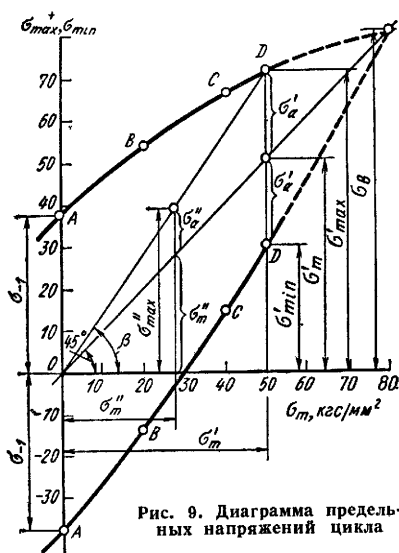


Рис. 9. Диаграмма предельных напряжений цикла

предел текучести σ_s , диаграмму предельных напряжений не строят. Теоретически обе ветви должны сходиться в точке E с ординатой σ_b , равной пределу прочности материала, т. е. $\sigma_m \approx \sigma_b$.

Специальные испытания. Испытания при повышенной и пониженной температурах выполняют при тех же видах деформации и на тех же образцах, что и при нормальной температуре.

Испытания в условиях агрессивной среды проводят при тех же видах деформации и на тех же образцах, что и при отсутствии агрессивной среды.

Испытания в малоцикловой области выполняют при переменном изгибе, растяжении — сжатии и кручении. В пределах данной серии образцов нагружение осуществляется: по заданным деформациям или перемещениям, по заданным напряжениям или нагрузкам. Частота схемы напряжений (усилий) — не более 50 цикл/мин.

Кривую малоцикловой усталости строят по осредненным результатам испытания образцов на 3—4 уровнях напряжений (усилий) или деформаций (перемещений), вызывающих полное разрушение или появление микротрещин при испытании до $2 \cdot 10^5$ циклов.

Верхний уровень напряжений или деформаций выбирают на уровне 0,7 от соответствующего разрушающего фактора, приложенного однократно, или на уровне 0,7 от предела прочности при растяжении. Кривые малоциклового усталости строят в координатах.

ординаты — максимальные или амплитудные разрушающие деформации или перемещения, абсциссы — число циклов до разрушения в равномерном, полулогарифмическом или двойном логарифмическом масштабах;

ординаты — коэффициенты нагрузки *, абсциссы — число циклов до разрушения в равномерном, полулогарифмическом или, двойном логарифмическом масштабе (рис. 10).

Испытания на ударную вязкость

При испытании на ударную вязкость (при динамическом изгибе) образец с надрезом, опирающийся концами на два упора, подвергают действию удара, который разрушает его.

Наличие надреза и повышенная скорость деформирования могут перевести металл в хрупкое состояние и выявить его склонность к хрупкому разрушению, т. е. те свойства металла, которые не обнаруживаются при статических испытаниях гладких образцов.

Хрупкое разрушение, наблюдаемое в деталях и конструкциях, зависит от характера напряженного состояния, химического состава металлического сплава и его структуры.

Склонностью к хрупкому разрушению обладают, как правило, металлы с решеткой объемноцентрированного куба, а следовательно, и стали (кроме сталей с аустенитной структурой)

Методы определения ударной вязкости при нормальной, пониженной и повышенной температурах регламентируются ГОСТ 9454—60, 9455—60 и 9456—60.

Для всех трех видов испытаний применяют надрезанные посередине образцы типа I, II, III, IV, V (рис. 11) согласно ГОСТ 9454—60.

В основном используют призматический образец типа I с размерами $10 \times 10 \times 55$ мм с надрезом посередине глубиной 2 мм и радиусом 1 мм. Кроме того, применяют образцы с полукруглым надрезом глубиной 3 и 5 мм с радиусом 1 мм и образец с V-образным надрезом под углом 45° , глубиной 2 мм и радиусом при вершине 0,25 мм.

Испытания образцов выполняют на маятниковых копрах с предельной энергией не более 30 кгс·м. Допускается применять копры с меньшей энергией удара.

Работу в кгс·м, затраченную на разрушение образца, определяют по формуле

$$A_H = Pl (\cos \beta - \cos \alpha),$$

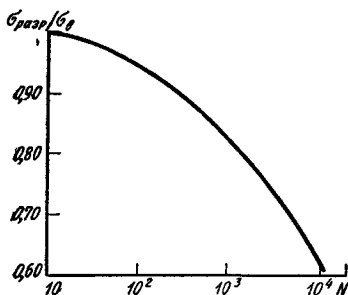


Рис. 10. Кривая усталости для упругопластической малоциклового области

* Коэффициент нагрузки — частное от деления циклического номинального напряжения или усилия на соответствующее разрушающее номинальное напряжение или нагрузку, приложенные однократно

где P — масса маятника, кгс; l — длина маятника, м; β и α — соответственно углы подъема маятника до и после излома образца, град.
Ударная вязкость (a_H) в (кгс·м)/см² определяется по формуле

$$a_H = \frac{A_H}{F},$$

где A_H — работа удара, затраченная на излом образца, кгс·м; F — площадь поперечного сечения, см².

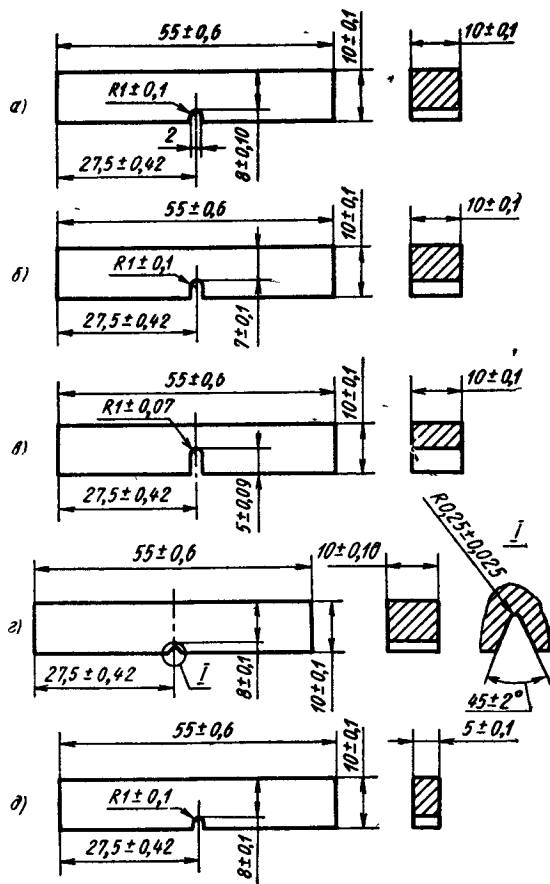


Рис. 11. Образцы, применяемые при испытаниях на ударную вязкость

(по ГОСТ 9454—60): а — тип I; б — тип II; в — тип III;
г — тип IV; д — тип V

В отдельных случаях, например для определения ударной вязкости хрупких материалов (в частности, сталей с твердостью выше $HRC\ 55$), применяют призматические образцы размером $10 \times 10 \times 55$ мм без надреза.

В этом случае работа, затраченная на разрушение, обозначается A , а ударная вязкость a .

Склонность материалов к хрупкому разрушению лучше выявляется на образцах с более острым надрезом ($r_n = 0,25$ мм, тип IV), которые в большинстве стран являются основными.

В настоящее время в некоторых случаях для более точной оценки вязкости высокопрочных материалов, определения интервала необра-

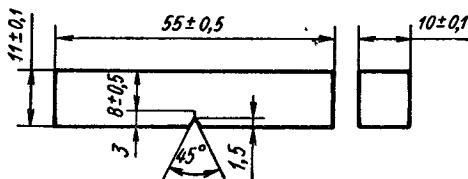


Рис. 12. Образец, применяемый для определения $a_{т.у}$ (при толщине материала свыше 10 мм)

тимой хрупкости, хрупкости от неоднородности структуры после закалки или сварки применяют испытания на ударный изгиб образцов размером $11 \times 10 \times 55$ мм (рис. 12) с усталостной трещиной по методу Б. А. Дроздовского и Я. Б. Фридмана. Трещину создают на специальном вибраторе.

Определяемый параметр

$$a_{т.у} = \frac{A_{т.у}}{F}.$$

Здесь $A_{т.у}$ — работа разрушения образца с трещиной, измеренная по шкале копра; $F = ht$, где t — толщина образца, а h — разница между высотой образца, глубиной надреза и усталостной трещиной — основная характеристика способности материала тормозить разрушение при ударном изгибе.

Работу, затраченную на разрушение образца A_n , делят на работу зарождения A_z и на работу распространения A_p трещины. Аналогично $a_n = a_z + a_p$.

При хрупком разрушении работа распространения трещины A_p приблизительно равна нулю, а при полухрупком она снижается пропорционально проценту вязкой составляющей в изломе, вследствие чего целесообразно определять a_p только при полностью вязком изломе.

Существуют несколько методов определения a_z и a_p .

Наиболее распространен описанный выше метод Б. А. Дроздовского и Я. Б. Фридмана и метод А. П. Гуляева.

Определяемый по методу Б. А. Дроздовского и Я. Б. Фридмана параметр $a_{т.у} = a_p$ характеризует работу, затрачиваемую на распространение трещины.

Метод А. П. Гуляева основан на том, что испытывают образцы с различными радиусами надреза (от 0,1 до 1 мм), строят зависимость

«величина ударной вязкости — радиус надреза» и экстраполируют полученный график до нулевого значения радиуса. Величина ударной вязкости при $r = 0$ соответствует величине a_p , а разность между ударной вязкостью для $r = 1$ мм и $r = 0$ — величине a_3 .

Важная характеристика, которая может быть получена при испытаниях на ударную вязкость, — температура перехода в хрупкое состояние. Для металлов с объемноцентрированной решеткой, а также низкоуглеродистых сталей характерно резкое снижение ударной вязкости ниже некоторой области температур, характеризующих порог хладноломкости.

Для высокопрочных сталей кривые ударной вязкости по мере понижения температуры плавно снижаются, из-за чего невозможно определить по ним порог хладноломкости. Обычно порог хладноломкости более четко определяют по кривым, «процент вязкой составляющей — температура испытания» при визуальном исследовании излома.

Однако и этот метод неприменим для определения хладноломкости стали в высокопрочном состоянии, так как в этом случае локализованные зоны вязкой и хрупкой составляющих находятся в пределах одного или нескольких зерен.

В настоящее время верхнюю и нижнюю температуры порога хладноломкости определяют электронно-фрактографическим методом. На электронных фрактограммах вязкое разрушение имеет «ч а ш е ч н ы й», а хрупкое р е ч н о й (или ручьевого) узоры. Разрушая образцы при различных температурах и изучая строение их изломов, находят интервал температур, в котором строение излома меняется от вязкого к хрупкому. Верхняя и нижняя границы интервалов температур будут соответствовать верхней и нижней температурам порога хладноломкости.

О конструктивной прочности материалов и методах ее оценки

При выборе параметров оценки прочностных свойств материала следует различать следующие группы критериев:

а) критерии оценки прочностных свойств материала, определяемых независимо от его назначения, т. е. от конструктивных особенностей и характера службы изделия, в котором данный материал применяют. Эти критерии ($\sigma_{0.2}$, σ_B , δ , ψ , a_n , σ_R и др.) характеризуют свойства материала вообще;

б) критерии оценки конструктивной прочности материала, т. е. комплекса тех (и только тех) прочностных свойств, которые находятся в наибольшей связи со служебными свойствами данного изделия. При этом под служебными свойствами подразумеваются те свойства, которые характеризуют работоспособность материала в условиях службы изделия, т. е. его стойкость и надежность — гарантированность отсутствия его отказов в эксплуатации.

Оценивать конструктивную прочность металла можно по отношению к данному изделию или группе однотипных изделий, или к группе материалов, предназначенных для изготовления сходных по назначению изделий;

в) критерии оценки прочности конструкции в целом, определяемой при стендовых, натурных и эксплуатационных испытаниях. В ряде случаев при таких испытаниях удается дополнительно выяснить влия-

ние на прочность и долговечность конструкции таких факторов, как распределение и величина остаточных напряжений, технология и дефекты сварки и т. д. В настоящее время нет общих правил для выбора критериев, которые способны охарактеризовать конструктивную прочность материала, предназначенного для того или другого изделия. Большую помощь при выборе оказывают изучение видов и природы износа и эксплуатационных разрушений, учет относительного количества различных отказов изделий в эксплуатации и воспроизведение в лабораторных условиях характерных типов разрушений. Кроме того, рекомендуется соблюдать

аналогию видов напряженного состояния в испытываемых образцах и изделиях, для которых предназначен материал, аналогию других условий испытания (температура, внешняя среда и т. д.),

сходство характера износа и разрушения, вида излома в образцах и изделиях.

Для весьма ограниченного количества изделий, работающих в условиях статической нагрузки, критериями оценки конструктивной прочности могут быть параметры, определяемые при одноосном статическом нагружении. Для большинства изделий и конструкций необходимо использовать другие критерии оценки конструктивной прочности, которые можно разделить на две группы

1) свойства, определяющие долговечность изделий (усталостная прочность, контактная выносливость, износостойчивость, коррозионная стойкость и др.),

2) свойства, позволяющие оценить запас надежности материала в изделии или конструкции (вязкость разрушения, работа, поглощаемая при распространении трещины, живучесть при циклическом нагружении и т. д.).

Критерии оценки конструктивной прочности

Из числа критериев, наиболее часто используемых для оценки долговечности, в первую очередь следует отметить испытания на усталость (ГОСТ 2860—65).

Для лучшей оценки надежности материалов машин и металлоконструкций целесообразно более широко использовать следующие критерии оценки металла: параметры Ирвина, работу развития трещины, живучесть и др.

Параметры Ирвина K и G характеризуют поле напряжений в зоне трещины и ее поведение при приложении внешней нагрузки. Они служат критериями оценки вязкости разрушения. Параметр K — коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины, или локальное повышение растягивающего напряжения у ведущего конца трещины, параметр G характеризует энергию, затрачиваемую при увеличении трещины на единицу длины. Для плосконапряженного и плоскодеформированного состояния указанные параметры обозначают соответственно K_c и G_c и K_{Ic} и G_{Ic} .

Эти параметры становятся константами материала, позволяющими использовать их для расчетов, если могут быть применены формулы, выведенные для различных схем нагружения и различных форм образцов. Эти формулы действительны только для условий, когда полностью или почти полностью предотвращается пластическая деформация перед

вершиной трещины. Это имеет место, когда: 1) процесс разрушения идет в упругой области (хрупкие высокопрочные материалы) и ограничивается условием $\sigma_n < 0,8\sigma_{0,2}$; 2) геометрические размеры образца обеспечивают соотношение $H \gg 2d$, где H — толщина образца и d — диаметр (ширина) пластически деформируемой зоны у острия надреза или трещины.

Эти условия соблюдаются только тогда, когда у надреза образца радиус близок к нулю (трещина). Такие образцы могут быть подвергнуты статическому или ударному нагружению (при условии, если будет определена разрушающая нагрузка). Определять параметры K_{1c} и G_{1c}

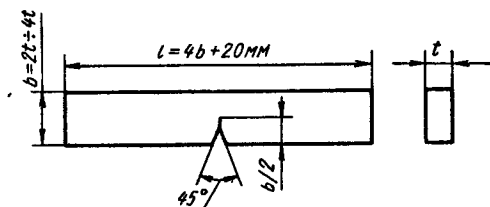


Рис. 13. Образец, применяемый для определения параметра K_{1c} при изгибе

для более пластичных материалов, натурных проб, образцов, подвергаемых обычным испытаниям на усталость, и т. д. можно, применяя специальные методы фиксации величины напряжения и длины трещины в момент перехода ее к нестабильному развитию в условиях плоскодеформированного состояния. Образец, используемый для определения параметра K_{1c} при изгибе, показан на рис. 13.

Работа, затрачиваемая на развитие трещины см. стр. 29.

Важнейший параметр конструктивной прочности деталей машин и конструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, — живучесть. Живучесть — это способность металла работать в поврежденном состоянии после возникновения усталостной трещины. Измеряется количеством циклов от начала образования трещины до разрушения или скоростью развития трещины при данном напряжении.

Для определения живучести строят две кривые усталости, из которых первая кривая отражает начало образования трещин, а вторая фиксирует разрушение образца.

Расстояние между этими кривыми при каждом напряжении, т. е. число циклов работы образца с трещиной, и есть живучесть.

Живучесть пока не удается предсказать на основе знания других механических свойств.

Высокие механические свойства, включая достаточную пластичность и ударную вязкость, часто сочетаются с очень низкой живучестью.

Определение твердости

Под твердостью понимают сопротивление, которое одно тело оказывает проникновению в него другого, более твердого тела.

В технике предпочтительны методы испытаний, при которых остаются измеримые отпечатки. При этом в процессе испытания вокруг отпечатка

возникает наклеп испытуемого образца. Степень этого наклепа зависит от формы вдавливаемого тела и глубины вдавливания, так что числа твердости, полученные при испытании различными вдавливаемыми телами (индентерами), нельзя безоговорочно сравнивать между собой даже при одинаковой расчетной формуле.

Статические методы

При статическом испытании твердости индентер вдавливается в образец под действием силы, непрерывно возрастающей до заданного предела.

Измерение твердости вдавливанием стального шарика по Бринеллю (ГОСТ 9012—59)*. При этом методе испытания стальной шарик диаметром D вдавливается в испытуемый образец (изделие) под действием нагрузки P , приложенной в течение определенного времени, и после удаления нагрузки измеряют диаметр отпечатка, оставшегося на поверхности образца.

Число твердости по Бринеллю (HB) определяют путем деления нагрузки P на площадь поверхности сферического отпечатка по формуле

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где P — нагрузка, кгс; D — диаметр шарика, мм; d — диаметр отпечатка, мм.

В соответствии с условиями испытания и по диаметру полученного отпечатка числа твердости определяют с помощью таблиц в ГОСТ 9012—59*.

При измерении твердости по Бринеллю диаметр шарика D , величину нагрузки P , продолжительность выдержки под нагрузкой и минимальную толщину испытуемого образца выбирают по табл. 2. Твердость испытуемых черных и цветных металлов не должна превышать 450 ед.

Перед числом твердости по Бринеллю при измерении твердости шариком диаметром $D = 10$ мм под нагрузкой $P = 3000$ кгс с выдержкой $t = 10$ с пишут символ HB , например $HB 400$.

При других условиях измерения обозначение HB дополняется индексом, указывающим условия измерения в следующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки, например $HB 5/250/30$.

Для более точного определения твердости (особенно это относится к крупнозернистым материалам или материалам с различными структурными составляющими) следует применять шарик с наибольшим диаметром, равным 10 мм.

Для стали существует соотношение между твердостью по Бринеллю и пределом прочности $\sigma_b = k HB$. Этот коэффициент k существенно зависит от отношения предела текучести к пределу прочности и от прочности материала. При отношении $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ более 65% он составляет 0,32—0,36. Обычно при неизвестном отношении $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ пользуются средним переводным коэффициентом 0,35.

Измерение твердости алмазной пирамидой по Виккерсу Наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды вдавливается в испытуемый образец (изделие) под действием нагрузки P .

2 Рекомендуемые параметры
при изменении твердости по Бринеллю

Материал	Интервал твердости в числах Бринелля	Минимальная толщина испытываемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой P и диаметром шарика D	Диаметр шарика D , мм	Нагрузка P , кгс	Выдержка под нагрузкой, с
Черные металлы	140—450	От 6 до 3 От 4 до 2 Менее 2	$P=30D^2$	10 5 2,5	3000 750 187,5	10
То же	<140	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P=10D^2$	10 5 2,5	1000 250 62,5	10
Цветные металлы	>130	От 6 до 3 От 4 до 2 Менее 2	$P=30D^2$	10 5 2,5	3000 750 187,5	30
То же	35—130	От 9 до 3 От 6 до 3 Менее 3	$P=10D^2$	10 5 2,5	1000 250 62,5	30
»	8—35	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P=2,5D^2$	10 5 2,5	250 62,6 15,6	60

приложенной в течение определенного времени, и после удаления нагрузки измеряют диагонали d отпечатка, оставшегося на поверхности образца.

Число твердости (HV) определяют путем деления нагрузки P на площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка (мм^2) по формуле

$$HV = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2},$$

где P — нагрузка, кгс; $\alpha = 136^\circ$ — угол между противоположными гранями пирамиды при вершине; d — среднее арифметическое обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Перед числом твердости, измеренным алмазной пирамидой, пишут символ HV , например $HV 300$.

При измерении твердости алмазной пирамидой применяют одну из следующих нагрузок: 5, 10, 20, 30, 50, 100 кгс. При наличии соответствующих приборов допустимы меньшие нагрузки (1 и 3 кгс). Минимальная толщина испытываемого образца или слоя должна быть больше диагонали отпечатка для стальных изделий в 1,2 раза, а для цветных металлов в 1,5 раза. Продолжительность выдержки под нагрузкой для черных металлов 10—15 с, для цветных — 30 с.

Расстояние между центром отпечатка и краем образца или соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка.

Измерение твердости по Виккерсу применимо для тонких образцов толщиной 0,3—0,5 мм или поверхностных слоев толщиной до 0,03—0,05 мм.

Получаемые отпечатки пирамиды относительно малы. Их измеряют с помощью оптического устройства, позволяющего выполнять измерение без перемещения образца.

Поверхность испытываемого образца должна иметь класс чистоты поверхности не ниже 10. В настоящее время метод Виккерса следует признать наиболее совершенным методом испытания твердости. Он дает для всех материалов (от самых мягких до самых твердых) сквозную однозначную шкалу твердости.

Числа твердости по Виккерсу и по Бринеллю имеет одинаковую размерность и для материалов с твердостью до *HB* 450 практически совпадают.

3. Измерение твердости по Роквеллу (ГОСТ 9013—59). При измерении твердости металлов по Роквеллу наконечник стандартного типа (алмазный конус или стальной шарик) вдавливается в испытуемый образец (изделие) под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок — предварительной P_0 и общей P , которая равна сумме предварительной P_0 и основной P_1 нагрузок: $P = P_0 + P_1$.

Твердость по Роквеллу измеряют в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм.

Числа твердости по Роквеллу *HR* выражаются формулами: при измерении по шкалам *A* и *C*

$$HR = 100 - e;$$

при измерении по шкале *B*

$$HR = 130 - e.$$

Величину *e* определяют по формуле

$$e = \frac{h - h_0}{0,002},$$

где h_0 — глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием общей нагрузки P , измеренная после снятия основной нагрузки P_1 с оставлением предварительной нагрузки P_0 .

Величина нагрузки, пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу, а также соответствующие приближенные значения чисел твердости по Виккерсу для шкал *A*, *B* и *C* приведены в табл. 3. Шкалу *C* (индентер—алмазный конус) используют при испытании твердых материалов (термически обработанная сталь, в том числе закаленная). При испытании мягких материалов используют шкалу *B* (индентер—стальной шарик). Шкалу *A* (индентер—алмазный конус) используют при измерении твердости очень твердых материалов (твердых сплавов). К числам твердости, полученным при измерении по этим шкалам, спереди добавляют обозначения шкалы, например, *HRC* 50, *HRB* 85, *HRA* 75. Метод Роквелла получил очень широкое применение, так как он позволяет определять твердость быстро и просто, а получаемые отпечатки относительно малы.

3 Шкалы твердости, тип индентера, пределы измерений и соотношения между числами твердости по Роквеллу и Виккерсу

Обозначения		Тип индентера	Нагрузка, кгс	Пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу HR	Соответствующие приближенные значения чисел твердости по Виккерсу HV
шкалы	чисел твердости				
<i>A</i>	<i>HRA</i>	Алмазный конус	$P_0=10$ $P_1=50$ $P=P_0+$ $+P_1=60$	<i>HRA</i> 70—85	390—900
<i>G</i>	<i>HRC</i>	Алмазный конус	$P_0=10$ $P_1=140$ $P=P_0+$ $+P_1=150$	<i>HRC</i> 20—67	240—900
<i>B</i>	<i>HRB</i>	Стальной шарик, Ø 1,588 мм	$P_0=10$ $P_1=90$ $P=P_0+$ $+P_1=100$	<i>HRB</i> 25—100	60—240

Этот метод в первую очередь очень широко применяют для поштучного контроля готовых деталей в массовом производстве.

Испытания на микротвердость вдавливанием алмазной пирамиды (ГОСТ 9450—60). Метод применяют для определения твердости тонких поверхностных слоев, а также отдельных структурных составляющих и фаз сплавов.

При испытании на микротвердость алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды вдавливается в испытуемый участок образца под действием нагрузки P , приложенной в течение определенного времени, и после удаления нагрузки измеряют диагонали d квадратного отпечатка, оставшегося на поверхности образца.

Перед числом твердости, вычисленным по той же формуле, что и при измерении твердости по Виккерсу, пишут символ H с указанием в индексе величины нагрузки в грамм-силах, например H_{50} — 220 кгс/мм². При испытании на микротвердость применяют одну из следующих нагрузок 0,005, 0,01, 0,02, 0,05, 0,1; 0,2, 0,5 кгс.

Для измерения микротвердости промышленность выпускает специальный прибор ПМТ-3. Измерение микротвердости выполняют следующим образом. Поверхность образца шлифуют и полируют, а при необходимости выявления структуры подвергают травлению реактивами, применяемыми для микроанализа соответствующих сплавов.

На исследуемом участке образца наносят отпечаток алмазной пирамиды, который измеряют с помощью окулярного микрометра при общих увеличениях в 478 или 135 раз.

Динамические методы

При динамическом определении твердости на образец с определенной кинетической энергией воздействует испытательный шарик или острей.

Используемая при испытании энергия складывается из: а) работы деформации, расходуемой на образование отпечатка; б) энергии отдачи, расходуемой на обратный подъем падающего груза; в) потерь на образование тепла, трение, вибрации.

Соответственно этому различают два различных способа динамического определения твердости: один основан на подсчете твердости по отпечатку (методы, использующие падение груза или удар, — молоток Полюди или Бринелля), другой — на измерении высоты отдачи (прибор Шора).

Прибор Шора предназначен в основном для определения твердости массивных деталей и применяется, например, для контроля твердости прокатных валков, а также мелких деталей как из металлов, так и неметаллов.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Штампруемость

Под штампуемостью понимают способность материала изменять свою форму при штамповке без образования трещин, разрывов, расслоений, полос сдвига и т. п. На штампуемость оказывают влияние много факторов: химический состав материала, величина зерна, твердость, механические характеристики, условия деформации и др. Вследствие этого в настоящее время нет твердого однозначного показателя штампуемости, по которому можно было бы судить о пригодности поставляемого материала к тем или иным формоизменяющим штамповочным операциям. Обычно за основу берут данные, характеризующие химический состав и механические свойства металла, а в ряде случаев и результаты технологических испытаний.

Химический состав металлов и сплавов регламентируется ГОСТами и ТУ. Для сталей наиболее важный химический элемент, оказывающий решающее влияние на их свойства, — углерод. Чем выше содержание углерода, тем ниже пластические свойства стали и штампуемость. Например, наилучшую способность к вытяжке имеет малоуглеродистая сталь с содержанием углерода 0,06—0,08%. Марганец как примесь в количестве 0,2—0,4% способствует повышению штампуемости стали. Кремний, повышая прочность и уменьшая относительное удлинение, снижает штампуемость; его содержание должно быть не более 0,01—0,03%. Сера и фосфор резко ухудшают пластические свойства стали, и содержание их в стали для особо сложной вытяжки (ОСВ), сложной вытяжки (СВ) и весьма глубокой вытяжки (ВГ) по ГОСТ 9045—70 * не должно превышать: S — 0,03%, P — 0,02%; кроме того, ограничено содержание Cr и Ni (до 0,03%—0,10%) и Cu (до 0,06—0,15%).

Микроструктура стали также должна удовлетворять определенным требованиям, касающимся величины, равномерности, равноосности зерна и вида химического соединения углерода с железом. Оптимальная величина зерна 7—8 баллов по ГОСТ 5639—65. Зерно большей величины увеличивает шероховатость, что снижает качество последую-

щей отделки детали, а меньшей величины делает листовую сталь более упругой и жесткой. Неравномерность зерна приводит к неравномерности деформации, что может вызвать образование трещин. Волокнистая структура металла нежелательна, так как такой металл имеет ярко выраженную анизотропию механических свойств и неодинаковую способность к деформации вдоль и поперек направления проката.

На штампуемость благоприятно влияет феррит с небольшим количеством пластинчатого перлита, который способствует уменьшению пружинения и получению более точных размеров штамповок. Структурно свободный цементит ухудшает вытяжку стали, его величина регламентируется ГОСТ 9045—70 * (табл. 4).

4. Величина зерна феррита и цементита стали для холодной штамповки по ГОСТ 9045—70 *

Категория вытяжки	Номер зерна феррита	Структурно-свободный цемент, балл (не более)
Весьма глубокая (ВГ)	6, 7, 8, 9	3
Сложная (СВ)		3
Особо сложная (ОСВ)		2

Иногда металл (некоторые стали, медь, дюралюминий) после обработки давлением может самопроизвольно изменять свои свойства. Такое явление называется старением. В деформированном металле, склонном к старению, могут при хранении возникать трещины. Поэтому во избежание ухудшения штампуемости при многооперационной обработке давлением следует стремиться к максимально быстрой передаче заготовки с позиции на позицию с тем, чтобы процесс старения не успевал произойти.

Для получения штампованных деталей требуемого качества определенное значение имеют разнотолщинность и состояние поверхности металла. Допускаемые отклонения по толщине листа составляют $\pm 5\%$ от толщины листа. Разнотолщинность может вызвать трещины, разрывы, волнистость при вытяжке деталей сложной формы. По отделке поверхности сталь тонколистовую холоднокатаную малоуглеродистую качественную для холодной штамповки (ОСВ, СВ и ВГ 9045—70) подразделяют на 3 группы. На поверхности листа не допускаются плены, раковины, трещины, окалина, загрязнения и т. п. Металл для глубокой вытяжки не должен иметь после деформации полос или линий сдвига. Для предупреждения образования линий сдвига сталь подвергают дрессировке (холодному обжатию до 2%) на специальных многовалковых станах.

По химическому составу, микроструктуре и т. д. нельзя судить о штампуемости. Поэтому необходимо проводить механические и технологические испытания металла.

Механические и технологические испытания

Важные показатели штампуемости металла — характеристики механических свойств: прочностные и пластические, определяемые при испытаниях плоских тонколистовых (ГОСТ 11701—66) образцов на растяжение.

В ГОСТ 11701—66 предусмотрено определение важного показателя штампуемости — равномерного относительного удлинения δ_p , по которому можно сделать вывод о величине допустимых деформаций при штамповке. Превышение последних приводит к возникновению трещин и разрывов при формоизменении заготовки.

Результаты испытаний на растяжение дают возможность установить анизотропию механических свойств исследуемого материала в плоскости листа и по его толщине. Большие значения отношения равномерных деформаций по ширине к равномерным деформациям по толщине образцов, вырезанных из листа вдоль и поперек направления прокатки, говорят о большей склонности металла к деформации в плоскости листа, а меньшие — к деформации по толщине, что ведет к утонению и разрыву металла.

Чем выше характеристики δ_p и σ_T , тем лучше штампуемость материала. Кроме того, большое влияние на штампуемость металла оказывает величина отношения предела текучести к пределу прочности $\frac{\sigma_T}{\sigma_B}$. Меньшие значения этого отношения свидетельствуют о лучшей штампуемости стали (табл. 5).

5. Характеристики пластичности стали, применяемой для различных категорий вытяжки

Категория вытяжки	σ_T/σ_B (не менее)	δ (не менее)	ψ (не менее)	δ_p
Особо сложная (ОСВ) . .	0,6	0,44	0,65	Не менее 0,25
Сложная (СВ)	0,65	0,42	0,55	Не менее 0,20
Весьма глубокая (ВГ) . .	0,6	0,34	—	—
Глубокая (Г)	0,66	0,30	—	—
Нормальная (Н)	0,75	0,20	—	0,10—0,15

Определенную информацию о штампуемости металла дает испытание на твердость и микротвердость. Повышение твердости металла говорит о снижении его пластических свойств. Сталь для холодной вытяжки категорий ОСВ, СВ и ВГ должна иметь твердость по Роквеллу HRB не более 46—48. Однако по результатам испытаний металла на твердость нельзя сделать заключения о пригодности его к глубокой вытяжке.

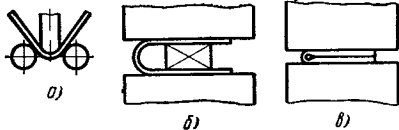
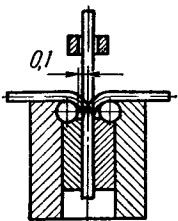
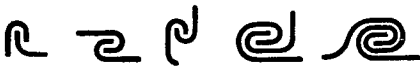
Технологические испытания

Механические испытания на растяжение не воспроизводят тех условий, в которых находится металл при штамповке. Поэтому для определения штампуемости металла при тех или иных формоизменяющих операциях проводят технологические испытания, при которых металл испытывает деформации, аналогичные деформациям реального процесса или близкие к ним.

Технологические методы испытания листового металла с целью определения их пригодности для операций гибки приведены в табл. 6.

О пригодности металла к операциям гибки судят путем внешнего осмотра образцов и определения соответствия их требованиям стандар-

**6. Методы технологических испытаний
по определению пригодности листового металла
к операциям гибки**

Метод испытания	Сущность испытания и область применения
Испытание на изгиб по ГОСТ 14019—68  а) б) в)	Испытание служит для определения способности металла выдерживать заданную пластическую деформацию, характеризуемую углом изгиба, или для оценки предельной пластичности, которая характеризуется углом изгиба до образования первой трещины. Испытание производится а) до заданного угла изгиба, б) до появления первой трещины; в) до параллельности сторон; г) до соприкосновения сторон
Испытание на перегиб по ГОСТ 13813—68  а)	Испытание состоит в определении числа перегибов путем повторяющихся изгибов образца толщиной не более 4 мм, шириной 20,5 мм и длиной 100—150 мм, зажатого в губках приспособления, вправо или влево вначале на 90°, а затем на 180° в противоположную сторону со скоростью не более 60 изгибов в 1 мин
Испытание на двойной кровельный замок по ГОСТ 13814—68	Испытание распространяется на листы толщиной менее 0,8 мм и устанавливает метод определения способности металла принимать заданную по размерам и форме деформацию. Соединяют два листа на испытательных машинах в соответствии с эскизом 
Испытание на изгиб по Гюту, по Вольтеру, на пружинение при гибке по Элэру	Испытание проводят на специальных приборах для определения минимального радиуса гибки или угла пружинения

тов или технических условий на металлопродукцию. Если нет стандартов, то признаком того, что образец выдержал испытание, является отсутствие отслаивания, трещин, надрывов и излома в материале образца или в его покровном слое.

Методы испытаний металла для определения пригодности его к глубокой вытяжке приведены в табл. 7. Металл при проведении испытаний, по которым судят о его штампуемости, находится в условиях, близких к двухосному напряженному состоянию, так как напряжение в перпендикулярном к поверхности заготовки направлении много меньше, чем в плоскости листа, и им можно пренебречь. Многообразие реальных процессов штамповки не позволяет применять тот или иной метод как универсальный. При вытяжке деталей сложной формы вытяжные свойства металла лучше определять, применяя испытание на вытяжку сферической лунки по ГОСТ 10510—74 (по Эриксену), а при глубокой вытяжке деталей цилиндрической и коробчатой формы — испытания на вытяжку цилиндрического колпачка. В этом случае схема напряженного состояния металла при испытаниях будет ближе всего к моделируемому процессу штамповки.

Из перечисленных методов самые простые по подготовке образца и проведению испытания метод Эриксона (ГОСТ 10510—74) и гидравлический метод.

Мерой способности металла к вытяжке является глубина вытянутой лунки до момента уменьшения усилия вытяжки. Глубина лунки для стали тонколистовой холоднокатаной малоуглеродистой качественной для холодной штамповки по ГОСТ 9045—70 * приведена в табл. 8, а для других металлов — в табл. 9.

Характер трещины при вытяжке сферической лунки позволяет судить об однородности металла: разрыв по окружности свидетельствует об однородности металла, а по прямой — об анизотропности.

По шероховатости поверхности лунки судят о величине зерна: чистая поверхность у мелкозернистого металла, а более шероховатая — у крупнозернистого.

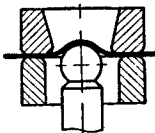
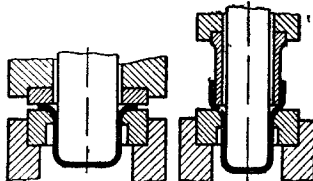
Используя результаты механических и технологических испытаний листового металла, следует применять его для технологических операций штамповки, приведенных в табл. 10.

Для выявления способности черного или цветного металла к деформации в горячем состоянии пользуются характеристиками механических свойств, определяемыми при испытаниях на растяжение при повышенных температурах (до 1200°С) по ГОСТ 9651—73, результатами испытаний по определению ударной вязкости a_n при нормальных (ГОСТ 9454—60) и повышенных (ГОСТ 9456—60) температурах. Кроме того, учитывают влияние на изменение химического состава и фазовых превращений металла или сплава исходного структурного состояния, температуры, схемы напряженного состояния, степени и скорости деформации на изменение механических свойств металла в процессе горячей деформации.

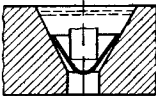
При необходимости проводят технологические испытания на осадку (ГОСТ 8817—73), на расплющивание (ГОСТ 8818—73), на выдавливание.

Метод испытания на осадку прутков и проволоки черных металлов и алюминиевых сплавов предназначен для определения способности их к деформации и выявления дефектов поверхности изделий в холодном (2—30 мм) или горячем (5—150 мм) состояниях. Образцы динаме-

7. Методы технологических испытаний листов и лент по определению их пригодности к глубокой вытяжке

Метод испытания, эскиз	Сущность испытания и область применения
Напряженное состояние — двухосное растяжение (детали сложной и несимметричной формы) Испытания на вытяжку сферической лунки по ГОСТ 10510—74 (по Эриксену) 	Образец прямоугольной, квадратной или круглой формы определенных размеров зажимают между матрицей и прижимным кольцом, и в центре его пуансоном с шаровым наконечником вытягивается сферическая лунка. Применяют для черных и цветных металлов толщиной от 0,1 до 2 мм
Гидравлический метод испытаний	Образец, зажатый по периферии, вытягивается под действием давления жидкости в круглую матрицу до момента разрыва или потери устойчивости процесса деформации. Условия испытаний исключают влияние формы инструмента и трения на результаты
Испытание по Олзену (США), Эйверн (Англия), Гиллери (Франция)	Испытания аналогичны испытанию по Эриксену, но на приборах несколько иной конструкции и инструментом других размеров
Напряженное состояние — растяжение и сжатие (детали цилиндрической и коробчатой формы) Испытание на вытяжку цилиндрического колпачка и отбортовку отверстия 	Метод проведения испытания тот же, что и при испытаниях на вытяжку сферической лунки по ГОСТ 10510—74, но применяют другие инструменты. Определяют максимальный коэффициент вытяжки и максимальное усилие при этом

Продолжение табл 7

Метод испытания, эскиз	Сущность испытания и область применения
Метод АЕГ метод института пластической деформации металлов (ГДР) метод Зибеля	Аналогичен предыдущему но методы проведения испытания различаются тем что применяют различные машины инструмент операции
Испытание на вытяжку в коническую матрицу по Фукуи 	Полусферическим пуансоном круглый образец вытягивается в коническую (угол равен 60°) матрицу Чем выше штампуемость металла тем меньше отношение диаметра фланца при разрыве заготовки к исходному диаметру

8. Глубина выдавливания сферической лунки для стали различной толщины и категорий вытяжки

Толщина листа, мм	Глубина сферической лунки, мм (не менее), для стали категории вытяжки			Толщина листа, мм	Глубина сферической лунки мм (не менее), для стали категории вытяжки		
	ВГ	СВ	ОСВ		ВГ	СВ	ОСВ
0,5	9,0	—	—	1,3	11,2	11,4	11,7
0,6	9,4	—	—	1,4	11,3	11,5	11,8
0,7	9,7	10,0	10,2	1,5	11,5	11,6	12,0
0,8	10,0	10,4	10,6	1,6	11,6	11,6	12,1
0,9	10,3	10,6	10,9	1,7	11,8	11,6	12,1
1,0	10,5	10,8	11,1	1,8	11,9	11,6	12,1
1,1	10,8	11,0	11,3	1,9	12,0	11,6	12,1
1,2	11,0	11,2	11,5	2,0	12,1	11,6	12,1

тром, равным диаметру изделия, и длиной, равной двум диаметрам для черных металлов и полутора диаметрам для алюминиевых сплавов, осаживают под прессом или молотом. Величину деформации при осадке принимают равной 50, 65 и 75% для черных металлов и 50% для алюминиевых сплавов.

Считают, что образец выдержал испытания, если после испытания на его поверхности нет трещин, надрывов, расслоений

Металл, поставленный в виде полос, листов, заклепок, подвергают испытанию на расплющивание. Расплющивание полос и заклепочных головок производят до размеров, установленных стандартами на испытываемые изделия. Изделия считаются годными, если на поверхности образцов, подвергнутых испытанию, не наблюдается трещин и надрывов.

9. Глубина выдавливания сферической лунки, мм, для различных металлов

Материал	Толщина металла, мм									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Латунь для глубокой вытяжки	12,8	13,5	13,8	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,7
Латунь обычного качества	11,3	12,2	12,7	13,0	13,3	13,5	13,7	13,8	14,1	14,3
Медь листовая	9,6	10,5	11,1	11,4	11,8	12,1	12,3	12,6	12,8	13,0
Алюминий листовой	7,6	8,7	9,2	9,5	9,9	10,2	10,7	11,1	11,2	12,7
Сталь декапированная	6,6	7,8	8,6	9,2	9,7	10,2	10,6	11,1	11,4	11,8
Жесть белая	6,2	7,5	8,3	8,9	9,5	9,9	10,3	10,8	11,2	11,6
Цинк	5,2	6,5	7,3	7,8	8,1	8,3	8,4	8,5	8,6	8,6

10. Характеристики механических свойств стали, применяемой для различных операций штамповки

Применение	Предел прочности σ_B , кгс/мм ² (не более)	Относительное удлинение δ_{10} , % (не менее)	Твердость HRB (не более)	Глубина выдавливания, мм (не менее)
Вырубка плоских деталей	65	1—5	84—86	6—7
Вырубка, простая гибка под углом 90° поперек волокон с большим радиусом закругления $r > S$	50	4—14	75—85	7—8
Неглубокая вытяжка, формовка. Гибка на 180° поперек волокон или на 90° вдоль волокон с радиусом закругления $r \geq 0,5S$	42	13—27	64—74	8—9
Глубокая вытяжка (допустимы линии сдвига) Гибка на 180° во всех направлениях с радиусом закругления $r < 0,5S$	37	24—36	52—64	9—10
Глубокая вытяжка (с незначительными линиями сдвига) Гибка на 180° во всех направлениях с радиусом закругления $r < 0,5S$	33	33—45	38—52	10—12

Свариваемость

Свариваемость — это способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения с требуемыми технологическими характеристиками. Свариваемость оценивают путем сравнения характеристик свойств сварных соединений с характеристиками свойств основного металла или их нормативными значениями. Свариваемость данного металла тем выше, чем больше способов сварки может быть применено, проще технология получения сварного соединения и шире пределы допускаемых режимов сварки.

Для оценки технологической свариваемости:

а) определяют структуру и механические свойства металла шва и околошовной зоны,

б) оценивают склонность металла шва и околошовной зоны к образованию горячих кристаллизационных и холодных (возникающих после полного остывания металла) трещин.

Методы оценки

Оценка влияния режимов сварки и последующей обработки на структуру и свойства сварных соединений

Применяются специальные методы для изучения фазовых превращений металлов в условиях, достаточно близко имитирующих сварочный процесс. К этим методам относятся метод ИМЕТ-1, вакуумные высокотемпературные металлографические и дилатометрические методы исследования и измерения твердости с воспроизведением термических циклов сварки.

При методе ИМЕТ-1 тонкие или стержневые образцы нагревают в специальной машине током и охлаждают в соответствии с заданными термическими циклами. В процессе нагрева или охлаждения образцы подвергаются либо деформации, либо разрыву при заданной мгновенной температуре или в заданном интервале температур (в зависимости от скорости деформации). Их также можно резко охлаждать в воде, чтобы было зафиксировано структурное состояние. Этим методом можно определить и конечные изменения структуры и механических свойств после полного охлаждения образцов до комнатной температуры. Кроме того, это позволяет исследовать кинетику изменения механических свойств и структуры металла в различных участках зоны термического влияния в процессе сварки и термической обработки.

Для исследования влияния технологии и режимов сварки на свойства и структуру зоны термического влияния применяют валиковую пробу по ГОСТ 13585—68. Валиковая проба заключается в наплавке валика на собранную в зажимном приспособлении составную пластину из брусков длиной $\delta = 12-18$ мм и шириной 200—450 мм, вырезанных из листов исследуемого металла толщиной δ_1 . Составную пластину собирают так, чтобы валик наплавлялся на поверхности реза брусков (рис. 14). Число брусков для составной пластины определяют из расчета требуемого числа образцов на каждый режим наплавки, предусмотренной программой испытания. Наплавленную составную пластину освобождают из приспособления и свободно охлаждают на воздухе. Затем отделяют друг от друга бруски и из них изготавливают образцы

для испытаний на ударный и статический изгиб по ГОСТ 6996—66. Число составных пластин принимают равным числу режимов наплавки.

Валиковая проба позволяет определить в зависимости от режимов наплавки ударную вязкость, критическую температуру хрупкости,

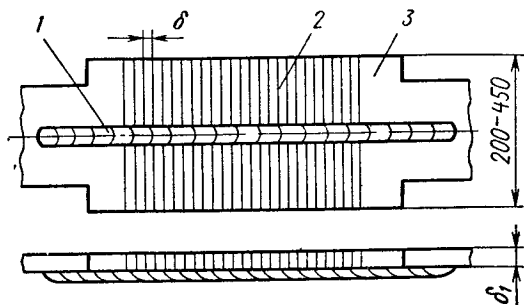


Рис. 14. Валиковая проба:

1 — валик; 2 — бруски; 3 — планка выводная;
 δ — ширина бруска; δ_1 — толщина образца

величину зерна и наибольшую твердость металла околошовного участка. Эти характеристики необходимы при разработке рациональных технологических режимов сварки.

Определение механических свойств сварных соединений

Механические испытания сварных соединений проводят при статических и вибрационных нагрузках. В их число входят стандартные испытания, испытания на растяжение, изгиб, твердость. Кроме этих испытаний в зависимости от типа нагрузки применяют испытания на усталость и длительную прочность.

При испытании соединений, выполненных контактной сваркой или электрозаклепками, определяют величину разрушающей нагрузки.

По ГОСТ 6996—66 выбирают тип образца для испытания сварного соединения соответствующего типа.

Испытания на изгиб служат для оценки пластичности основного металла и сварных соединений. Испытания проводят при различных температурах. Образцы для испытаний выбирают согласно ГОСТ 6996—66.

Испытания на усталость служат для определения сопротивления металла знакопеременным нагрузкам. Образцы для испытаний изготовляют из сваренных встык заготовок с расположением исследуемой зоны металла сварного соединения в рабочей части образца.

Испытания на длительную прочность основного металла, шва и околошовной зоны проводят по ГОСТ 10145—62. Образцы для испытаний сварных соединений изготовляют из сваренных встык заготовок, причем исследуемая зона сварного соединения расположена в рабочей части образца.

Твердость определяют для оценки степени неоднородности состава и свойств различных участков металла сварного соединения по его поперечному или продольному сечению. Твердость сварного соединения определяют в соответствии с ГОСТ 6996—66 на шлифах поперечного сечения по линиям, параллельным границе проплавления основного металла, а также пересекающим ось симметрии шва.

*Определение сопротивления сварных соединений
образованию горячих трещин*

Горячие или кристаллизационные трещины образуются в металле шва и околошовной зоне в процессе его кристаллизации, когда возникающие внутренние напряжения достаточны, чтобы вызвать разрушение по границам зерен. В зависимости от условий образования горячие трещины разделяются на кристаллизационные и подсолидусные. Трещины первого типа образуются, когда металл находится в твердотекучем состоянии; трещины второго типа возникают при температуре ниже температуры солидуса. В производстве сварных конструкций для определения сопротивления металла или сплава образованию трещин применяют количественную или качественную оценку. Количественную оценку проводят методом принудительного деформирования образцов, подвергнутых сварочному нагреву (деформирование под действием внешних сил).

Если в условиях кристаллизации металл шва подвергнуть внешней деформации растяжением, то для каждого сплава можно найти такую критическую скорость деформации, при которой в сварном шве появятся горячие трещины, т. е. запас пластичности в температурном интервале хрупкости будет исчерпан. Эта критическая скорость и является количественным критерием сопротивления образованию горячих трещин.

В промышленности наибольшее применение получил метод МВТУ, который позволяет оценить стойкость материала против образования горячих трещин при выполнении стыковых, тавровых и угловых соединений и при наплавке. Деформирование сварочной ванны производят под действием внешних сил поперек или вдоль направления сварки.

Деформирование образцов осуществляют изгибом или растяжением. Критерием является наименьшая скорость деформации, при которой в металле шва или околошовной зоне зарождается горячая трещина.

Испытания проводят на специальных автоматизированных установках, имеющих сменные устройства для сборки, сварки и деформирования образцов различной формы. На рис. 15 показан образец, сваренный вдоль стыка кромок, усилие приложено поперек оси шва. Образец этого типа служит для определения продольных трещин в металле шва и околошовной зоне.

На рис. 16 показан образец, позволяющий определить сопротивление металла образованию поперечных трещин в металле шва и околошовной зоне.

Для оценки стойкости против образования горячих трещин металла шва, металла околошовной зоны и основного металла в околошовной зоне применяют метод ИМЕТ-ЦНИИЧМ, который заключается в испытании составных клавишных или одиночных образцов. В процессе сварки образцы подвергают деформации изгибом поперек или вдоль направления шва, наличие трещины определяют визуально. Крите-

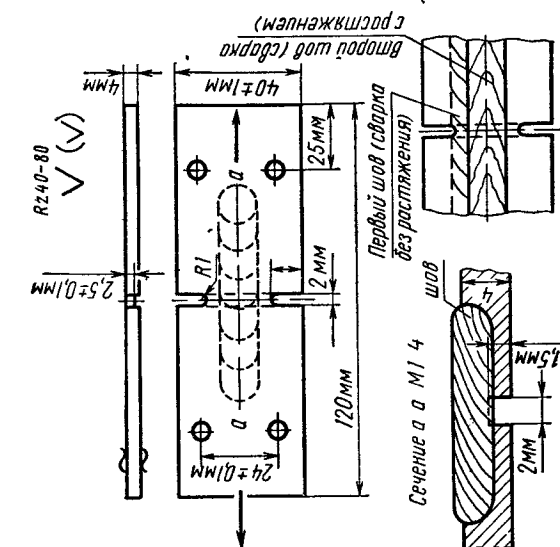


Рис 16. Образец для определения склонности к образованию поперечных горячих трещин в металле шва и околошовной зоне

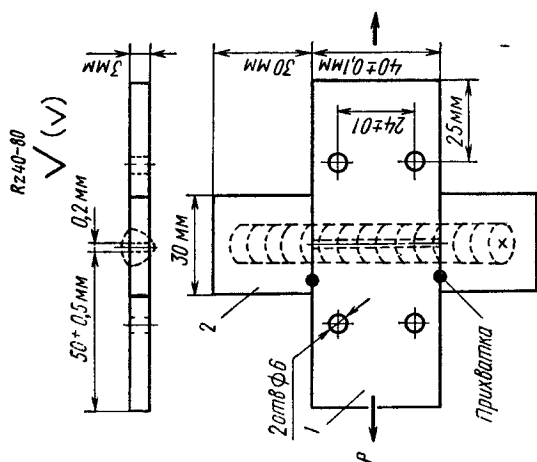


Рис. 15 Образец для определения склонности к образованию продольных горячих трещин в металле шва и околошовной зоне:
1 — пластины 3×40×50, 2 — технологические планки

рием оценки считают минимальную скорость деформации кристаллизующегося металла, при которой образуются трещины.

Качественную оценку сопротивляемости образованию горячих трещин проводят по результатам сварки жестких образцов (технологических проб). Материалы, получившие при сварке проб горячие трещины, считаются склонными к образованию горячих трещин. Различные технологические пробы могут соответствовать условиям конкретной технологии.

Определение сопротивления сварных соединений образованию холодных трещин

Холодные трещины возникают в зоне термического влияния и сварном шве после полного затвердевания сварного шва или последующего вылеживания сварной конструкции. Холодные трещины развиваются как по границам зерен, так и в теле зерна. Они образуются в сталях перлитного и мартенситного класса, если в процессе сварки происходит частичная или полная закалка металла в зоне термического влияния. На склонность к образованию холодных трещин оказывают влияние водород, попадающий из флюсов или атмосферы в металл шва, структурное состояние металла, жесткость сварной конструкции, а также инородные включения и поры в металле.

Количественная оценка сопротивления сварных соединений образованию холодных трещин основана на теории замедленного разрушения и предусматривает механические испытания сварных образцов. Испытания эти подобны испытаниям на длительную прочность. Наибольшее применение получил метод МВТУ на машине ЛТП. Метод основан на механическом испытании сварных образцов рекомендуемых размеров путем нагружения постоянными нагрузками. Нагрузки моделируют упругую энергию собственных напряжений в сварных конструкциях. За показатель сопротивляемости металла образованию холодных трещин при сварке следует принимать минимальное растягивающее напряжение от внешней нагрузки, при котором в сварном соединении образца образуются трещины после выдержки образца под нагрузкой в течение 20 ч.

В зависимости от толщины основного металла, зоны сварного соединения, подвергаемой испытанию, и направления получаемых трещин по отношению к оси шва применяются следующие типы образцов (рис. 17, а, б, в).

На рис. 17, а показан плоский, круглый или восьмигранный образец со стыковым швом. Образец жестко закреплен по контуру, нагружается путем изгиба равномерно распределенной нагрузкой. Испытание оценивает склонность к образованию продольных и поперечных трещин.

На рис. 17, б показан тавровый образец с угловым швом для толщин 6—20 мм. Образец нагружают путем консольного изгиба. Оценивается сопротивляемость зоны сплавления, околошовной зоны и сварного шва образованию продольных трещин.

На рис. 17, в показан пластинчатый образец с продольным стыковым швом для толщин 6—20 мм. Образец нагружают путем поперечного изгиба. Испытание позволяет оценить сопротивляемость шва и околошовной зоны образованию поперечных трещин.

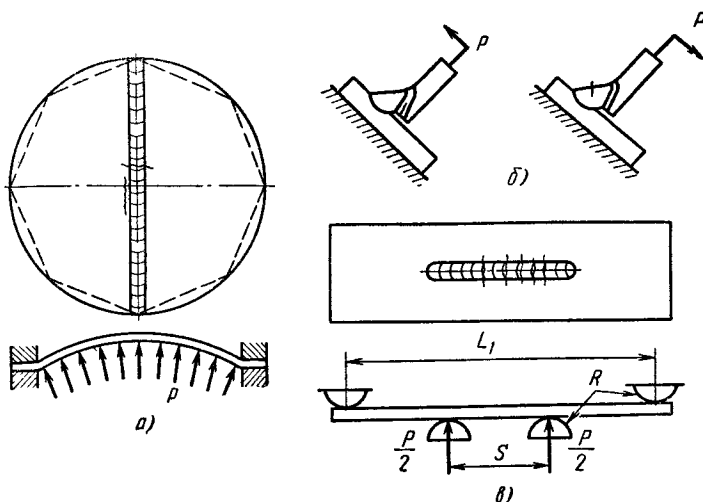


Рис. 17. Образцы для определения склонности к образованию холодных трещин, продольных и поперечных трещин

Испытания сварных соединений на сопротивление хрупкому разрушению

Сварные узлы, выполненные без трещин, могут подвергаться хрупкому разрушению при работе конструкции в условиях сложного напряженного состояния и низких температур. Причинами разрушений могут быть конструктивные недостатки — наличие макроскопических концентраторов напряжений и дефекты сварных соединений — раковины, поры, шлаковые включения, подрезы по краю швов, существенное изменение структуры металла в результате сварочного тепла и возникновения остаточных напряжений. Склонность материалов к хрупкому разрушению оценивают путем испытаний различных видов.

Испытание на статический изгиб надрезанных образцов. Применяют стандартные образцы Менаже, образцы, уменьшенного сечения

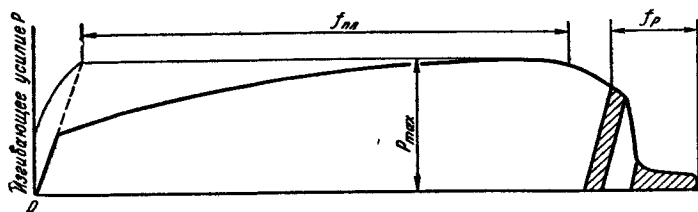


Рис. 18. Диаграмма испытания «изгибающее усилие — стрела прогиба»: f_p — стрела прогиба при разрушении; $f_{пл}$ — пластический прогиб до точки максимума

или образцы с усталостной трещиной. В процессе испытаний записывают диаграмму «изгибающее усилие — стрела прогиба». Мера сопротивления металла развитию трещин — работа излома A_p , определяемая путем планиметрирования падающей части диаграммы изгиба (заштрихованная площадь на рис. 18).

Испытание на ударный изгиб. Используют стандартные образцы типа образцов Менаже или образцов с V-образным надрезом. Испытания основного металла проводят согласно ГОСТ 9454—60 (см. раздел «Методы механических испытаний»), а металла сварных соединений по ГОСТ 6996—66. Надрез расположен в соответствии с целью испытания либо в литой зоне (параллельно оси шва), либо в зоне термического влияния на заданном расстоянии от края шва.

Результаты испытания сравнивают с результатами испытаний аналогичных образцов из основного металла или с нормативными значениями ударной вязкости для данного металла.

Испытания на вязкость разрушения. Для оценки стойкости сталей против хрупкого разрушения определяют вязкость разрушения или коэффициент интенсивности напряжения в условиях плоской деформации и мгновенного роста трещины K_{Ic} (см. раздел «Методы механических испытаний»).

ПАЯЕМОСТЬ

Паяемость — это способность материалов образовывать паяные соединения с требуемой прочностью, герметичностью, электропроводностью и т. д.

Качество паяных соединений зависит от правильного выбора основного металла, припоя, флюса, способа нагрева, величины зазоров, типа соединения, способа скрепления элементов перед пайкой.

Выбор основного металла и припоя. В качестве основного металла применяют стали всех типов, никелевые сплавы (жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие), медь и ее сплавы, а также легкие сплавы на основе титана, алюминия, магния и бериллия.

Реже применяют сплавы на основе тугоплавких металлов: хрома, ниобия, молибдена, тантала и вольфрама.

Припой (см. стр. 395—407) выбирают в зависимости от свойств основного материала. К ним предъявляются следующие требования:

- 1) температура плавления припоя должна быть ниже температуры плавления паяемых материалов;
- 2) расплавленный припой (в присутствии защитной среды, флюса или в вакууме) должен хорошо смачивать паяемый материал и легко растекаться по его поверхности;
- 3) прочность, пластичность и герметичность припоя должны быть достаточно высокими;
- 4) с паяемыми материалами припой не должен образовывать соединения, склонные к коррозии;
- 5) коэффициенты термического расширения припоя и паяемого материала не должны резко отличаться.

В табл. 11 указаны наиболее распространенные металлы, применяемые при изготовлении паяных соединений, и значения их температуры плавления.

Выбор флюса. В большинстве случаев окисную пленку с поверхности паяемого металла удаляют с помощью паяльного флюса

11. Наиболее распространенные металлы,
применяемые при пайке

Материал	Марка	Температура плавления (солидус), °C	Температура плавления (ликвидус), °C
Углеродистая деформируемая сталь	08кп	1485	1525
Хромомарганцевокремнистая сталь	30 ХГСА	1485	1515
Хромоникелевая сталь	40 ХНМА	1485	1490
Коррозионностойкая хромоникелевая сталь . . .	12 Х18Н9Т	1400	1500
Жаропрочный никельхромовый сплав	ХН77ТЮ (ЭИ437А)	1400	1430
Жаростойкий никельхромовый сплав	ХН78Т	1380	1440
Медь	М0, М1	1083	1083
Томпак	Л96	1060	1070
Латунь	Л62	900	920
Бронза	Бр. ОФ6,5—0,25	890	1040
Титановый сплав	BT2	1680	1710
Алюминиевомарганцевый сплав	АМц	600	655
Алюминиевомагнийевый сплав	АМг6	565	655
Дюралюминий	Д16	550	650
Силумин	АЛ5	577	627
Магнийевый деформируемый сплав	МА5	482	602
Магнийевый литейный сплав	Мл5	445	602
Цинковый сплав	ЦМ1	419	422
Бериллий	Чистый	1315	1315
Хром	—	1900	1900
Никобиевый сплав	ВН2	2430	2460
Молибденовый сплав	ВМ1	2600	2620
Тантал	Чистый	2996	2996
Вольфрам	—	3410	3410

(ГОСТ 19250—73). К паяльным флюсам предъявляются определенные требования:

- 1) при температуре пайки они должны иметь достаточную жидкотекучесть и легко удаляться после пайки;
- 2) не должны вызывать коррозии паяного соединения;
- 3) в расплавленном и газообразном состоянии должны способствовать смачиванию поверхности основного металла расплавленным припоем.

По составу флюсы делятся на следующие группы:

- 1) на основе соединений бора;
- 2) на основе фтористых соединений металлов;
- 3) на основе хлористых соединений металлов;
- 4) окисные;
- 5) на основе канифоли и других органических соединений.

Флюсы первой и второй групп применяют при пайке конструкционных, коррозионностойких и жаропрочных сталей, никелевых и медных

сплавов. Флюсы третьей группы применяют для пайки алюминиевых и магниевых сплавов, а также для низкотемпературной пайки черных и цветных металлов. Флюсы четвертой группы применяют для высокотемпературной пайки сталей. Флюсы пятой группы применяют при низкотемпературной пайке в тех случаях, когда нельзя тщательно промыть изделие после пайки (в монтажных условиях). Их применяют для пайки меди, медных сплавов, никеля и оцинкованного железа.

Выбор способа нагрева и величины зазоров при пайке определяется техническими требованиями к изделию, конструкцией паяемой детали, материалом, из которого она изготовлена, применяемым припоем, количеством изготавливаемых деталей.

Прочность паяного соединения, плотность и герметичность в значительной степени зависят от величины зазора.

Зазор под пайку зависит от физико-химических свойств основного металла и припоя, а также характера взаимодействия между ними. Величину зазора определяют экспериментальным путем. Оптимальные величины зазоров, применяемых при пайке некоторых металлов и сплавов, приведены в табл. 12. При конструировании паяного изделия необходимо предусмотреть, чтобы в зоне паяного соединения не было замкнутых полостей, в которых воздух или другие газы при пайке могут увеличиваться в объеме и служить причиной образования неспаев, пор и раковин в шве. Для выхода газов рекомендуется в деталях сверлить специальные отверстия.

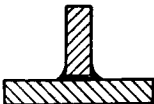
12. Оптимальные зазоры при пайке

Основной металл	Припой	Зазор мм
Углеродистые стали	Медь	0,02—0,15
	Латунь	0,05—0,30
	Серебро	0,05—0,15
Коррозионностойкие стали	Медь	0,02—0,15
	Латунь	0,05—0,30
	Серебро	0,05—0,15
	Никельхромовый	0,05—0,20
Медь и медные сплавы	Медноцинковый	0,10—0,30
	Меднофосфористый	0,02—0,15
	Серебро	0,03—0,15
Титан	Серебро	0,05—0,10
	Серебряномарганцевый	0,05—0,10
Алюминий	На алюминиевой основе	0,10—0,30

Выбор типа соединений. Основными типами паяных соединений согласно ГОСТ 19249—73 являются стыковое, внахлестку, косое, тавровое, угловое, соприкасающееся. Соединение встык применяют, когда не требуется герметичности и изделие работает не в жестких условиях.

В остальных случаях применяют соединение внахлестку, косое и соприкасающееся. Угловое и тавровое соединения применяют реже. В табл. 13 представлены основные типы паяных соединений.

13. Типы паяных соединений

Тип соединения	Формы поперечного сечения	Условное обозначение
Соприкасающееся		ПС-3
Встык		ПВ-1
Внахлестку		ПН-1
В скос		ПВ-3
В тавр		ПТ-1
В угол		ПЧ-1

Метод оценки растекаемости припоя на паяемом материале. Растекаемость припоя оценивают по площади растекания и коэффициенту пористости K_n :

$$K_n = \frac{S_n}{S_p},$$

где S_n — площадь пор — суммарная площадь, занятая газовыми порами и участками несмачивания под растекающейся каплей припоя; S_p — площадь растекания — площадь под растекающейся, дозированной по объему каплей припоя.

Площадь растекания измеряют планиметром или другим способом. Площадь пор измеряют планиметром или другим способом на рентгеновском снимке после просвечивания образцов.

Для испытаний применяют плоскую пластину паяемого материала размером 40 × 40 мм. Толщина пластины — от 1 до 3 мм. Подготовка поверхности, контактирующей при испытании с жидким припоем, должна быть аналогичной подготовке под пайку изделия. При испытании используют кусок припоя 64 мм³ и 300—400 мм³ флюса. Пластины нагревают до температуры пайки. За площадь растекания и коэффи-

коэффициент пористости принимают среднее арифметическое измерений площади растекания и коэффициент пористости трех—пяти испытываемых образцов

Методы оценки затекания припоя в зазор. Затекание припоя в горизонтальный зазор оценивают по коэффициенту затекания, коэффициенту пористости, высоте и радиусу галтели

Коэффициент затекания K_3 вычисляют по формуле

$$K_3 = \frac{S_3}{S_0},$$

где S_3 — площадь под затекшим в капиллярный зазор припоем; S_0 — площадь верхней пластины-образца.

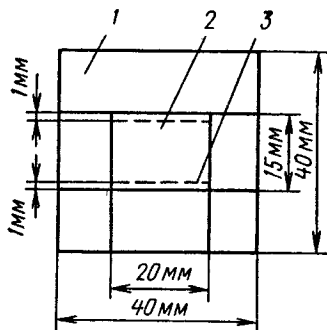


Рис. 19 Образец для определения затекания в горизонтальный зазор

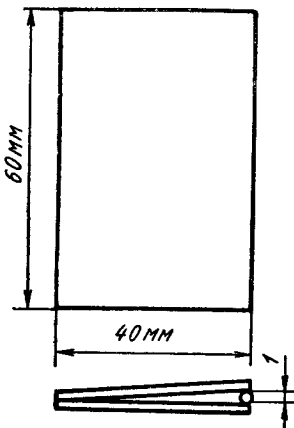


Рис. 20. Пластина-образец для определения затекания в вертикальный зазор

Условный радиус галтели R — радиус круга, касающегося поверхности галтели шва в точке пересечения высоты галтели с его поверхностью. Высота галтели h — отрезок биссектрисы угла, образованного паяемыми поверхностями, ограничен поверхностью галтели.

Для испытаний применяют плоские пластины паяемого материала 40×40 мм и 20×15 мм, толщина пластин от 1 до 3 мм (рис. 19).

На пластину 1 сверху укладывают пластину 2 с требуемым зазором. Величина зазора фиксируется двумя прокладками 3 соответствующей толщины. Собранный образец закрепляют в струбцине. Припой укладывают вплотную к зазору. Подготовка паяемых поверхностей образца перед испытанием должна быть аналогичной подготовке под пайку изделия.

Площадь затекания измеряют планиметром или другим способом на рентгеновском снимке, полученном после просвечивания. За значение коэффициента затекания, коэффициента пористости, радиуса и высоты галтели принимается среднее арифметическое измерений соответствующих характеристик 3—5 образцов.

Оценку затекания припоя в вертикальный зазор, переменный по величине, проводят по высоте подъема припоя. Для испытаний применяют образцы (рис. 20 и 21).

Образец на рис. 20 состоит из двух пластин паяемого материала размером 40—60 мм, толщина от 1 до 3 мм. Образец на рис. 21 состоит из двух трубок паяемого материала: трубки А (внутренний диаметр 14 мм, толщина стенки 4 мм, длина 80 мм), трубки Б (внутренний диаметр 9 мм, толщина стенки 4 мм, длина 80 мм). При испытании применяют припой, дозированный по объему в количестве 150% от объема капиллярного зазора.

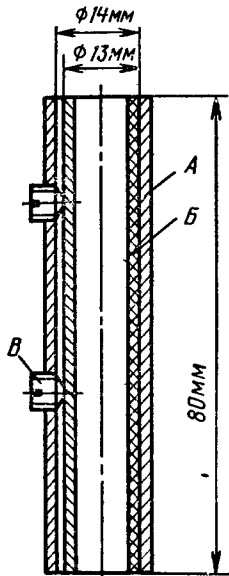


Рис. 21. Трубный образец для определения затекания в вертикальный зазор

Пластины образца (см. рис. 20) располагают под углом таким образом, чтобы зазор изменялся от 0 до 1 мм. Для этого с одного края по стороне, равной 60 мм, их прижимают плотно, а с другой — укладывают калиброванную проволоку диаметром 1 мм. Образец закрепляют с помощью струбцины.

Трубка Б образца (см. рис. 21) вставляется в трубку А и прижимается двумя винтами В, которые обеспечивают переменный зазор между ними от 0 до 1 мм.

Подготовленные образцы и ванну с припоём прогревают до заданной температуры, образцы погружают в ванну с припоём на глубину 3—6 мм и выдерживают при температуре пайки в течение 2 мин, а затем охлаждают. Высота подъема припоя в зависимости от зазора измеряется от уровня погружения на рентгеновском снимке после просвечивания образцов. За значение высоты подъема припоя принимается среднее арифметическое измерений высоты подъема на трех-пяти образцах.

Определение механических свойств паяных соединений. Механические испытания проводят для определения поведения паяных соединений под нагрузкой. Применяют испытание на растяжение и срез.

Для испытания на растяжение изготовляют круглые образцы (рис. 22). Образцы должны быть спаяны соосно. Перед пайкой торцовые поверхности образцов обезжиривают, травят и покрывают флюсом. После высыхания образцы устанавливают в зажимные цанги, на паяемую горчовую плоскость нижнего образца укладывают припой, который прижимают верхней половиной образца, укреплённой в подвижной цанге. После этого места пайки равномерно нагревают до рабочей температуры. При плавлении верхняя половина образца опускается под действием собственной массы и автоматически устанавливается заданный зазор.

Для испытания на срез изготовляют плоский образец, показанный на рис. 23. Образец закрепляют в приспособлении так, чтобы паяемые плоскости были параллельны, пайку проводят в горизонтальном положении образца. Припой и флюс в необходимых количествах помещают вблизи места соединения, а пламя горелки подводят к месту, указанному стрелкой. После пайки образец подвергают механической обработке до получения указанных размеров.

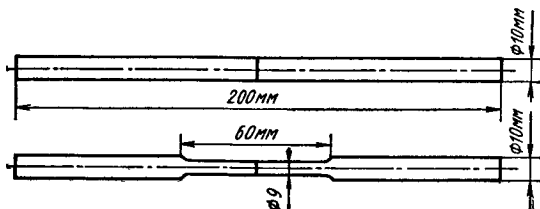


Рис. 22. Образец для испытания на растяжение

Металлографические исследования паяных соединений применяют для определения природы связей в паяном шве. Качество паяного шва во многом зависит от прочности связи припоя с металлом основы. Смачивание твердой металлической поверхности припоем свидетельствует о том, что между атомами припоя и атомами металлической основы возникает межатомная связь. Эта связь может образоваться в результате:

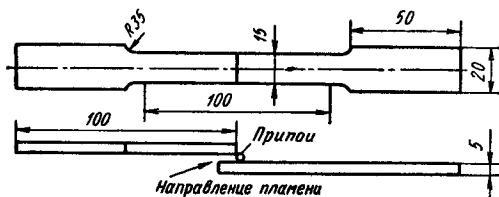


Рис. 23. Образец для испытания на срез

- 1) растворения основного металла в расплавленном припое с образованием жидкого раствора, распадающегося при последующей кристаллизации;
- 2) диффузии составляющих припой элементов в твердый основной металл с образованием твердого раствора;
- 3) реактивной диффузии между припоем и основным металлом с образованием на границе интерметаллических соединений;
- 4) бездиффузионной связи.

Характер связи определяется при изучении микроструктуры образцов, вырезанных из паяного соединения. При разработке технологии пайки следует подбирать такие условия процесса, которые обеспечивают хорошее смачивание основного металла припоем и по возможности предотвращают образование диффузионного слоя интерметаллических соединений.

КОРРОЗИЯ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ МЕТАЛЛОВ ОТ КОРРОЗИИ

Определение, типы и виды коррозии

Коррозией металлов называется разрушение металлов и сплавов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой.

Существует коррозия двух типов.

1) электрохимическая коррозия — взаимодействие металла с коррозионной средой (раствором электролита), при котором ионизация атомов металла и восстановление окислительной компоненты коррозионной среды протекают не в одном акте и их скорости зависят от электродного потенциала;

2) химическая коррозия — взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором окисление металла и восстановление окислительной компоненты среды протекают в одном акте.

По характеру разрушений металлов и сплавов различают несколько основных видов коррозии (ГОСТ 5272—68*): равномерная коррозия, неравномерная коррозия, местная коррозия, межкристаллитная коррозия, коррозия под напряжением, коррозионное растрескивание, коррозионная усталость, контактная коррозия, щелевая коррозия, биокоррозия.

Методы коррозионных испытаний и способы оценки коррозии

Коррозионные испытания разделяют на:

1) лабораторные — коррозионные испытания металла, проводимые в искусственных условиях;

2) испытания в природных условиях — коррозионные испытания металла, проводимые в атмосфере, в море, в почве и т. п.

3) эксплуатационные — коррозионные испытания машин, аппаратов, сооружений и т. п. в эксплуатационных условиях;

4) ускоренные — коррозионные испытания, проводимые в условиях, близких к эксплуатационным, но в более короткий срок.

Самая простая и надежная оценка коррозии — оценка по потерям массы металла, разрушенного коррозией. Этот способ обычно применяют при сплошной коррозии, протекающей с более или менее одинаковой скоростью по всей поверхности металла.

Потеря массы определяется по изменению массы образца, отнесенному к единице поверхности в единицу времени, и обычно измеряется в $г/(м^2 \cdot год)$. При определении потери массы необходимо тщательно следить за полным удалением продуктов коррозии. Если продукты коррозии механическим путем (щеткой, шпателем, ватой, резинкой и др.) удаляются плохо, следует использовать специальные химические реактивы, растворяющие продукты коррозии, но не реагирующие с основным металлом.

В соответствии с ГОСТ 13819—68 о коррозии судят по толщине разрушенного металла. Проникновение коррозии Π в мм/год определяется по формуле

$$\Pi = \frac{K}{\delta} \cdot 10^{-3},$$

где K — потеря массы, $г/(м^2 \cdot год)$; δ — плотность металла, $г/см^3$.

Классификация металлов по их коррозионной стойкости производится по десятибалльной шкале в соответствии с ГОСТ 13819—68 (табл. 14).

**14. Десятибалльная шкала
коррозионной стойкости металлов (ГОСТ 13819—68)**

Группа	Характеристика	Скорость коррозии метал- ла мм/год	Балл
1	Совершенно стойкие	Менее 0,001	1
2	Весьма стойкие	Больше 0,001 до 0,005	2
3	Стойкие	» 0,005 » 0,01	3
4	Пониженностойкие	» 0,01 » 0,05	4
5	Малостойкие	» 0,05 » 0,1	5
6	Нестойкие	» 0,1 » 0,5	6
		» 0,5 » 1,0	7
		» 1,0 » 5,0	8
		» 5,0 » 10,0	9
		» 10,0	10

Примечания: 1. Под скоростью коррозии металлов в десятибалльной шкале следует понимать проникновение коррозии в глубину металла, которая рассчитывается из данных потери массы после удаления продуктов коррозии

2. Оценка коррозионной стойкости металлов при скорости коррозии 0,5 мм/год и выше производится по группам стойкости а при скорости коррозии ниже 0,5 мм/год — по баллам

3. Десятибалльной шкалой коррозионной стойкости не допускается пользоваться при наличии в металле межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания.

**15. Оценка коррозионной стойкости
некоторых металлов в различных средах**

Металл	Влажный воз- дух, не содер- жащий солей	Морская вода	NaOH		H ₂ SO ₄		HCl		HNO ₃	
			холодный	горячий	холодная	горячая	холодная	горячая	холодная	горячая
Углеродистая сталь	2	2	4	4	1	1	1	1	1	1
Коррозионно-стойкая сталь	4	4	4	4	2	2	2	2	4	2
Алюминий	3	2	1	1	2	1	1	1	3	3
Бронза оловя- нистая	3	3	3	2	2	1	2	1	1	1
Бронза алюми- ниевая	4	4	3	3	2	1	2	1	1	1
Хром	4	4	4	4	3	3	1	1	4	4
Никель	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1
Кадмий	4	4	3	2	1	1	1	1	1	1
Цинк	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Медь	2	2	4	3	2	1	2	1	1	1
Латунь	2	2	3	2	2	1	2	1	1	1
Свинец	4	3	2	1	4	3	3	2	1	1
Олово	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1
Серебро	4	4	4	4	4	3	4	3	2	1
Золото	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Платина	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Примечание. В таблице приняты условные обозначения: 1 — разрушается, растворяется; 2 — корродирует; 3 — медленно корродирует; 4 — стоек в данной среде.

Если процесс коррозии идет в основном с выделением водорода или поглощением кислорода, применяют объемный метод оценки коррозии. Скорость коррозии при этом определяется количеством выделившегося водорода $[\text{см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})]$ или количеством поглощенного кислорода $[\text{см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})]$.

Объемный метод оценки коррозии на один-два порядка точнее массового.

Когда коррозия носит неравномерный или местный характер, показатель потери массы должен быть дополнен глубиной проникновения коррозии.

О межкристаллитной коррозии удобно судить по изменению предела прочности и особенно удлинения.

Существуют другие способы оценки коррозии: по изменению отражательной способности поверхности металла; по изменению электрического сопротивления; по определению количества металла, перешедшего в раствор в процессе коррозии; по времени до появления первого коррозионного очага или определенной площади коррозии.

В табл. 15 приведены данные по коррозионной стойкости некоторых металлов и сплавов в различных средах.

Защита металлов от коррозии

Для защиты металлов от коррозии применяют электрохимическую защиту, защитные покрытия, обработку коррозионной среды и специальные антикоррозионные сплавы и металлы, устойчивые в данной среде.

Электрохимическая защита металла от коррозии осуществляется наложением электрического тока от внешнего источника или соединением с металлом (протектором), имеющим больший отрицательный (катодная защита) или больший положительный (анодная защита) потенциал, чем защищаемый металл.

Катодная защита — весьма важный метод борьбы с коррозией. При этом способе защиты в случае достаточно высокой плотности наложенного тока в отличие от анодной защиты, когда скорость коррозии очень мала, но не уменьшается до нуля, коррозию можно свести к нулю.

Электрохимическую защиту широко применяют для защиты железных сталей, меди, свинца, алюминия при их работе в грунте, водных растворах (защита от коррозии подземных трубопроводов, кабелей, свай, шлюзовых ворот, морских трубопроводов, оборудования химических заводов).

Защитные покрытия. В большинстве случаев роль защитных покрытий сводится к изоляции металла от коррозионной среды.

Металлические покрытия. Защитные металлические покрытия широко применяют для защиты металлов от коррозии. Большинство металлических покрытий наносят или погружением в расплавленный металл, или гальванически. Находят применение и другие способы нанесения металлических покрытий (диффузионный, распыление, механотермический или плакирование).

Основные виды защитных и защитно-декоративных покрытий, применяемых в различных условиях эксплуатации, приведены в ГОСТ 14623—69.

При выборе покрытия следует руководствоваться назначением детали, материалом детали, условиями эксплуатации, назначением по-

крытия, способом нанесения покрытия, экономической целесообразностью.

Неорганические защитные пленки. Неорганические защитные пленки образуются в результате химического взаимодействия непосредственно на поверхности металла, превращающего поверхностный слой металла в химическое соединение. Наиболее распространенные защитные пленки окисные, фосфатные. Большинство пленок не обеспечивают достаточной защиты от коррозии. Их используют как грунт (фосфатные, окисные пленки), что повышает адгезию лакокрасочных покрытий с металлом.

Некоторые неорганические пленки предназначены для защиты от коррозии. Это оксидные пленки на стали, анодные на алюминии и магнии.

Образование оксидных пленок (оксидирование) достигается путем химической или электрохимической (анодной) обработки поверхности металлов. Фосфатные пленки получают на поверхности черных металлов путем химической обработки (фосфатирование) смесями фосфорнокислых соединений.

Эмали. Эмали представляют собой наплавленные на металл стеклянные покрытия. Эмали в основном состоят из боросиликатного стекла. Их высокая защитная способность определяется водо- и газонепроницаемостью. Эмали используются и как декоративные покрытия.

Лакокрасочные покрытия для обеспечения защиты от коррозии должны, с одной стороны, создавать надежный барьер, полную изоляцию металла от воздействия окружающей среды, с другой — тормозить протекание коррозионного процесса. В первом случае лакокрасочная пленка должна быть непроницаемой для воды, газов, химическистойкой, эластичной, должна хорошо прилипать к поверхности металла и обладать механической прочностью. Во втором случае применяемый грунт (лакокрасочный слой, непосредственно примыкающий к металлу) должен тормозить электродные реакции.

Стойкость лакокрасочных покрытий приведена в табл. 16.

Покрытия резиной металлических поверхностей могут обеспечить надежную защиту от коррозии. Их применяют для высокоагрессивных сред.

Ингибиторы. Ингибиторами называют вещества, добавляемые в незначительных количествах в коррозионную среду, в результате чего значительно уменьшается или полностью устраняется коррозия металла. Ингибиторы применяют как в жидких, так и в газовых средах. Находят применение ингибиторы и для повышения защитных свойств смазок и лакокрасочных покрытий.

Смазки. Защитные смазки довольно широко применяют для защиты от атмосферной коррозии металлов. Полностью защитить металл от коррозии смазками не удастся. В связи с этим их применяют для временной защиты (консервации) в основном при перевозке или хранении металлов и изделий из них. Для повышения защитных свойств смазок в них вводят ингибиторы.

Кислотоупорные плитки, замазки, пластмассы применяют для облицовки аппаратуры, работающей в кислотах, щелочах и других агрессивных жидкостях и газах.

Обработка коррозионной среды. Обработка коррозионной среды заключается в удалении из состава среды стимуляторов коррозии (например, растворенный в воде кислород) или введении в среду

16. Стойкость лакокрасочных покрытий в различных средах

Агрессивная среда	Покрытие									
	битумное	масляное	глифталевое, модифицирован- ное сушкой	пентафталевое	фенолформаль- дегидное модифи- цированное	виниловое	меламиноалкид- ное	нитроцеллюлоз- ное	кремнийоргани- ческое	эпоксидное
Атмосфера средних широт	н	у	п	п	п	п	у	х	х	п
Тропический климат . .	н	н	х	х	п	п	н	х	у	п
Вода пресная	х	у	у	у	х	п	у	у	х	п
Вода морская	у	н	у	у	у	х	н	у	у	х
Минеральные масла . . .	н	н	х	х	х	х	п	у	п	х
Бензин	н	н	у	у	х	х	х	х	х	п
Углеводороды	н	н	у	у	х	у	х	х	н	п
Кислоты	у	н	у	н	х	п	у	у	у	х
Щелочи	н	н	н	н	х	у	у	у	н	п

Примечание. В таблице приняты обозначения: Н — низкая стойкость; У — удовлетворительная стойкость; Х — хорошая стойкость; П — превосходная стойкость.

веществ (ингибиторов), замедляющих или полностью подавляющих коррозию.

Растворенный в воде кислород удаляют или химическим путем (пропускание воды над металлической стружкой или ее обработка восстановителями, например, сульфидами), или отгонкой в специальной аппаратуре.

Специальные антикоррозионные сплавы, металлы, устойчивые в данной среде. Этот способ ограничивается дефицитностью и дороговизной требуемых материалов, а также тем, что свойства сплава иногда не удовлетворяют предъявленным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов Г. В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М., Изд-во АН СССР, 1945. 338 с.
2. Гуляев А. П. Разложение ударной вязкости на ее составляющие по данным испытания образцов с разным надрезом. — «Заводская лаборатория», 1967, т. 33, № 4, с. 473—475.
3. Дроздовский Б. А., Фридман Я. Б. Влияние трещины на механические свойства конструкционных сталей. М., Металлургиздат, 1960 260 с.
4. Исследования механических свойств металлов. — В кн: Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. М., «Машиностроение», 1974, с. 319.
5. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Вопросы теории и технологии пайки. Саратов, изд. Саратовского университета, 1974, с. 248.
6. Любимов Б. В. Защитные покрытия изделий. М., Машгиз, 1969. 215 с.
7. Петрунин Н. С., Лоцманов С. Н., Николаев Т. А. Пайка металлов М., «Металлургия», 1973, с. 5—153.
8. Раузин Я. Р., Шур Е. А. Конструктивная прочность металлических материалов и методы ее оценки. — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1972, № 4, с. 2—5.
9. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке Изд. 5-е, доп. и перераб. М.—Л., Машгиз, 1971, с. 724—738.
10. Рубенкова Л. А., Щеглов Б. А. Механические испытания листового металла. М., «Машиностроение», 1963 (НТО Машпром).
11. Справочник по сварке Т. 3. Под ред. В. А. Винокурова. М., Машгиз, 1970, с. 190—228.
12. Хряпин В. Е., Лакедемонский А. В. Справочник паяльщика. Изд. 4-е. М., Машгиз, 1974. 328 с.
13. Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И. Испытания металлов на свариваемость. М., «Металлургия», 1972. 240 с.
14. Элер Г. Листовой металл и его испытание. М., Машгиз, 1958. 282 с.

СТАЛЬ

Строение и свойства

Сталь — сплав железа с углеродом (до 2%) и сопутствующими примесями в виде марганца, кремния, серы, фосфора и др. Стали, применяемые в машиностроении, обычно содержат от 0,05 до 1,5% С.

Железо в твердом состоянии может находиться в двух модификациях. α и γ .

α -железо имеет кубическую объемно-центрированную решетку, существует в двух интервалах температур: ниже 910°C и от 1401 до 1534°C ; высокотемпературное состояние α -железа часто обозначают как δ -железо; γ -железо имеет гранецентрированную кубическую решетку в температурном интервале 910 — 1401°C .

Углерод является вторым основным компонентом, определяющим структуру, механические и технологические свойства стали.

Примеси, присутствующие в стали, по Н. Т. Гудцову делят на четыре группы:

постоянные, или обычные (табл. 1) — марганец, кремний, фосфор и сера, если их содержание находится в пределах:

до 0,8% Мп; до 0,4% Si; до 0,05% Р и до 0,05% S;

скрытые — азот, кислород, водород, присутствующие в любой стали; в очень малых количествах (тысячные доли процента);

случайные — например, мышьяк, свинец, медь и др., попадающие в сталь из-за того, что они содержатся в рудах или шихтовых материалах данного географического района или связаны с определенным технологическим процессом производства стали;

специальные (легирующие элементы) — их вводят в состав стали для получения нужных по условиям службы деталей свойств стали. В этом случае сталь называют легированной. Сталь также будет легированной, если содержание кремния $\geq 0,5\%$, а марганца $\geq 1\%$.

Диаграмма состояния железо—углерод

Фазовое состояние железоуглеродистых сплавов в зависимости от состава и температуры описывается диаграммами стабильного (Fe—C) и метастабильного ($\text{Fe—Fe}_3\text{C}$) равновесия, которые позволяют определить температурные интервалы деформации, литья и ряда процессов термической обработки.

При стабильном равновесии равновесной высокоуглеродистой фазой является графит, а при метастабильном — цементит. Фазовый состав сталей характеризует диаграмма $\text{Fe—Fe}_3\text{C}$.

Элемент, его содержание, %	Предельная растворимость, %		Химические соединения	Влияние на структуру и свойства
	в феррите	в аустените		
Постоянные примеси				
марганец — до 0,8	До 12	Неограни- ченная	$(Fe\ Mn)_3C$	Растворяется в феррите и це- ментите Устраняет вредное дей- ствие серы образуя сернистый марганец Раскисляет сталь По- вышает прокаливаемость и проч- ностные свойства
кремний в спокойной стали — от 0,17 до 0,37 в кипя- щей — до 0,03	До 15	При 1100—1200° С до 4	Fe_3Si , Fe_2Si_3 , $FeSi$ $FeSi_2$	Растворяясь в феррите по- вышает твердость и прочность стали Раскисляет сталь
фосфор — до 0,05, в авто- матных сталях до 0,1	При 1050° С до 28	При 1140° С до 0,6	Fe_3P , Fe_2P , FeP , FeP_2	Растворяясь в феррите, вызы- вает хладноломкость, т. е. по- вышенную хрупкость при нор- мальной и особенно при пони- женной температуре Улучшает обрабатываемость стали резани- ем, способствуя образованию хрупкой стружки

Элемент, его содержание, %	Предельная растворимость, %		Химические соединения	Влияние на структуру и свойства
	в феррите	в аустените		
сера — до 0,05, в автомат- ных сталях — до 0,3	—	—	FeS-пирротит	FeS вызывает в стали красно- ломкость вследствие образования по границам зерен легкоплавкой эвтектики Fe—FeS (988° С или Fe—FeS—FeO (940° С), что пре- пятствует прокатке и ковке. Ухуд- шает механические свойства, кор- розионную стойкость и сваривае- мость стали. Улучшает обраба- тываемость резанием. Присадку серы в сталь применяют для улучшения обрабатываемости ре- занием и получения высококаче- ственной поверхности при обра- ботке на автоматах. В автомат- ную сталь вводят до 0,3% S и одновременно 0,06—0,12% P. Серу вводят также в некоторые бы- строрежущие стали для повыше- ния стойкости инструментов.
Скрытые примеси кислород	При 900° С ≈ 0,03	Тысячные доли	FeO-вюстит, Fe ₃ O ₄ -магнетит, Fe ₂ O ₃ -гематит	Наличие 0,1% кислорода силь- но повышает красноломкость. Твердые оксидные включения делают сталь более хрупкой и препятствуют обработке ее ре- жущим инструментом. Значи- тельно повышают критическую температуру хрупкости.
азот в низколегированных сталях до 0,001, в высоко- легированных, особенно содержащих хром, до 0,03—0,08	При 590° С — 0,1	При 650° С — 2,8	Fe ₄ N, Fe ₃ N, Fe ₂ N При наличии в стали V, Ti, Nb Al образуются нит- риды этих элементов	Образует в стали мелкодисперс- ные, твердые нитриды. Способ- ствует измельчению зерна.

При содержании углерода до 6,67% наблюдается неограниченная растворимость углерода в жидком состоянии (рис. 1).

В твердом состоянии растворимость углерода ограничена и существенно зависит от того, в какой кристаллической форме существует железо.

Различают три твердых раствора углерода в железе: α -раствор (феррит), γ -раствор (аустенит) и δ -раствор (δ -феррит). Все они являются

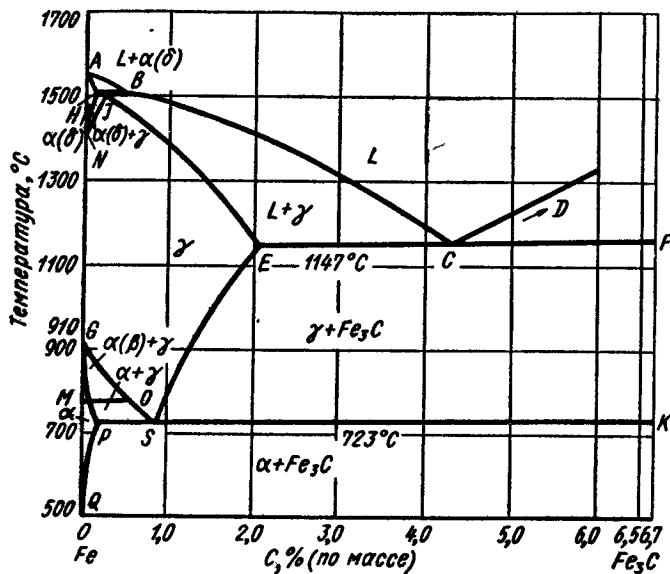


Рис. 1. Диаграмма фазового равновесия Fe—Fe₃C

твердыми растворами внедрения. В легированных сталях они могут быть также и твердыми растворами замещения. Максимальная растворимость углерода в феррите, аустените и δ -феррите соответственно составляет 0,006; 2 и 0,1%.

Линии AB, BC, CD — так называемые линии ликвидуса — показывают начало выделения кристаллов аустенита (AB, BC) или цементита (CD) из жидкой фазы при охлаждении или окончании плавления при нагреве.

Линии AH, HJ, JE, EC и CF — так называемые линии солидуса — соответствуют окончанию процесса затвердевания при охлаждении или началу плавления при нагреве.

Линия HJB — линия перитектического превращения (при охлаждении взаимодействие жидкого сплава состава B с δ -фазой состава H и образование γ -фазы состава J).

Линия ECF — линия эвтектического превращения: сохранившийся жидкий сплав эвтектического состава превращается при охлаждении в ледобурит.

2 Обозначения критических точек (температур) диаграммы
(см. рис 1)

Критическая точка	Температура, °C	Характер превращения
A_0	210	Переход цементита (Fe_3C) из ферромагнитного состояния в парамагнитное при нагреве
A_1	723	Превращение аустенита в феррит и цементит (линия PSK) при охлаждении и обратный процесс при нагреве
A_2	770 /	Переход феррита при нагреве из ферромагнитного состояния в парамагнитное и из парамагнитного в ферромагнитное (линия MO) при охлаждении
A_3	723—910	Превращение феррита в аустенит (линия GS) при нагреве и обратный процесс при охлаждении
A_4	1401—1490	Превращение γ -железа в δ -железо при нагреве и обратный процесс при охлаждении
A_{cm}	723—1147	Начало выделения вторичного цементита из аустенита при охлаждении или окончание растворения в аустените при нагреве
Ac_1		Начало образования аустенита при нагреве стали в результате превращения перлита
Ar_1		Превращение аустенита в перлит при охлаждении стали
Ac_3		Окончание образования аустенита из феррита при нагреве стали
Ar_3		Начало превращения аустенита в феррит при охлаждении стали

Линия GS — линия начала превращения аустенита в феррит при охлаждении. В условиях равновесия критическую температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения принято обозначать A_3 . При нагреве и охлаждении соответственно эта критическая температура обозначается соответственно A_{c3} и A_{r3} .

Линия SE — линия предельной растворимости углерода в аустените обозначается A_{cm} . При охлаждении эта линия соответствует температурам начала выделения, а при нагреве — температурам окончания растворения цементита (вторичного) в аустените.

Линия MO — температура Кюри — соответствует превращению при охлаждении парамагнитного феррита в ферромагнитный и обратному переходу при нагреве. При нагреве эту критическую температуру обозначают A_{c2} , при охлаждении A_{r2} . Однако эти критические точки соответствуют одной и той же температуре.

Линия PSK — линия эвтектоидного равновесия (обозначают A_1). При охлаждении соответствует распаду аустенита (0,8% C) с образованием эвтектоидной феррито-цементитной структуры, получившей название перлит. При нагреве и охлаждении обозначают ее соответственно A_{c1} и A_{r1} .

Линия PQ характеризует зависимость растворимости углерода в феррите от температуры. При охлаждении в условиях равновесия эта линия соответствует температурам начала выделения третичного цементита, а при нагреве — полному его растворению.

Обозначения критических точек (температур) диаграммы приведены в табл. 2.

Фазы и структуры

Характеристика основных фаз и структур сталей (рис. 2) приведена в табл. 3.

Влияние легирующих элементов на строение и свойства стали

Основные легирующие элементы сталей — марганец, кремний, хром, никель, кобальт, молибден, вольфрам, ванадий, титан, ниобий, алюминий, бор, редкоземельные металлы (церий, лантан и др.), азот.

В соответствии с принятой классификацией по действию на аллотропические модификации железа эти элементы делят на две группы.

Первая группа объединяет элементы, расширяющие область γ -фазы. В эту группу кроме углерода и азота, образующих твердые растворы внедрения, входят также элементы, образующие растворы замещения (никель, марганец, кобальт).

Вторая группа объединяет легирующие элементы, уменьшающие (сужающие) область γ -фазы (кремний, хром, алюминий, титан, ванадий, ниобий, молибден, вольфрам).

По отношению к углероду легирующие элементы можно распределить на три группы.

1. Графитизирующие элементы, к которым относятся кремний, никель, медь и алюминий. При значительном содержании в стали никеля, меди и особенно кремния протекает процесс графитизации, в результате которого цементит распадается на железо и графит. Эти элементы во всех случаях находятся в твердом растворе.

3. Основные фазы и структуры в сплавах железа (то Ю. М. Лактину)

Фаза или структура	Определение	Растворимость углерода	Кристаллическая решетка	Твердость по Бринеллю HB	Примечания
Феррит	Твердый раствор углерода и других элементов в α -железе Различают: а) высокотемпературный феррит, обозначаемый δ -феррит б) низкотемпературный α -феррит (рис. 2, а)	0,1% (при 1493° С) 0,025% (при 723° С) 0,006% (при 20° С) До 2,06% (при 1147° С) 0,8% (при 723° С) 6,67% С	ОЦК	80	Атомы растворенных элементов занимают междоузлия (C, N, H), узлы (Mn, Cr, Ni, W, Mo, V и др.) и дефектные области
Аустенит	Твердый раствор углерода и других элементов в γ -железе (рис. 2, б)	До 2,06% (при 1147° С) 0,8% (при 723° С) 6,67% С	ГЦК	170—200	
Цементит	Карбид железа Fe_3C . В присутствии примесей образуется легированный цементит, например $(FeMn)_3C$, $(FeCr)_3C$, $(FeMnCr)_3C$	6,67% С	Орторомбическая $a = 4,514 \text{ \AA}$; $b = 5,079 \text{ \AA}$; $c = 6,729 \text{ \AA}$	850—1000	Легированные элементы в стали могут образовывать сложные карбиды типа $M_3C_3^{(1)}$, $M_{12}C_4^{(2)}$, $M_6C_2^{(3)}$ (M_3C), MC , где M — сумма легирующих элементов, образующих карбид
Ледебурит	Эвтектическая структура состоящая из аустенита (после охлаждения до $t < A_1$ — перлита) и цементита	Образуется при содержании в жидком сплаве 4,3% С			При наличии в стали значительных количеств Cr, W, Mo может образовываться при существенно более низких концентрациях углерода
Перлит	Эвтектоидная или квазиэвтектоидная структура, состоящая из феррита и цементита, имеющих пластинчатую форму (рис. 2, в). Во многих случаях получают зернистый перлит (рис. 2, г), когда зерна цементита расположены в феррите	Образуется из аустенита в процессе охлаждения. Для образования перлита			В сорбите или троостите содержание C может быть меньше или больше 0,8% (квазиэвтектоид) Чем больше степень переохлаждения (скорость охлаждения), тем дисперснее смесь феррита и цементита

Мартенсит	Пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе (рис 2, б, е)	Такая же, как в исходном аустените	Тетрагональная. Чем выше содержание углерода, тем больше отношение c/a ; при 1,78% C $c/a = 1,08$	250—350 *) 350—450 *) 180—700 *)	стенита, так и в результате распада мартенсита при отпуске. В последнем случае цементит имеет не пластинчатую, а зернистую форму, феррит — повышенную плотность дефектов строения. Мартенсит образуется из аустенита в интервале температур $M_n - M_k$. Для получения мартенсита скорость охлаждения из области аустенита должна быть выше критической.
Бейнит	Структура, состоящая из кристаллов пересыщенного углеродом α -твердого раствора (малоуглеродистого мартенсита) и карбидов. Различают: верхний бейнит, в котором частицы карбидов размещаются между пластинками α -фазы (рис 2, ж); нижний бейнит, где α -фаза имеет игольчатое строение, а дисперсные карбиды располагаются внутри пластин α -фазы (рис 2, з)			HRC 35—40 *) HRC 40—50 *)	Образуется в результате распада аустенита в условиях большого переохлаждения (обычно в интервале температур 450—200° C). Верхний бейнит образуется в верхней зоне промежуточного превращения. Нижний бейнит образуется при температурах, близких к точке M_n .

1) Под Δ_0 понимают усредненную сумму толщин пластинок феррита и цементита.

2) Твердость мартенсита зависит от содержания в нем углерода. При содержании углерода 0,6—1,5% твердость мартенсита HB 600—700.

3) Твердость перлита (сорбита, троостита) и бейнита дана для стали, содержащей 0,8% C.

4) Карбиды, имеющие кристаллическую решетку простых карбидов хрома.

5) Карбиды, имеющие решетку двойных карбидов вольфрама или молибдена.

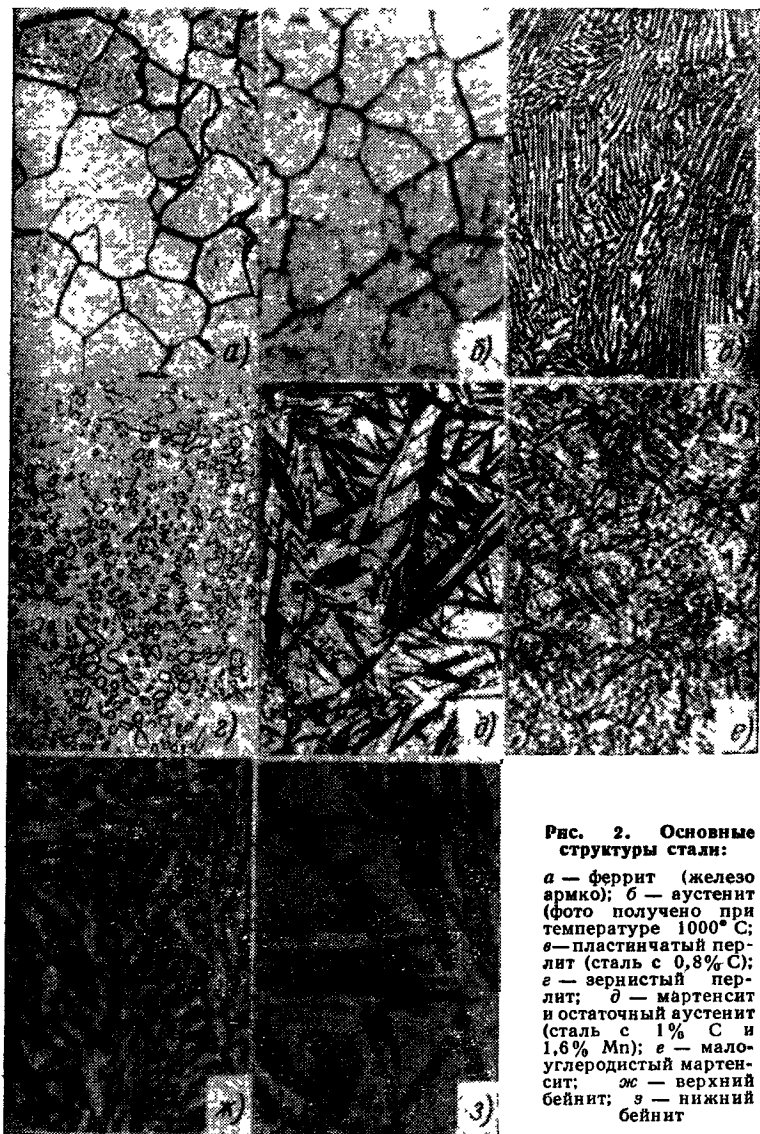


Рис. 2. Основные структуры стали:

а — феррит (железо армко); *б* — аустенит (фото получено при температуре 1000° С; *в* — пластинчатый перлит (сталь с 0,8% С); *г* — зернистый перлит; *д* — мартенсит и остаточный аустенит (сталь с 1% С и 1,6% Мп); *е* — малоуглеродистый мартенсит; *ж* — верхний бейнит; *з* — нижний бейнит

2. Нейтральные элементы, к которым относится кобальт. Кобальт в стали не образует карбидов и не вызывает графитизации. Находится в твердом растворе.

3. Карбидообразующие элементы, которые по возрастающей степени сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз располагаются в следующем порядке: Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Nb, Zr.

При малом содержании карбидообразующих элементов Mn, Cr, W, Mo растворяются в цементите, замещая в нем атомы железа. Более сильные карбидообразующие элементы (Ti, Zr, V, Nb) практически не растворяются в цементите и даже при самом небольшом своем содержании образуют специальные карбиды TiC, NbC, ZrC, VC и др.

Карбиды в легированных сталях в зависимости от состава, структуры и растворимости в аустените можно разделить на две группы.

К первой группе относятся карбиды типа M_3C , M_2C_3 , $M_{23}C_6$ и M_6C , имеющие сложную кристаллическую решетку. Характерная особенность карбидов этой группы — их сравнительно большая растворимость в аустените при нагреве.

Ко второй группе относятся карбиды типа MC (TiC, NbC, ZrC и др.). Эти карбиды представляют собой так называемые фазы внедрения, в кристаллической решетке которых атомы металла располагаются по типу решеток простых металлов и практически не растворяются в аустените.

Влияние легирующих элементов на свойства стали заключается в основном в воздействии их на характер превращения переохлажденного аустенита и на состав карбидных или интерметаллидных фаз, образующихся в стали и выделяющихся в процессе распада мартенсита при отпуске.

Легирующие элементы, влияя на устойчивость переохлажденного аустенита, могут повышать или снижать (при введении кобальта) прокаливаемость стали, изменяя тем самым механические свойства изделий повышенных сечений.

Если в стали при отпуске выделяются специальные карбиды или интерметаллиды, сталь приобретает устойчивость против отпуска, а также повышенную твердость, прочность и износостойкость. Влияние некоторых легирующих элементов на фазовый состав, критические точки и свойства стали показано в табл. 4.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ *

Сталь углеродистая обыкновенного качества общего назначения

Свойства стали обыкновенного качества регламентируются ГОСТ 380—71 *. Эту наиболее широко распространенную сталь применяют в строительстве, для деталей машин, станков, автомобилей и тракторов, труб разного назначения, ширпотреба и др. при сравнительно неответственном назначении конструкций и деталей.

Группы стали обыкновенного качества и основные марки приведены в табл. 5.

Сталь группы А применяют, когда изделия у потребителя не подвергаются горячей обработке (сварке, ковке и др.), и они поэтому сохра-

* В таблицах, где особо не оговорено, характеристики свойств даны по нижнему пределу.

4. Влияние легирующих элементов на строение и свойства легированной стали

74

Черные металлы и сплавы

Легирующий элемент и его химические соединения	Растворимость в α - и γ -твердых растворах (феррите и аустените), %	Влияние на критические точки, свойства стали и ее структурные составляющие
Марганец $Mn, C_n, Mn_{12}C_6$. Свободные карбиды марганца в стали не встречаются. Основное его количество находится в твердом растворе и частично в карбиде железа $(FeMn)_3C$	Ограниченная область α-твердого раствора (до 15%), открытая область γ-твердого раствора (непрерывная растворимость до 55%)	Понижает точки A_{c2} и A_{c1}, но еще более значительно A_{r2} и A_{r1}. Повышает твердость, предел прочности, текучести и сопротивление отрыву феррита. Понижает пластичность феррита при содержании свыше 3—3,5%. Смещает эвтектоидную концентрацию в сторону более низких содержаний углерода. Каждый процент марганца понижает концентрацию углерода в эвтектике на 0,05—0,06%. В присутствии марганца карбид железа Fe_3C сильно обогащается марганцем. Марганец в карбидах в твердом растворе содержится в отношении 1:4. Марганец повышает устойчивость аустенита в перлитной и промежуточной областях, понижает температуру мартенситного превращения, увеличивает прокаливаемость стали, стабилизирует аустенит и повышает прочностные свойства стали.
Никель а) $FeNi_3$ — типа сверхструктуры, б) Ni_3C — соединение неустойчивое, а в стали не обнаружено	Область α-твердого раствора ограниченная. Растворимость возрастает с понижением температуры и при 20° С составляет около 10%. Открытая область γ-твердого раствора	Понижает точки A_2 и A_1, и особенно A_{r2} и A_{r1} при охлаждении. Повышает твердость и прочность, снижает критическую температуру хрупкости феррита. Никелевый аустенит имеет высокую вязкость, малую прочность и твердость. Уменьшает содержание углерода в эвтектике. Повышает устойчивость переохлажденного аустенита в перлитной и промежуточной областях, понижает температуру мартенситного превращения. Вследствие снижения критической скорости охлаждения повышает прокаливаемость стали, стабилизирует аустенит в закаленной стали; в отожженных сталях незначительно повышает прочность, наиболее сильно уменьшает склонность к хрупкому разрушению закаленной и отпущенной стали при комнатной и пониженной температурах; увеличивает дисперсность карбидов при низком отпуске, но способствует их росту и коагуляции при высоком отпуске, способствует равномерному распределению углерода в цементованном слое. При повышенном содержании увеличивает сопротивление стали окислению при

а) FeCo — типа сверхструктуры;
б) Co_3C — соединения неустойчивые, в сталях не обнаружены

Хром
а) FeCr (σ -фаза) образуется при $600-800^\circ\text{C}$. Ее выделение охрупчивает сталь;
б) Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Cr_3C_2
в) CrN , Cr_2N

При температурах ниже 700°C в феррите растворяется до 75% кобальта. При содержании кобальта 35—65% феррит способен к упорядочению, что вызывает рост твердости. Кобальт неограниченно растворим в γ -железе в твердом состоянии.

Растворимость хрома в α -железе неограниченна. Область γ -твердого раствора замкнута. Максимальная растворимость хрома в γ -Fe около 12% при 1000°C .

До содержания около 50% повышает, а при более высоком понижает точку A_{c1} , повышает точку A_{c2} . Повышает температуру рекристаллизации и магнитного превращения (точку Кюри) феррита. Уменьшает способность аустенита к переохлаждению, повышает скорость превращения аустенита. Уменьшает количество остаточного аустенита в закаленной стали, повышает температуру мартенситного превращения. При отпуске закаленные кобальтовые стали снижают твердость медленнее, чем углеродистые. Кобальт повышает коэффициент диффузии углерода в аустените, способствует обезуглероживанию. В быстрорежущих сталях повышает горячую твердость и производительность резания.

Содержание до 7% снижает, а затем повышает точку A_{c1} . Повышает точку A_{c2} . Хромистый феррит обладает повышенными прочностными свойствами, при содержании до 2% Cr уменьшает склонность феррита к хрупкому разрушению, смещает максимальную скорость превращения аустенита в перлитной области к более высоким температурам; уменьшает скорость перлитного превращения, уменьшает скорость превращения в промежуточной области и смещает максимум ее к более низким температурам. В случае полного растворения карбидов и, таким образом, значительного насыщения твердого раствора углеродом и хромом мартенситная точка стали существенно снижается и в стали сохраняется много остаточного аустенита. Хромистая сталь обладает повышенной устойчивостью против отпуска (вследствие выделения специальных карбидов и уменьшения скорости рекристаллизации α -фазы). Хром повышает прокаливаемость стали, способствует получению высокой и равномерной твердости, наличие карбидов хрома или карбидов цементитного типа, легированных хромом, обеспечивает стали повышенную износостойкость. При содержании хрома в твердом растворе свыше 12—13% значительно повышается устойчивость стали против коррозии и окисления.

Легирующий элемент и его химические соединения	Растворимость в α - и γ -твердых растворах (феррите и аустените), %	Влияние на критические точки, свойства стали и ее структурные составляющие
Молибден а) Fe_3Mo_6, FeMo б) Mo_3C, MoC в) Mo_3N, MoN	Открытая область α-твердого раствора. При 1450°C растворяется около 37,5%, при 700°C — 9% при 20°C — 4% Мо. Область γ-твердого раствора замкнутая. Максимальная растворимость молибдена в γ-фазе — около 5%	Повышает точки A_{c2} и A_{c1}. Сильный карбидообразующий элемент. Образует карбиды типа $(\text{MoFe})_{23}\text{C}_6$ и $(\text{Fe}, \text{Mo})_6\text{C}$, в которых вероятное соотношение атомов железа и молибдена $\text{Fe}_{21}\text{Mo}_2\text{C}_6$ и $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}_6$. В карбиде $(\text{MoFe})_{23}\text{C}_6$ могут растворяться хром и вольфрам, поэтому он может присутствовать в сталях (сплавах) разной легированности. В цементите (Fe_3C) растворяется около 1% молибдена. Молибден повышает прокаливаемость стали, увеличивая устойчивость переохлажденного аустенита в перлитной области. Устойчивость аустенита в сталях с молибденом в промежуточной области изменяется мало. Уменьшает чувствительность к перегреву, повышает устойчивость стали против разупрочнения при отпуске, увеличивает теплостойкость и сопротивление ползучести; устраняет склонность стали к отпускной хрупкости; тормозит процесс роста и коагуляции легированного молибденом цементита и специальных карбидов
Вольфрам а) Fe_2W, Fe_7W_6 б) W_2C, WC в) W_3N, WN	Открытая область α-твердого раствора. Растворимость при 1524°C — 15%, при 700°C — 4,5%. Область γ-твердых растворов замкнутая. Максимальная растворимость вольфрама в α-твердом растворе при 600°C — около 6%	Повышает точки A_{c2} и A_{c1}. Повышает температуру рекристаллизации, твердость, предел прочности и предел текучести феррита, снижает пластичность. В сложнoleгированных сталях (быстрорежущих, штамповых и т. п.) в качестве стабильной фазы присутствуют карбиды типа M_6C—$(\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C})$ и M_{23}C_6—$(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{W})_{23}\text{C}_6$. Вольфрам и образуемые им карбиды уменьшают склонность аустенита к росту зерна. Вольфрам повышает устойчивость аустенита в перлитной области, почти не влияя на его устойчивость в про-

а) FeV—σ-фаза, образуется при содержании 29—60% ванадия, хрупкая, парамагнитная

- б) V_4C_3 , VC (V_4C_3)
в) VN

α-железа в твердом состоянии неограниченная. Область γ-твердого раствора очень узкая (1,2—1,5%) и замкнутая

температуру рекристаллизации, но снижает вязкость феррита. Сильный карбидообразующий элемент. Выделение карбидов ванадия при отпуске обеспечивает повышение твердости и теплоустойчивости. Замедляет превращение аустенита в перлитной, но не влияет на превращение в промежуточной области. Повышает дисперсность структуры перлита; увеличивает прокаливаемость стали, при закалке от высоких температур, обеспечивающих растворение карбидов ванадия, уменьшает ее при закалке от обычных температур; повышает устойчивость против отпуска.

Малые добавки ванадия способствуют измельчению зерна, повышают вязкость, а также весь комплекс механических свойств в нормализованном и улучшенном состояниях. Будучи активным раскислителем и дегазатором, ванадий рафинирует сталь и улучшает ее свариваемость вследствие связывания углерода в карбиды и газов в оксиды и нитриды. Образуя очень твердые карбиды, он обеспечивает стали повышенную износостойкость

Повышает точки A_{c2} и A_{c1} . Ферритные стали, содержащие титан, способны к дисперсионному твердению. Сильный карбидообразующий элемент способствует образованию в стали наследственного мелкого зерна, препятствует росту зерна при нагреве, выделяясь при отпуске в виде интерметаллидов. В высоколегированных сталях, содержащих никель и кобальт, титан значительно упрочняет их за счет эффекта дисперсионного твердения. Вводится в нержавеющие стали в качестве стабилизирующего элемента

Титан

- а) Fe_2Ti , FeTi, FeTi₃
б) TiC
в) TiN, Ti₃N

Максимальная растворимость в α = Fe ≈ 6% при температуре 1300°С. С понижением температуры растворимость уменьшается. Область γ-твердого раствора ограниченная (≈1% Ti), замкнутая

5. Группы и основные марки стали
обыкновенного качества

Группа	Характеристика поставки	Марки
А	По механическим свойствам	Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6
Б	По химическому составу	БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6
В	По механическим свойствам и химическому составу	ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5

няют свойства, полученные на металлургическом заводе. Химический состав этой стали не регламентируется, но указывается в сертификате.

Сталь группы Б подвергают у потребителя обработке, при которой механические свойства меняются, и уровень их, помимо условий обработки, определяется химическим составом. От последнего зависят также режимы горячей обработки у потребителя. Если при изготовлении конструкции и деталей применяется сварка, то гарантируются и химический состав, и механические свойства (группа В). Это необходимо потому, что свариваемость и механические свойства в зоне влияния сварки зависят от химического состава, а в остальных частях изделия свойства сохраняются на уровне, достигнутом на металлургическом заводе.

Сталь поставляют горячекатаной — сортовой, фасонной, толстолистовой, тонколистовой, широкополосной (универсальной) и холоднокатаной — тонколистовой, а также в виде ленты, проволоки и метизов.

Химический состав углеродистых сталей обыкновенного качества приведен в табл. 6; механические свойства стали группы А при испытании на растяжение и изгиб — в табл. 7; ударная вязкость сталей ВСтЗсп, ВСтЗпс, ВСтЗГпс — в табл. 8; в табл. 9 даны режимы термической обработки и характеристики механических свойств крупных поковок; в табл. 10 — характеристики технологических свойств.

6. Химический состав стали (%)
по плавочному анализу

Сталь	C	Mn	Si
БСт0	≤0,23	—	—
БСт1кп	0,06—0,12	0,25—0,50	≤0,05
БСт1пс			0,05—0,17
БСт1сп			0,12—0,30
БСт1Гпс		0,7—1,1	≤0,15

Продолжение табл. 6

Сталь	C	Mn	Si
БСт2кп	0,09—0,15	0,25—0,50	≤0,07
БСт2пс			0,05—0,17
БСт2сп			0,12—0,30
БСт2Гпс		0,7—1,1	≤0,15
БСт3кп	0,14—0,22	0,30—0,60	≤0,07
БСт3пс		0,40—0,65	0,05—0,17
БСт3сп			0,12—0,30
БСт3Гпс		0,80—1,10	≤0,15
БСт4кп	0,18—0,27	0,40—0,70	≤0,07
БСт4пс			0,05—0,17
БСт4сп			0,12—0,30
БСт4Гпс		0,8—1,2	≤0,15
БСт5пс	0,28—0,37	0,50—0,80	0,05—0,17
БСт5сп			0,15—0,35
БСт5Гпс	0,22—0,30	0,80—1,20	≤0,15
БСт6пс	0,38—0,49	0,50—0,80	0,05—0,17
БСт6сп			0,15—0,35

Примечания 1. Содержание P в стали БСт0 должно быть не более 0,07% и в остальных сталях не более 0,04%

2. Содержание S в стали БСт0 должно быть не более 0,06% и в остальных сталях не более 0,05%

Сталь	$\sigma_{\text{в}},$ кгс/мм ²	$\sigma_{\text{т}},$ кгс/мм ² , для толщин, мм				$\delta_{\text{в}}, \%$, для толщин, мм			Изгиб на 180° * для толщин, мм	
		≤ 20	$>20 \leq 40$	$>40 \leq 100$	> 100	≤ 20	$>20 \leq 40$	> 40	≤ 20	> 20
		Не менее								
Ст0	≥ 31	—	—	—	—	23	22	20	$d = 2a$	Диаметр оправки увеличивается на тол- щину образца
Ст1кп	31—40	—	—	—	—	35	34	32	$d = 0$ (без оправки)	
Ст1сп Ст1пс	32—42	—	—	—	—	34	33	31		
Ст1Гпс	32—43									
Ст2кп	33—42	22	21	20	19	33	32	30		
Ст2сп Ст2пс	34—44	23	22	21	20	32	31	29		
Ст2Гпс	34—45									
Ст3кп	37—47	24	23	22	20	27	26	24	$d = 0,5a$	
Ст3пс Ст3сп	38—49	25	24	23	21	26	25	23		

Сталь	$\sigma_{в},$ кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ² , для толщин, мм				δ_s , %, для толщин, мм			Изгиб на 180° * для толщин, мм	
		≤ 20	$>20 \leq 40$	$>40 \leq 100$	> 100	≤ 20	$>20 \leq 40$	> 40	≤ 20	>20
		Не менее								
Ст3Гпс	38—50	25	24	23	21	26	25	23	$d = 0,5a$	Диаметр оправки увеличивается на тол- щину образца
Ст4кп	41—52	26	25	24	23	25	24	22	$d = 2a$	
Ст4пс Ст4сп	42—54	27	26	25	24	24	23	21		
Ст4Гпс	42—55									
Ст5пс Ст5сп	50—64	29	28	27	26	20	19	17	$d = 3a$	
Ст5Гпс	46—60	29	28	27	26	20	19	17		
Ст6пс Ст6сп	≥ 60	32	31	30	30	15	14	12	—	

* a — толщина образца; d — диаметр оправки.

8. Ударная вязкость сталей

Стали	Вид проката	Расположение образца относительно проката	Толщина, мм	Ударная вязкость, кгс м/см ² (не менее)		
				при температуре, °С		После механического старения
				+ 20	- 20	
ВСт3по ВСт3сп	Листовой	Поперек	5—9 10—25 26—40	8 7 5	4 3 —	4 3 —
	Широкополосный	Вдоль	5—9 10—25 26—40	10 8 7	5 3 —	5 3 —
	Сортовой и фасонный	Вдоль	5—9 10—25 26—40	11 10 9	5 3 —	5 3 —
ВСт3Гпо	Листовой	Поперек	5—9 10—30 31—41	8 7 5	4 3 —	4 3 —
	Широкополосный	Вдоль	5—9 10—30 31—40	10 8 7	5 3 —	5 3 —
	Сортовой и фасонный	Вдоль	5—9 10—30 31—40	11 10 9	5 3 —	5 3 —
ВСт4по ВСт4сп ВСт4Гпо	Листовой	Поперек	5—9 10—25 26—40	7 6 4	— — —	— — —
	Сортовой и фасонный	Вдоль	5—9 10—25 26—40	10 9 7	— — —	— — —

9. Режимы термической обработки
и нормы механических свойств

Сталь	Сечение поко- вок, мм	Термическая обработка	Температура, °C	Механические свойства			HB (не более)
				σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	
Ст1 Ст2	—	Нормализация	920—970 910—960	—	—	—	110 116
Ст3 Ст4 Ст5	≤200		900—950 880—930 850—900	38—50 — 50—64	36—50 — 23—29	58—65 — 45—56	131 143 170
Ст6	≤300	Нормализация с охлаждени- ем на воздухе	От 840—880 до 500—450	65	23	42	197
		Высокий отпуск	620—650				
Ст6	≤400	Отжиг	830—860	69	19	36	—
		Высокий отпуск	620—640	60	27	52	
Ст6	≤220	Закалка в воде Отпуск	840—860 600—640	68— 83 *	18—23	50—57	—
		Закалка в масле Отпуск	840—860 580—620	71— 87 **	17—24	46—54	

* $\sigma_T = 40 \div 54$ кгс/мм², $a_H = 4,0 \div 6,5$ кгс м/см²
 ** $\sigma_T = 40 \div 54$ кгс/мм², $a_H = 3,5 \div 5,5$ кгс м/см²

П р и м е ч а н и е В тех случаях, где нет пределов, даны прибли-
зительные цифры

10. Характеристики технологических свойств

Сталь	Свариваемость	Способ сварки	Обрабатываемость резанием	
			Состояние металла	Коэффициент обрабатываемости K_v (материал реза)
Ст0	Неограниченная	РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой); ЭШС и КТС	Горячекатаный $HV\ 103-107$, $\sigma_B = 47\ \text{кгс/мм}^2$	2,10 (твердый сплав); 1,65 (быстрорежущая сталь)
Ст2кп, Ст2по, Ст2сп	Неограниченная	РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой), ЭШС и КТС. Для толщин свыше 36 мм рекомендуется подогрев и последующая термообработка Гр. Б — свариваемость (гарантируется по требованию заказчика) Гр В — свариваемость (гарантируется)	Горячекатаный $HV\ 137$	1,8 (твердый сплав); 1,6 (быстрорежущая сталь)
Ст3кп, Ст3по, Ст3сп, Ст3пс	Неограниченная	РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой), ЭШС и КТС. Для толщин свыше 36 мм рекомендуется подогрев и обязательная последующая термическая обработка	Горячекатаный $HV\ 124$, $\sigma_B = 41\ \text{кгс/мм}^2$	1,8 (твердый сплав); 1,6 (быстрорежущая сталь)
Ст5пс, Ст5сп, Ст6пс, Ст6сп	Ограниченная	РДС, АДС под флюсом и газовой защитой ЭШС (рекомендуется подогрев и последующая термообработка)	Горячекатаный $HV\ 158$, $\sigma_B = 65\ \text{кгс/мм}^2$	1,2 (твердый сплав и быстрорежущая сталь)

Примечания. 1 Указанные стали не склонны к отпускной хрупкости и не обладают флокеночувствительностью.

2 Обозначения способов сварки РДС — ручная дуговая, АДС — автоматическая дуговая, ЭШС — электрошлаковая, КТС — контактная.

3 Обрабатываемость стали резанием определена для условий полуставного точения без охлаждения по чистому металлу резцами, оснащенными твердым сплавом, и резцами из быстрорежущей стали (Р18, Р12) при постоянных глубине резания, подаче и главном угле в плане резцов. Обрабатываемость оценивалась по скорости резания, соответствующей 60-минутной стойкости резцов, и определяется коэффициентами K_v (твердого сплава) и K_v (быстрорежущей стали) по отношению к эталонной стали. За эталонную сталь принята марка 45 при $\sigma_B = 65\ \text{кгс/мм}^2$ и $HV\ 179$ скорость резания которой принята за единицу.

Сталь углеродистая качественная конструкционная

Углеродистые качественные конструкционные стали (ГОСТ 1050—74) применяют для изготовления различных машин и механизмов. От сталей обыкновенного качества они отличаются меньшим содержанием серы, фосфора и других вредных примесей, более узкими пределами содержания углерода в каждой марке (с учетом допускаемых отклонений по стандарту) и в большинстве случаев более высоким содержанием Si и Mn. Это, а также более тщательная выплавка дают возможность широко применять для изделий из этих сталей различные виды термической и химико-термической обработки и, следовательно, получать широкий диапазон механических свойств, изготовлять изделия не только ковкой и холодной механической обработкой, а также холодной штамповкой, высадкой и др.

Стали этой группы можно подразделить на подгруппы.

1. Низкоуглеродистые стали высокой пластичности (марки 05 до 10 по ГОСТ 1050—74). Стали этой подгруппы хорошо деформируются в холодном состоянии (особенно методом глубокой вытяжки), не склонны к отпускной хрупкости, хорошо свариваются и применяются в случаях, когда при изготовлении деталей необходимы значительные пластические деформации (гиб, высадка, холодная штамповка, отбортовка и др.). Эти стали применяют для изготовления статически умеренно нагруженных деталей и узлов машин, не подвергаемых термической обработке, а также деталей, подвергаемых химико-термической обработке (цементация, нитроцементация, цианирование).

2. Низкоуглеродистые стали марок 15—25. Эти стали менее пластичны, несколько хуже деформируются в холодном состоянии, хорошо свариваются, нечувствительны к перегреву и отпускной хрупкости. Применяют их для малоагруженных динамических нагрузками деталей. Термическая и химико-термическая обработка сталей этой подгруппы существенно повышает ее прочностные свойства.

3. Среднеуглеродистые стали повышенной прочности (марки с 30 по 55). Из сталей этой подгруппы изготовляют самые разнообразные детали. Различные виды термической обработки (изотермический отжиг, нормализация, улучшение, закалка с низким отпуском, поверхностное упрочнение ТВЧ и др.) значительно повышают эксплуатационные и прочностные свойства деталей.

4. Высокоуглеродистые конструкционные стали высокой прочности. Их применяют для изготовления деталей, работающих в условиях высоких статических, динамических и вибрационных нагрузок. Для повышения прочности применяют различные виды термической обработки. Из сталей этой подгруппы изготовляют также подкат для высокопрочной проволоки, рессорно-пружинные детали.

Тонколистовую (толщиной от 0,5 до 3 мм) холоднокатаную малоуглеродистую качественную сталь, предназначенную для холодной штамповки деталей с весьма глубокой сложной и особо сложной вытяжкой, изготовляют в соответствии с требованиями ГОСТ 9045—70*. Сталь горячекатаную толстолистовую (от 4 до 14 мм толщиной) конструкционную качественную углеродистую для холодной штамповки поставляют в соответствии с ГОСТ 4041—71*, требования к стали качественной углеродистой для изделий, изготовляемых методом холодной высадки, регламентирует ГОСТ 10702—63*.

Качественную углеродистую сталь выплавляют в конверторах с продувкой кислородом, в мартеновских и электрических печах. В зависимости от раскисления она бывает спокойной, полуспокойной (пс) и кипящей (кп).

В соответствии с ГОСТ 1050—74 изготовляют: горячекатаную и кованую сталь как с термической обработкой (отжиг, нормализация, высокий отпуск), так и без нее; калиброванную сталь и серебрянку (шлифованную) в нагартованном состоянии и после термической обработки (отжиг, высокий отпуск, нормализация, нормализация с отпуском, закалка с отпуском).

Сталь предназначается: а) для горячей обработки давлением; б) для холодной механической обработки по всей поверхности; в) для холодного волочения (подкат).

Химический состав стали и твердость после прокатки иликовки приведены в табл. 11.

По ГОСТ 1050—74 сталь делится на 5 категорий в зависимости от вида обработки при поставке и требований к испытанию механических свойств. Если категория не указана в заказе, сталь поставляют по 2-й категории (табл. 12).

В табл. 13 приведены свариваемость, обрабатываемость резанием сталей различных марок.

Сталь пониженной прокаливаемости 58 (55ПП) (см. табл. 11) применяют для изготовления деталей тонких сечений, требующих высокой поверхностной твердости и подвергаемых термической обработке с нагревом ТВЧ. Эту сталь используют для изготовления ответственных деталей машин вместо легированных цементуемых сталей. Сталь с пониженной прокаливаемостью применяют в основном для изготовления автомобильных шестерен с модулем 3—6, тонких шпинделей и других деталей, от которых требуется высокая износоустойчивость при вязкой сердцевине. Детали из этой стали, прогретые по всему сечению, закаливаются на небольшую глубину. Поверхностный слой, имеющий высокую твердость на глубине 1—2 мм, гарантирует большую контактную прочность и износоустойчивость при достаточно вязкой сердцевине. Твердость на расстоянии 3 мм от закаленной поверхности образца не должна превышать HRC 43.

Низкая прокаливаемость сохраняется при нагреве в определенном интервале температур. Процесс охлаждения после нагрева должен быть интенсивным, так как критическая скорость закалки стали 55ПП равна 1000—2000° С/с, что в 5—7 раз выше, чем у стали 45.

При испытании на статический изгиб и удар образцы из этой стали значительно превосходят легированные стали 18ХГТ, 30ХГТ и 12Х2Н4А, а по пределу контактной выносливости не уступают им. В то же время она значительно дешевле и технологичнее их и не содержит дефицитных легирующих элементов.

Сталь для холодной штамповки конструкционную качественную листовую поставляют в соответствии с ГОСТ 4041—71*, ГОСТ 9045—70*, ГОСТ 16523—70*, а также с техническими условиями.

Тонколистовую холоднокатаную малоуглеродистую сталь, предназначенную для холодной штамповки деталей с весьма глубокой сложной и особосложной вытяжкой, изготовляют по ГОСТ 9045—70* из сталей 08Ю, 08пс, 08Фкп и 08пс. Химический состав сталей приведен в табл. 14.

**11. Химический состав стали и твердость
после прокатки иковки**

Сталь	Состав, %			Твердость <i>HВ</i> без термо- обработки (не более)
	С	Si	Mn	
05кп	≤0,06	≤0,03	≤0,40	131
08кп	0,05—0,11		0,25—0,50	
08пс		0,05—0,17	0,35—0,65	
08	0,05—0,12	0,17—0,37		
10кп	0,07—0,14	≤0,07	0,25—0,50	143
10пс		0,05—0,17	0,35—0,65	
10		0,17—0,37		
15кп	0,12—0,19	≤0,07	0,25—0,50	149
15пс		0,05—0,17	0,35—0,65	
15		0,17—0,37		
20кп	0,17—0,24	≤0,07	0,25—0,50	163
20пс		0,05—0,17	0,35—0,65	
20		0,17—0,37		
25	0,22—0,30		0,50—0,80	170
30	0,27—0,35			179
35	0,32—0,40			207
40	0,37—0,45	217		

Продолжение табл 11

Сталь	Состав, %			Твердость <i>HВ</i> без термо- обработки (не более)
	C	Si	Mn	
45	0,42—0,50	0,17—0,37	0,50—0,80	229
50	0,47—0,55			241
55	0,55—0,60			255
58 (55ПП)	0,55—0,63	0,10—0,30	≤0,20	255
60	0,57—0,65	0,17—0,37	0,50—0,80	
65	0,62—0,70			
70	0,67—0,75			
75	0,72—0,80			
80	0,77—0,85			
85	0,82—0,90			
60Г	0,57—0,65		0,70—1,00	269
65Г	0,62—0,70		0,90—1,2	285
70Г	0,67—0,75			

Примечания 1. По степени раскисления сталь обозначают: кипящая — кп, полуспокойная — пс, спокойная — без индекса.

2. В сталях всех марок содержание S допускается не более 0,04%, P — не более 0,035%.

3. Содержание Сг в стали марок 05кп, 08кп, 08пс и 08 допускается не более 0,10%, в стали марок 10кп, 10пс, 10 и 58 — не более 0,15%; в остальных — не более 0,25%.

12. Характеристики механических свойств стали
2-й категории, определяемые при растяжении и ударе

Сталь	Термическая обработка заготовок	σ_T , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ_5 , %	Ψ , %	a_K , кгс м/см ²
		не менее				
08	Нормализация	20	33	33	60	—
10		21	34	31	55	—
15		23	38	27	55	—
20		25	42	25	55	—
25		28	46	23	50	9
30		30	50	21	50	8
35		32	54	20	45	7
40		34	58	19	45	6
45		36	61	16	40	5
50		38	64	14	40	4
55		39	66	13	35	—
60		41	69	12	35	—
65		42	71	10	30	—
70		43	73	9	30	—
75	Закалка + отпуск	90	110	7	30	—
80		95	110	6	30	—
85		100	115	6	30	—
60Г	Нормализация	42	71	11	35	—
65Г		44	75	9	—	—
70Г		46	80	8	—	—

Примечание Ударную вязкость определяют по требованию потребителя на термически обработанных образцах (закалка + отпуск) типа I.

Сталь	Свариваемость	Способ сварки	Состояние металла	Коэффициент обрабатываемости K_p (материал резца)
08	Неограниченная (кроме химико-термически обработанных деталей)	РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой), КТС	Горячекатаный HB 131, $\sigma_B = 32-42$ кгс/мм ²	2,1 (твердый сплав), 1,65 (быстрорежущая сталь)
10, 10кп			Горячекатаный HB 99—107, $\sigma_B = 46$ кгс/мм ²	2,1 (твердый сплав), 1,6 (быстрорежущая сталь)
15			Горячекатаный HB 143	1,8 (твердый сплав)
20			Горячекатаный HB 126—131, $\sigma_B = 46 + 50$ кгс/мм ²	1,7 (твердый сплав), 1,6 (быстрорежущая сталь)
25			Горячекатаный $\sigma_B = 46$ кгс/мм ²	1,7 (твердый сплав), 1,6 (быстрорежущая сталь)
30	Ограниченная	РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой), ЭШС (рекомендуется подогрев и последующая термообработка); КТС (без ограничений)	Горячекатаный HB 143, $\sigma_B = 47$ кгс/мм ²	1,7 (быстрорежущая сталь)
35			Горячекатаный HB 144—156, $\sigma_B = 52$ кгс/мм ²	1,3 (быстрорежущая сталь)
40			Горячекатаный HB 170, $\sigma_B = 53$ кгс/мм ²	1,2 (твердый сплав)

Сталь	Свариваемость	Способ сварки	Обрабатываемость резанием	
			Состояние металла	Коэффициент обрабатываемости K_v (материал резца)
45	Трудная	РДС и КТС (необходимы подогрев и последующая термическая обработка)	Горячекатаный $HB\ 170-179$, $\sigma_B = 66\text{ кгс/мм}^2$	1,0 (твердый сплав); 1,0 (быстрорежущая сталь)
50	Трудная	РДС и КТС (необходимы подогрев и последующая термическая обработка)	Горячекатаный $HB\ 196-202$, $\sigma_B = 65\text{ кгс/мм}^2$	1,0 (твердый сплав); 0,7 (быстрорежущая сталь)
55	Для сварных конструкций не применяется	КТС (с последующей термообработкой)	Нормализованный $HB\ 212-225$	1,0 (твердый сплав); 0,65 (быстрорежущая сталь)
60			Нормализованный $HB\ 241$	0,7 (твердый сплав); 0,65 (быстрорежущая сталь)
65Г		КТС (без ограничений)	Закаленный и отпущенный, $HB\ 240$, $\sigma_B = 84\text{ кгс/мм}^2$	0,85 (твердый сплав), 0,8 (быстрорежущая сталь)

Примечание. Условные обозначения способов сварки и коэффициент обрабатываемости — см стр 85

14. Химический состав, %, сталей для холодной штамповки

Сталь	C (не более)	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Прочие
			не более					
08кп	0,10	0,25—0,45	0,03	0,025	0,030	0,10	0,10	Si не более 0,15
08пс	0,09	0,20—0,40	0,04	0,025	0,030	0,10	0,10	Si не более 0,15
08Ю	0,07	0,20—0,35	0,01	0,020	0,025	0,03	0,06	Si не более 0,06 Al металлургический 0,02—0,07
08Фкп	0,08	0,20—0,40	0,01	0,020	0,025	0,03	0,01	Si не более 0,01 V 0,02—0,04

Листовую углеродистую сталь, поставляемую в соответствии с ГОСТ 16523—70*, по способности к вытяжке подразделяют на сталь, обрабатываемую глубокой (Г) и нормальной (Н) вытяжкой.

Тонколистовую холоднокатаную сталь толщиной от 0,5 до 3 мм, предназначенную для холодной штамповки деталей с весьма глубокой (ВГ), сложной (СВ) и особо сложной вытяжкой (ОСВ), поставляют по ГОСТ 9045—70*.

К качеству поверхности стального листа, предназначенного для холодной штамповки, предъявляются повышенные требования. Поверхность листов и рулонов углеродистой качественной конструкционной стали должна быть чистой, без плен, пузырей, трещин, вкатанной или невытравленной окалины, инородных включений и темных пятен. Дефекты местного характера допускается удалять путем зачистки при условии, что предельные минусовые отклонения по толщине листов не будут превышать норм.

Низколегированные стали

Низколегированными называют стали, содержащие до 0,2% С и до 2—3% в основном недефицитных легирующих элементов. Они не намного дороже углеродистых, но обладают рядом важных преимуществ: более высоким пределом текучести, что позволяет снизить расход металла на 15—30%; пониженной склонностью к механическому старению; повышенной хладостойкостью, лучшей коррозионной стойкостью и износостойкостью; возможностью значительно повысить после закалки и отпуска прочность, вязкость, износостойкость и чувствительность к надрезу. Все это в сочетании с хорошей свариваемостью обусловило широкое применение этих сталей при изготовлении трубопроводов и аппаратов, всевозможных сварных конструкций в вагоностроении, автомобилестроении, сельскохозяйственном машиностроении и др. Стали не флокеночувствительны и не склонны или мало склонны к отпускной хрупкости. За последнее время начинают внедряться высокопрочные бесперлитные и малоперлитные стали с весьма низким содержанием углерода, серы и фосфора, благодаря чему достигаются очень хорошая свариваемость, высокая ударная вязкость и низкий порог хладноломкости. Высокая прочность сталей в этом случае получается благодаря микролегированию ниобием, ванадием и титаном и применению регулируемой прокатки при изготовлении.

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	Другие элементы
<i>Стали, применяемые для изготовления листового, сортового и фасонного проката</i>								
09Г2	≤0,12	0,17—0,37	1,4—1,8	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	—
09Г2Д	≤0,12	0,17—0,37	1,4—1,8	≤0,30	≤0,30	0,15—0,30	—	—
14Г2	0,12—0,18	0,17—0,37	1,2—1,6	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	—
09Г2С	≤0,12	0,5—0,8	1,3—1,7	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	—
09Г2СД	≤0,12	0,5—0,8	1,3—1,7	≤0,30	≤0,30	0,15—0,30	—	—
10Г2С1	≤0,12	0,8—1,1	1,3—1,65	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	—
10Г2С1Д	≤0,12	0,8—1,1	1,3—1,65	≤0,30	≤0,30	0,15—0,30	—	—
15ГФ	0,12—0,18	0,17—0,37	0,9—1,2	≤0,30	≤0,30	≤0,30	0,05—0,12	—
15ГФД	0,12—0,18	0,17—0,37	0,9—1,2	≤0,30	≤0,30	0,15—0,30	0,05—0,12	—
15Г2СФ	0,12—0,18	0,4—0,7	1,3—1,7	≤0,30	≤0,30	≤0,30	0,05—0,10	—
15Г2СФД	0,12—0,18	0,4—0,7	1,3—1,7	≤0,30	≤0,30	0,15—0,30	0,05—0,10	—
10Г2Б	≤0,12	0,17—0,37	1,2—1,6	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	Nb 0,02—0,05
10Г2БД	≤0,12	0,17—0,37	1,2—1,6	≤0,30	≤0,30	0,15—0,30	—	Nb 0,02—0,05
10ХСНД	≤0,12	0,8—1,1	0,5—0,8	0,6—0,9	0,5—0,8	0,4—0,6	—	—
15ХСНД	0,12—0,18	0,4—0,7	0,4—0,7	0,6—0,9	0,3—0,6	0,2—0,4	—	—
10ХНДП	≤0,12	0,17—0,37	0,3—0,6	0,5—0,8	0,3—0,6	0,3—0,5	—	P 0,07—0,12 Al 0,08—0,15

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	Другие элементы
<i>Стали, применяемые для изготовления листового проката</i>								
12ГС	0,09—0,15	0,5—0,8	0,8—1,2	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	—
16ГС	0,12—0,18	0,4—0,7	0,9—1,2	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	—
17ГС	0,14—0,20	0,4—0,6	1,0—1,4	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	—
17Г1С	0,15—0,20	0,4—0,6	1,15—1,6	≤0,30	≤0,30	≤0,30	—	—
14Г2АФ	0,12—0,18	0,3—0,6	1,2—1,6	≤0,40	≤0,30	≤0,30	0,07—0,12	N 0,015—0,025
14Г2АФД	0,12—0,18	0,3—0,6	1,2—1,6	≤0,40	≤0,30	0,15—0,30	0,07—0,12	N 0,015—0,025
6Г2АФ	0,14—0,20	0,3—0,6	1,3—1,7	≤0,40	≤0,30	≤0,30	0,08—0,14	N 0,015—0,025
16Г2АФД	0,14—0,20	0,3—0,6	1,3—1,7	≤0,40	≤0,30	0,15—0,30	0,08—0,14	N 0,015—0,025
18Г2АФпс	0,14—0,22	До 0,17	1,3—1,7	≤0,30	≤0,30	≤0,30	0,08—0,15	N 0,015—0,030
18Г2АФДпс	0,14—0,22	» 0,17	1,3—1,7	≤0,30	≤0,30	0,15—0,30	0,08—0,15	N 0,015—0,030
14ХГС	0,11—0,16	0,4—0,7	0,9—1,3	0,5—0,8	≤0,30	≤0,30	—	—
15Г2АФДпс	0,12—0,18	До 0,17	1,2—1,6	≤0,30	≤0,30	0,2—0,4	0,08—0,15	N 0,015—0,030

Примечания: 1. В стали 10Г2С1Д допускается снижение содержания Si до 0,7%.
2. Содержание P в стали должно быть не более 0,035% (за исключением стали 10ХНДП); S — не более 0,040%

16. Характеристики механических свойств низколегированных сталей

Сталь	Толщина проката, мм	Толстолистовая и широкополосная универсальная стали						Сортовая и фасонная стали					
		σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	δ_5 , %	a_H (кгс·м/см ²) при температуре, °С			σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	δ_5 , %	a_H (кгс·м/см ²) при температуре, °С		
					+20	-40	-70				+20	-40	-70
09Г2, 09Г2Д	4	45	31	21	—	—	—	45	31	21	—	—	—
	5—9	45	31	21	—	3,5	—	45	31	21	—	4	3
	10—20	45	31	21	—	3	—	45	31	21	—	3	3
	21—32	45	30	21	—	4	—	45	30	21	—	3	1
14Г2	4	47	34	21	—	—	—	47	34	21	—	—	—
	5—9	47	34	21	—	3,5	—	47	34	21	—	3,5	3,5
	10—20	46	33	21	—	3	—	46	33	21	—	3	3
	21—32	46	33	21	—	3	—	46	33	21	—	3	1
12ГС	4	47	32	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5—9	47	32	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	10	47	32	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16ГС	4	50	33	21	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5—9	50	33	21	6	4	3	—	—	—	—	—	—
	10—20	49	32	21	6	3	2,5	—	—	—	—	—	—
	21—32	48	30	21	6	3	2,5	—	—	—	—	—	—
	33—60	47	29	21	6	3	2,5	—	—	—	—	—	—
	Св 60	46	28	21	6	3	2,5	—	—	—	—	—	—
	до 160												
17ГС	4	52	35	23	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5—9	52	35	23	—	4,5	—	—	—	—	—	—	—
	10—20	50	34	23	—	3,5	—	—	—	—	—	—	—

17Г1С	4 5-9 10-20	52 52 52	36 36 36	23 23 23	— — —	4,5 4	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —
09Г2С, 09Г2СД	4 5-9 10-20 21-32 33-60 61-80 Св. 80	50 50 48 47 46 45 44	35 35 33 31 29 28 27	21 21 21 21 21 21 21	— 6,5 6 6 6 6 6	4 3,5 3,5 3,5 3,5 3,5	— 3,5 3 3 3 3 3	50 50 48 47 46 45 44	35 35 33 31 29 28 27	21 21 21 21 21 21 21	— 6,5 6 6 6 6 6	4 3,5 3,5 3,5 3,5 3,5
10Г2С1, 10Г2С1Д	4 5-9 10-20 21-32 33-60 61-80 81-100	50 50 49 48 46 44 44	36 35 34 33 33 30 30	21 21 21 21 21 21 21	— 6,5 6 6 6 6 6	4 3 3 3 3 3 3	— 3 2,5 2,5 2,5 2,5 2,5	50 50 49 48 46 44 44	36 35 34 33 33 30 30	21 21 21 21 21 21 21	— 6,5 6 6 6 6 6	4 3 3 3 3 3 3
15ГФ, 15ГФД	4 5-9 10-20 21-32	52 52 52 48	38 38 36 34	21 21 21 21	— — — —	4 3 3 3	— — — —	52 52 49 47	38 38 35 33	21 21 21 21	— — — —	4 3 3 3
15Г2СФ, 15Г2СФД	4 5-9 10-20 21-32	— 56 56 56	— 40 40 40	— 18 18 18	— — — —	4 3,5 3,5	— — — —	56 56 56 —	40 40 40 —	18 18 18 —	— — — —	4 3,5 —
14Г2АФ, 14Г2АФД	4 5-9 10-50	55 55 55	40 40 40	20 20 20	— — —	4,5 4	— 3,5 3	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —

Сталь	Толщина проката, мм	Толстолистовая и широкополосная универсальная стали						Сортовая и фасонная стали					
		σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	$\delta_{5,2}$, %	a_H (кгс·м/см ²) при температуре, °С			σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	$\delta_{5,2}$, %	a_H (кгс·м/см ²) при температуре, °С		
					+20	-40	-70				+20	-40	-70
16Г2АФ, 16Г2АФД	4	60	45	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5—9	60	45	20	—	4,5	3,5	—	—	—	—	—	—
	10—32	60	45	20	—	4	3	—	—	—	—	—	—
	33—50	58	42	20	—	4	3	—	—	—	—	—	—
18Г2АФсп, 18Г2АФДсп	4	60	45	19	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5—9	60	45	19	—	4,5	—	—	—	—	—	—	—
	10—32	60	45	19	—	4	3	—	—	—	—	—	—
10Г2Б	4	52	38	21	—	—	—	56	40	18	—	—	—
	5—9	52	38	21	—	4	—	56	40	18	—	4	—
	10	52	38	21	—	3	—	56	40	18	—	3,5	—
10Г2БД	4	52	38	21	—	—	—	52	38	21	—	—	—
	5—9	52	38	21	—	4	—	52	38	21	—	4	—
	10	52	38	21	—	3	—	52	38	21	—	3	—
14ХГС	4	50	35	22	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5—9	50	35	22	—	4	—	—	—	—	—	—	—
	10	50	35	22	—	3,5	—	—	—	—	—	—	—

	5-9	54	40	19	—	5	3,5	54	40	19	—	5	3,5
	10-15	54	40	19	—	4	3	54	40	19	—	4	3
	16-32	54	40	19	—	5	3	—	—	—	—	—	—
	33-40	52	40	19	—	5	3	—	—	—	—	—	—
15ХСНД	4	50	35	21	—	—	—	50	35	21	—	—	—
	5-9	50	35	21	—	4	3	50	35	21	—	4	3,5
	10-20	50	35	21	—	3	3	48	33	21	—	3	3,0
	21-32	50	35	21	—	3	3	48	33	21	—	3	—
15Г2АФДпс	4	55	40	19	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5-9	55	40	19	—	4,5	3,5	—	—	—	—	—	—
	10-32	55	40	19	—	4	3	—	—	—	—	—	—
10ХНДП	4	48	35	20	—	—	—	48	35	20	—	—	—
	5-9	48	35	20	—	4	—	48	35	20	—	4	—

Примечания: 1 Ударная вязкость при температуре -20°C должна быть не ниже норм, установленных для температуры -40°C . Ударная вязкость при температуре -50 — -60°C должна быть не ниже норм, установленных для температуры -70°C .

2 Ударную вязкость определяют при одной температуре, которая указывается в заказе.

Низколегированную толстолистовую широкополосную универсальную и рулонную сталь поставляют в соответствии с ГОСТ 19282—73; круглую, квадратную, полосовую и фасонную — с ГОСТ 19281—73. Малоperlитные и бесперлитные стали изготавливаются по техническим условиям.

Химический состав сталей стандартных марок приведен в табл. 15, характеристики механических свойств — в табл. 16. Сталь поставляют горячекатаной и термообработанной. Установлено 15 категорий поставки этих сталей в зависимости от нормируемых характеристик, химического состава, механических свойств при растяжении, изгиба в холодном состоянии, ударной вязкости при температурах от +20 до -70° С, ударной вязкости при температурах от +20 до -70° С после механического старения.

Сталь конструкционная легированная

В зависимости от содержания углерода стали делятся на цементуемые (низкоуглеродистые) и улучшаемые (среднеуглеродистые). Одно из основных отличий этих сталей от углеродистых сталей — более глубокая прокаливаемость, что позволяет получать высокие механические свойства в больших сечениях. Особенности структурных превращений этих сталей позволяют для получения нужных свойств широко использовать не только все виды термической и химико-термической обработки, но также применять при достаточном легировании термомеханическую обработку, с помощью которой можно достигать весьма высоких механических свойств.

Сталь легированную конструкционную поставляют в соответствии с ГОСТ 4543—71 и многими техническими условиями.

Химический состав стали стандартных марок и твердость отожженной или высокоотпущенной стали приведены в табл. 17.

В зависимости от содержания примесей, а следовательно, и свойств различают сталь: а) качественную; б) высококачественную; в) особо высококачественную (электрошлакового переплава); в зависимости от назначения проката: а) для горячей обработки давлением и холодного волочения (подкат); б) для холодной механической обработки по всей поверхности; в зависимости от вида обработки: а) горячекатаную; б) кованую (в том числе с обточенной или ободранной поверхностью) диаметром или толщиной до 250 мм; в) калиброванную; г) круглую со специальной отделкой поверхности (серебрянку); в зависимости от заказа — на поставляемую как в горячекатаном, так и в термически обработанном состоянии (отоженную, высокоотпущенную или нормализованную с высоким отпуском); калиброванную и серебрянку в нагартованном или термически обработанном состоянии (отоженную, отпущенную, нормализованную, закаленную и отпущенную).

Характеристики механических свойств стали при 20° С, определяемые на термически обработанных образцах или образцах, вырезанных из термически обработанных заготовок, должны быть не ниже норм, приведенных в табл. 18. При других режимах термической обработки характеристики могут быть иные, такие, например, как в табл. 19, где показано для некоторых сталей изменение их в зависимости от температуры отпуска.

В табл. 20 приведены характеристики технологических свойств.

По требованию потребителя стали могут быть изготовлены с целым рядом дополнительных требований, оговоренных в ГОСТ 4543—71 и технических условиях: с нормированной прокаливаемостью, контролем обрабатываемости, величины зерна, доли вязкой составляющей в изломе образцов типа I, испытываемых на удар при температуре —60° С (для стали, предназначенной для машин и механизмов северного исполнения) и др.

Автоматные стали

Автоматные стали обрабатывают при высоких скоростях резания. При их применении снижается расход режущего инструмента и уменьшается шероховатость поверхности обрабатываемой детали.

Для достижения повышенной обрабатываемости в СССР до последнего времени применяли главным образом стали с повышенным содержанием серы. При увеличении содержания серы уменьшается трение между стружкой и инструментом из-за смазывающего действия сульфидов марганца и ломкости стружки. Однако применение сернистых сталей ограничивается из-за некоторого снижения механических свойств и краснеломкости.

В настоящее время применяют также свинецсодержащие стали.

Добавки свинца позволяют еще больше увеличить режим резания и срок службы инструмента. Свинец присутствует в стали в виде мелких округлых включений, связанных с сульфидами, и действует как разрушитель стружки сильнее, чем сульфид марганца. Кроме того, при резании образуется пленка свинца, уменьшающая трение между обрабатываемой деталью и инструментом.

Свойства стали и технологические характеристики при добавках свинца практически не меняются.

Недостаток при применении свинца — необходимость специальных мер при производстве свинцовистых сталей и при сварке из-за токсичных выделений.

Считается, что применение свинцовистых сталей целесообразно при снятии стружки в количестве 20% и более от массы обрабатываемой детали. Свинец добавляют в углеродистые и марганцовистые стали с высоким содержанием серы и в легированные конструкционные стали с низким содержанием серы. Примеры применения стали в автомобилестроении даны в табл. 21. Химический состав сталей приведен в табл. 22; характеристики механических свойств — в табл. 23 и 24.

17. Химический состав (%) и твердость конструкционных легированных сталей в состоянии поставки

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Другие элементы	Характеристики твердости отожженной или высоко- отпущенно ³ стали диамет- ром или толщиной > 5 мм	
							Диаметр отпечатка, мм (не менее)	Число твердости HB (не более)
Хромистые стали								
15X	0,12—0,18	0,17—0,37	0,40—0,70	0,70—1,00	—	—	4,5	179
15XA	0,12—0,17	0,17—0,37	0,40—0,70	0,70—1,00	—	—	4,5	179
20X	0,17—0,23	0,17—0,37	0,50—0,80	0,70—1,00	—	—	4,5	179
30X	0,24—0,32	0,17—0,37	0,50—0,80	0,80—1,10	—	—	4,4	187
30XPA	0,27—0,33	0,17—0,37	0,50—0,80	1,00—1,30	—	—	3,9	241
35X	0,31—0,39	0,17—0,37	0,50—0,80	0,80—1,10	—	—	4,3	197
38XA	0,35—0,42	0,17—0,37	0,50—0,80	0,80—1,10	—	—	4,2	207
40X	0,36—0,44	0,17—0,37	0,50—0,80	0,80—1,10	—	—	4,1	217
45X	0,41—0,49	0,17—0,37	0,50—0,80	0,80—1,10	—	—	4,0	229
50X	0,46—0,54	0,17—0,37	0,50—0,80	0,80—1,10	—	—	4,0	229
Марганцовистые стали								
15Г	0,12—0,19	0,17—0,37	0,70—1,00	—	—	—	4,7	169
20Г	0,17—0,24	0,17—0,37	0,70—1,00	—	—	—	4,5	179
25Г	0,22—0,30	0,17—0,37	0,70—1,00	—	—	—	4,3	197
30Г	0,27—0,35	0,17—0,37	0,70—1,00	—	—	—	4,3	197
35Г	0,32—0,40	0,17—0,37	0,70—1,00	—	—	—	4,2	207
40Г	0,37—0,45	0,17—0,37	0,70—1,00	—	—	—	4,2	207
45Г	0,42—0,50	0,17—0,37	0,70—1,00	—	—	—	4,0	229
50Г	0,48—0,56	0,17—0,37	0,70—1,00	—	—	—	4,0	229
10Г2	0,07—0,15	0,17—0,37	1,20—1,60	—	—	—	4,3	197
30Г2	0,26—0,35	0,17—0,37	1,40—1,80	—	—	—	4,2	207
35Г2	0,31—0,39	0,17—0,37	1,40—1,80	—	—	—	4,2	207
40Г2	0,36—0,44	0,17—0,37	1,40—1,80	—	—	—	4,1	217
45Г2	0,41—0,49	0,17—0,37	1,40—1,80	—	—	—	4,0	229
50Г2	0,46—0,55	0,17—0,37	1,40—1,80	—	—	—	4,0	229

Хроможарящие стали

18X Γ	0.15-0.21	0.17-0.37	0.90-1.20	0.90-1.20			
18X Π	0.17-0.23	0.17-0.37	0.80-1.10	1.00-1.30			4.4
20X Π P	0.18-0.24	0.17-0.37	0.70-1.00	1.00-1.30		Ti 0.03-0.09	4.1
27X Π P	0.25-0.31	0.17-0.37	0.70-1.00	0.75-1.05			4.3
25X Π T	0.22-0.31	0.17-0.37	0.70-1.00	0.75-1.00			4.1
30X Π T	0.24-0.32	0.17-0.37	0.80-1.10	1.00-1.30		Ti 0.03-0.09	4.1
40X Π T Φ	0.38-0.45	0.17-0.37	0.70-1.00	0.80-1.10		Ti 0.03-0.09	4.0
35X Π T Φ	0.31-0.38	0.17-0.37	0.95-1.25	1.00-1.30		Ti 0.03-0.09	4.0
25X Π M	0.23-0.29	0.17-0.37	0.90-1.20	0.90-1.20		Mo 0.20-0.30	4.2

Хромокремнистые стали

33XC	0.29-0.37	1.00-1.40	0.30-0.60	1.30-1.60	3.9
38XC	0.34-0.42	1.00-1.40	0.30-0.60	1.30-1.60	3.8
40XC	0.37-0.45	1.20-1.60	0.30-0.60	1.30-1.60	3.8

Хромолибденовые и хромолибденованадиевые стали

15XM	0.11-0.18	0.17-0.37	0.40-0.70	0.80-1.10	Mo 0.40-0.55	4.5
20XM	0.15-0.25	0.17-0.37	0.40-0.70	0.80-1.10	Mo 0.15-0.25	4.5
30XM	0.17-0.37	0.17-0.37	0.40-0.70	0.80-1.10	Mo 0.15-0.25	4.0
50XMA	0.26-0.33	0.17-0.37	0.40-0.70	0.80-1.10	Mo 0.15-0.25	4.0
35XM	0.32-0.40	0.17-0.37	0.40-0.70	0.80-1.10	Mo 0.15-0.25	3.9
38XM	0.35-0.42	0.17-0.37	0.35-0.65	0.90-1.30	Mo 0.20-0.30	3.9
30X3MΦ	0.27-0.34	0.17-0.37	0.30-0.60	2.30-2.70	Mo 0.20-0.30	4.0
40XMΦA	0.37-0.44	0.17-0.37	0.40-0.70	0.80-1.10	V 0.06-0.12	3.7
					Mo 0.20-0.30	
					V 0.10-0.18	2.69

Хромонадиевые стали

15XΦ	$\left \begin{array}{c} 0,12-0,18 \\ 0,37-0,44 \end{array} \right $	$\left \begin{array}{c} 0,17-0,37 \\ 0,17-0,37 \end{array} \right $	$\left \begin{array}{c} 0,40-0,70 \\ 0,50-0,80 \end{array} \right $	$\left \begin{array}{c} 0,80-1,10 \\ 0,80-1,10 \end{array} \right $	—	V 0,06-0,12	187
10XΦA					—	V 0,10-0,18	241

Никель молибденовые стали

5H2M	0.10-0.18	0.17-0.37	0.40-0.70	1.50-1.90	Mo 0.20-0.30	4,3	197
10H2M	0.17-0.25	0.17-0.37	0.40-0.70	1.50-1.90	Mo 0.20-0.30		

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Другие элементы	Характеристики твердости отожженной или высоко- отпущенной стали диамет- ром или толщиной > 5 мм	
							Диаметр отпечатка, мм (не менее)	Число твердости НВ (не более)
Хромоникелевые и хромоникелевые с бором стали								
20ХН	0,17—0,23	0,17—0,37	0,40—0,70	0,45—0,75	1,00—1,40	—	4,3	197
40ХН	0,36—0,44	0,17—0,37	0,50—0,80	0,45—0,75	1,00—1,40	—	4,0	229
45ХН	0,41—0,49	0,17—0,37	0,50—0,80	0,45—0,75	1,00—1,40	—	4,2	207
50ХН	0,46—0,54	0,17—0,37	0,50—0,80	0,45—0,75	1,00—1,40	—	4,2	207
20ХНР	0,16—0,23	0,17—0,37	0,60—0,90	0,70—1,10	0,80—1,10	—	—	—
12ХН2	0,09—0,16	0,17—0,37	0,30—0,60	0,60—0,90	1,50—1,90	—	4,2	207
12ХН3А	0,09—0,16	0,17—0,37	0,30—0,60	0,60—0,90	2,75—3,15	—	4,1	217
20ХН3А	0,17—0,24	0,17—0,37	0,30—0,60	0,60—0,90	2,75—3,15	—	3,8	255
30ХН3А	0,27—0,33	0,17—0,37	0,30—0,60	0,60—0,90	2,75—3,15	—	3,9	241
12Х2Н4А	0,09—0,15	0,17—0,37	0,30—0,60	1,25—1,65	3,25—3,65	—	3,7	269
20Х2Н4А	0,16—0,22	0,17—0,37	0,30—0,60	1,25—1,65	3,25—3,65	—	3,7	269
Хромокремнемарганцевые и хромокремнемарганцевоникелевые стали								
20ХГСА	0,17—0,23	0,90—1,20	0,80—1,10	0,80—1,10	—	—	4,2	207
25ХГСА	0,22—0,28	0,90—1,20	0,80—1,10	0,80—1,10	—	—	4,1	217
30ХГС	0,28—0,35	0,90—1,20	0,80—1,10	0,80—1,10	—	—	4,0	229
30ХГСА	0,28—0,34	0,90—1,20	0,80—1,10	0,80—1,10	—	—	4,0	229
35ХГСА	0,32—0,39	1,10—1,40	0,80—1,10	0,80—1,40	—	—	3,9	241
30ХГСН2А	0,27—0,34	0,90—1,20	1,00—1,30	0,90—1,20	1,40—1,80	—	3,8	255
Хромомарганцевоникелевые и хромомарганцевоникелевые с титаном и бором стали								
15ХГН2ТА	0,13—0,18	0,17—0,37	0,70—1,00	0,70—1,00	1,40—1,80	Ti 0,03—0,09	3,7	269
20ХГНР	0,16—0,23	0,17—0,37	0,70—1,00	0,70—1,00	0,80—1,10	—	4,3	197
20ХГНТР	0,18—0,24	0,17—0,37	0,80—1,10	0,40—0,70	0,40—0,70	Ti 0,03—0,09	—	—

30XН2МА	0,27—0,34	0,17—0,37	0,30—0,60	0,30—0,60	1,25—1,65	Мо 0,20—0,30	3,9	229
38X2Н2МА	0,33—0,40	0,17—0,37	0,25—0,50	1,30—1,70	1,30—1,70	Мо 0,20—0,30	3,7	241
40XН2МА	0,37—0,44	0,17—0,37	0,50—0,80	0,60—0,90	1,25—1,65	Мо 0,15—0,25	3,7	269
40X2Н2МА	0,35—0,42	0,17—0,37	0,30—0,60	1,25—1,65	1,35—1,75	Мо 0,20—0,30	3,8	269
38XН3МА	0,33—0,40	0,17—0,37	0,25—0,50	0,80—1,20	2,75—3,25	Мо 0,20—0,30	3,7	255
18X2Н4МА	0,14—0,20	0,17—0,37	0,25—0,55	1,35—1,65	4,00—4,40	Мо 0,30—0,40	3,7	269
25X2Н4МА	0,21—0,28	0,17—0,37	0,25—0,55	1,35—1,65	4,00—4,40	Мо 0,30—0,40	3,7	269

Хромоникельмолибденованадиевые и хромоникельванадиевые стали

30XН2МФА	0,27—0,34	0,17—0,37	0,30—0,60	0,60—0,90	2,00—2,40	Мо 0,20—0,30	3,7	269
36X2Н2МФА	0,33—0,40	0,17—0,37	0,25—0,50	1,30—1,70	1,30—1,70	V 0,10—0,18		
38XН3МФА	0,33—0,40	0,17—0,37	0,25—0,50	1,20—1,50	3,00—3,50	Мо 0,20—0,30	3,7	269
45XН2МФА	0,42—0,50	0,17—0,37	0,50—0,80	0,80—1,10	1,30—1,80	V 0,10—0,18		
20XН4ФА	0,17—0,24	0,17—0,37	0,25—0,55	0,70—1,10	3,75—4,15	Мо 0,35—0,45	3,7	269
						V 0,10—0,18	3,7	269

Хромоалюминиевые и хромоалюминиевые с молибденом стали

38X2Ю	0,35—0,43	0,20—0,40	0,20—0,40	1,50—1,80	—	Al 0,50—0,80	4,0	229
38X2МЮА	0,35—0,42	0,20—0,45	0,30—0,60	1,35—1,65	—	Мо 0,15—0,25	4,0	229
						Al 0,70—1,10		

Примечания: 1. Содержание Р в сталях должно быть не более в качественных — 0,035%; высококачественных и особо высококачественных — 0,025%.

2. Содержание S должно быть не более 0,035% в качественных, 0,025% в высококачественных и 0,015% в особо высококачественных.

3. Содержание остаточных элементов должно быть не более Ni и Cr для всех категорий — до 0,30% каждого, Si для качественных, высококачественных 0,30% и для особо высококачественных 0,25%.

4. Твердость сталей 20ХНР, 25ХГМ, 20Н2М и 20ХГНТР устанавливают по соглашению.

5. В марки с буквой Р вводят до 0,005% В (по расчету).

18. Характеристики механических свойств конструкционных легированных сталей

Сталь	Термообработка				Хромистые стали												не менее					Размеры сечения заготовок для термообработки (диаметр круга или сторона квадрата), мм
	Закалка		Отпуск		Среда охлаждения	Температура, °C	Среда охлаждения	1-й закалки или нормализации	2-й закалки	Вода или масло	180	Воздух или масло	50	70	12	45	7	15				
15X 15XA	880	770—820	Вода или масло	Воздух или масло	180	Воздух или масло	50	70	12	45	7	15										
20X	880	770—820	Вода или масло	Воздух или масло	180	Воздух или масло	65	80	11	40	6	15										
30X	860	—	Масло	Вода или масло	500	Вода или масло	70	90	12	45	7	25										
30XPA	900 воздух	860	Масло	Воздух	200	Воздух	130	160	9	40	5	—										
35X	860	—	Масло	Вода или масло	500	Вода или масло	75	93	11	45	7	25										

38ХА	860	—	Масло	550	Вода или масло	80	95	12	50	9	25
40Х	860	—	Масло	500	Вода или масло	80	100	10	45	6	25
45Х	840	—	Масло	520	Вода или масло	85	105	9	45	5	25
50Х	830	—	Масло	520	Вода или масло	90	110	9	40	4	25
<i>Марганцовистые стали</i>											
15Г	880	—	Воздух	—	—	25	42	26	55	—	25
20Г	880	—	Воздух	—	—	28	46	24	50	—	25
25Г	880	—	Вода или воздух	560	Воздух	30	50	22	50	9	25
30Г	860	—	Вода или воздух	600	Воздух	32	55	20	45	8	25
35Г	860	—	Вода или воздух	600	Воздух	34	57	18	45	7	25

Сталь	Термообработка						Механические стали								Не менее			
	Закалка			Среды охлаждения	Отпуск													
	Температура, °C		Температура, °C		Среды охлаждения													
	1-й закалки или нормализации	2-й закалки																
10T	860	—	Вода или воздух	600	Воздух	36	60	17	45	6	25							
5T	850	—	Масло или воздух	600	Воздух	38	63	15	40	5	25							
50T	850	—	Масло или воздух	600	Воздух	40	66	13	40	4	25							
0T2	920	—	Воздух	—	—	25	43	22	50	—	25							
0T2	880	—	Масло или воздух	600	Воздух	35	60	15	45	—	25							

35Г2	870	—	Масло или воздух	650	Воздух	31	03	13	20	—	23
40Г2	880	—	Масло или воздух	650	Воздух	39	67	12	40	—	25
45Г2	850	—	Масло или воздух	650	Воздух	41	70	11	40	—	25
50Г2	840	—	Масло или воздух	650	Воздух	43	75	11	35	—	25
<i>Хромолегированные стали</i>											
18ХГ	880	—	Масло	200	Воздух или масло	75	90	10	40	—	15
18ХГГ	880—950, воздух	870	Масло	200	Воздух или вода	90	100	9	50	8	—
20ХГР	880	—	Масло	200	Воздух или масло	80	100	9	50	8	15
27ХГР	870	—	Масло	200	Воздух	120	140	8	45	6	15
25ХГГ	880—950, воздух	850	Масло	200	Вода или масло	100 110	130 150	9 10	45 50	6 7	— —

Продолжение табл. 18

Сталь	Термообработка				не менее							Размеры сечения заготовок метр крутя или сторона квадрата, мм	
	Закалка		Отпуск		Температура, °C	Среды охлаждения	σ_B , кгс/мм ²	δ_5 , %	ϕ , %	σ_H , кгс/мм ²	$\sigma_{H'}$, кгс/мм ²		
	Температура, °C												
	1-й закалки или нормализация	2-й закалки											
Хромомарганцевистые стали													
30ХГТ	880—950, воздух	850	Масло	200	Вода или масло	130	150	9	40	6	—		
40ХГТР	840	—	Масло	550	Вода или масло	80	100	11	45	8	25		
35ХГФ	870	—	Масло	630	Вода или масло	80	93	14	55	8	25		
25ХГМ	860	—	Масло	200	Воздух	110	120	10	45	8	—		
Хромокремнистые стали													
33ХС	920	—	Вода или масло	630	Вода или масло	70	90	13	50	8	25		

Хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые стали

38ХС	900	—	Масло	630	масло	10	90	12	50	1	20
40ХС	800	—	Масло	540	Масло	110	125	12	40	3,5	25
15ХМ	880	—	Воздух	650	Воздух	28	45	21	55	12	30
20ХМ	880	—	Вода или масло	500	Воздух	60	80	12	50	9	15
30ХМ	880	—	Масло	540	Вода или масло	75	95	11	45	8	15
30ХМА	880	—	Масло	540	Вода или масло	75	95	12	50	9	15
35ХМ	850	—	Масло	560	Вода или масло	85	95	12	45	8	25
38ХМ	850	—	Масло	580	Воздух	90	100	11	45	7	25
30Х3МФ	870	—	Масло	620	Вода или масло	85	100	12	55	10	25
40ХМФА	860	—	Масло	580	Масло	95	105	13	50	9	25

Продолжение табл. 18

Сталь	Термообработка				не менее					Размеры сечения заготовок для термобработки (диаметр круга или сторона квадрата), мм		
	Закалка		Отпуск		Среды охлаждения	Температура, °C	Среды охлаждения	σ_T , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ_0 , %	ψ , %	σ_H , кгс/мм ²
	Температура, °C											
	1-й закалки или нормализации	2-й закалки										
	Хромовангидридные стали											
15ХФ	880	760—810	Вода или масло	180	Воздух или масло	55	75	13	50	8	15	
40ХФА	880	—	Масло	650	Вода или масло	75	90	10	50	9	25	
Никельмолибденовые												
15Н2М 20Н2М	860 860	770—820 —	Масло Масло	180 180	Воздух Воздух	65 70	85 90	11 10	50 50	8	15 15	
Хромоникелевые и хромоникелевые с бором стали												
20ХН	860	760—810	Вода или масло	180	Вода или масло	60	80	14	50	8	15	

40ХН	820	—	Вода или масло	500	Вода или масло	80	100	11	45	7	25
45ХН	820	—	Вода или масло	530	Вода или масло	85	105	10	45	7	25
50ХН	820	—	Вода или масло	530	Вода или масло	90	110	9	40	5	25
20ХНР	930—950, воздух	780—830	Масло	200	Воздух или масло	100	120	10	50	9	15
12ХН2	860	760—810	Вода или масло	180	Воздух или масло	60	80	12	50	9	15
12ХН3А	860	760—810	Вода или масло	180	Воздух или масло	70	95	11	55	9	15
20ХН3А	820	—	Масло	500	Вода или масло	75	95	12	55	11	15
12Х2Н4А	860	760—800	Масло	180	Воздух или масло	95	115	10	50	9	15
20Х2Н4А	860	780	Масло	180	Воздух или масло	110	130	9	45	8	15

Продолжение табл. 18

Сталь	Термообработка				не менее							Размеры сечения заготовок для термобработки (диаметр круга или сторона квадрата), мм
	Закалка		Отпуск		Температура, °C	Среда охлаждения	σ_T , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ_0 , %	ψ , %	σ_H , кгс/мм ²	
	Температура, °C											
	1-й закалки или нормализации	2-й закалки										
	<i>Хромоникелевые и хромоникелевые с бором стали</i>											
30XН3А	820	—	Масло	Масло	530	Вода или масло	80	100	10	50	8	25
<i>Хромокремнемарганцевые и хромокремнемарганцевоникелевые стали</i>												
20XГСА	880	—	Масло	Масло	500	Вода или масло	65	80	12	45	7	15
25XГСА	880	—	Масло	Масло	480	Вода или масло	85	110	10	40	6	15
30XГС	880	—	Масло	Масло	540	Вода или масло	85	110	10	45	4,5	25

35ХГСА	950, масло 700, воздух	890	Масло	230	Воздух или масло	130	165	9	40	4	—
30ХГСН2А	900	—	Масло	260	Воздух или масло	140	165	9	45	6	—
<i>Хромомарганцевоникелевые и хромомарганцевоникелевые с титаном и бором стали</i>											
15ХГН2ТА	960, воздух	840	Масло	180	Воздух или масло	75	95	11	55	10	15
20ХГНР	930—950	780—830	Масло	200	Воздух или масло	110	130	10	50	9	15
20ХГНТР 38ХГН	850 850	— —	Масло Масло	200 570	Масло Вода или масло	100 70	120 80	9 12	50 45	8 10	15 25
<i>Хромоникельмолибденовые стали</i>											
14Х2Н3МА	880	770	Масло	180	Воздух	90	100	10	45	8	15
20ХН2М	860	780	Масло	200	Вода или масло	70	90	11	50	8	15

Легирование	Термообработка						Характеристики механических свойств					
	Закалка			Отпуск								
	Температура, °С		Среда охлаждения	Температура, °С		Среда охлаждения						
1-й закалки или нормализации	2-й закалки	Среда охлаждения		Температура, °С	Среда охлаждения							
Н2МА	860	—	Масло	530	Воздух	80	100	10	45	8	15	
Н2МА	870	—	Масло	580	Воздух или масло	95	110	12	50	8	25	
Н2МА	850	—	Масло	620	Вода или масло	95	110	12	50	8	25	
Н2МА	870	—	Масло	600	Вода или масло	95	110	10	45	8	25	

18X2H4MA	950 950, воздух	860 860	Воздух Масло	200 550	Воздух или масло	85 80	115 105	12 12	50 50	10 12	15 15
25X2H4MA	850	—	Масло	560	Масло	95	110	11	45	9	25
<i>Хромоникельмолибденованадиевые и хромоникельванадиевые стали</i>											
30XH2MФА	860	—	Масло	680	Воздух	80	90	10	40	9	25
36X2H2MФА	850	—	Масло	600	Воздух	110	120	12	50	8	25
38XH3MФА	850	—	Масло	600	Воздух	110	120	12	50	8	25
45XH2MФА	860	—	Масло	460	Масло	130	145	7	35	4	—
20XH4ФА	850	—	Масло	630	Вода	70	90	12	50	10	25
<i>Хромоалюминиевая и хромоалюминиевая с молибденом стали</i>											
38X2Ю	930	—	Вода или масло	630	Вода или масло	75	90	10	45	8	30
38X2МЮА	940	—	Вода или масло	640	Вода или масло	85	100	14	50	9	30

19. Характеристики механических свойств конструкционных легированных сталей
в зависимости от температуры отпуска

Сталь	Режим термообработки	Температура отпуска, °C	σ_T , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	a_H , кгс м/см ²	Твердость
40X	Закалка с 850° C в воде Охлаждение после отпуска в воде	200	159	180	8	35	3	HB 552
		300	142	164	7,5	35	1,8	HB 498
		400	120	135	9	40	5	HB 417
		500	93	117	11	49	7,7	HB 326
		600	74	88	14	60	15	HB 265
		700	59	75	18	70	20	HB 226
30Г	Закалка с 820° C в воде	400	80	100	5	37	5	
		500	70	90	10	55	9	
		600	55	75	15	65	17	
20ХГР	Закалка с 860° C в масле Охлаждение после отпуска в масле	200	127,2	154,2	10,5	54,7	6,2	HRC 45
		300	125,6	142,9	7,5	49,6	6,3	HRC 45
		400	120,0	126,7	10,7	57,5	7,0	HRC 41
		500	99,0	99,3	13,5	64,2	12,8	HRC 31
		600	70,8	84,0	16,7	65,2	18,6	HRC 26
40XH	Закалка с 820° C в масле	400	125	140	10	41	3,3	
		450	115	130	13	47	3,7	
		500	110	118	14	51	4,7	
		550	89	105	17	57	7,8	
		600	78	93	20	60	8,5	
		650	68	82	21	63	11,2	

Сталь	Режим термообработки	Температура отпуска, °C	σ_T , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	a_H , кгс м/см ²	Твердость
12ХН3А	Закалка с 860° С в масле	200	130	140	12	60	10	HB 400
		300	115	130	13	68	8	HB 380
		400	110	122	14	68	8 5	HB 375
		500	95	105	19	70	12 0	HB 280
		600	68	75	24	75	17	HB 230
20ХН3А	Закалка с 820° С в масле	200	130	148		56	6	
		300	120	133		56	5	
		400	113	120		60	6	
		500	102	112		63	7	
		600	81	83		70	15	
20ХГНР	Закалка с 860° С в масле и отпуск Охлаждение после отпуска в масле	200	127 2	154 2	10,5	54,7	6,2	HRC 45
		300	125,6	142 9	7,5	49,6	6 3	
		400	120 0	126 7	10 7	57,5	7,0	HRC 41
		550	99,0	99 3	13 5	64,2	12,8	HRC 31
		600	70,8	84,0	16,7	65,2	18,6	HRC 25
40ХН2МА	Закалка с 850° С в масле	200	163	179	10	50	6	HB 525
		300	150	163	10	50	5	HB 475
		400	127	140	12	52	6	HB 420
		500	110	120	15	59	9	HB 350
		600	88	98	20	62	15	HB 275

Сталь	Свариваемость	Способ сварки	Обрабатываемость резанием		Флокеночувствительность	Склонность к отпускной хрупкости
			Состояние металла	Коэффициент обрабатываемости K_{σ} (материал резца)		
15X	Неограниченная (кроме химико-термически обработанных деталей)	РДС, КТС	—	—	Нечувствительна	Несклонна
20X			Горячекатаный HB 131, $\sigma_B = 47$ кгс/мм ²	1,7 (твердый сплав), 1,3 (быстро-режущая сталь)	Малочувствительна	
35X	Ограниченная	РДС, ЭШС (рекомендуются подогрев и последующая термообработка), КТС (рекомендуется последующая термообработка)	Горячекатаный HB 163, $\sigma_B = 62$ кгс/мм ²	0,95 (быстро-режущая сталь)		Чувствительна
40X, 45X	Трудная	РДС (необходимы подогрев и последующая термообработка), КТС (рекомендуется последующая термообработка)	Горячекатаный, HB 163—168, $\sigma_B = 62$ кгс/мм ²	1,20 (твердый сплав), 0,95 (быстро-режущая сталь)		
50X			Горячекатаный HB 207, $\sigma_B = 64$ кгс/мм ²	0,85 (твердый сплав), 0,80 (быстро-режущая сталь)		
20Г	Неограниченная (кроме химико-термически обработанных деталей)	РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой), КТС (без ограничений)	Нормализованный HB 143—187	1,00 (твердый сплав), 0,96 (быстро-режущая сталь)	Нечувстви-	Несклонна

40Г	Ограниченная	сом рекомендуется подогрев и последующая термообработка); КТС (без ограничений)	Нормализованный, НВ 174—207	0,95 (твердый сплав); 0,70 (быстро-режущая сталь)	Малочувствительна	Склонна
50Г	Трудная	РДС (необходимы подогрев и последующая термообработка), КТС (без ограничений)	Закаленный и отпущенный, НВ 202, $\sigma_B = 73 \text{ кгс/мм}^2$	0,90 (твердый сплав)	Чувствительна	Склонна при 1,0% Мп
45Г2		РДС (необходимы подогрев и последующая термообработка); КТС (необходима последующая термообработка)	Нормализованный, НВ 229	0,8 (твердый сплав), 0,55 (быстро-режущая сталь)	Малочувствительна	Склонна
18ХГТ	Неограниченная (кроме химико-термически обработанных деталей)	РДС, КТС	Нормализованный, НВ 156—159, $\sigma_B = 54 \text{ кгс/мм}^2$	1,1 (твердый сплав); 1,0 (быстро-режущая сталь)	Нечувствительна	Малосклонна
30ХГТ	Ограниченная	РДС, КТС (рекомендуются подогрев и последующая термообработка)	Нормализованный, НВ 364, $\sigma_B = 88 \text{ кгс/мм}^2$	0,45 (твердый сплав), 0,25 (быстро-режущая сталь)		Склонна
30ХМ, 30ХМА		РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой), АрДС (рекомендуются подогрев и последующая термообработка)	Закаленный и отпущенный, НВ 229—269, $\sigma_B = 95 \text{ кгс/мм}^2$	0,7 (твердый сплав), 0,3 (быстро-режущая сталь)	Малочувствительна	Несклонна

Сталь	Свариваемость	Способ сварки	Обрабатываемость резанием		Флокеночувствительность	Склонность к отпускной хрупкости
			Состояние металла	Коэффициент обрабатываемости K_p (материал резца)		
35ХМ	Ограниченная	РДС, АДС (под флюсом и газовой защитой); АрДС и ЭШС (необходимы подогрев и последующая термообработка)	Закаленный и отпущенный, HV 240—250, $\sigma_B = 81$ кгс/мм ²	0,5 (быстро-режущая сталь)	Чувствительна	Несклонна
40ХФА	Трудная	РДС (необходимы подогрев и последующая термообработка); КТС (необходима последующая термообработка)	Закаленный и отпущенный, HV 241	0,75 (твердый сплав); 0,65 (быстро-режущая сталь)		Склонна
40ХН		РДС, АДС (под флюсом); ЭШС (необходимы подогрев и последующая термообработка)	Горячекатаный, HV 166—170, $\sigma_B = 70$ кгс/мм ²	1,0 (твердый сплав); 0,9 (быстро-режущая сталь)	Повышенно чувствительна	
12ХН2	Ограниченная	РДС, АДС (под флюсом)	—	—	Нечувствительна	
12ХН3А			Горячекатаный, HV 183—187	1,26 (твердый сплав); 0,96 (быстро-режущая сталь)		
12ХН4А						

		обработка), КТС (без ограничений)				
38ХГН	Трудная	РДС (необходимы подогрев и последующая термообработка)	Закаленный и отпущенный, $HV\ 187-236$, $\sigma_B = 65\text{ кгс/мм}^2$	1,0 (твердый сплав); 0,9 (быстро-режущая сталь)		
20Х2Н4А		РДС, АДС (под флюсом), ЭПС (необходимы подогрев и последующая термообработка)	Кованая, $HV\ 156-163$	1,40 (твердый сплав), 0,75 (быстро-режущая сталь)	Сильно чувствительна	Мало-склонна
40ХН2МА		РДС (необходимы подогрев и последующая термообработка)	Горячекатаная, $HV\ 228-235$, $\sigma_B = 57\text{ кгс/мм}^2$	0,7 (твердый сплав), 0,4 (быстро-режущая сталь)	Чувствительна	Несклонна
40Х2Н2МА			—	—		
18Х2Н4МА		РДС, АДС (под флюсом), ЭПС (необходимы подогрев и последующая термообработка)	Кованая, $HV \leq 265$	1,40 (твердый сплав)	Сильно чувствительна	
38Х2МЮА	Для сварных конструкций не применяется	Закаленная и отпущенная $HV\ 240-277$, $\sigma_B = 80\text{ кгс/мм}^2$	0,75 (твердый сплав), 0,55 (быстро-режущая сталь)	Чувствительна		
Примечание. АрДС — аргонодуговая сварка						

21. Применение автоматных сталей в автомобилестроении

Стали	Применение
A11, AC11	Болты, гайки, обрабатываемые резанием Шаровые опоры, вилки включения сцепления, цепи
A12, A20	Шестерни коленчатого вала, вставки ручки прикуривателя, ролики кулачка привода замка двери, оси рычага диска сцепления, шестерни привода масляного насоса, валы редуктора привода спидометра, переходники угловой пресс-масленки водяного насоса, оси дроссельной заслонки, клапаны атмосферного усилителя тормозов, крышки обратного клапана, штуцера главного цилиндра тормоза, опоры колодки тормоза
A30, A40Г	Детали типа гаек, осей, шпилек, испытывающих более высокие напряжения
AC14XГН	Оси сателлитов дифференциала, ступицы, скользящие муфты синхронизатора
AC12XН	Храповики коленчатого вала, фланцы масляного насоса, ключи зажигания, направляющие штифты, рычаги переключения передач, тяги, гайки, муфты, оси рычага привода акселератора, оси крышки воздушного фильтра
AC19XГН	Детали типа промежуточной шестерни заднего хода, втулки шестерни вторичного вала коробки передач
AC20XГНМ	Венцы зубчатых синхронизаторов первичного вала коробки передач
AC30XM	Червяки рулевого управления
AC38XГМ	Кольца запорного подшипника полуоси
AC35Г2	Валики масляного насоса
AC40XГНМ	Ролики вала и сошки плунжера натяжителя цепи толкателя привода бензинового насоса

Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Pb	Стандарт или технические условия
A12	0,08— 0,16	0,60— 0,90	0,15— 0,35	0,08— 0,20	0,08— 0,15	—	—	—	—	ГОСТ 1414—54
A20	0,15— 0,25	0,60— 0,90	0,15— 0,35	0,08— 0,15	≤0,06	—	—	—	—	
A30	0,25— 0,35	0,70— 1,0	0,15— 0,35	0,08— 0,15	≤0,06	—	—	—	—	
A40Г	0,35— 0,45	1,20— 1,55	0,15— 0,35	0,18— 0,30	≤0,05	—	—	—	—	
AC35Г2	0,32— 0,39	1,35— 1,65	0,17— 0,37	0,08— 0,13	≤0,04	≤0,25	≤0,25	—	0,15— 0,30	ТУ 14-1-514—73
AC12XH	0,09— 0,15	0,3—0,6	0,17— 0,37	≤0,035	≤0,035	0,4—0,7	0,5—0,8	—	0,15— 0,30	
AC14XГН	0,13— 0,18	0,7—1,0	0,17— 0,37	≤0,035	≤0,035	0,8—1,1	0,8—1,1	≤0,10	0,15— 0,30	ТУ 14 1 514—73, ТУ 14 1 529—73
AC19XГН	0,16— 0,21	0,7—1,1	0,17— 0,37	≤0,035	≤0,035	0,8—1,1	0,8—1,1	≤0,10	0,15— 0,30	

Сталь	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Pb	Стандарт или технические условия
AC30XM	0,27— 0,33	0,4—0,7	0,17— 0,37	≤0,035	≤0,035	0,8—1,1	≤0,30	0,15— 0,25	0,15— 0,30	ТУ 14-1-514—73, ТУ 14-1-529—73
AC38XГМ	0,34— 0,40	0,6—0,9	0,17— 0,37	≤0,030	≤0,035	0,8—1,1	≤0,30	0,15— 0,25	0,15— 0,30	
AC40XГНМ	0,37— 0,43	0,5—0,8	0,17— 0,37	≤0,030	≤0,035	0,6—0,9	0,72— 1,1	0,15— 0,30	0,15— 0,30	
AC20XГНМ	0,18— 0,23	0,7—1,1	0,17— 0,37	≤0,035	≤0,035	0,4—0,7	0,4—0,7	0,15— 0,25	0,15— 0,30	ТУ 14-1-529—73
A11	0,07— 0,15	0,8—1,2	≤0,1	0,15— 0,25	≤0,1	—	—	—	—	ЧМТУ 4-142—69
AC11	0,07— 0,15	0,8—1,1	≤0,10	0,15— 0,25	≤0,10	—	—	—	0,15— 0,30	ТУ 14-1-512—73
AC14	0,10— 0,17	1,0—1,4	≤0,10	0,15— 0,30	≤0,10	—	—	—	0,15— 0,30	ТУ 14-1-512—73, ТУ 14-1-258—72
AC45Г2	0,40— 0,48	1,35— 1,65	≤0,10	0,24— 0,35	≤0,04	—	—	—	0,15— 0,35	ТУ 14-1-271—72

Сталь	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	σ_B , кгс/мм ² , при диаметре прутка, мм			δ , % (не менее)
		не менее	до 20	20—30	выше 30		
A12	42—57	22	36	60—80	55—75	52—70	7,0
A20	46—61	20	30	62—80	57—76	54—73	7,0
A30	52—67	15	25	64—84	60—80	55—77	6,0
A40Г	60—75	14	20	60—80 *	60—80 *	60—80 *	17,0 *

* Сталь марки A40Г испытывают после высокого отпуска

Примечание Механические свойства холодноотянутой стали определяются по требованию потребителя

**24. Характеристики механических свойств автоматных сталей,
поставляемых по техническим условиям**

Сталь	Размер сечения заготовки под термическую обработку, мм	Термообработка				Механические свойства				Технические условия
		Закалка		Отпуск		σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	δ , %	a_H , кгс·м/см ²	
		Температура нагрева, °С	Среда охлаждения	Температура нагрева, °С	Среда охлаждения					
АС12ХН	Образцы	900—920	Масло	150—180	Воздух	65	45	10	9	ТУ 14-1-514—73
АС14ХГН	Образцы	860—880	Масло	150—180	Воздух	110	85	8	8	ТУ 14-1-514—73, ТУ 14-1-529—73
АС19ХГН	Образцы	865—885	Масло	150—180	Воздух	120	95	7	7	ТУ 14-1-514—73, ТУ 14-1-529—73
АС20ХГНМ	Образцы	850—870	Масло	150—180	Воздух	120	95	7	6	ТУ 14-1-529—73
АС30ХМ	16	860—880	Масло	510—560	Воздух	90	75	12	10	ТУ 14-1-514—73, ТУ 14-1-529—73
АС38ХГМ	20—25	860—880	Масло	580—620	Воздух	95	80	11	8	ТУ 14-1-514—73, ТУ 14-1-529—73
АС40ХГНМ	20—25	830—850	Масло	580—620	Воздух	100	85	12	9	ТУ 14-1-514—73, ТУ 14-1-529—73

Сталь листовая углеродистая и низколегированная для котлостроения и сосудов, работающих под давлением

Из сталей этой группы изготовляют бесшовные трубы, а также барабаны, днища, обечайки и другие детали паровых котлов, работающие при давлении до 60 кгс/см² и температуре до 450° С.

Для котлостроения и сосудов, работающих под давлением, изготавливают листовую сталь следующих марок: углеродистую — 12К, 15К, 16К, 20К (ГОСТ 5520—69)*; низколегированную — 16ГС, 09Г2С, 10Г2С1 (ГОСТ 19282—73). По требованию потребителя листы могут изготавливаться из сталей ВСт2 и ВСт3 по ГОСТ 380—71* с содержанием серы не более 0,040% и из стали 09Г2 (ГОСТ 19282—73). Химический состав сталей 12К, 15К, 16К, 18К и 20К приведен в табл. 25.

25. Химический состав (%)
некоторых котельных сталей

Сталь	С	Si	Mn	Р	С
				Не более	
12К	0,08—0,16	0,17—0,37	0,40—0,70	0,040	0,040
15К	0,12—0,20	0,15—0,30	0,35—0,65	0,040	0,040
16К	0,12—0,20	0,17—0,37	0,45—0,75	0,040	0,040
18К	0,14—0,22	0,17—0,37	0,55—0,85	0,040	0,040
20К	0,16—0,24	0,15—0,30	0,35—0,65	0,040	0,040

Стали северного исполнения

Основное требование к стали, из которой изготовлена машина или сооружение для севера, — малая чувствительность к хрупкому разрушению.

На склонность стали к хрупкому разрушению в основном влияют химический состав ее, величина зерна и микроструктура. Большинство легирующих элементов (Ni, Mn, Cr и др.) при небольшом их содержании понижают порог хладноломкости. Вредные примеси (S, P, N, O₂, As) повышают порог хладноломкости. Мелкозернистые стали менее чувствительны к хрупким разрушениям; поэтому для сталей северного исполнения рекомендуется применять модифицирование малыми добавками алюминия, титана, ванадия при выплавке и раскисление с добавкой повышенного по сравнению с обычным количеством алюминия, снижать температуру конца обработки давлением и проводить термическую обработку горячекатаного металла и зоны шва сварных соединений.

В табл. 26 приведены марки стали, нашедшие применение в промышленности, температуры и максимальные толщины, при которых эти стали могут быть использованы для деталей, испытывающих при эксплуатации значительные динамические нагрузки. Для менее нагру-

26. Стали северного исполнения для деталей машин

Сталь	Температура отпуска по- сле закали, °С	σ_B , кгс/мм ²	Температура применения, °С (не ниже)	Толщина детали, мм (не более)
18Х2Н4ВА	200	130	—100	200
18Х2Н4ВА	550—600	100	—120	200
12ХН3А	200	100	—83	40
12ХН2	200	90	—80	30
12Х2Н4А	200	120	—70	100
15ХМ	200	90	—60	20
20М	200	100	—50	15
15Х	200	80	—50	10
20Х	200	90	—40	15
20ХГНР	200	130	—20	70
20ХГР	200	130	0	50
18ХГТ	200	120	0	20
30ХГТ	200	150	0	30
30ХГТ	530—550	100	—30	30
30ХН3А	550	100	—80	100
30ХМА	550	95	—80	30
38ХМЮА	600—650	103	—80	60
40ХН	500	100	—80	50
40ХНМА	580—600	110	—80	70
38ХА	500	95	—60	25
40ХФА	600—650	100	—60	30
40Х	500	100	—60	25
35ХРА	550	95	—50	40
20Г	500	50	—70	10
35	500	70	—60	15
45	500	90	—50	20
40Г	500	100	—40	20
30ХГСНА	600	110	—30	60
30ХГСА	600	110	—20	40
35ХГСА	600	120	—20	50
45Г2	600	90	—20	30

Примечания. 1 При термической обработке на прочность ниже указанной в таблице или при использовании в деталях с толщиной стенки менее 10 мм температура эксплуатации может быть понижена.

2. Максимальная толщина, указанная в таблице, обусловлена необходимостью получения сквозной прокаливаемости и однородности свойств по сечению

09Г2 09Г2С 10Г2С 15ХСНД 10ХСНД 14Г2АФ 15Г2АФДсп	ГОСТ 19282—73 4МТУ 1-349—68 ТУ 14-1-91—71	Листовой, ≤ 40 ; сортовой и фасон- ный, ≤ 20	От —50 до —65	Несущие элементы кон- струкций: ходовые рамы машин, стрелы и башни, поворотные платформы и т. п., испытывающие воздействие растягива- ющих и изгибающих на- пряжений	Ударную вяз- кость проверяют при —70° С
09Г2 09Г2С 10Г2С1 15ХСНД 10ХСНД 14Г2АФ 15Г2АФДсп	ГОСТ 19282—73 ЧМТУ 1-349—68 ТУ 14-1-91—71		От —40 до —50		Ударную вяз- кость проверяют при —40° С
М16С ВСт3сп5 ВСт3Гпс5	ГОСТ 6713—53 ГОСТ 380—71* ГОСТ 380—71 *	Листовой, ≤ 40 Листовой и фа- сонный, ≤ 25 Листовой и фа- сонный, ≤ 30	От —40 до —65	Несущие элементы кон- струкций, испытывающие воздействие сжимающих усилий, или слабонапря- женные элементы, испы- тывающие воздействие рас- тягивающих и изгибающих напряжений до 40% от расчетных	Ударную вяз- кость проверяют при —20° С
ВСт3кп, ВСт3пс	ГОСТ 380—71*	Листовой и фа- сонный, ≤ 5	От —40 до —65	Вспомогательные эле- менты: лестницы, площад- ки, ограждения, обшивка кабин, кожухи и т. п.	

женных деталей, не испытывающих значительных ударных воздействий, допустимые температуры применения могут быть ниже температур, указанных в табл. 26.

Кипящая сталь по ГОСТ 380—71* не может быть рекомендована для изготовления ответственных сварных конструкций в «северном исполнении». Применение сталей 10ХСНД, 15ХСНД, 09Г2С вместо углеродистых повышает срок службы машин.

Марки стали для сварных конструкций в «северном исполнении», рекомендуемые ГОСТ 14892—69*, приведены в табл. 27.

Для литых деталей несущих конструкций, подлежащих сварке, следует применять стальное литье 20Л (содержание С не более 0,22%) группы III по ГОСТ 977—65* или низколегированное литье (содержание С не более 0,2%, Р и S — 0,05% каждого)

Стали для криогенной техники

Стали и сплавы, предназначенные для эксплуатации при сверхнизких температурах (ниже -80°C) и до температур жидкого гелия (-269°C), называют криогенными материалами. К этим материалам предъявляется комплекс требований: высокая прочность, вязкость (сопротивление хрупкому разрушению), коррозионная стойкость, хорошая свариваемость.

В СССР для криогенной техники изготавливают стали марок 12Х18Н10Т, 10Х14Г14Н4Т, 07Х21Г7АН5, 0Н6А, 0Н9А, 03Х19Г10Н7М2, 03Х13Н9Д2ТМ и др.

В табл. 28 приведен химический состав криогенных сталей, в табл. 29 — характеристики механических свойств.

Наиболее распространены криогенные стали 12Х18Н10Т и 10Х14Г14Н4Т, обладающие высокими пластичностью и вязкостью при сверхнизких температурах как в основном металле, так и в сварных соединениях. Эти стали имеют хорошие технологические свойства при горячей и холодной обработке давлением.

Из стали 07Х21Г7АН5 изготавливают различные штампованные, сварные и литейные конструкции.

Сталь 03Х19Г10Н7М2 применяют для изготовления сварных изделий, эксплуатируемых в интервале температур от 0 до -253°C , не требующих термической обработки после сварки. Эту сталь иногда подвергают ковке (интервал горячей механической обработки $1180-850^{\circ}\text{C}$).

Для различных изделий, в том числе свариваемых, работающих в интервале температур от $+20$ до -253°C , применяют сталь 03Х13Н9Д2ТМ. Эта сталь нечувствительна к образованию горячих трещин при сварке, обладает повышенным сопротивлением против коррозионного растрескивания в условиях солевого тумана, 100%-ной влажности и в атмосфере, содержащей 0,01% SO_3 при 96—98%-ной влажности. Горячая механическая обработка стали 03Х13Н9Д2ТМ в интервале температур $1150-850^{\circ}\text{C}$ не вызывает затруднений.

Кроме сталей, обладающих противокоррозионными свойствами, для криогенной техники применяют некоторые стали, подверженные коррозии, например, стали 0Н6А, 0Н9А. Стали 0Н6 и 0Н9 технологичны при штамповке, гибке, выколотке и обработке резанием, они хорошо свариваются. Сварные соединения из этих сталей не требуют последующей термической обработки. Применяют стали указанных

Сталь	C	Cr	Mn	Ni	Si	Не более		Другие элементы
12X18H10T	≤0,12	17,0—19,0	≤2,0	9,0—11,0	≤0,8	0,020	0,030	Ti 5, C 0,8
10X14Г14Н4Т	≤0,10	13,0—15,0	13,0—15,0	2,8—4,5	≤0,8	0,020	0,030	Ti=5 (C—0,02)—0,6
07X21Г7АН5	≤0,07	19,5—21,0	6,0—7,5	5,0—6,0	≤0,7	0,030	0,030	N 0,15—0,25
0Н6	≤0,06	—	0,45—0,60	6,5—7,0	0,17—0,37	0,02	0,02	—
0Н9	≤0,06	—	0,45—0,60	8,5—9,5	0,17—0,37	0,02	0,02	—
03X19Г10Н7М2	≤0,03	18,5—20,5	9,0—11,0	6,5—7,5	≤0,8	0,025	0,035	Mo 2,0—2,5 N 0,30—0,40
03X13Н9Д2ТМ	≤0,03	12,0—13,0	≤0,5	8,0—9,0	≤0,5	0,025	0,020	Ti 0,8—1,1 Mo 0,5—1,0 Cu 1,5—2,0

29. Характеристики механических свойств пригонных сталей
при различных температурах испытания

Сталь	σ_B , кгс/мм ²			$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²			δ , %			ψ , %			a_{Hf} кгс·м/см ²		
	-70 °C	-196 °C	-253 °C	-70 °C	-196 °C	-253 °C	-70 °C	-196 °C	-253 °C	-70 °C	-196 °C	-253 °C	-70 °C	-196 °C	-253 °C
12X18H10T		120	185		32	65		42	32		50	42			
10X14Г14Н4Т		130	150		45	55		45	40		50	50			
03X19F10H7M2	109	149	196	65	110	162	74	43	26	77	28	42	28	28	8
07X21Г7АН5	102 *	166 130 **	153**	59 *	95 100**	124**	73 *	58		83*	55		23	16 14**	12
0Н6 (после двойной нормализации)		90			75			24			65			8	
0Н6 (после закалки с отпуском)		85			65			22			60			5	
0Н9 (после двойной нормализации)		100			85			25			60			10	
* Данные для листа толщиной 12 мм. ** Данные для толстого листа.															
Примечание. Для сталей 0Н6 и 0Н9 в графе $\sigma_{0,2}$ приведены данные по пределу текучести σ_T .															

юк для установок, с помощью которых получают жидкие газы (кислород и азот), для изготовления резервуаров, где хранят сжиженные газы, и других изделий, работающих при температурах до -196°C .

СТАЛЬ ДЛЯ ОТЛИВОК

Применение и состояние производства

Современная техника литейного производства позволяет получать изделия непосредственно отливкой или с дополнительным использованием сварки (сварно-литые изделия) любой степени сложности.

Примеры применения стальных отливок показаны в табл. 30.

30. Применение стальных отливок

Стали	Отливаемые изделия
Малоуглеродистые	Детали железнодорожных вагонов, отжигательные горшки, корпуса и детали электродвигателей постоянного тока и др
Среднеуглеродистые	Детали железнодорожных вагонов и грузовых автомобилей, станков, прокатных станов, горного оборудования, элеваторов, строительных машин, шестерни, задвижки и др
Высокоуглеродистые	Гибочные, вырубные, отделочные штампы, валки, станочный и ручной инструмент, детали, работающие в условиях среднего абразивного износа, и др
Низколегированные	Детали элеваторов и транспортеров породы, детали сельскохозяйственных машин и автомобилей, инструментарий для обработки давлением, предметы вооружения и броня и др
Высоколегированные, жаропрочные	Задвижки, фланцы, фиттинги, детали рудодобывательных и термических печей, нефтеперегонных установок, цементных мельниц, тигли, реторты, лопасти и лопатки турбин, детали реактивных двигателей и др.
Коррозионностойкие	Задвижки, насосы, детали пищевого оборудования, горных, бумагоделательных, текстильно-красильных машин, фильтры, мешалки, детали, работающие в морской воде, и др
Износостойкие	Черпаки, зубья и другие детали экскаваторов, детали транспортного и дробильного оборудования; железнодорожные крестовины, стрелки, траки и др

Литейные свойства и особенности конструкции

По сравнению со многими литейными сплавами у стали значительно уже литейные свойства. Усадка у нее больше, чем у чугуна и большинства цветных сплавов. При затвердевании объем ее сокращается на 2 до 5% (соответственно при содержании углерода от 0,1 до 0,7%). При затвердевании с температуры солидуса до температуры окружающей среды объем углеродистой стали сокращается на 7,2—7,5%. Литейная усадка при этом равна 2,2—2,5%. В связи с тем, что в реальных условиях затвердевания из-за механического и термического торможения

ния свободная линейная усадка не может быть реализована, фактическое изменение линейных размеров отливки меньше и у тонкостенных отливок сложной конфигурации составляет 1,23—1,5%, а у толстостенных 2,0—2,3%. Такую усадку принято называть литейной.

Литейная усадка, зависящая от многих причин, даже для отливок одного и того же типа нестабильна и в реальных условиях может изменяться в заметных пределах, сказываясь соответствующим образом на точности отливок.

Жидкотекучесть и формозаполняемость у стали также хуже, чем у чугуна и большинства других литейных сплавов.

Указанные свойства часто могут быть причиной образования в стальных отливках (особенно из высоколегированных сталей) различных литейных пороков (усадочных раковин, пористости, трещин, коробления, трансформации и др.).

В табл. 31 показаны развес и толщины стенок для различных стальных отливок в сравнении с деталями, изготовленными горячей штамповкой, и из металлокерамики.

31. Варианты технологического процесса изготовления стальных отливок

Технологический процесс	Развес, кг	Минимальная толщина стенки, мм
Литье в песчаные формы	0,1—300 000	6
Литье в оболочковые формы	0,05—120	3,5
Литье по выплавляемым (растворяемым) моделям	0,005—1 000	1,0
Горячая штамповка	0,03—15	2
Металлокерамические изделия после калибровки	0,005—4	0,5

Диаграмма железо-углерод применительно к реальным литым углеродистым и низколегированным сталям показана на рис. 3 (сплошные линии — обычная диаграмма, пунктирные — реальные стали для отливок).

В табл. 32 показано влияние различных химических элементов на снижение температуры ликвидуса.

32. Влияние элементов на снижение температуры ликвидуса

Элементы	Снижение температуры ликвидуса (°C) на 1% элемента в стали	Предел содержания элемента, % (не более)
C	80	1
Si	14	5
Mn	4	23
Ni	2,6	20
Cr	1,4	15
Mo	1,2	10
Al	3,4	10
S и P	35	2

При введении в сталь хрома от 15 до 25% температура ликвидуса снижается очень мало, а при увеличении содержания хрома свыше 25% она начинает возрастать.

Температура ликвидуса при наличии в стали нескольких компонентов может быть с достаточной степенью точности рассчитана по формуле $t_L = 1539 - t_3$, где t_3 — суммарное изменение температуры под влиянием компонентов и примесей.

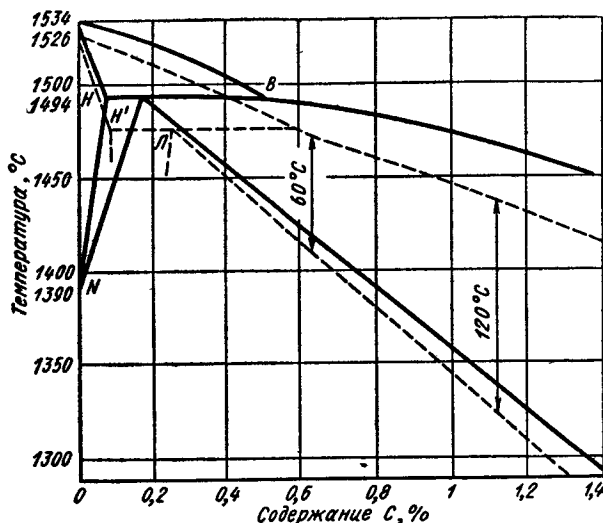


Рис. 3. Диаграмма железо—углерод, видоизмененная для литых промисловых углеродистых и низколегированных сталей:

H — 1494°C — $0,07\%$ C ; J — 1494°C — $0,18\%$ C ,
 B — 1494°C — $0,51\%$ C ; N — 1390°C

Для всех углеродистых сталей общего применения, а также низколегированных, высоколегированных хромистых и хромоникелевых интервал затвердевания равен $30\text{—}55^\circ\text{C}$. Для высокоуглеродистых и высокомарганцовистых сталей он увеличивается с 60 до 120°C , если содержание углерода возрастает с $0,6$ до 1% (см. рис. 3).

Влияние углерода на изменение температурного интервала кристаллизации даже при наличии других компонентов является определяющим. У марганцовистых сталей, широко распространенных при производстве стальных отливок, увеличение содержания марганца с $8,7$ до $15,1\%$ весьма существенно снижает температуру ликвидуса, но не изменяет температурный интервал ликвидус—солидус, который примерно равен 100°C .

Общая классификация

Общими классификационными признаками сталей для отливок обычно считают способ выплавки, химический состав, структуру, назначение.

83. Характеристики различных способов выплавки стали

Способ плавки	Основные исходные материалы	Основной источник тепла для процесса	Характер литья	Выплавляемые стали
Кислый конвертерный на воздушном дутье (малое бесемерование)	Бессемеровский чугун	Расплавленный чугун. Окисление углерода и кремния	Литье средней ответственности, преимущественно мелкое и среднее. Возможно отливка изделий массой до 2 т (иногда и более)	Мало- и среднеуглеродистые
Кислый конвертерный на кислородном дутье	Бессемеровский чугун и стальной лом	То же	Тонкостенное литье ответственного назначения мелкое и среднее. Возможно производство отливок массой в несколько тонн	Мало- и среднеуглеродистые, а также некоторые марки легированных
Мартеновский основной	Чугун и стальной лом в любых пропорциях	Газообразное или жидкое топливо	Среднее и крупное литье	Углеродистые и легированные
Мартеновский кислый	Чистый по фосфору и сере стальной лом с добавлением чугуна	То же	То же	То же
Электродуговой основной	Стальной лом	Электрическая дуга	Тонкостенное литье ответственного назначения, преимущественно мелкого и среднего развеса	Углеродистые и легированные с низким содержанием серы
Электродуговой кислый	Стальной лом, чистый по фосфору и сере	То же	То же	Преимущественно углеродистые и малолегированные
Индукционные печи (кислые и основные)	Стальной лом	Индукционная электроэнергия	Тонкостенное, преимущественно мелкое литье ответственного назначения	Преимущественно легированные и сплавы с особыми физическими свойствами

По способу выплавки различают стали, выплавленные кислым или основным процессом.

По химическому составу стали для отливок делят на углеродистые, низколегированные, среднелегированные и высоколегированные.

По структуре различают отливки из сталей: мартенситных, мартенситно-ферритных, ферритных, аустенитно-мартенситных, аустенитно-ферритных и аустенитных.

Отливки из сталей бывают обычного, ответственного и особо ответственного назначения.

Способы выплавки

В табл. 33 приведены характеристики различных способов выплавки стали, применяемые в литейном производстве стальных отливок.

Кроме перечисленных в табл. 33 способов плавки, применяют комбинированные процессы (так называемые дуплекс- и триплекс-процессы) в которых используются последовательно два или три типа плавильных агрегатов.

В особых случаях плавку стали для отливок осуществляют в вакууме или контролируемой атмосфере, а также в электронных плавильных устройствах во взвешенном состоянии, подвергают внепечной металлургической обработке (обрабатывают в расплавленном шлаке, продувают нейтральными газами и различными порошкообразными смесями).

Влияние состава на свойства

Прочность, пластичность и твердость углеродистых сталей зависят главным образом от содержания углерода и характера термической обработки (рис. 4). Легирующие добавки по-разному влияют на прочностные показатели и пластичность.

На свойства легированных сталей оказывает влияние толщина сечения отливок. Особенно заметно это влияние на прокаливаемость и

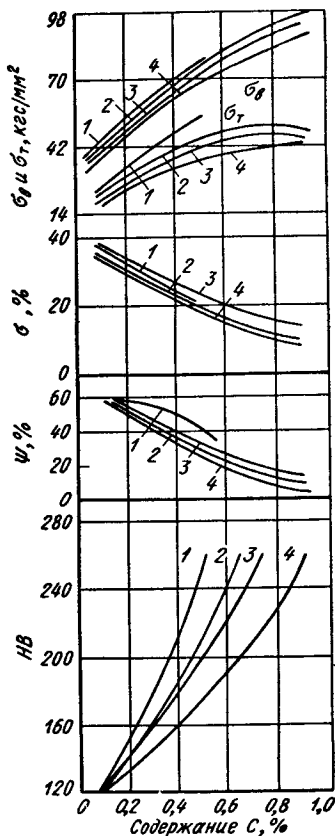


Рис. 4. Влияние содержания углерода на прочность, пластические свойства и твердость углеродистых литейных сталей:

1 — закалка в воду и отпуск при 650°С; 2 — нормализация; 3 — нормализация и отпуск при 650°С; 4 — отжиг

34. Характеристики механических, эксплуатационных и технологических свойств сталей для отливок

Стали	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	HB	$E \times 10^3$ кгс/мм ²	Характеристики						
					эксплуатационных свойств			технологических свойств			Литейные
					Предельная рабочая температура (под нагрузкой), °C	Стойкость против абразивного износа	Циклическая вязкость	Коррозионная стойкость	Свариваемость	Обработываемость резанием	
Дисталье											
алю- (0,2% С)	35—58	26—38	108—150	20—21	480	П	П	П	О	У	У
редне- (0,2—0,5% С)	49—84	12—32	140—240	20—21	480	У	П	П	Х'	У	У
ннемо- (0,5—1,0% С)	70—140	2—23	200—400	20—21	480	Х	П	П	Х	У—П	У
егрованные	50—175	2—35	105—500	20—21	540	У—Х	П	П—У	Х—У	У	У
дегированные											
жаропрочные	45—140	2—35	130—400	19—20	1175	П—Х	П	Х—О	Х—У	У—П	У
коррозионностойкие	49—140	8—60	140—400	19—20	980	П—Х	П	Х—О	Х—У	У—П	У
нзностойкие (аусте- нитные)	56—140	15—55	180—550	19	260	О	П	У	У	П	У

Примечание. В таблице приняты обозначения: О — отлично; Х — хорошо; У — удовлетворительно; П —

пластичность в массивных сечениях. Развитие новых областей техники, сопровождающееся усложнением конструкции механизмов и машин, а также повышением параметров протекающих в них процессов, привело к широкому использованию при изготовлении отливок высокопрочных сталей переходных (преимущественно аустенитно-мартенситных) классов. Аустенитно-мартенситные стали чаще всего применяют при изготовлении точных отливок методом выплавляемых моделей. Такие отливки в большинстве случаев изготавливают без припусков на механическую обработку или с очень малыми припусками. Для улучшения многих свойств такие стали выплавляют с добавками редкоземельных элементов. Малые добавки редкоземельных металлов изменяют кинетику диффузионных процессов в сталях, обеспечивают большую чистоту границ зерен и определяют характер выделения на границах кристаллитов, рафинируют их от вредных примесей и др. Таким образом, можно существенно улучшить свойства литых сталей при нормальных, отрицательных и высоких температурах.

В табл. 34 приведены механические, эксплуатационные и технологические свойства различных сталей для отливок.

Марки и технические требования

В зависимости от назначения и требований отливки сталей из различных марок разделяют на три группы (см. табл. 35).

35. Назначение отливок и методы контроля

Группа	Назначение	Применение	Обязательные методы контроля
I	Обычного назначения	Для деталей, не рассчитываемых на прочность, конфигурация и размеры которых определяются конструктивными и технологическими соображениями	Наружный осмотр; контроль размеров; определение химического состава
II	Ответственного назначения	Для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при статических нагрузках	Наружный осмотр; контроль размеров; определение химического состава; определение механических свойств — предела текучести или временного сопротивления разрыву и относительного удлинения
III	Особо ответственного назначения	Для деталей, рассчитываемых на прочность и работающих при динамических и знакопеременных нагрузках	Те же, что для отливки ответственного назначения, и дополнительное определение ударной вязкости

Отливки из конструкционной нелегированной стали изготавливают из стали марок 15Л, 25Л, 30Л, 35Л, 45Л, 50Л и 55Л. Содержание С (в зависимости от марки стали) 0,15—0,55%, Mn — 0,3—0,9%, Si —

0,2—0,4%, S — до 0,045—0,06%, P — до 0,04—0,08%. Остаточное содержание Cr, Ni и Cu в отдельности не должно превышать 0,3%.

Для обеспечения требуемых механических свойств или снятия внутренних напряжений отливки следует подвергать термической обработке. Рекомендуемые режимы термической обработки приведены в в табл. 36.

36. Рекомендуемые режимы термической обработки отливок

Сталь	Рекомендуемый режим термической обработки	Характеристики механических свойств					
		$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	σ_B кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	a_K кгс·м/см ²	НВ
		не менее					
15Л	Н 910—930° С или Н 910—930° С _в О 670—690° С	20	40	24	35	5,0	109—136
25Л	Н 880—900° С _в О 610—630° С	24	45	19	30	4,0	124—187
25Л	З 870—890° С _в В, О 610—630° С	30	50	22	33	3,5	131—207
30Л	Н 880—900° С _в О 610—630° С	26	48	17	30	3,5	131—197
30Л	З 860—880° С _в В, О 610—630° С	30	—	17	—	3,4	137—217
35Л	Н 860—880° С _в О 600—630° С	28	50	15	25	3,5	137—217
35Л	З 860—880° С _в М, О 600—630° С	35	—	16	—	4,0	143—229
45Л	Н 860—880° С _в О 600—630° С	32	35	12	20	3,0	143—229
45Л	З 860—880° С _в М, О 550—600° С	40	75	10	20	2,5	166—241
50Л	Н 860—880° С _в О 600—630° С	34	58	11	20	2,5	159—229
50Л	З 860—880° С _в М, О 600—630° С	40	—	14	—	3,0	187—240
55Л	Н 840—860° С _в О 600—630° С	35	60	10	18	25	159—229
55Л	З 790—810° С _в М О 580—600° С	47	86	15	—	25	199—255

Примечание. В таблице приняты обозначения. Н — нормализация, З — закалка; О — отпуск В — охлаждение в воде, М — охлаждение в масле

Глубина обезуглероженного слоя на необрабатываемых поверхностях отливок должна быть не более 0,3—0,5 мм.

Отливки из конструкционной легированной стали изготавливают из стали марок 20ГЛ, 27ГЛ, 30ГСЛ, 20ГСФЛ, 45ФЛ, 32Х06Л, 40ХЛ, 35ХМЛ, 30ХНМЛ, 35ХГСЛ, 35НГМЛ, 20ДХЛ, 20ХГСНДМЛ, 08ГДНФЛ, 13ХНДФЛ, 12ДН2ФЛ, 12ДХН1МФЛ, 25ХГ2ФЛ.

Цифры и буквы в наименованиях марок означают: двузначные числа — среднее содержание углерода в сотых долях процента; С —

кремний; Г — марганец; Х — хром; Н — никель; Д — медь, М — молибден; В — вольфрам; Т — титан; Ф — ванадий, Л — литейная.

Химический состав отливок из рассматриваемых сталей приведен в табл. 37.

Механические свойства при различных режимах термической обработки представлены в табл. 38.

Отливки из высоколегированных сталей. В табл. 39 приводится перечень и применение высоколегированных сталей, чаще всего используемых для изготовления отливок с особыми свойствами.

Значительная часть отливок из высоколегированных сталей подвергается различным видам сложных режимов термической обработки, обеспечивающих получение требуемой структуры и свойств.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

По химическому составу инструментальные стали являются преимущественно легированными.

Большая часть инструментальных сталей имеет повышенное содержание углерода. По структуре различают заэвтектоидные, близкие к эвтектоидным и ледебуритные стали. Их используют после термической обработки (заковки и отпуска), в результате которой инструментальные стали приобретают высокие твердость (до $HRC\ 60-70$ у ряда сталей), прочность (до $350-400\ \text{кгс/мм}^2$ при изгибе) и износостойкость, а некоторые из них — и теплостойкость, т. е. способность сохранять эти свойства при нагреве рабочей кромки в процессе резания или деформирования.

Вязкость инструментальных сталей пониженная, до $5-8\ (\text{кгс} \cdot \text{м/см}^2)$ на образцах без надреза для сталей с высокой твердостью (более $HRC\ 55$) и образцах с надрезом (при твердости $HRC\ 40-55$).

Большая часть инструментальных сталей — высококачественные, их выплавляют, как правило, в электрических печах (дуговых и индукционных) и отливают в слитки относительно небольших размеров массой $1-2\ \text{т}$, а высоколегированные быстрорежущие — $250-750\ \text{кг}$. Содержание серы и фосфора не превышает $0,03\%$ каждого в отдельности. Применяют и более совершенные способы производства — электрошлаковым переплавом или спеканием порошков, распыленных из жидкого металла. Но из-за высокой стоимости эти процессы оправданы лишь для особо высоколегированных сталей (некоторых быстрорежущих, в том числе кобальтовых).

Часть углеродистых сталей — качественные (см. табл. 40)

Инструментальные стали применяют для изготовления как инструментов (режущих, штамповых и измерительных), так и для некоторых деталей машин, от которых требуются высокие твердость и износостойкость и которые применяют при небольших или умеренных динамических нагрузках (в частности, для шарико- и роликоподшипников).

Инструментальные стали целесообразно классифицировать по теплостойкости как свойству, определяющему их основные особенности (рис. 5), химический состав и область назначения. По этому признаку различают три группы сталей: 1) нетеплостойкие, 2) полутеплостойкие

37. Химический состав

Сталь	C	Mn	Si	P	S
				Не более	
20ГЛ	0,15—0,25	1,20—1,60	0,20—0,40	0,040	0,040
27ГЛ	0,22—0,32	1,10—1,50	0,20—0,40	0,050	0,050
30ГСЛ	0,25—0,35	1,10—1,40	0,60—0,80	0,040	0,040
20ГСФЛ	0,17—0,28	1,30—1,80	0,30—0,50	0,040	0,040
45ФЛ	0,42—0,50	0,40—0,90	0,20—0,40	0,040	0,040
32Х06Л	0,25—0,35	0,40—0,90	0,20—0,40	0,050	0,050
40ХЛ	0,35—0,45	0,40—0,90	0,20—0,40	0,040	0,040
31ХМЛ	0,30—0,40	0,40—0,90	0,20—0,40	0,040	0,040
30ХНМЛ	0,25—0,35	0,40—0,90	0,20—0,40	0,040	0,040
35ХГСЛ	0,30—0,40	1,00—1,30	0,60—0,80	0,040	0,040
35ХГМЛ	0,32—0,42	0,80—1,20	0,20—0,40	0,040	0,040
20ДХЛ	0,15—0,25	0,50—0,80	0,20—0,40	0,040	0,040
20ХГСНДМЛ	0,18—0,24	0,90—1,30	0,90—1,20	0,050	0,045
08ГДНФЛ	Не более 0 10	0,60—1,00	0,15—0,40	0 035	0,035
13ХНДФТЛ	Не более	0,40—0,90	0,20—0,40	0,030	0,030
12ДН2ФЛ	0,08—0,16	0,40—0,90	0,20—0,40	0,035	0,035
12ДХН1МФЛ	0,10—0,15	0,30—0,55	0,20—0,40	0,030	0,030
25Х2Г2ФЛ	0,22—0,27	1,60—1,80	0,70—0,90	0,020	0,020

егированных сталей

Cr	Ni	Mo	V	Cu	Ti
Не более 0,30	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—
Не более 0,30	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—
Не более 0,30	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—
Не более 0,30	Не более 0,30	—	0,07—0,15	Не более 0,30	—
Не более 0,30	Не более 0,30	—	0,07—0,17	Не более 0,30	—
0,50—0,80	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—
0,080—1,10	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—
0,80—1,0	Не более 0,30	0,20—0,30	—	Не более 0,30	—
1,30—1,60	1,30—1,60	0,20—0,30	—	Не более 0,30	—
0,60—0,50	Не более 0,30	—	—	Не более 0,30	—
Не более 0,30	0,80—1,20	0,15—0,25	—	Не более 0,30	—
0,80—1,10	Не более 0,30	—	—	1,40—1,60	—
0,60—0,90	1,10—1,50	0,10—0,15	—	0,40—0,60	0,03—0,07
Не более 0,30	1,15—1,50	—	0,01 (по расчету)	0,80—1,20	—
0,15—0,40	1,20—1,60	—	0,06—12	0,65—0,90	0,04—0,10
Не более 0,30	1,80—2,20	—	—	0,08—0,85	1,20—1,50
1,20—1,70	1,40—1,80	0,20—0,30	0,08—0,15	0,40—0,65	—
1,80—2,20	Не более 0,30	—	0,15—0,20	Не более 0,30	—

38. Рекомендуемые режимы термической обработки и свойства литых легированных сталей

Сталь	Рекомендуемый режим термической обработки	Механические свойства					HB
		$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	a_{H^*} , кгс-м/см ²	
		не менее					
20ГСФЛ	Н 930—970° С, О 600—650° С	30	52	20	30	5,0	143—187
20ГЛ	Н 880—900° С, О 600—650° С	30	55	18	25	5,0	143—187
08ГДНФЛ	Н 930—970° С, Н 920—950° С, О 590—650° С	35	45	18	30	5,0	126—178
30ГСЛ	Н 870—890° С, О 570—600° С	35	60	14	25	3,0	163—229
35ХГСЛ	Н 870—890° С, О 570—600° С	35	60	14	25	3,0	163—240
13ХНДФГЛ	Н 950—970° С, Н 900—920° С, О 530—560° С	40	50	18	30	5,0	143—187
20ДХЛ	Н 880—890° С, О 560—600° С	40	50	12	30	3,0	143—187
35ХМЛ	Н 860—880° С, О 600—650° С	40	60	12	20	3,0	163—225
45ФЛ	Н 880—900° С, О 600—650° С	40	65	12	20	3,0	170—229
12ДН2ФЛ	Н 910—930° С, О 530—580° С	55	65	12	20	3,0	170—229
30ХНМЛ	Н 860—880° С, О 600—650° С	55	70	12	20	3,0	206—255
12ДХН1МФЛ	Н 940—960° С, Н 890—910° С, О 520—630° С	65	80	12	20	3,5	217—269
30ГСЛ	З 870—880° С, М, О 570—600° С	40	65	14	30	5,0	179—229
27ГЛ	З 860—870° С, М, О 560—600° С	45	65	10	20	5,0	179—229
30Х06Л	З 890—910° С, М, О 620—660° С	45	65	10	20	5,0	170—229
40ХЛ	З 850—860° С, М, О 600—650° С	50	65	12	25	4,0	196—229
20ХГСНДМЛ	З 910—980° С, В, О 640—660° С	50	65	12	20	4,0	207—269
20ДХЛ	З 880—890° С, М, О 560—600° С	55	65	12	30	4,0	187—240
35ХМЛ	З 860—870° С, М, О 600—650° С	55	70	12	25	4,0	206—255
35НГМЛ	З 860—870° С, М, О 600—650° С	60	75	12	25	4,0	217—262
35ХГСЛ	З 870—880° С, М, О 630—670° С	60	80	10	20	4,0	217—269
30ХНМЛ	З 860—870° С, М, О 600—650° С	65	80	10	20	4,0	217—269
12ДНХ1МФЛ	З 890—910° С, М, О 520—630° С	80	100	10	20	3,0	285—321
25Х2Г2ФЛ	З 910—930° С, М, О 280—300° С	120	140	5	25	4,0	402—474

Примечание. Обозначения — см. табл. 36

Примечание. Обозначения — см. табл. 36

39. Высоколегированные стали для отливок

Класс	Стали	Основное назначение
Мартенситный	20X13Л, 5X14НДЛ, 10X16НЧБЛ, 10X17НЗЛ, и др.	Отливки, работающие в малоагрессивных средах, при умеренных ударных и статических нагрузках (корпусы нефтяных насосов, турбинные лопасти, гребные винты, клапаны гидравлических прессов, детали повышенной прочности для авиационной, химической и других отраслей промышленности)
Мартенсито-ферритный	10X13Л	Коррозионностойкие отливки, работающие в пресной воде, атмосферных условиях при одновременных ударных нагрузках
Ферритный	15X25ТЛ, 75X28Л, 185X34Л	Кислото- и жаростойкие отливки для химического машиностроения не подвергающиеся большим механическим нагрузкам
Аустенитный	110Г13Л, 10X18Н9ТЛ, 10X18Н9Л, 5X18Н9Л, 15X25Н19СЛ, 45X17Г13Н310Л, 55X18Г14СТЛ и др. 15X18Н22В6М2Л, 5X17Н34В5Т3102Л, 20X21Н46В8Л	Из стали 110Г13Л — отливки, износостойкие в условиях ударных и высоких статических нагрузок (сердечники стрелочных переводов и крестовин железно-дорожных путей, детали экскаваторов дробилок, траки и др.) Из других сталей — отливки с высокой коррозионной стойкостью для различной арматуры химической промышленности, коллекторов выхлопных систем, печной арматуры, работающей в среде агрессивных газов, и т. д. Жаропрочные (до 800—900° С), отливки для газовых турбин, турбокомпрессоров установок нефтехимической промышленности, газопроводов и др.
Аустенитно-мартенситный	5X14Н7МЛ, 10X18Н4Г4Л	Коррозионностойкие (кислотостойкие) отливки, работающие в условиях нормальных и низких температур
Аустенитно-ферритный	10X25Н5ТМФЛ, 25X23Н7СЛ, 30X24Н12СЛ	Кислотостойкие и жаростойкие (до 600—1000° С) отливки для химического машиностроения, оборудования нефтеперегонных заводов, лопасти компрессоров и другие детали, работающие в условиях высоких температур и давления

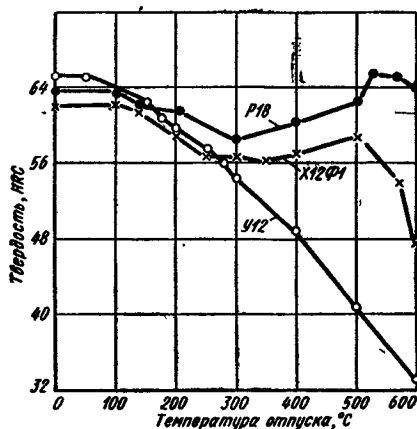


Рис. 5. Зависимость твердости инструментальных сталей от температуры отпуска:

У12 — сталь углеродистая нетеплостойкая; X12Ф1 — сталь высокохромистая полутеплостойкая; P18 — сталь быстрорежущая теплостойкая

и 3) теплостойкие. Внутри каждой группы инструментальные стали дополнительно различают по механическим свойствам: стали высокой твердости и стали повышенной вязкости.

Нетеплостойкие стали высокой твердости

Марки, свойства и применение

Химический состав сталей приведен в табл. 40. Они имеют повышенное содержание углерода (более 0,7%) и приобретают высокую твердость HRC 62—65 (а у некоторых до HRC 67—68) после закалки. Структура в закаленном состоянии — мартенсит, остаточный аустенит и вторичный цементит.

Отпуск повышает прочность и вязкость (рис. 6), снимая часть закалочных напряжений. Но для сохранения высокой твердости его выполняют, как правило, при температурах не больше 180—200° С. В структуре сохраняется более мягкая составляющая — остаточный аустенит, полученный при закалке, что не позволяет получить очень высокое сопротивление пластической деформации. Предел текучести при сжатии: от 190 до 160 кгс/мм² соответственно при твердости HRC 63—64 и HRC 59—60.

Углеродистые стали указаны по ГОСТ 1435—74, легированные — по ГОСТ 5950—73, а сталь 6ХЗФС — по техническим условиям.

Углеродистые стали с буквой А в конце марки — высококачественные, без этой буквы — качественные. В углеродистых сталях: а) в листе и ленте толщиной до 2,5 мм и в шлифованной стали (серебрянке) содержание хрома 0,20—0,40% (качественные) и 0,20—0,35% (высококачественные); б) допускается содержание никеля не более 0,25% в качественных и не более 0,20% в высококачественных сталях.

Цементитный карбид, выделяющийся при отпуске, начинает коагулировать при относительно низком нагреве (200—250° С), что приводит к снижению твердости стали уже при нагреве до этих температур.

40. Химический состав (%) негетерогенных, инструментальных сталей

Марка	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V
Стали высокой твердости Стали небольшой прокаливаемости							
У10	0,95— 1,04	0,15— 0,35	0,15— 0,35	До 0,20	—	—	—
У10А	0,95— 1,04	0,15— 0,30	0,15— 0,35	До 0,15	—	—	—
У11	1,05— 1,14	0,15— 0,35	0,15— 0,35	До 0,20	—	—	—
У11А	1,05— 1,14	0,15— 0,30	0,15— 0,35	» 0,15	—	—	—
У12	1,15— 1,24	0,15— 0,35	0,15— 0,35	» 0,20	—	—	—
У12А	1,15— 1,24	0,15— 0,30	0,15— 0,35	» 0,15	—	—	—
У13	1,25— 1,35	0,15— 0,35	0,15— 0,35	» 0,20	—	—	—
У13А	1,25— 1,35	0,15— 0,30	0,15— 0,35	» 0,15	—	—	—
В2Ф	1,05— 1,22	0,20— 0,50	0,15— 0,35	0,20— 0,40	1,60— 2,00	—	0,20— 0,28
ХВ4	1,25— 1,45	0,15— 0,40	0,15— 0,35	0,40— 0,70	3,50— 4,30	—	0,15— 0,30
8ХФ	0,70— 0,80	0,15— 0,40	0,15— 0,35	0,40— 0,70	—	—	0,15— 0,30
9ХФ	0,80— 0,90	0,30— 0,60	0,15— 0,35	0,40— 0,70	—	—	0,15— 0,30
11ХФ	1,05— 1,15	0,40— 0,70	0,15— 0,35	0,40— 0,70	—	—	0,15— 0,30
13Х	1,25— 1,40	0,30— 0,60	0,15— 0,35	0,40— 0,70	—	—	—
Стали повышенной прокаливаемости							
Х	0,95— 1,10	0,15— 0,40	0,15— 0,35	1,30— 1,65	—	—	—
12Х1	1,15— 1,25	0,30— 0,60	0,15— 0,35	1,30— 1,65	—	—	—
ХВСГ	0,95— 1,05	0,60— 0,90	0,65— 1,0	0,60— 1,10	0,50— 0,80	—	0,05— 0,15
9ХС	0,85— 0,95	0,30— 0,60	1,20— 1,60	0,95— 1,25	—	—	—
Сталь высокой прокаливаемости							
7ХГ2ВМ	0,68— 0,76	1,80— 2,30	0,20— 0,40	1,50— 1,80	0,50— 0,90	0,50— 0,80	0,10— 0,25
Стали повышенной вязкости							
У7	0,65— 0,74	0,20— 0,40	0,15— 0,35	До 0,20	—	—	—
У7А	0,65— 0,74	0,15— 0,35	0,15— 0,35	» 0,15	—	—	—
7ХФ	0,63— 0,73	0,30— 0,60	0,15— 0,35	0,40— 0,70	—	—	0,15— 0,30
6ХС	0,60— 0,70	0,15— 0,40	0,60— 1,00	1,00— 1,30	—	—	—
6Х3ФС (ЭП670)	0,56— 0,62	0,15— 0,40	0,40— 0,70	2,60— 3,30	—	0,20— 0,30	0,20— 0,40
7Х3	0,65— 0,75	0,15— 0,40	0,15— 0,35	3,20— 3,80	—	—	—

Твердость цементита $HV\ 1050$; это лишь немного превышает твердость металлической основы. Эти стали относятся к группе умеренной износостойкости. Стали этой группы пригодны для резания с небольшой скоростью и для деформирования сравнительно мягких материалов.

Преимущества нетеплостойких сталей:

более однородная структура с мелкими и равномерно распределенными карбидами, чем у быстрорежущих и полутеплостойких высокохромистых сталей, что делает их пригодными для некоторых крупных

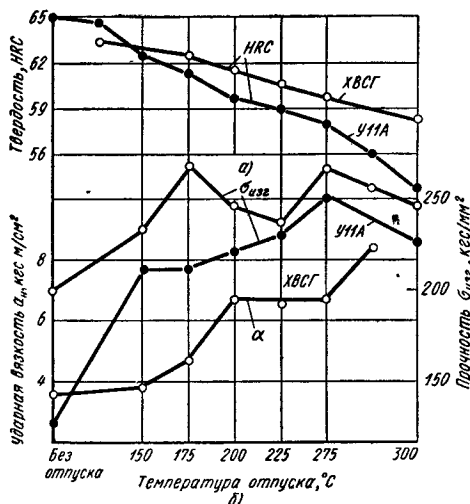


Рис. 6. Зависимость твердости (а), прочности и ударной вязкости (б) нетеплостойких углеродистых и легированных сталей высокой твердости от температуры одночасового отпуска (закалка на мелкое зерно)

инструментов; это преимущество значительное в крупном сечении; при увеличении диаметра проката с 15 до 75 мм прочность нетеплостойкой стали 7ХГ2ВМ снижается с 240–260 до 200–220 кгс/мм², а теплостойкой быстрорежущей стали Р18 — с 320–340 до 180–200 кгс/мм²;

они лучше обрабатываются после отжига резанием и давлением в холодном состоянии, что облегчает получение тонкого листа (проволоки) и нанесение рабочей фигуры штампа мастер-пуансоном; они также обрабатываются резанием при твердости до $HRC\ 55–58$ (после закалки и отпуска);

они пригодны для закалки с индукционным нагревом (в отличие от полутеплостойких и нетеплостойких сталей).

Однако применение нетеплостойких сталей для режущих инструментов и для штампов из-за недостаточной устойчивости против нагрева и изнашивания постепенно сокращается вследствие увеличения доли полутеплостойких и теплостойких сталей.

Нетеплостойкие стали разных марок отличаются главным образом рокаливаемостью и закаливается.

Стали небольшой прокаливаемости. К ним относятся стали углеродистые, низколегированные и легированные вольфрамовые с высоким содержанием углерода.

Углеродистые стали. Основная особенность — пониженные прокаливаемость и закаливается. Для получения высокой твердости необходимо резкое охлаждение при закалке в водных растворах, что усиливает деформацию и чувствительность образованию трещин.

Более рационально использование их для инструментов диаметром 10—30 мм. Эти стали приобретают при закалке высокую твердость лишь в поверхностном слое, сохраняя незакаленной вязкую сердцевину. Это делает углеродистые стали пригодными для инструментов, работающих на износ с динамическими нагрузками: ручных метчиков (стали У11А, У12А), штампов простой формы для высадки, а также вытяжки мягких металлов и некоторых экзотических штампов (стали У10 и У10А).

В сечениях более 30 мм твердый закаленный слой излишне тонок и может сминаться под действием нагрузок в эксплуатации.

В инструментах небольших сечений, особенно толщиной (диаметром) менее 2—3 мм, и в инструментах с тонкой рабочей кромкой углеродистые стали не получают равномерной высокой твердости.

Низколегированные стали. Путем легирования небольшим количеством хрома (и марганца) стали подобно углеродистым сохраняют хорошую обрабатываемость давлением и резанием после отжига, но приобретают лучшую закаливаемость и прокаливаемость. Они наиболее пригодны для индукционной закалки, так как получают равномерную и высокую твердость при охлаждении водой (вместо водных растворов солей и щелочей). При дополнительном легировании ванадием уменьшается чувствительность к перегреву при закалке, сохраняются более мелкое зерно и повышенная прочность (рис. 7).

Стали используют для инструментов небольших сечений: пил по дереву (стали 8ХФ, 9ХФ), метчиков, ручных напильников, штампов высадки, вытяжки диаметром до 40 мм (стали 11ХФ, 13Х) и для бритв (сталь 13Х).

Вольфрамовые стали с повышенным содержанием углерода. Твердость после закалки до HRC 67. Их используют для пил по металлу (сталь В2Ф), граверных инструментов, реже для резания отбеленного чугуна.

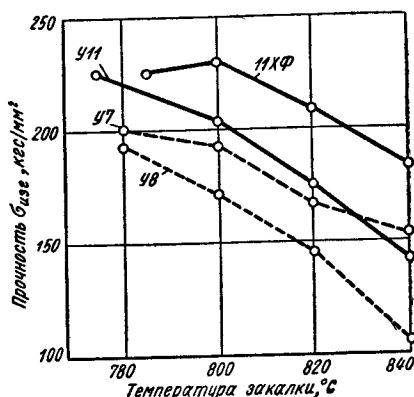


Рис. 7. Зависимость прочности сталей высокой твердости (углеродистых У7, У8, У11 и низколегированной 11ХФ) от температуры закалки (отпуск 150° С)

Стали повышенной прокаливаемости. Они получают высокую твердость в инструментах диаметром до 40—50 мм (стали 12Х1, Х), 60—70 мм (сталь 9ХС) и до 90—95 мм (сталь ХВСГ) при закалке с охлаждением в масле и несколько меньше при охлаждении в горячих средах (с температурами 150—200° С). Это позволяет значительно уменьшить деформацию инструментов. Устойчивость стали против нагрева показана на рис. 8.

Стали используют для круглых плашек, разверток, зенкеров, штампов и форм прессования полимеров (сталь ХВСГ), измерительных ин-

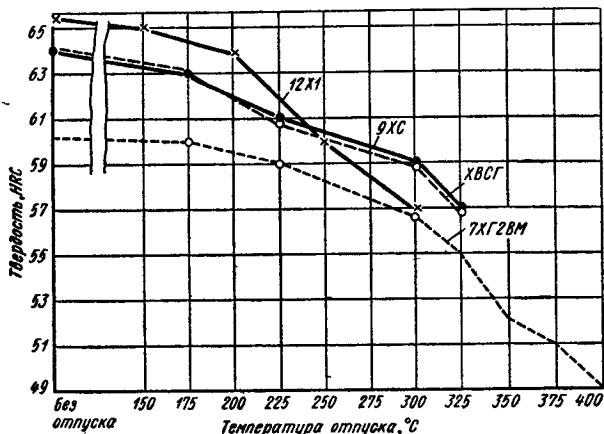


Рис. 8. Зависимость твердости нетеплоустойчивых сталей от температуры отпуска (закалка на мелкое зерно)

струментов (сталь Х) и плоскопараллельных концевых мер повышенной износостойкости (сталь 12Х1), реже (из-за чувствительности к обезуглероживанию) для круглых плашек применяют сталь 9ХС.

Стали высокой прокаливаемости. Стали отличаются высокой прокаливаемостью и закаливаемостью. Они получают твердость HRC 59—60 в сечениях до 100—110 мм при охлаждении как в масле, так и в горячих средах и на воздухе. Из-за повышенного содержания марганца стали сохраняют до 15—17% аустенита и получают минимальные объемные изменения при закалке.

Стали 7ХГ2ВМ и 7ХГНМ используют для крупных и сложной формы штампов вырубки, форм прессования полимеров. Из-за минимальной деформации шлифование можно применять незначительное.

Термическая обработка

Отжиг. Температуры отжига и твердость после отжига (в состоянии поставки) приведены в табл. 41. Для более производительного холодного деформирования (волочения, насечки, вырубки) твердость может быть понижена на HB 10—20 замедлением скорости охлаждения до 20° С/ч в интервале от температуры нагрева до температуры изотермической выдержки.

41. Температуры отжига нетеплостойких сталей высокой твердости

Сталь	Температура, °C		
	Нагрев	Изотермическая выдержка	Твердость HB
У10, У10А	740—750	600—650	166—192
У11А—У13А,	750—780	620—660	166—192
У11—У13, В2Ф			
8ХФ, 9ХФ	750—790	670—700	170—196
11ХФ			
ХВ4	730—750 *	—	228—269
Х, 9ХС, ХВСР	770—800	670—720	187—241
12Х1	790—820	670—720	196—235
7ХГ2ВМ	780—800	650—670	228—248

* Высокий отпуск с выдержкой не менее 3 ч.

Обезуглероженный слой согласно ГОСТ 5950—73 не должен превышать на сторону для стали размером:

от 4 до 8 мм	0,35 мм
» 8 » 15 »	0,4 »
» 15 » 30 »	0,5 »
» 30 » 50 »	0,7 »
» 50 » 70 »	1,0 »
» 70 » 100 »	1,3 »

Предварительную термическую обработку применяют для уменьшения деформации (в 1,5—2 раза) при последующей закалке; она заключается в предварительной закалке из межкритической области: $A_1 + 30 - 40^\circ\text{C}$ ($750-760^\circ\text{C}$ для сталей Х, ХВГ и $740-750^\circ\text{C}$ для стали У12) с охлаждением в масле и отпуске 600°C (1 ч). Твердость сталей HRC 30—32. Достижимое уменьшение деформации показано на рис. 9.

Закалка. Режимы закалки приведены в табл. 42. При нагреве до указанных в ней температур сталь сохраняет мелкое зерно (балла 9—10) и более высокую прочность. Структура после охлаждения — скрытокристаллический мартенсит, вторичный цементит и остаточный аустенит (8—10%).

Для предупреждения обезуглероживания и окисления нагрев выполняют в расплавленных солях: BaCl_2 (70—72%) и NaCl (28—30%). Ванны периодически раскисляют бурой (2—3% по массе).

Выдержка на каждый миллиметр диаметра: 20—35 с при нагреве в соли и 50—80 с при нагреве в печи. Ее увеличивают на 20—25% для мелких инструментов.

Стали небольшой прокаливаемости охлаждают в водном растворе NaCl (10%).

Стали повышенной и высокой прокаливаемости охлаждают в: а) масле ($20-50^\circ\text{C}$) или б) расплавленной соли (55% NaNO_3 и 45% NaNO_2), а затем на воздухе, выдержка в соли равна 30—50% от выдержки, принятой для окончательного нагрева.

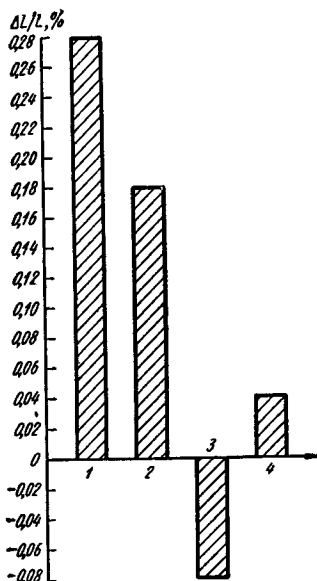


Рис. 9. Влияние предварительной термической обработки на изменение длины образцов ($L=100$ мм и $D=50$ мм) из стали У8:

1 — закалка от 810°C в воде (без предварительной обработки), 2 — закалка из межкритической области (760°C); 3 — то же и отпуск 600°C , 1 ч, 4 — закалка от 810°C в воде (с предварительной термической обработкой)

Обработку холодом (охлаждение до $-65 \div -70^{\circ}\text{C}$) применяют для плоскопараллельных концевых мер с целью более полного превращения остаточного аустенита и повышения стабильности размеров в эксплуатации. Охлаждение выполняют не позже чем через 30 мин после заковки.

Отпуск. Режим отпуска: $150-160^{\circ}\text{C} - 60$ мин ($HRC\ 61-63$) для большинства режущих инструментов и штампов, калибров и пробок;

42. Режимы заковки нетеплостойких сталей высокой твердости

Сталь	Температура заковки ($^{\circ}\text{C}$) при охлаждении в		Твердость HRC при охлаждении в	
	водных растворах	масле или горячих средах	водных растворах	масле или горячих средах
У10—У12 (У10А—У12А)	770—790	790—810	63—65	61—62
То же	800—820 ¹	—	62—64	—
У13—У13А	770—790	790—810	63—65	62—64
8ХФ—9ХФ	—	820—840	—	61—63
11ХФ, 13Х	800—820	810—830	62—65	62—64
В2Ф	810—830	—	64—65	—
ХВ4	820—840	—	65—67	—
Х	810—820	840—850	63—65	62—64
9ХС	—	865—875	—	62—63
ХВСГ ²	—	855—870	—	63—64
12Х1	810—820	850—860	64—66	63—65
7ХГ2ВМ ³	—	850—870	—	59—62

¹ Для инструментов диаметром ≥ 25 мм

² Инструменты диаметром < 15 мм можно охлаждать на воздухе ($HRC\ 60-62$)

³ Можно охлаждать на воздухе ($HRC\ 56-60$)

180—200° С — 50—60 мин (*HRC* 60—61) для режущих инструментов небольших сечений;

120—130° С 12—24 ч (*HRC* 63—64) для плоскопараллельных концевых мер.

После шлифования выполняют отпуск (30—45 мин) при температуре на 10—15° С ниже указанных ранее.

Нетеплостойкие стали повышенной вязкости

Марки, свойства и применение

Химический состав сталей приведен в табл. 40. Стали близки к эвтектоидным; исходная структура — перлит, а у углеродистых сталей — перлит с небольшим количеством феррита. После непрерывной закалки они имеют мартенситную структуру и твердость *HRC* 56—60 (см. табл. 45). Инструменты подвергают отпуску при 250—350° С. Твердость в зависимости от состава стали *HRC* 45—58, а вязкость 3—6 кгс·м/см² (образцы без надреза).

Стали применяют для инструментов, воспринимающих динамические нагрузки: штампов чеканочных и некоторых высадочных (стали 6ХЗФС, 6ХС, реже 6ХВ2С и 7ХЗ), а также многих деревообрабатывающих инструментов: стамесок, пил (сталь 7ХФ), топоров (У7), фрез (6ХС), буровых шарошек (7ХНФ).

Стали различаются по прокаливаемости и вязкости.

Стали небольшой прокаливаемости. К ним относятся стали У7 и 7ХФ.

Изменение прокаливаемости стали У7 показано на рис. 10.

Для получения требуемой твердости сталь надо закалить с охлаждением в водных растворах. Применение стали У7 ограничивается для инструментов простой формы и толщиной (диаметром) до 15—20 мм.

Стали повышенной прокаливаемости. Сталь 6ХЗФС сочетает повышенное сопротивление пластической деформации, вязкость и износостойкость при ударных нагрузках и высокие технологические свойства.

Сталь 6ХЗФС прокаливается в сечениях до 70—80 мм. Вязкость после закалки с охлаждением в масле и отпуска при 300—350° С составляет 3—4 кгс·м/см² при твердости *HRC* 52—54. Вследствие влияния кремния и хрома сталь пригодна также для изотермической закалки и получает в этом случае повышенную вязкость и требуемую твердость в сечениях диаметром до 50—60 мм. После выдержки при 250° С (40 мин) и получаемой твердости *HRC* 52—54 ее вязкость 5—6 кгс·м/см².

Количество остаточного аустенита в стали 6ХЗФС: 9—10% после непрерывной закалки и отпуска при 180° С и 22—25% после изотермической закалки. Этот аустенит из-за совместного влияния хрома и кремния устойчив при низких температурах (—50÷60° С), что обеспечивает сохранение высокой вязкости.

Сталь 6ХЗФС имеет низкую твердость после отжига, что позволяет наносить сложную гравюру мастер-пуансоном.

Назначение сталей 6ХС, 6ХВ2С и 7ХЗ аналогично назначению стали 6ХЗФС, но вязкость их меньше из-за излишне высокого содержания кремния в сталях 6ХС и 6ХВ2С и углерода в стали 7ХЗ.

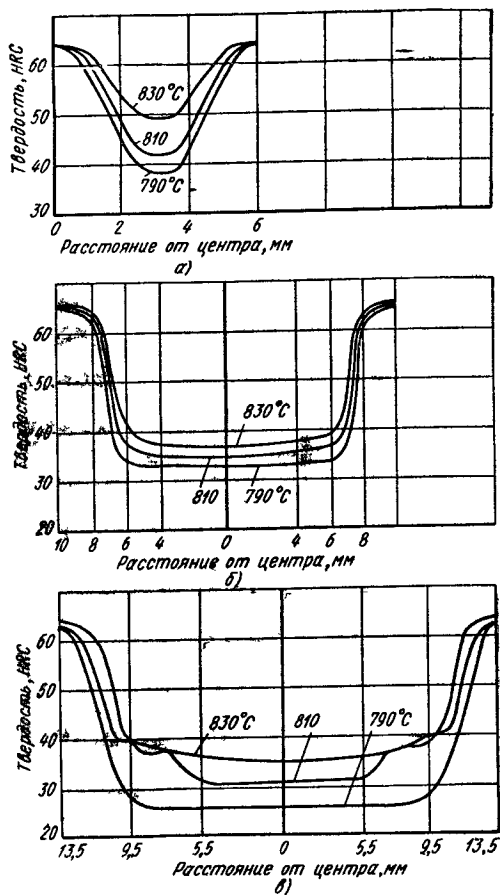


Рис. 10. Зависимость прокаливаемости нетеплостойкой углеродистой стали повышенной вязкости (У7) от температуры заковки и диаметра образцов:

а — $\varnothing = 12$ мм; б — $\varnothing = 20$ мм, в — $\varnothing = 27$ мм

Сталь 7ХФН имеет повышенную вязкость $4 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ при твердости $HRC 57-58$ (непрерывная заковка и отпуск при 200°C) по сравнению с $2-2,5 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{см}^2$ у стали 7ХФ. Она прокаливается в сечении до 30 мм.

Горячая механическая и термическая обработка

Твердость в состоянии поставки указана в табл. 43. Структура — перлит зернистый у легированных сталей; у сталей У7, 7ХФ и 7ХН — перлит с участками феррита.

43. Температуры (°C) критических точек, отжига и смягчающего отпуска нетеплостойких сталей повышенной вязкости

Сталь	Ac ₁	Ac ₂	Отжиг	Изотермическая выдержка при отжиге	Твердость НВ	Смягчающий отпуск
У7	720—730	740—745	730—750	600—650	170—196	650—670
7ХФ	730—740	735—745	740—750	600—650	197—229	660—680
6ХЗФС	790—910	—	820—840	680—700	170—196	680—700
6ХС	770—790	—	820—840	670—700	197—229	670—680
7ХЗ	—	—	—	—	—	—
7ХФН	710—720	750—760	750—780	600—650	179—196	650—660

Ковка. Температуры начала ковки 1100—1125° С и окончания 750—850° С для сталей У7 и 7ХФА и соответственно 1120—1150 и 800—900° С для остальных сталей.

Поковки сталей У7, 7ХФ охлаждают, складывая штабелями, а поковки остальных сталей — в футерованной яме или под слоем песка.

Отжиг выполняют при необходимости улучшения структуры слитка или крупных заготовок, мало обжатых при горячей деформации, и для получения твердости по нижнему пределу (см. табл. 43).

Для сталей 6ХЗФС, 7ХЗ в этом случае обеспечивается возможность нанесения гравюры холодной деформацией (мастер-пуансоном).

Для остальных сталей для упрощения обработки вместо отжига выполняют смягчающий отпуск.

Обезуглероживание не должно превышать норм, указанных для сталей высокой твердости (см. стр. 153).

Предварительную термическую обработку выполняют для уменьшения деформации при последующей закалке (см. рис. 6). Инструменты закаливают с 750—770° С с охлаждением в масле и подвергают отпуску при 600° С (1 ч).

Закалка. Режимы закалки приведены в табл. 44. Охлаждение в горячих средах применяют для инструментов, работающих с повышенными динамическими нагрузками, но с меньшими давлениями.

44. Режимы закалки нетеплостойких сталей повышенной вязкости

Сталь	Температура нагрева (°C) при охлаждении в			Твердость HRC при охлаждении в		
	воде (и водных растворах)	масле	горячих средах 250—270° С	воде (и водных растворах)	масле	горячих средах
У7 (У7А)	780—800	800—820	—	61—63	59—62	—
7ХФ	810—830	820—840	—	62—64	59—62	—
7ХНФ	—	830—840	—	—	61—62	—
6ХС	—	890—920	900—930	—	58—60	52—54
6ХВ2С	—	880—910	890—920	—	59—61	52—54
6ХЗФС	—	940—960	950—970	—	59—60	52—54
7ХЗ	—	900—920	—	—	61—62	—

Отпуск применяют после непрерывной закалки. Температуры отпуска: для инструментов из сталей У7, 7Х, 7ХНФ — 290—350° С (*HRC* 45—50), для инструментов из сталей 6Х3ФС, 6ХС, 6ХВ2ФС и 7ХЗ — 150—180° С (*HRC* 57—59) для работы при повышенном изнашивании и меньших динамических нагрузках и 300—350° С (*HRC* — 50—54) для работы со значительными ударами.

Отпуск после изотермической закалки при 150—170° С (1 ч).

Полутеплостойкие стали высокой твердости

Марки, свойства и применение

Химический состав сталей приведен в табл. 45.

По основным свойствам различают стали двух групп.

Износостойкие стали содержат значительное количество — до 18—24% (по объему) твердых карбидов M_7C_3 ($HV \approx 1500$) и MC ($HV \approx 2000$), что обеспечивает высокую износостойкость в условиях изнашивания как по металлу, так и по абразивным материалам при нагреве не выше 300—400° С.

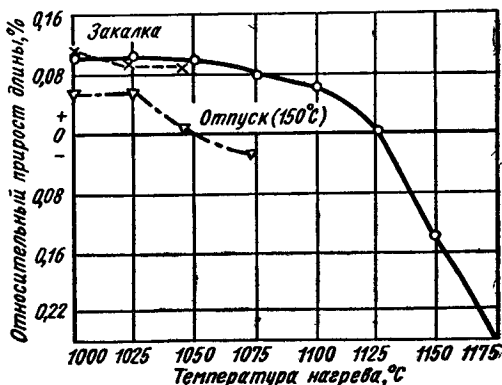


Рис. 11. Зависимость относительного прироста длины образцов из стали X12M ($L = 100$ мм и $D = 10$ мм) от температуры закалки (отпуск 150° С)

Стали имеют повышенное содержание хрома, а некоторые и ванадия. Прокаливаемость высокая: в сечениях более 100—150 мм при 12% Сг и до 80—100 мм при 6% Сг.

Стали, указанные в табл. 45, закаливаются с охлаждением в масле, а стали с 12% Сг и в горячих средах (300—350° С, 30 мин). После закалки с нагревом до температур, сохраняющих мелкое зерно (балла 9—10), стали имеют 15—20% аустенита, что обеспечивает минимальные изменения (рис. 11) и деформацию.

После отпуска на высокую твердость (150—225° С) остаточный аустенит сохраняется в структуре, вследствие чего предел текучести (при

45. Химический состав (%) полутеплостойких инструментальных сталей

Сталь	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	Остальные
Стали высокой твердости							
Стали повышенной и высокой износостойкости							
							V
X6BФ	1,05— 1,15	0,15— 0,40	0,15— 0,35	5,50— 6,50	1,10— 1,50	—	0,50— 0,80
X12Ф1	1,25— 1,45	0,15— 0,40	0,15— 0,35	11,0— 12,5	—	—	0,70— 0,90
X12M	1,45— 1,65	0,15— 0,40	0,15— 0,35	11,0— 12,5	—	0,40— 0,60	0,15— 0,30
X6Ф3М (ЭП670)	1,70— 1,80	0,15— 0,40	0,30— 0,60	6,00— 6,50	—	0,60— 0,90	3,50— 4,00
X12	2,00— 2,20	0,15— 0,40	0,15— 0,35	11,5— 13,0	—	—	—
X12ВМ	2,00— 2,20	0,15— 0,40	0,20— 0,40	11,0— 12,5	0,50— 0,80	0,60— 0,90	0,15— 0,30
X12Ф3М (ДИ51)	1,85— 2,00	0,15— 0,40	0,20— 0,40	12,0— 13,0	—	0,60— 0,80	3,2— 3,8

Стали с повышенным сопротивлением пластической деформации

6X6B3MΦC	0,50— 0,60	0,15— 0,40	0,60— 0,90	5,50— 6,50	2,50— 3,20	0,60— 0,90	0,50— 0,80
6X4M2ΦC (ДИ55)	0,57— 0,65	0,20— 0,50	0,60— 0,90	3,80— 4,40	—	2,00— 2,40	0,60— 0,80

Стали коррозионностойкие

X18MΦ	1,17— 1,25	0,20— 0,40	0,50— 0,90	17,5— 19,0	—	0,50— 0,60	0,10— 0,20
9X18	0,90— 1,00	0,40— 0,70	0,50— 0,90	17,0— 19,0	— Ti	—	— Ni
000X11H10M2T2 * (ЭП853)	0,03— 0,03	0,15— 0,15	0,15— 0,15	10,0— 11,3	1,70— 2,1	1,80— 2,30	9,0— 10,3

Кроме того, Al ≤ 0,1%; В ≤ 0,002%; Zr ≤ 0,08%; Са ≤ 0,06%

Стали повышенной вязкости

5XHM	0,50— 0,60	0,50— 0,80	0,15— 0,35	0,50— 0,80	—	0,15— 0,30	Ni 1,40— 1,80
5XГМ	0,50— 0,60	1,20— 1,60	0,25— 0,60	0,60— 0,90	—	0,15— 0,30	—
5XHB	0,50— 0,60	0,50— 0,80	0,15— 0,35	0,50— 0,80	W 0,40— 0,70	—	1,40— 1,80
5XHBС	0,50— 0,60	0,30— 0,60	0,60— 0,90	1,30— 1,60	0,40— 0,70	—	0,80— 1,20
4XMΦC	0,37— 0,45	0,50— 0,80	0,50— 0,80	1,50— 1,80	—	0,90— 1,20	V 0,30— 0,50
27X2HMBΦ	0,25— 0,32	0,50— 0,80	0,17— 0,37	2,00— 2,50	0,40— 0,60	0,40— 0,60	0,20— 0,30 Ni 1,1— 1,5

* Состав сталей указан по ГОСТ 5950—73, стали 9X18 — по ГОСТ 5632—72 **, а сталей X6Ф4М, X12Ф4М, X18MΦ, 000X11H10M2T2 и 27X2HMBΦ — по техническим условиям.

сжатии) не превышает 170—180 и 160—165 кгс/мм² при твердости *HRC* 61—62 и 58—59 соответственно.

Стали X12M, X12Ф1, X6ВФ с карбидной фазой M_7C_3 (16—17% объемных в стали X12M) имеют повышенную износостойкость (по сравнению с нетеплостойкими сталями ХВСГ и др.) и удовлетворительную шлифуемость. Назначаются для вырубных и вытяжных и реже штампов для выдавливания металлов небольшой твердости, а также электротехнических сталей.

Сталь X12 имеет больше карбидов M_7C_3 ; ее износостойкость больше, но прочность ниже, чем у X12M, X12Ф1, X6ВФ.

Стали X12Ф3М, X12ВМ, X6Ф4М наиболее износостойкие. Они содержат также карбиды MC (4% объемных в стали X12Ф4М и 7—8% в стали X6Ф4М). Используются для работы по более твердым материалам, в том числе абразивным. Их технологический недостаток — плохая шлифуемость обычными абразивами. Эти стали надо шлифовать кругами алмазными или с карбидом бора; шероховатость поверхности в этом случае меньше 9—10-го класса.

Стали с повышенным сопротивлением пластической деформации. После закалки с повышенных температур (см. табл. 47) они получают значительную устойчивость против нагрева, что позволяет получать высокую твердость (*HRC* 58—62) после отпуска при 540—560° С и обеспечить превращение остаточного аустенита. Предел текучести при сжатии 200—210 и 220—230 кгс/мм² соответственно при твердости *HRC* 58—59 и 60—62.

Стали используют для штампов холодной высадки, прессования и накатных инструментов.

Сталь 6X4M2ФС получает после отпуска твердость *HRC* 61—62, а сталь 6X6B3MФС — *HRC* 58—60.

Коррозионностойкие стали имеют высокую твердость. Они устойчивы в кипящей воде, водяном паре, влажном и сухом воздухе, холодных органических кислотах; их применяют прежде всего для медицинских инструментов и для ножей в пищевой промышленности.

К этой группе относятся стали:

а) с повышенным содержанием углерода и хрома (стали X18МФ и 9X18). По твердости, прочности, износостойкости и по поведению при закалке они близки к стали X12M. Стали получают твердость до *HRC* 60, применяются для ножей и хирургических скальпелей;

б) с низким содержанием углерода и с 12% Cr, дополнительно легированные никелем, молибденом, титаном. Это мартенситностареющая сталь 000X11H10M8T2. Она не содержит карбидов и упрочняется путем выделения при отпуске (старении) очень дисперсных интерметаллидных частиц. Твердость после закалки (совмещаемой часто с охлаждением послековки) *HRC* 30—32. В этом состоянии сталь обрабатывают резанием, и инструменты получают окончательные размеры. В результате последующего старения (отпуска) твердость возрастает до *HRC* 56—58; возрастание твердости не сопровождается деформацией. Сталь используется преимущественно для медицинских инструментов в очень тонких сечениях: ленте, проволоке.

Горячая механическая и термическая обработка

Твердость в состоянии поставки не должна превышать *HB* 241 для стали X6ВФ и *HB* 255 для остальных сталей (кроме стали 000X11H10M2T2, поставляемой без нормирования твердости до закалки).

Толщина безуглероженного слоя не должна превышать на сторону 0,5 мм плюс 1% от диаметра (ГОСТ 5950—73).

Карбидная неоднородность не должна превышать норм, указанных в табл. 46.

46. Допускаемый карбидный балл полутеплостойких сталей высокой твердости (ГОСТ 5950—73)

Диаметр (толщина) прутка, мм	X6BФ, 6XB3MФC, 6X4M2ФC	X12, X12BM, X12M, X12Ф1, X6Ф4M
До 40	3	4
Свыше 40 до 60	4	5
» 60 » 80	5	6
» 80 » 100	6	7

Ковка. Для X6BФ, 6XB3MФC, 6X4M2ФC температуры начала деформации 1100—1150° С и окончания 870—900° С, а для остальных — 900—950° С. Охлаждение замедленное в предварительно нагретой футерованной яме, а лучше в печи с температурой 650—700° С.

Отжиг: нагрев при 840—860° С, выдержка не менее 2 ч после прогрева, охлаждение со скоростью 30—40° С/ч до 700—720° С и выдержкой не менее 3 ч, затем замедленное охлаждение с печью до 600—650° С и окончательное — на воздухе.

Закалка. Режимы закалки приведены в табл. 47.

47. Режимы закалки полутеплостойких сталей высокой твердости

Сталь	Температуры нагрева, °С	Охлаждение	Твердость HRC
X6BФ	960—990	В масле	61—63
X12Ф1	1020—1050	То же	61—63
X12M, X12BM	1000—1030	То же	62—63
		и в соли (340—360° С)	
X12Ф3M	1060—1090	То же	62—63
X6Ф4M	1000—1020	В масле	62—64
6XB3MФC	1070—1090	То же	58—61
6X4M2ФC	1060—1080	»	60—62
000X11H10M2T2	1000—1010	В воде	30—34

Примечание. Выдержка при охлаждении в горячих средах 30—40 мин.

Отпуск. Температуры нагрева: износостойких сталей — 150—170° С (HRC 60—61) для небольших штампов и пуансонов, 200—220° С (HRC 50—60) для более крупных штампов и матриц и 220—250° С (HRC 57—58) для крупных штампов и матриц при работе с динамическими нагрузками;

сталей 6Х6ВЗМФС и 6Х4М2ФС — 530—540°С (*HRC* 61—62) при отсутствии динамических нагрузок и 550—560°С (*HRC* 59—60) при повышенных нагрузках.

Отпуск повторяют 2—3 раза.

Сталь 000Х11Н10М2Т2 подвергают отпуску при 460—480°С 6 ч на твердость *HRC* 56—58.

Полунадежные стали повышенной вязкости

Марки, свойства и применение

Химический состав указан в табл. 45. Эти стали сочетают устойчивость против нагрева с разгаростойкостью (термической усталостью), т. е. устойчивостью против образования трещин, которые могут возникнуть в эксплуатации при многократном нагреве и охлаждении поверхностного слоя. Разгаростойкость возрастает с повышением вязкости и пластичности и снижением коэффициента теплового расширения.

Для получения большей вязкости:

а) содержание углерода должно быть более низкое (0,25—0,55%). Легирование хромом, вольфрамом и молибденом ограничивается относительно небольшими пределами, при которых обеспечивается лишь умеренное повышение стойкости против нагрева, и

б) стали подвергают отпуску на твердость *HRC* 35—40 (более крупные штампы) и 42—46 (менее крупные штампы).

Вязкость сталей 5—6 и 3—4 кгс·м/см² соответственно при твердости *HRC* 35—40 и 42—46. Она мало снижается с увеличением сечения.

Прокаливаемость и закаливаемость сталей высокая. Стали, менее легированные никелем, марганцем и хромом (5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНСВ), прокаливаются полностью в сечениях до 400—500 мм, а стали 27Х2НМВФ (30Х2НМФ) — в сечениях до 700—800 мм.

Эти стали предназначены для: а) штампов горячего деформирования, работающих с динамическими нагрузками, и прежде всего для молотовых, подвергающихся интенсивному охлаждению, т. е. в условиях кратковременного контакта рабочего слоя с нагретым металлом, и б) крупных контейнеров прессования алюминиевых сплавов.

Стали используют для штампов со стороны до, мм: 200—300 (5ХНВ, 4ХМФС), 300—400 (5ХНСВ, 5ХГМ), 500—600 (5ХНМ), а также еще более крупных (30Х2НМФ, 27Х2НМВФ)

Горячая механическая и термическая обработка

Отжиг. Температуры отжига и твердость отожженных сталей (в состоянии поставки) приведены в табл. 48.

Закалка. Температуры закалки °С:

для сталей	27Х2НМВФ, 30Х2НМФ	950—975
»	» 5ХНСВ	840—860
»	» 5ХНВ, 5ХНМ, 5ХГМ	820—860
»	» 4ХМСФ	850—870

Для защиты от окисления и обезуглероживания штампы покрывают обмазкой, подогревают в печи (600—650°С) и после прогрева

48. Критические точки, температуры отжига и твердость полутеплостойких сталей повышенной вязкости

Сталь	Критическая точка, °C		Температура отжига, °C	Твердость HB
	Ac ₁	Ac ₃		
5ХНМ, 5ХНВ	730	780	760—790	197—241
5ХГМ				
5ХНСВ	760	800	790—820	207—255
27Х2НМВФ	800	830	800—830	207—255

медленно повышают температуру. Продолжительность нагрева и выдержки при температурах заковки — от 3 до 6 ч для штампов стороной от 300 до 700 мм (пламенная печь) и на 30—40% больше для электрической печи.

Штампы со стороной до 150 мм охлаждают в масле, а более крупные — подстуживают на воздухе до 750—780° С и очищают от изоляции, затем погружают в масло с температурой до 70° С, выдерживают от 40 мин до 2 ч, соответственно для штампов стороной от 300 до 700 мм, а затем, не допуская полного охлаждения, переносят в печь для отпуска.

Более крупные штампы охлаждают водовоздушной смесью.

Отпуск. Температуры отпуска и твердость приведены в табл. 49.

Стали 27Х2НМВФ, 30Х2НМФ подвергают отпуску при 540—560° С (HRC 41—45).

49. Температуры отпуска и твердость полутеплостойких сталей повышенной вязкости

Наименьший размер, мм	Температура, нагрева* (°C) сталей			Твердость HRC
	5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ	5ХНСВ	40ХМСФ	
<300	500—540	500—540	520—560	40—46
<400	530—560	530—550	550—580	36—40
>400	560—580	550—570	—	35—38

* Небольшие штампы с плоской фигурой подвергают отпуску при 300—350° С (HRC 50—52).

Продолжительность нагрева и выдержка при отпуске — от 10 до 24 ч соответственно для штампов с наименьшей стороной от 300 до 700 мм.

Теплостойкие стали высокой твердости (быстрорежущие стали)

Марки, свойства и применение

Химический состав часто применяемых сталей приведен в табл. 50. Для режущих инструментов применяют в основном эти стали. Они сочетают главное свойство сталей — теплостойкость * с высокими износостойкостью при нагреве до 600—700° С и сопротивлением пластической деформации (предел текучести при сжатии 220—230 и 240—

50. Химический состав (%) характерных теплостойких
инструментальных сталей (быстрорежущих) *
(по ГОСТ 19265—73)

Сталь	C	Cr	W	Mo	V	Co
<i>Умеренной теплостойкости</i>						
P18	0,7—0,8	3,8—4,4	17,0—18,5	До 1,0	1,0—1,4	—
P12	0,8—0,9	3,1—3,6	12,0—13,0	» 1,0	1,5—1,9	—
P9	0,85—0,95	3,8—4,4	8,5—10,0	» 1,0	2,0—2,6	—
P6M5	0,80—0,88	3,8—4,4	5,5—6,5	5,0—5,5	1,7—2,1	—
P6M3	0,85—0,95	3,0—3,5	5,5—6,5	3,0—3,6	2,0—2,5	—
P8M3 (ЭП856)	0,8—0,9	3,3—3,9	7,6—8,4	3,0—3,5	1,6—1,9	—
<i>Повышенной теплостойкости</i>						
P6M5K5	0,82—0,90	3,8—4,3	6,0—7,0	4,8—5,8	1,7—2,2	4,8—5,3
P9M4K8	1,0—1,1	3,0—3,6	8,5—9,6	3,8—4,3	2,1—2,5	7,5—8,5
P8M3K6C (ЭП722)	1,05—1,13	3,5—4,0	8,0—9,5	3,4—4,0	1,5—1,9	5,7—6,7
P12Ф4K5 (ЭП600)	1,25—1,35	8,5—4,0	12,5—14	До 1,0	3,2—3,8	5,0—6,0
P12Ф2K8M3 (ЭП657)	0,95—1,05	3,8—4,4	11—13,0	2,8—3,4	1,8—2,4	7,5—8,5
10P8M3 (ЭП716)	0,96—1,06	3,3—3,9	7,5—8,5	3,0—3,8	1,7—2,1	—
P12Ф3 (ЭП597)	0,94—1,04	3,5—4,0	12,5—13,5	До 1,0	2,5—3,0	—
<i>Высокой теплостойкости</i>						
B11M7K23 (ЭП831)	0,05—0,15	До 0,5	10,5—12,0	7,0—8,0	0,4—0,8	22,5—24 0,1—0,2
Примечание. Состав P8M3, P8M3K6C, P12Ф4K5, 10P8M3, P12Ф3 и B11M7K23 указан по техническим условиям. Во всех сталях содержание кремния и марганца ≤ 0,4% каждого в отдельности						

* Теплостойкость характеризуется по температуре нагрева в течение 4 ч, после которого сохраняется твердость HRC 60.

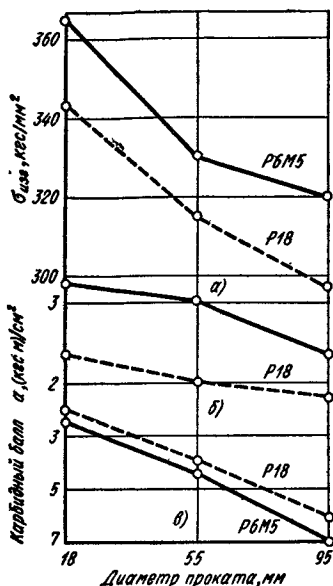
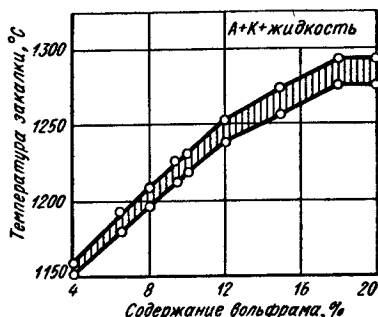


Рис. 12. Зависимость прочности (а), вязкости (б) и карбидного балла (в) сталей Р18 и Р6М5 от диаметра проката

Рис. 13. Зависимость температуры закали быстрорежущих сталей от содержания вольфрама



250 кгс/мм² соответственно при твердости HRC 63—64 и 67—68, так как после отпуска при повышенных температурах (550—600° С) стали не содержат в структуре остаточного аустенита, сохраняя при этом высокую твердость.

Прочность сталей сильно зависит от количества карбидов и сечения проката (поковок); в сечениях диаметром до 30—40 мм она составляет у многих сталей 300—400 кгс/мм² и снижается с увеличением сечения (рис. 12).

Предел выносливости 0,2—0,3 $\sigma_{\text{изг}}$ (для гладких образцов).

Вязкость 2—4, реже 5 кгс·м/см² (что ниже, чем у полутеплостойких сталей высокой твердости).

Быстрорежущие стали, уступаая твердым сплавам в теплостойкости и твердости, превосходят их в прочности и вязкости, а также в том, что их можно обрабатывать резанием и шлифованием.

Температуры закали быстрорежущих сталей должны быть высокими для более полного растворения карбидов и получения лучшей теплостойкости. Они определяются содержанием вольфрама (рис. 13).

Различают стали умеренной, повышенной и высокой теплостойкости (см. табл. 50).

Стали умеренной теплостойкости

Максимальная твердость сталей HRC 63—65. Они сохраняют твердость HRC 60 после нагрева при 615—620° С (4 ч). Механические свойства при нагреве показаны на рис. 14.

Эти стали, более широко применяемые из числа быстрорежущих, и пригодны для резания металлов с твердостью до HB 250—280.

У сталей этой группы различных марок близкие режущие свойства, различаются они преимущественно механическими и технологическими свойствами.

Вольфрамомолибденовые стали. Вольфрам и молибден влияют на теплостойкость почти одинаково, если содержание молибдена не превышает 4—5%. При этом условии вместо вольфрама применяют молибден в соотношении $Mo : W = 1 : 1,4 \div 1,5$.

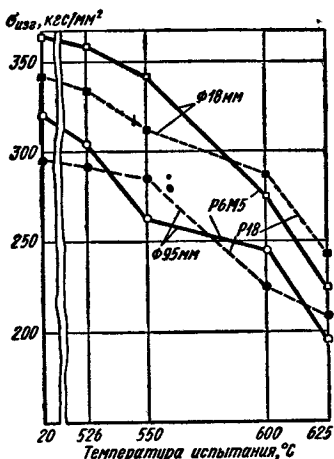


Рис. 14. Зависимость прочности быстрорежущих сталей Р18 и Р6М5 при нагреве от температуры испытаний (закалка на медкое зерно и отпуск 500° С, 3 раза)

Размеры карбидных частиц этих сталей меньше (до 10—12 мкм), чем у вольфрамовых, вследствие чего они имеют большую прочность и вязкость. Режущие свойства вольфрамомолибденовых сталей немного выше, чем вольфрамовых, при обдирочных режимах резания и ниже при чистовых.

Сталь Р6М5 — наиболее широко применяемая для большинства инструментов (сверл, метчиков, долбяков, протяжек и других инструментов). Прочность 315—325 кгс/мм² и вязкость 4—5 кгс·м/см² (для проката диаметром 25 мм). Теплостойкость немного ниже (в указанных пределах), чем вольфрамовых и Р8М3. Шлифуемость стали хорошая. Недостатки: а) повышенное обезуглероживание при нагреве выше 1000° С; ванны нагрева для закалки надо тщательно раскислять MgF_2 и б) чувствитель-

ность отдельных плавов к перегреву и росту зерна при нагреве для закалки, что затрудняет установление одинаковых температур закалки для инструментов разных плавов.

Сталь Р8М3 имеет то же назначение, что и сталь Р6М5. Как содержащая больше вольфрама и меньше молибдена превосходит сталь Р6М5 в стабильности свойств при нагреве для закалки и менее чувствительна к обезуглероживанию. Она еще не получила широкого применения.

Сталь Р6М3 имеет хорошую горячую пластичность (ковкость) из-за меньшего содержания хрома. Но она хуже шлифуется из-за влияния повышенного содержания ванадия. Применение стали Р6М3 поэтому ограниченное: для некоторых сверл, изготавливаемых прокаткой.

Вольфрамовые стали. Эти стали, содержащие более 12—13% W, применяют в настоящее время реже из-за того, что они имеют более крупные карбиды (до 20—30 мкм), пониженные прочность и вязкость, а также из-за дефицитности вольфрама.

Сталь Р18 имеет хорошие устойчивости против перегрева и шлифуемость. Используется преимущественно для шлифуемых инструментов (метчиков) и сверл небольшого диаметра (до 10 мм).

Сталь Р9 имеет более низкие температуры закалки, ее используют преимущественно в холоднокатаном листе для инструментов (пилы

ножовки), закаливаемых с индукционного нагрева. Шлифуемость пониженная.

Сталь P12 имеет более мелкие карбиды (до 15—20 мкм) и превосходит сталь P18 в механических свойствах. Прочность 300—310 и 280—300 кгс/мм² и вязкость 3,5 и 2,5—3 кгс·м/см² соответственно для сталей P12 и P18 (в прокате диаметром 20—25 мм). Применяют для сверл, фрез, протяжек.

Стали повышенной теплостойкости

Их твердость более высокая *HRC* 65—69 (в зависимости от состава), они сохраняют твердость *HRC* 60 после нагрева на 630—650° С. Применение сталей увеличивается. Их используют для резания труднообрабатываемых материалов: жаропрочных, нержавеющей сталей и сплавов, конструкционных сталей с твердостью *HRC* 40—45 и др., а также более мягких материалов, но с повышенной скоростью резания.

Кобальтовые стали. Сочетают повышенные теплостойкость и твердость с более высокой (на 30—50%), чем у остальных сталей теплопроводностью.

Прочность и вязкость более низкие (на 20—30%), чем у сталей умеренной теплостойкости. Производство ряда этих сталей способом спекания порошков, получаемых распылением жидкого металла, улучшает механические и технологические свойства и повышает стойкость инструментов при резании с повышенными нагрузками.

Использование сталей целесообразно преимущественно для обработки аустенитных сплавов. У сталей с 8% Со скорость резания возрастает на 10—12% при точении жаропрочных сталей и лишь на 5—6% при точении конструкционной стали с твердостью *HB* 217—223.

Различают стали по содержанию углерода.

Сталь P6M5K5 имеет пониженное содержание углерода (см. табл. 50) и меньшие теплостойкость (до 630—635° С) и вторичную твердость (*HRC* 65), но большую прочность. Применяют преимущественно для резания с обдирочными режимами более мягких сталей, а также для сверления глубоких отверстий малых диаметров.

Стали с большим содержанием углерода P8M3K6C, P9M4K8, P12Ф4K5, P12Ф2K8M3 (см. табл. 50) имеют более высокие теплостойкость (до 645° С) и твердость (*HRC* 67—69), их используют для резания большинства труднообрабатываемых материалов. Режущие свойства их примерно одинаковые как при 5—6, так и 8% Со.

Вольфрамованадиевые стали. Стали — менее дорогие, чем кобальтовые. Теплостойкость P12Ф3 ~ 635° С и твердость ~ *HRC* 66, что ниже, чем у кобальтовых. Однако у этих сталей более высокие прочность и вязкость.

Использование их эффективно для протяжек, сверл, фрез, обрабатывающих конструкционные стали и чугуны с твердостью *HB* 223—302. Стойкость их в 1,5—1,8 раз выше, чем у стали P6M5.

Сталь с повышенным содержанием углерода 10P8M3 (см. табл. 50), теплостойкость 625—630° С. Стойкость инструментов из этой стали на 50—60% выше, чем стали P6M5 при резании конструкционных сталей и чугунов умеренной твердости.

Стали высокой теплостойкости

Твердость до *HRC* 68—69 и теплостойкость 700—720° С. Прочность ~250 кгс/мм². Стали высоколегированные в отличие от остальных быстрорежущих, упрочняются вследствие выделения интерметаллидов, а не карбидов, они содержат поэтому мало углерода (см. табл. 50).

Стойкость (по сравнению со сталью Р6М5) возрастает в 20—40 раз при резании титановых сплавов и в 8—10 раз при резании аустенитных сплавов.

Горячая механическая и термическая обработка

Твердость в состоянии поставки не должна превышать согласно ГОСТ 19265—73 для сталей умеренной теплостойкости *HB* 255, сталей Р6М5К5, Р12Ф3, 10Р8М3—*HB* 269.

Структура — перлит сорбитообразный и карбиды.

Предельный балл карбидной неоднородности (ГОСТ 19265—73) должен быть не выше:

Диаметр (сторона) проката (поковки) мм				Балл
До 20				2
Свыше 20	до 40			3
» 40	» 60			4
» 60	» 80			5
» 80	» 100			6
» 100	» 150			7

Толщина обезуглероженного слоя не должна превышать на сторону 0,5 мм плюс 1% от диаметра (стороны).

Ковка. Температуры нагрева до 1140—1180° С и окончания 900—850° С (верхний предел для кобальтовых сталей). Посадка в печь — при температуре не выше 600° С; затем медленный нагрев до 850° С и ускоренный до 1140—1180° С. Охлаждение послековки замедленное, лучше помещать неостывшие заготовки в печь с температурой 600° С и затем нагревать для отжига.

Толщина обезуглероженного слоя не должна превышать норм., указанных ранее.

Отжиг быстрорежущих сталей. Температуры отжига 840—860° С для вольфрамовых и 800—830° С для вольфрамомолибденовых сталей.

Выдержка определяется величиной садки, но не менее 3—5 ч. Скорость охлаждения 30—40° С/ч до 720—750° С; при этой температуре выдержка не меньше 4 ч и затем охлаждение до 600—650° С со скоростью 40—50° С/ч, а потом на воздухе. Твердость после отжига *HB* 228—255 у вольфрамовых сталей, 207—235 у вольфрамомолибденовых и несколько выше — до *HB* 289 — если стали дополнительно легированы кобальтом.

Сталь В11М7К23 нагревают до 1000—1025° С с выдержкой не менее 2 ч, охлаждают с печью до 880—890° С и после 6—10 ч выдержки охлаждают на воздухе или с печью. Твердость *HRC* 32—35.

Карбидный отпуск — операция, применяемая для улучшения обрабатываемости при холодной деформации; приводит к снижению предела текучести на 15—20% и повышению пластичности. Заготовки нагревают до 720—750° С и охлаждают в масле. Эффект обработки больше для вольфрамовых и кобальтовых сталей.

Предварительные закалку и отпуск применяют для уменьшения:
а) шероховатости поверхности на 1—2 класса при чистовой обработке резанием и б) деформации при последующей окончательной закалке.

Заготовки или инструменты закаливают с 940—960° С с охлаждением в масле и отпускают при 590—620 С в течение 1 ч (*HRC* 32—35).

Закалка. Температуры закалки приведены в табл. 51 и 52.

51. Температуры закалки быстрорежущих сталей умеренной теплостойкости

Инструменты	Температура нагрева сталей, °С				Балл зерна	Твердость <i>HRC</i> после отпуска при 560°С и нагрева при 620°С (4 ч)
	P6M5, P6M3	P8M3	P18	P12		
Крупные сверла и резцы	1220—1240	1230—1245	1280—1300	1245—1255	10—8,5	60—61
Остальные режущие инструменты . . .	1210—1230	1215—1235	1270—1290	1225—1245	10,5—9,5	59—60
Штампы (прессования)	1180—1200	1180—1200	1240—1260	1200—1220	12	56—57

52. Температуры закалки быстрорежущих сталей повышенной и высокой теплостойкости (для получения зерна балла 11)

Сталь	Температура закалки, °С	Твердость <i>HRC</i> после отпуска при 560°С, 3 раза
Стали повышенной теплостойкости		
а) с повышенным углеродом		
10P8M3	1200—1215	65—66,5
б) с повышенным ванадием		
P12Ф3	1235—1250	64,5—66
в) кобальтовые		
P9M4K8	1215—1235	67—69
P12Ф4K5	1235—1250	65—66,5
P8M3K6C	1200—1220	68—70
P12Ф2K8M3	1220—1260	66—67
Сталь высокой теплостойкости, отпуск 600°С, 1 раз		
B11M7K23	1260—1280	67,5—69

Инструменты подогревают при 800—850° С 10—15 мин или при 1050—1100° С 3—5 мин, а крупные инструменты предварительно при 550—600° С 15—20 мин.

Нагрев выполняют в смеси BaCl_2 (78%) и NaCl (28%) при 800—850° С и в BaCl_2 при нагреве выше 1050° С. Соли каждые 8—12 ч раскисляют добавками 2—3% буры по массе или MgF_2 (4—5% по массе). Раскисление MgF_2 создает лучшую защиту и обязательно для сталей, легированных молибденом или кобальтом, как более чувствительных к обезуглероживанию.

Выдержка при окончательном нагреве 10—12 с на 1 мм диаметра или наименьшей стороны (для стали В11М7К23 — 30—60 с).

Инструменты простой формы охлаждают в масле, а сложной — в горячих средах (KNO_3) при 400—250° С.

Может быть и более высокая температура выдержки — 650° С.

Выдержка в горячих средах 3—5 мин при более высоких температурах и 8—15 мин при более низких.

Инструменты небольшой толщины (прорезные фрезы, пилы и др.) при 600—650° С помещают под пресс, а сверла диаметром 8—20 мм охлаждают под катком или между роликами правильной машины для уменьшения деформации.

Температуры закалки понижают на 10—15° С для инструментов небольшого сечения или сложной формы.

Отпуск. После закалки выполняют многократный: 2 раза для вольфрамомолибденовых, 3 раза для вольфрамовых и кобальтовых и 3—4 раза для стали Р8М3К6С.

Температуры первого отпуска 350—375° С, а второго и третьего следующие: 550—560° С для вольфрамомолибденовых и кобальтовых сталей Р8М3К6С и Р9М4К8 и 560—570° С для вольфрамовых. Назначают также температуры первого отпуска 550—560° С, но твердость и теплостойкость в этом случае немного меньше.

Для инструментов небольшого сечения (сверл), нагреваемых в автоматизированных агрегатах с точной регулировкой температур, применяют краткосрочный отпуск в течение 20 мин при 580—590° С для вольфрамомолибденовых и 590—600° С для вольфрамовых и кобальтовых сталей.

Отпуск после шлифования выполняют при 400—450° С в течение 30—40 мин для снятия напряжений и повышения стойкости инструментов.

Цианирование применяют для инструментов диаметром более 8—10 мм, оно повышает твердость до 1100—1050 HV в рабочей кромке на глубину до 0,05 мм. Теплостойкость и стойкость инструментов возрастают в 1,5—1,8 раз. Цианирование выполняют после шлифования и заточки.

Инструменты нагревают 15—20 мин при 550—560° С в расплавленной смеси NaCN (50%), NaCl (10—15%), Na_2CO_3 (15—25%) и NaOH (10—15%) с последующей обязательной промывкой и строго выполняя меры по технике безопасности.

Возможно цианирование в поташе и мочеvine или же KCNO при температурах и с выдержками, указанными выше. Смеси не ядовиты при составлении, но в них постепенно образуется NaCN , что требует частой смены солей.

Окислирование. Инструменты подогревают в печи до 350—400° С и помещают на 20—30 мин в ванну * с температурой 480—510° С состава: 30—35% KNO_3 и 65—70% Na_2NO_3 . Затем их охлаждают на воздухе,

* Возможен также нагрев в сухом паре под давлением 0,1—0,3 кгс/см².

промывают в горячей воде, просушивают, погружают в холодное масло и протирают ветошью.

Оксидирование повышает стойкость инструментов дополнительно на 20—30%, повышая твердость рабочего слоя на HV 100—300, если они предварительно подвергались цианированию или азотированию. Кроме того, на поверхности создается пленка магнитной окиси железа толщиной 2—3 мкм темно-синего цвета, что улучшает товарный вид и повышает стойкость против коррозии.

Теплостойкие стали повышенной вязкости (штамповые)

Свойства и применение

Состав сталей указан в табл. 53.

Содержание Mn 0,15—0,6%.

53. Химический состав (%) теплостойких сталей повышенной вязкости (штамповых)

Сталь	C	Si	Cr	W	Mo	V	Co
<i>Стали умеренной теплостойкости</i>							
4X3BMФ	0,40— 0,48	0,60— 0,90	2,8— 3,5	0,6—1	0,4— 0,6	0,60— 0,90	—
<i>Стали повышенной теплостойкости</i>							
3X3M3Ф	0,27— 0,34	0,2— 0,4	2,8— 3,5	—	2,5—3	0,4— 0,6	—
4X5MФC	0,32— 0,40	0,80— 1,20	4,50— 5,50	—	1,20— 1,50	0,30— 0,50	—
4X5MФ1C	0,37— 0,44	0,80— 1,20	4,50— 5,50	—	1,20— 1,50	0,80— 1,10	—
4X5B2ФC	0,35— 0,45	0,80— 1,20	4,50— 5,50	1,60— 2,20	—	0,60— 0,90	—
4X4BMФC	0,37— 0,44	0,60— 1,00	3,20— 4,00	0,80— 1,20	1,20— 1,50	0,60— 0,90	—
3X2B8Ф	0,30— 0,40	0,15— 0,40	2,20— 2,70	7,50— 8,50	—	0,20— 0,50	—
5X3B3MФC	0,45— 0,52	0,50— 0,80	2,50— 3,20	3,00— 3,60	0,80— 1,10	1,50— 1,80	Nb 0,05— 0,15
<i>Стали коррозионностойкие</i>							
2X9B6 (ЭП 726)	0,15— 0,22	0,20— 0,40	7,50— 9,00	5,50— 6,5	—	0,20— 0,50	—
18X12BMБФР	0,15— 0,22	0,5	11,0— 13,0	0,40— 0,70	0,40— 0,60	0,15— 0,30	B 0,003 Nb 0,20— 0,40
<i>Стали высокой теплостойкости</i>							
2X6B8M2K7 (ЭП 745)	0,22— 0,30	0,20— 0,40	6,00— 7,00	7,50— 8,50	1,80— 2,30	—	6,8— 7,8

Стали указаны по ГОСТ 5960—72*, сталь 18Х12ВМБФР — по ГОСТ 5632—72** и стали 2Х8В8М2К7 и 2Х9В6 — по техническим условиям.

Стали используют для штампов, находящихся в процессе деформирования в сравнительно длительном контакте с нагретым обрабатываемым металлом (штампы прессования, выдавливания, высадки, вытяжки), и для форм литья и жидкой штамповки расплавленных металлов.

Стали, как правило, должны сохранять при температурах нагрева рабочего слоя предел текучести не ниже 95—100 кгс/мм².

Кроме теплостойкости у этих сталей, как и у полутеплостойких повышенной вязкости, должна быть разгаростойкость. Их подвергают отпуску на твердость *HRC* 45—52 (и реже 40—42).

Многие стали для форм литья должны иметь, кроме того, повышенную стойкость против коррозии.

Прокаливаемость сталей высокая (в сечении до 300—400 мм) из-за повышенного содержания хрома.

Сталь умеренной теплостойкости 4Х3ВМФ с основным карбидом $M_{23}C_6$ из-за относительно низкого содержания вольфрама и молибдена сохраняет твердость *HRC* 45 и предел текучести 95—100 кгс/мм² при нагреве не выше 500—525° С. Однако она менее чувствительна к отрицательному влиянию масштабного эффекта; ударная вязкость 3—4 кгс·м/см² сохраняется в сечениях стороной до 250—300 мм. Применяют для молотовых штампов небольших размеров вместо стали 5ХНМ (5ХГМ).

Стали повышенной теплостойкости сохраняют требуемые свойства при нагреве до 550—600° С, а стали 5Х3В3МФС и 3Х2В8Ф до 600—620° С.

Сталь 3Х3ВМФС (с более низким содержанием углерода) имеет несколько лучшие вязкость и разгаростойкость. Применяется для штампов небольших размеров, подвергающихся интенсивному охлаждению.

Стали 4Х5МФС, 4Х5В2ФС, 4Х5МФ1С и 4Х4ВМФС применяют для штампов высадки и прессования (а также молотовых штампов толщиной или диаметром до 200—250 мм) и форм литья алюминиевых, цинковых и медных сплавов. Сталь 4Х5МФ1С пригодна для форм литья более крупных размеров.

Сталь 5Х3В3МФС имеет большую износостойкость, но меньшую вязкость, чем указанные выше стали, она рекомендуется для прошивных пуансонов и матриц, работающих без интенсивного охлаждения.

Сталь 3Х2В8Ф применяют для тех же целей, что и сталь 5Х3В3МФС, но из-за повышенного легирования и низкой вязкости ее применение значительно сокращается.

Коррозионностойкие стали 2Х9В6 и 18Х12ВМБФР используют для форм литья алюминиевых, цинковых и медных сплавов.

Сталь высокой теплостойкости 2Х6В8М2К7 сохраняет твердость *HRC* 45 и предел текучести до 100 кгс/мм² при нагреве до 700—720° С. Ее применяют для прессования и выдавливания труднодеформируемых сплавов (жаропрочных, нержавеющих, конструкционных сталей повышенной прочности).

Горячая механическая и термическая обработка

Ковка. Температуры ковки 1130—1160° С (начало) и 850—925° С (окончание). Поковки охлаждают на воздухе до 700° С (более мелкие до 450—500° С), а затем в футерованной яме или горячем песке. Поковки стали 2Х6В8М2К7 после охлаждения до 700° С помещают в печь и выполняют отжиг.

Отжиг. Температуры отжига и твердость приведены в табл. 54.

Закалка и отпуск. Температуры закалки и отпуска и твердость указаны в табл. 55.

54. Температуры (°С) отжига и смягчающего отпуска
теплостойких штамповых сталей

Сталь	Отжиг	Отпуск
<i>Стали умеренной теплостойкости</i>		
4Х3ВМФ	810—830	700—720
<i>Стали повышенной теплостойкости</i>		
4Х5МС, 4Х5МФ1С, 4Х4М2ФС	840—860	730—760
3Х3М3Ф	910—930	700—720
5Х3В3МФС	830—850	750—780
3Х2В8Ф		750—780
<i>Стали умеренной и повышенной теплостойкости, коррозионностойкие</i>		
2Х9В6	830—850	700—720
18Х12ВМБФР	820—840	—
<i>Стали высокой теплостойкости</i>		
2Х6В8М2К7	890—910	—

Рабочую часть штампов и форм (при отсутствии печей с контролируемой атмосферой) покрывают защитной обмазкой или устанавливают рабочей частью в отработанный карбюризатор. Штампы и формы подогревают при 900—1000° С, а крупные, кроме того, при 700—750° С. Выдержка при окончательном нагреве 25—30 мин на каждые 25 мм наименьшей стороны. Охлаждение с подстуживанием на воздухе до 950—900° С, а затем в масле.

Отпуск чаще выполняют на твердость *HRC* 45—48 для сохранения достаточной вязкости, а стали 2Х6В8М2К7 на твердость *HRC* 48—52.

55. Температуры (°C) заковки и отпуска
теплостойких штамповых сталей

Сталь	Закалка		Температуры отпуска (°C) на твердость HRC	
	Температуры нагрева, °C	Твердость, HRC	50	45
<i>Стали умеренной теплостойкости</i>				
4X3BMФ	980—1020	53—56	400—420	440—460
<i>Стали повышенной теплостойкости</i>				
4X5MC,	1050—107	56—58	560—580	600—610
4X5MФ1C				
4X5B2ФC	1060—1080	52—54	580—590	610—620
3X3M3Ф	1050—1080	50—52	560—580	600—610
4X4B2MФC	1050—1070	56—58	600—620	620—630
5X3B3MФC	1120—1150	53—56	640—650	650—670
3X2B8Ф	1080—1100	54—56	600—610	640—650
<i>Стали умеренной и повышенной теплостойкости коррозионностойки</i>				
2X9B6	1130—1150	46—48	—	570—580
2X12BMБФР	1090—1110	58—60	—	600—620
<i>Стали высокой теплостойкости</i>				
2X6B8M2K7	1180—1200	56—58	780—690	—
Примечания: 1. Температуры заковки штампов из стали 2X6B8M2K7, работающих при повышенном нагреве, но при небольших динамических нагрузках, повышают дополнительно на 10—20° C. 2. Сложнонапряженные штампы, помещаемые путем горячей посадки в обойму, из более вязкой стали и испытывающие сжимающие напряжения, подвергают отпуску при 550—570° C (HRC 53—55). 3. Температуры отпуска пуансонов и матриц из стали 2X6B8M2K7, работающих при повышенном износе, подвергают отпуску при температурах на 30—40° C ниже (HRC 53—55).				

Назначение инструментальных сталей

Назначение инструментальных сталей приведено в табл. 56.

56. Назначение сталей для инструментов

Инструмент	Рекомендуемая сталь
<i>Металлорежущие инструменты</i>	
Сверла	
катаные для обработки металлов твердостью до <i>HВ</i> 260—280	P6M5, P12, P6M3, P8M3
то же для обработки металлов большей твердости	P12Ф3, P12Ф4К5
фрезерованные для обработки металлов твердостью до <i>HВ</i> 260—280	P6M5, P12, P8M3
то же для сверления глухих отверстий	P6M5К5
то же для сверления труднообрабатываемых сплавов (короткие сверла)	P12Ф4К5, P12Ф2К8М3, B11M7K23
вышлифованные	P6M5, P8M3
то же для сверления сплавов повышенной твердости	P6M5К5
Фрезы:	
резьбовые	P6M5, P12
червячные	P6M5, P12Ф3, P8M3
то же для резания труднообрабатываемых сплавов	P12Ф4К5, P8M3К6С, P9M4К8, P12Ф2К8М3
то же при повышенных нагрузках	P6M5К5
дисковые	P6M5, P12, P12Ф2К8М3
концевые	P6M5, P12, P8M3К6С
то же для резания труднообрабатываемых материалов	P8M3К6С, P9M4К8, B11M7K23
Долбяки, шеверы	P6M5, P12
Протяжки диаметром, мм:	
до 80—100	P12, P6M5, P12Ф3
более 100	ХВСГ, P6M5
Метчики:	
машинные и машинно-ручные	P6M5, P18, P8M3К6С
ручные	11ХФ, У11А, У12А
Плашки круглые:	
для нарезания мягких металлов	ХВСГ
для нарезания твердых металлов	P6M5, P12
Развертки:	
машинные	P6M5, P12Ф3, P8M3К6С
ручные	ХВСГ, P6M5
Пилы:	
сегменты к круглым пилам	P9, P6M5, P12
ножовочные полотна	P9, P6M5, P12
то же ручные	Х6ВФ
» для резки мягких металлов	B2Ф
Напильники:	
для обработки мягких металлов	11ХФ, 13Х, У13А
то же твердых металлов	P6M5
<i>Деревообрабатывающие инструменты</i>	
Пилы машинные:	
рамные	9ХФ, 7ХНФ
круглые	9ХФ
ленточные делительные	9ХФ
» столярные	9ХФ, 11ХФ
Пилы ручные	9ХФ
Пильные цепи	9ХФ

Инструмент	Рекомендуемая сталь
Ножи, для резания с ударными нагрузками	6Х3ФС, 6ХГ
коррозионностойкие	9Х18
Ножи длинные двухслойные, режущая часть	9ХФ
то же, но коррозионностойкие	9Х18
крепежная часть	10, 15
Ножи строгальные для резания: мягких пород	Х6ВФ
твердых пород	Р6М5, Р12, 6Х4М2ФС
то же при отсутствии ударных нагрузок	Р8М3К6С
Фрезы для резания: мягких пород	Х6ВФ
твердых пород	6Х4М2ФС, Р6ПП, Р12
Стамески, долота	7ХФ, У7
Топоры, колуны	У7
<i>Инструменты для резания других органических материалов</i>	
Ножи резки бумаги с умеренной скоростью	Х12М, Х6ВФ
То же с большой скоростью	Р6М5, Р12
Ножовки для пищевой промышленности	9Х18
Бритвы	13Х
» коррозионностойкие	11Х14ГМ
Медицинские инструменты: скальпели хирургические	Х18МФ
ножи	Х18МФ, 4Х13
инструменты тонких сечений (в том числе для офтальмологических операций)	000Х11Н10М2Т2
<i>Штамп объёмной штамповки</i>	
Штамп для высадки мягких металлов: матрицы	Х12М, Х6ВФ
пуансоны	6Х3ФС, У10
Штамп для высадки более твердых металлов	6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС
Штамп для прессования (выдавливания): пуансоны при умеренных давлениях	Х12М, Х12Ф1
то же при высоких давлениях	6Х4В2СМФ
» особо тяжелых условиях матрицы	Р6М5, Р12
бандажи крупных матриц	Х12М, Х12Ф1
Накатные и резбонакатные ролики: накатки твердых металлов	5ХНМ, 4Х3МФС
мягких металлов	6Х4М2ФС, 6Х6В3СМФ
то же, нешлифуемые после закалики и отпуска	6Х3ФС
Рифельные ножи: небольшой толщины	7ХГ2ВМ
толщиной более 10—15 мм	15Х ¹ , 20Х ¹
Чеканочные штампы: по мягким цветным металлам	7ХГ2ВМ
то же (мастер—пуансон)	6Х3ФС, 7Х3
по твердым металлам	ХВСТ
Штамп гибочные, рихтовочные: работающие без ударных нагрузок с ударными нагрузками	6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС
	Х6ВФ, Х12М
	7ХФН, 6Х3ФС

Продолжение табл. 56

Инструмент	Рекомендуемая сталь
<i>Штампы листовой штамповки</i>	
Вытяжные штампы	
до 25	У10, У11, У12 ²
более 25	11ХФ, Х ² , ХВСГ
более 25 для деформирования с большой скоростью	Х12М, Х12Ф1 ² , Х12ВМ
Вырубные и отрезные штампы:	
для мягких металлов	7ХГ2ВМ, Х6ВФ
» твердых »	Х6Ф4М, Х12М
Пуансоны (иглы) для пробивки отвер- стий	Х12, 6Х4М2ФС, 6Х6В3МФС
То же для мягких металлов	7ХГ2ВМ, Х12М
Доски для волочения и калибровки:	
цветных металлов	Х12М, Х12ВМ, Х12Ф4М
стали	Х6Ф4М
Ножницы и ножи для рубки и резки:	
тонких листов (до 2 мм) без ока- лины	Х12М, Х6ВФ
листов толщиной более 2—3 мм или тонких (с окалиной)	6Х3ФС
Ножи холодновысадочных автоматов	Р6М5, Р12, Р12Ф3, 6Х4М2ФС
<i>Штампы прессования</i>	
Матрицы прессования порошков при шлифовании:	
кубическим нитридом бора	Х6Ф4М, Х12Ф4М
обычными абразивами	Х12М, Х12ВМ
<i>Пневматические инструменты и зубила</i>	
Пневматические инструменты (ударники)	6Х3ФС
То же с повышенными ударными нагруз- ками	12ХН3А, 18ХГТ ¹
Зубила, долота для:	
обработки мягких металлов	7ХФ, У7
» твердых »	6Х6В3МФС
<i>Штампы горячего деформирования</i>	
Молотовые штампы с наименьшей сто- роной, мм.	
200—300	5ХНВ, 4Х5МФС
300—400	5ХНСВ, 5ХГМ
то же при повышенном нагреве	4ХМФС
400—500	5ХНМ
400—700	27Х2НВМФ, 30Х2НМФ
Молотовые штампы для работы при повышенном нагреве.	
с наименьшей стороной до 150 мм	4Х3ВМФ
крупные	30Х2НМФ
Контейнеры прессования алюминиевых сплавов	30Х2НМФ
Прессовые вставки для штампов дефор- мирования конструкционных сталей и цветных сплавов	4Х5МФС

Продолжение табл. 56

Инструмент	Рекомендуемая сталь
Штампы высокоскоростной машинной штамповки, вставки штампов, обработки легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах и кривошипных прессах . . .	4X4BMΦC
Штампы для кривошипных прессов и горизонтально-ковочных машин, подвергающихся интенсивному охлаждению	3X3M3Φ
Прошивные и формирующие пуансоны, матрицы для высадки на горизонтально-ковочных машинах, вставки штампов напряженных конструкций для деформирования конструкционных сталей и жаропрочных металлов и сплавов	5X3B2MΦC
Пуансоны, матрицы для деформирования жаропрочных сплавов, штампы вырубки, экструзии быстрорежущих и других сплавов при повышенном нагреве (700—720° C) и давлениях (до 80—100 кгс/мм²)	2X8B8M2K8
Формы литья под давлением и жидкой штамповки:	
для литья цинковых сплавов:	
при повышенном нагреве	4X5MΦC
» воздействию коррозии	2X9B6
для литья алюминиевых сплавов:	
наименьшей стороной до 200 мм	4X5MΦC
» » свыше	4X5MΦ1C
200 мм	2X9B6
коррозионностойкие	18X12BMБΦP
для литья медных сплавов	18X12BMБΦP
» жидкой штамповки медных сплавов	

^a Необходима цементация.² Необходимо электролитическое хромирование.³ Необходимо азотирование.

ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Общая характеристика

Под твердыми сплавами понимают сплавы на основе карбидов тугоплавких металлов (вольфрама, титана, хрома), связанных кобальтом, легированной сталью или же жаропрочным сплавом на основе никеля.

Эти сплавы изготавливают методом порошковой металлургии из соответствующих исходных смесей карбидов со связующими металлами путем прессования последних в изделия необходимой формы и последующего спекания сформованных изделий, т. е. их нагрева в защитной атмосфере (водород) или в вакууме при температуре (в зависимости от химического состава) 1250—1450° C.

Кроме основных операций (приготовления смеси, формования и спекания) в технологический процесс изготовления изделий из твердых

сплавов входят еще и другие операции, например, замешивание смеси с пластификатором (парафин и др.), удаление пластификатора из сформованных изделий путем их сушки, отделочная полировка изделий и др.

Современные спеченные твердые сплавы выпускают в виде изделий двух типов. а) стандартных пластин различного фасона, которыми оснащаются соответствующие инструменты, или же различных матриц для прессования полуфабрикатов и волочения проволоки, б) различного фасонного инструмента, например, спиральных сверл, метчиков, плоских фрез и др.

Фасонный инструмент изготавливают из пластифицированной смеси следующими способами

а) механической обработкой пластифицированных «сырых» заготовок;

б) формованием мундштучным способом;

в) прокаткой ленты с последующей штамповкой из нее (вырубкой) плоских фрез и других инструментов.

Сформованный перечисленными способами инструмент подвергают сушке для удаления пластификатора и производят спекание.

Свойства твердых сплавов, а следовательно, и области применения в значительной степени зависят от химического состава (соотношения карбидной и связывающей фаз) и зернистости карбидной фазы. Регулированием этих двух основных факторов можно в широких пределах менять свойства сплавов

Марки, составы и свойства твердых сплавов

В табл. 57 приведены основные характеристики стандартных твердых сплавов, выпускаемых в СССР.

В марках первые буквы означают группу, к которой относится данный сплав (ВК — вольфрамовая, Т — титано-вольфрамовая, ТТ — титано-тантало-вольфрамовая), цифры в вольфрамовой группе — количество кобальта, первые цифры в титано-вольфрамовой группе — количество карбида титана, а вторые цифры — количество кобальта. Первые цифры в титано-тантало-вольфрамовой группе — количество карбидов титана и тантала, а вторые цифры — количество кобальта.

В некоторых марках после последних цифр есть буквенные обозначения. Они означают следующее:

В — сплавы, изготовленные из карбида вольфрама, полученного из крупнозернистого вольфрама, образующегося при высокотемпературном восстановлении, такие сплавы отличаются повышенной вязкостью;

М — сплавы, изготовленные из мелких порошков карбида вольфрама; для таких сплавов характерна повышенная износоустойчивость;

ОМ — сплавы, изготовленные из особо мелких порошков карбида вольфрама, такие сплавы отличаются очень высокой износоустойчивостью;

ВК — сплавы, изготовленные из особо крупного карбида вольфрама; отличаются повышенной вязкостью, стойкостью против ударов;

КС — сплавы, изготовленные из карбида вольфрама, полученного при высоких температурах и, как следствие этого, отличающегося крупной зернистостью, но подвергнутого размолу до средней зернистости;

Б — индивидуальное обозначение марки вольфрамо-титано-тантало-вого сплава.

Необходимо отметить, что строгого разграничения марок сплавов по этим обозначениям нет, они условны.

57. Основные характеристики стандартных спеченных твердых сплавов (ГОСТ 3882—74)

Группа	Марка	Химический состав, %				Плотность, г/см ³	Твердость HRC (не менее)	$\sigma_{изг}$ кгс/мм ² (не менее)
		WC	TiC	TaC	Co			
Вольфрамовая	BK3	97	—	—	3	15,0—15,3	89,5	110
	BK3-M	97	—	—	3	15,0—15,3	91,0	110
	BK4	96	—	—	4	14,9—15,2	89,5	140
	BK4-B	96	—	—	4	14,9—15,2	88,0	140
	BK6	94	—	—	6	14,6—15,0	88,5	150
	BK6-M	94	—	—	6	14,8—15,1	90,0	135
	BK6-OM	92	—	2	6	14,7—15,0	90,5	120
	BK6-B	94	—	—	6	14,6—15,0	87,5	155
	BK8	92	—	—	8	14,4—14,8	87,5	160
	BK8B	92	—	—	8	14,4—14,8	86,5	175
	BK8-BK	92	—	—	8	14,5—14,8	86,5	175
	BK10	90	—	—	10	14,2—14,6	87,0	165
	BK10-M	90	—	—	10	14,3—14,6	88,0	150
	BK10-OM	88	—	2	10	14,3—14,6	88,5	140
	BK10-KC	90	—	—	10	14,2—14,6	85,0	175
	BK11-B	89	—	—	11	14,1—14,4	86,0	180
	BK11-BK	89	—	—	11	13,9—14,1	86,0	180
	BK-15	85	—	—	15	13,9—14,1	86,0	180
	BK-20	80	—	—	20	13,4—13,7	84,0	195
	BK-20KC	80	—	—	20	13,4—13,7	82,0	205
	BK-20K	80	—	—	20	13,4—13,7	79,0	155
	BK-25	75	—	—	25	12,9—13,2	82,0	200
Титано-вольфрамовая	T30K4	66	30	—	4	9,5—9,8	92	95
	T15K6	79	15	—	6	11,1—11,6	90	115
	T14K8	78	14	—	8	11,2—11,6	89,5	125
	T5K10	85	6	—	9	12,4—13,1	88,5	140
	T5K12	83	5	—	12	13,1—13,5	87,0	165
Титано-тантало-вольфрамовая	TTK12	81	4	3	12	13,0—13,3	87,0	165
	TT8K6	84	8	2	6	12,8—13,3	90,5	125
	TT10K8-B	82	3	7	8	13,5—13,8	89,0	130
	TT20K9	71	8	12	9	12,0—13,0	89,0	130

В табл. 58 приведены характеристики эксплуатационных свойств твердых сплавов и их основные области применения.

В табл. 59 приведены характеристики некоторых важнейших видов нестандартных спеченных твердых сплавов.

58. Характеристики эксплуатационных свойств и назначение твердых сплавов (ГОСТ 3882—74)

Сплав	Характеристика эксплуатационных свойств	Назначение
ВК2 ВК3 ВК3-М	Весьма высокая износоустойчивость и повышенная допустимая скорость резания для сплавов вольфрамовой группы. Умеренная прочность и сопротивляемость ударам	Чистовое и получистовое точение при непрерывном резании. Нарезание резьбы, развертывание и другие виды обработки черного чугуна, цветных металлов и неметаллических материалов. Резка стекла
ВК4 ВК6-М ВК6	Высокие показатели износоустойчивости и эксплуатационной прочности	Черновое точение, черновое и чистовое фрезерование, рассверливание, зенкерование при обработке чугуна, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов, титана и титановых сплавов, нержавеющей стали и жаропрочных сплавов
ВК4-В	Крупнозернистая структура, износоустойчивость более низкая, но более высокая эксплуатационная прочность, чем у ВК4	Бурение углей, сланцев, каменной соли и других пород
ВК6-В	Крупнозернистая структура, износоустойчивость ниже, но более высокая эксплуатационная прочность, чем у ВК6	Перфораторное бурение горных пород
ВК8	Более высокая эксплуатационная прочность, но меньшая износоустойчивость, чем у ВК6	Черновое точение и другие виды черновой обработки резанием чугуна, цветных металлов, жаропрочных сплавов. Волочение и калибровка труб, прутков, проволоки. Штамповый инструмент. Вращательное бурение геологоразведочных и нефтяных скважин
ВК8-В	Более крупнозернистая структура и более низкая износоустойчивость, чем в ВК8. Более высокая эксплуатационная прочность	Бурение шарошечными долотами, зарубки каменных углей. Волочение труб и прутков из сталей и других металлов при повышенных обжатиях
ВК10	Меньшая износоустойчивость, но более высокая эксплуатационная прочность, чем у ВК8	Волочение труб и прутков из сталей, изготовление быстрознашивающихся деталей машин, приспособлений и инструмента

Продолжение табл. 58

Сплав	Характеристика эксплуатационных свойств	Назначение
ВК15	Высокая эксплуатационная прочность и сопротивляемость ударам. Износостойкость ниже, чем у ВК8 и ВК10	Перфораторное и другие виды ударного бурения горных пород, гранита. Волочение труб и прутков из сталей с большими обжатиями, изготовление быстрознашивающихся деталей, штампов. Обработка дерева резанием
ВК20, ВК25	Эксплуатационная прочность и сопротивляемость ударам выше, а износостойкость ниже, чем у ВК15	Изготовление быстрознашивающихся деталей машин, штамповый инструмент
Т30К4	Наивысшие для титано-вольфрамовых сплавов износостойкость и допустимая скорость резания при пониженной эксплуатационной прочности	Чистовое точение с малым сечением среза и другие виды обработки сталей
Т15К6, Т14К8	Эксплуатационная прочность выше, а износостойкость и допустимая скорость резания ниже, чем у Т30К4	Черновое и полужесткое точение при непрерывном резании, чистовое точение при прерывистом резании и другие виды обработки сталей
Т5К10	Эксплуатационная прочность выше, а износостойкость и допустимая скорость резания ниже, чем у Т14К8	Черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании; чистовое строгание; черновое фрезерование и другие виды обработки сталей
Т5К12В	Эксплуатационная прочность значительно выше, а износостойкость и допустимая скорость резания ниже, чем у Т5К10	Тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами при наличии песка, шлака при неравномерных сечениях, срезах и ударах
ТТ10К8Б	Высокая эксплуатационная прочность и сопротивление ударам при умеренной износостойкости	Черновая и чистовая обработка труднообрабатываемых материалов, в том числе жаропрочных сплавов и сталей

Сплав	Химический состав, %	Плот- ность, г/см ³	Твердость HRC	σ , кгс/мм ²	$\sigma_{сж}$, кгс/мм ²	E , кгс/мм ²	Разработчик	Назначение
Карбидо- хромовый КХН	Cr_3C_2 — основа, Ni — 10—30	6,6—7,0	85—90	60—70	280— 350	32 000 — 34 000	Институт проблем материаловедения АН УССР	Штамповки и во- лочение черных и цветных металлов, калибровочный и измерительный ин- струмент Пресс- формы для порош- ковой металлургии
Карбидо- титано- вый	TiC—50, связка из никелевого жаро- прочного сплава типа ЖС6-50	7,8—8,2	82—83	220— 230	380— 400	38 000 — 39 000	Всесоюзный ин- ститут легких спла- вов	Изотермическая штамповка титано- вых сплавов, ста- лей
Ферро- цитит	TiC — основа, связка из легиро- ванной хромонике- левой стали — 10— 15	7,4—7,6	88—89	70—80	—	—	Московский ин- ститут стали и спла- вов	Штамповка и во- лочение черных и цветных металлов

Основные принципы изготовления твердосплавного инструмента

Инструменты, изготавливаемые из твердых сплавов, можно разделить на три основные группы.

1. Пластины различной формы для оснащения ими резцов, фрез, сверл и других режущих инструментов, а также бурового инструмента.

2. Различные штамповые и волочильные инструментальные матрицы для прессования труб, прутков, волочения проволоки, высадки гильз и других операций.

3. Различные цельные фасонные инструменты в виде спиральных сверл, зенкеров, разверток, фрез и других инструментов.

Крепление штамповых и волочильных матриц осуществляют обычно путем тугой посадки в соответствующую стальную обойму с помощью определенного припоя. Пластины в режущем и буровом инструменте крепят либо с помощью припоя, либо механическим способом.

В табл. 60 приведены характеристики припоев, наиболее часто применяемых на практике.

Для предохранения поверхности гнезда и пластинок твердых сплавов от окисления и лучшего смачивания спаиваемых поверхностей применяют флюсы.

60. Характеристики и назначения припоев
для твердых сплавов

Припой	Химический состав, %	Температура плавления, °C	Назначения
Медно-никелевый	Cu — 68,7, Ni — 27,5, Al — 0,8	1170	Для работ с большими нагрузками и нагревом режущей части инструмента до 900° C
Электролитическая медь	Cu — 99,9, примеси — 0,1	1083	Для работ со средними нагрузками и нагревом режущей части инструмента до 700° C
Латуно-никелевый	Cu — 68,0, Zn — 27,0, Ni — 5,0	1000	То же
Латунь Л62	Cu — 62, Zn — 38	900	То же при нагреве режущей части до 600° C
Серебряный Пср 45	Ag — 10, Cu — 53, Zn — 37	720	Для припайки твердых сплавов с содержанием TiC

Характеристики основных видов применяемых флюсов приведены в табл. 61.

61. Основные виды флюсов

Состав флюса, %	Назначение
Бура — 100	Основной вид флюса
Бура — 50, борная кислота — 50	При использовании латунного припоя
Борная кислота — 57, фтористый кальций — 43	При использовании серебряного припоя

Для уменьшения термических напряжений, возникающих в процессе напайки пластинок твердых сплавов, применяют компенсационные прокладки из малоуглеродистой стали, а также из сплава пермаллой. Применение таких прокладок особенно важно при напайке пластинок из сплавов титано-вольфрамовой и титано-тантало-вольфрамовой групп.

ПОДШИПНИКОВЫЕ СТАЛИ

Широкая область применения подшипников качения, специфика нагрузок и условия работы обусловили применение для их изготовления высокоуглеродистых хромистых, низкоуглеродистых легированных сталей и сплавов, обладающих устойчивостью против коррозии и теплоустойкостью (табл. 62). В основном подшипники качения изготавливают из высокоуглеродистых хромистых сталей ШХ15 и ШХ15СГ (табл. 63).

Кольца и тела качения подшипников, предназначенные для работы в агрессивных средах (морской воде, азотной кислоте и т. д.) и при повышенных температурах, изготавливают из коррозионностойких и теплоустойчивых сталей. Для подшипников, работающих при больших динамических нагрузках, применяют цементуемые стали.

Как в СССР, так и за рубежом сталь выплавляют в кислых мартеновских или электродуговых плавильных печах. Для повышения однородности и чистоты широко применяют сталь, выплавленную методом электрошлакового переплава и с вакуумированием. Предельные количества неметаллических включений и карбидной неоднородности, допускаемые в стали для подшипников качения, приведены в табл. 64, 65.

Сталь для производства подшипников качения поставляют: для горячей штамповки деталей — неотожженной, для холодной механической обработки — отожженной.

Скорость охлаждения при отжиге (10—30° С/ч) устанавливают с таким расчетом, чтобы распад аустенита завершился в верхней области превращений (примерно до 600° С). Это обеспечивает образование структуры равномерно распределенного мелкозернистого перлита и

Материалы	Марки	ГОСТ или ТУ	Профиль и вид поставки	Основное назначение
Высокоуглеродистые хромистые подшипниковые и инструментальные стали	ШХ15 и ШХ15СГ	ГОСТ 801—60*	Горячекатаная и холоднокатаная сортовая сталь	Кольца, тела качения
	ШХ15 ШХ15	ГОСТ 800—55* ГОСТ 4727—67	Трубы Проволока	Кольца Кольца, тела качения
	ШХ15 и ШХ15СГ	ЧМТУ 1-992—70 ЧМТУ 1-478—73	Прутки	То же »
	ШХ15-Ш, ШХ15СГ-Ш	ТУ 14-1-594—73	Прутки	Кольца »
	ШХ15-Ш ШХ15СГ-Ш ШХ15-Ш	ТУ 14-3-135—73 ТУ 14-3-142—73 ТУ 14-4-539—74	Трубы Трубы Проволока	» Тела качения, кольца То же »
	ШХ15-ШД ШХ15-ШД	ГОСТ 21022—75 ТУ 14-1-563—74	Прутки Проволока	То же »
Среднеуглеродистые стали	55СВФА, 55СМ5ФА, 55СМ3ФА, 55СМ5ФА-ВД	ЧМТУ 1-129—67 ЧМТУ 1-169—67	Прутки	Кольца, тела качения
Коррозионностойкие стали и сплавы	95Х18-Ш	ТУ 14-1-595—73	Горячекатаная, калиброванная и серебрянка	Кольца, тела качения
	11Х18М-ШД	ТУ 14-1-631—73	То же	То же
	8Х4В9Ф2-Ш	МРТУ 4-2-114—66	»	»
	8Х4В9Ф2-ШД	ТУ 14-1-13—71	Прутки	»
	12Х13 (1Х13)	ГОСТ 5632—72**	»	Тела качения
	20Х13 (2Х13) 30Х13 (3Х13)	ГОСТ 5632—72** ГОСТ 5632—72**	» »	» »
Цементуемые стали	20Х2Н4А	ЧМТУ 1-1005—70	Прутки, поковки	Кольца, тела качения
	20Х2Н4А-Ш	ЧМТУ 1-955—70	Полоса	То же
	20Х3Г2Ф	ЧМТУ 1-618—69	Пруток	»
	18ХГТ	ЧМТУ 1 800—70	»	»

Сталь	ГОСТ или ТУ	C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Cu	Примечание
ШХ15	ГОСТ 801-60*	0,95— 1,05	0,17— 0,37	0,20— 0,40	1,30— 1,65	0,027	0,02	0,30	0,25	Ni + Cu — не более 0,50%
ШХ15СГ	ГОСТ 801—60*	0,95— 1,05	0,40— 0,65	0,90— 1,20	1,30— 1,65	0,027	0,020	0,30	0,25	Ni + Cu — не более 0,50%
95Х18-Ш	ТУ 14-1-595—73, ГОСТ 5632—72**	0,9—1,0	0,8	0,8	17,0— 19,0	0,030	0,015	Fe — основа		
11Х18М-ШД	ТУ 14-1-631—73	1,10— 1,20	0,53— 0,95	0,50— 1,00	16,5— 18,0	0,025	0,015	Fe — основа		
8Х4В9Ф2-Ш	МРТУ 4-2-114—66	0,70— 0,80	0,40	0,40	4,0— 4,6	0,030	0,030	Fe — основа	W 8,5—9,5	V 1,4—1,7

64. Нормы неметаллических включений в подшипниковой стали

Сталь, состояние поставки	Размер профиля, мм	ГОСТ или ТУ	Баллы неметаллических включений по (не более)			
			оксидам	сульфидам	глобулям	сילкатам
ШХ15, холоднокатаная, горячекатаная отожженная	≤ 40	ГОСТ 801—60*	2	2	2	1
ШХ15, горячекатаная неотожженная	≤ 40	ГОСТ 801—60*	2,5	2,5	2,5	1
ШХ15, холоднокатаная, горячекатаная отожженная	$>40 \leq 80$	ГОСТ 801—60*	2,5	2,5	2,5	1
ШХ15, горячекатаная неотожженная	$>40 \leq 80$	ГОСТ 801—60*	3	2,5	2,5	1
ШХ15, горячекатаная неотожженная	80	ГОСТ 801—60*	3	3	3	
ШХ15-Ш, проволока		ТУ 14-4-539—74	1	1	1	1
ШХ15-Ш, холоднокатаная	Все размеры	ТУ 14-1-594—73	1	1	1	
ШХ15-Ш, горячекатаная отожженная и неотожженная			1,5	1,5	1,5	
ШХ15-ШД	Прутки $\varnothing \leq 25$	ГОСТ 21022—75	1	2	2	1
	$>25 \leq 50$		2	3	3	3
	1,5—16	ТУ 14-4-563—74	1	2	2	1
95Х18-Ш	Прутки $\varnothing \leq 20$	ТУ 14-1-595—73	1,5	1,0	1,0	1,5
	$>20 \leq 110$		1,5	1,5	1,5	1,5
	$>110 \leq 150$		2,0	2,0	2,0	2,0
11Х18М-ШД	$\varnothing$ прутков $\leq 25,5$	ТУ 14-1-631—73	1	1	2	2
	$>25,5 \leq 50,0$		2	2	3	3
	$>50 \leq 80$		2	3	3	3
8Х4В9Ф2-ШД (ЭИ347-ШД)	$\varnothing$ прутков ≤ 25	ТУ 14-2-13—71	1	3	2	2
	$>25 \leq 50$		2	3	3	3

65. Нормы карбидной неоднородности
в подшипниковой стали

Сталь, состояние поставки	Размер профиля, мм	Баллы карбидной неоднородности (не более)	
		карбидной полосчатости	карбидной ликвации
ШХ15, холоднокатаная	Все размеры	2,0	1,0
ШХ15, горячекатаная отожженная	Все размеры	3,0	2,0
ШХ15, горячекатаная неотожженная	Все размеры	4,0	3,0
ШХ15, проволока	5,4 >12	2,0	0,5 1,0
ШХ15-Ш, холоднокатаная	Все размеры	2,0	1,0
ШХ15-Ш, горячекатаная отожженная	Все размеры	2,5	2,0
ШХ15-Ш, горячекатаная неотожженная	≤140	3,0	3,0
ШХ15-Ш, горячекатаная неотожженная	>140	3,5	3,0
ШХ15-ШД, прутки	≤30	1,5	1,0
ШХ15-ШД, прутки	>30 ≤50	2,0	1,0
ШХ15-ШД, прутки	>50 ≤80	3,0	2,0
ШХ15-ШД, проволока	≤5,4	2	0,5
ШХ15-ШД, проволока	≤12		
ШХ15-ШД, проволока	>12		1,0

твердости *HV* 178—207 для сталей ШХ15 и ШХ15СГ. Сталь 20Х2Н4А поставляют с твердостью *HV* не более 229 (диаметр отпечатка — не менее 4,0 мм) после нормализации и отпуска при температуре 650°С, а сталь марки 18ХГТ — после отжига с твердостью *HV* не более 217.

Кольца подшипников качения, как правило, изготавливают методом горячей штамповки иликовки, в отечественной промышленности их масса составляет около 55% от массы потребляемого металла.

При штамповке деталей подшипников из теплостойких сталей нагрев заготовок производят с подогревом до 750—800°С и окончательным

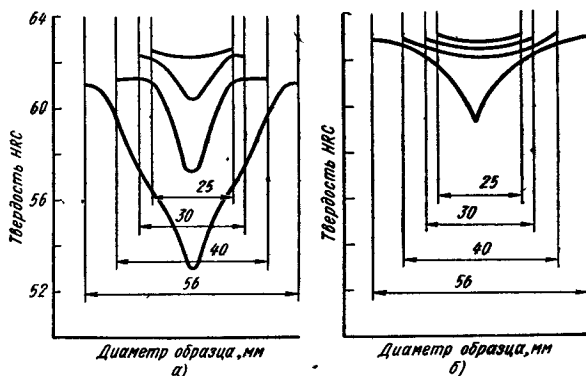


Рис. 15. Прокаливаемость сталей ШХ15 и ШХ15СГ. Распределение твердости по сечению роликов разного диаметра (И. Н. Лагунцов, Е. И. Лагунцова, С. Ф. Белков):

а — сталь ШХ15, закалка с 840—850°С в масле; б — сталь ШХ15СГ, закалка с 830°С в масле

нагревом до 1140—1160°С. Температура конца штамповки должна быть не менее 850°С. Охлаждают штамповки в термостате (печи) по режиму отжига с начальной температурой не выше 800°С.

Повышения прочностных характеристик и экономии металла достигают также горячей раскаткой колец подшипников. Раскатку осуществляют как с непосредственного нагрева под штамповку, так и с дополнительным нагревом в пламенных или индукционных печах при температуре 950—1000°С.

Режим предварительной термической обработки деталей подшипников качения из стали 20Х2Н4А включает в себя нормализацию с температурой нагрева 950—970°С и высокий отпуск с нагревом до температуры 630—660°С, а также выдержку 6—9 ч.

Для обеспечения рабочих характеристик подшипников качения применяют различные методы термического и химико-термического упрочнения.

Нагрев под закалку деталей подшипников из сталей ШХ15 и ШХ15СГ производят в электропечах сопротивления и соляных ваннах. Учитывая прокаливаемость стали (рис. 15), устанавливают температуру нагрева 830—860°С для деталей из стали ШХ15 с сечением до 10 мм и свыше 10 мм 840—870°С, для деталей из стали ШХ15СГ 820—

840° С. Величина действительного аустенитного зерна стали ШХ15 после заковки характеризуется кривыми на рис. 16. Время нагрева зависит от вида оборудования, среды нагрева и толщины сечения. Охлаждение колец производят в промышленных маслах с температурой 30—60° С. Перед отпуском детали должны быть охлаждены до температуры не выше 25° С. Отпуск деталей из стали ШХ15 производят при температуре 150—165° С, из стали ШХ15СГ при 165—175° С не позднее чем через 3 ч после заковки. Общую длительность отпуска устанавливают из расчета выдержки при температуре не менее 2 ч для деталей с сечением толщины стенки до 20 мм и 3 ч при сечении толщины стенки 20—50 мм. Содержание остаточного аустенита в сталях ШХ15 и ШХ15СГ должно быть не более величин, указанных в табл. 66.

Характерная особенность заковки деталей подшипников из коррозионностойких теплостойких сталей 95Х18, 11Х18М и ЭИ347 — двухступенчатый режим нагрева. Предварительный нагрев производят при температуре 850—860° С для стали 95Х18, при 830—850° С для стали 11Х18М и при 800° С — для стали ЭИ347. Окончательный нагрев сталей 95Х18 и 11Х18М производят до температуры 1080—1100° С и 1220—1240° С для стали ЭИ347. Время нагрева деталей устанавливают из расчета 1,5 мин на 1 мм сечения, но не менее 4 мин. Охлаждение при заковке производят в промышленных маслах ИС-12, ИС-20 с температурой 30—60° С.

После охлаждения до температуры цеха детали подвергают обработке холодом при температуре —(70—80)°С. Перерыв между закалкой и обработкой холодом не должен превышать 4 ч. Выдержка при температуре —70° С должна быть не менее 60 мин. После обработки холодом детали нагревают на воздухе до температуры цеха и затем подвергают отпуску от 2 до 5 ч при температурах от 150 до 420° С (табл. 67). Микроструктура стали после термической обработки представляет собой скрыто- или мелкокристаллический мартенсит и карбиды.

В СССР для изготовления деталей подшипников качения применяют два метода химико-термического упрочнения — цементацию (табл. 68) и цианирование.

Глубину цементованного слоя устанавливают в соответствии с чертежами деталей и технологическими допусками. Нижний предел глубины цементованного слоя строго контролируют; верхний предел, как правило, устанавливают для колец и роликов массового производ-

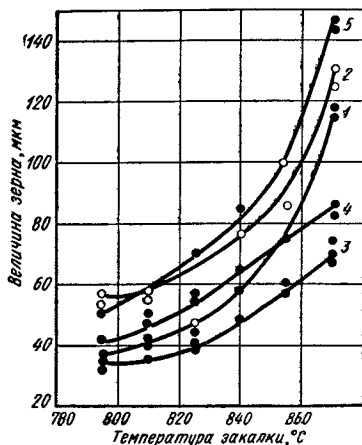


Рис. 16. Зависимость величины зерна аустенита в закаленной стали ШХ15 от исходной структуры и температуры заковки:

- 1 — мелкопластинчатый перлит, 2 — пластинчатый перлит, 3 — точечный перлит; 4 — мелкозернистый перлит, 5 — крупнозернистый перлит

66. Содержание остаточного аустенита в сталях ШХ15 и ШХ15СГ в зависимости от режимов термообработки

Сталь	Исходная структура перлита	Температура закали, °С	Содержание аустенита после закали, %	HRC после закали	Содержание аустенита (%) после отпуска при температуре, °С					
					150	175	200	225	250	275
ШХ15	Тонкопластинчатый	830	16—18	64	18—19	16—17	10	3—4	0	0
	Мелкозернистый	850	—	—	18	—	10	5	1	0
ШХ15СГ	Зернистый	830	7—8	60—61	14	—	10	4	0	0
	Тонкопластинчатый	820	20—22	64	22—23	21	16	11,5	3	0
	Точечный	820	16—18	63	18	17	13—14	10,5	2,5	0
	Мелкозернистый	820	12—14	61—62	14	13	10,5	8	2,5	0

67. Типовые режимы отпуска сталей 9Х18 и 11Х18М

Сталь	Рабочая температура для подшипника, °С	Отпуск			Старение	
		Температура, °С	Время, ч	Твердость HRC (не менее)	Температура, °С	Время, ч
95Х18	От —200 до +150	150—180	3	58 *	140—150	3
95Х18	» +350 » +400	400—420	3+2	55	200	2
11Х18М	» —200 » +120	150—160	3	60	140—150	3
11Х18М	» —200 » +350	400—420	5	57	200	2

* При твердости более HRC 60 производится повторный отпуск при температуре 170—180° С в течение 2 ч.

68. Типовые режимы цементации деталей подшипников

Режим	18ХГТ	20Х2Н4А
Способ укладки колец	В приспособлениях на поддон	В приспособлениях на поддон
Температура, °C ± 10	970	940
Глубина слоя, мм	1,2—1,6; 1,4—1,8	1,2—1,6, 1,4—1,8; 2—3,5
Карбюризатор	Природный или городской газ	Природный или городской газ
Время выдержки, ч	8,5—10, 10,5—12	9—11, 15—20, 25—40
Среда охлаждения	Масло, воздух	Масло, воздух (до 200—300° C)
Температура высокого отпуска, °C	—	550 (масло), 630 (воздух)
Время, ч	—	8—12
Температура закалки, °C	860±10	800±10
Время, ч	0,5—0,75	0,5—0,75
Среда охлаждения с температурой 30—60° C	Масло	Масло
Температура низкого отпуска, °C	160—170	160—170
Время отпуска, ч	2,5—3,0	1,5—2,0
Твердость поверхности HRC	61—65	58—62
Твердость сердцевины HRC	Не менее 30	30—45

ства факультативно. Допускается насыщение углеродом цементованного слоя: для стали 18ХГТ — 1,0—1,2%, а для стали 20Х2Н4А — 0,8—1,2%. Микроструктура закаленного цементованного слоя для сталей 18ХГТ, 20НМ и 20Х2Н4А состоит из скрытокристаллического, мелкокристаллического или мелкоигольчатого мартенсита; наличие скопленных карбидов и замкнутой карбидной сетки не допускается.

Цианирование холодноштампованных колец из стали 18ХГТ осуществляют в расплаве солей при температуре $950 \pm 10^\circ \text{C}$ на глубину 0,9—1,5, 1,0—1,3, 1,2—1,6 и 1,4—1,8 мм при выдержке (соответственно), равной 1 ч 45 мин, 2 ч 50 мин, 2 ч 30 мин, 3 ч 15 мин, 3,0—5,0 ч и 4,0—6 ч 30 мин. Закалка после цианирования производится с температуры $850\text{—}870^\circ \text{C}$ в масло с температурой $30\text{—}60^\circ \text{C}$.

После закалки перед отпуском детали промывают для удаления масла. Низкий отпуск проводят при температуре $160\text{—}170^\circ \text{C}$ с выдержкой не менее 1,5 ч. Твердость поверхности $HRC\ 61\text{—}65$, а микроструктура состоит из мелкоигольчатого мартенсита. Замкнутая карбидная или карбонитридная сетки не допускаются.

Процесс нитроцементации колец подшипников проводят в шахтных печах при температуре 860°C , продолжительность выдержки 2—4 ч, глубина нитроцементации при этом от 0,3 до 1,6 мм.

Закалку производят непосредственно с температуры процесса, но не ниже 820°C в масло. Твердость HRC нитроцементованных колец из стали ШХ15 после отпуска при различных температурах следующая: 160°C — 67—69; 200°C — 65—66; 250°C — 64—65; 300°C — 60—63; 350°C — 58—60.

Микроструктура нитроцементованного слоя состоит из скрытокристаллического азотистого мартенсита с равномерно распределенными карбидами.

После нитроцементации значительно увеличивается объем стали ШХ15 по сравнению с объемом закаленной стали. Для компенсации этого увеличения предусматривается изменение припусков на шлифовку. Так, для колец подшипников диаметром от 50 до 200 мм по наружному диаметру уменьшают припуск на 0,1—0,15 мм, а по внутреннему диаметру увеличивают припуск также на 0,1—0,15 мм. Для колец диаметром менее 50 мм и шариков припуск не изменяется.

ПРУЖИННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

В промышленности применяют много разнообразных пружинных сплавов, так как в зависимости от условий службы упругих элементов — пружин, мембран, сильфонов, рессор и т. п., а также их формы и размеров они должны обладать различными механическими, физическими и химическими и технологическими свойствами.

Однако независимо от этого все пружинные сплавы должны иметь определенные, характерные для всех конструкционных сплавов свойства, т. е. прочность в условиях статического, циклического или динамического нагружения, пластичность и вязкость, сопротивление хрупкому разрушению, а также специальные механические свойства и в первую очередь высокое сопротивление малым пластическим деформациям в условиях кратковременного статического нагружения, характеризующее пределом упругости или менее точно пределом пропорциональности. Кроме того, эти сплавы должны обладать высоким сопро-

тивлением малым пластическим деформациям в условиях длительного статического или циклического нагружения при различных температурах и при воздействии различных внешних сред. Во многих случаях пружинные сплавы в отличие от обычных конструкционных материалов должны быть в то же время и сплавами коррозионностойкими, немагнитными или ферромагнитными, с низкой или высокой электропроводностью, с низким температурным коэффициентом модуля упругости, малой t -ЭДС в паре с медью, с большой или малой демпфирующей способностью и т. д.

Для того чтобы удовлетворить этим требованиям, применяют пружинные сплавы различного состава на основе железа, никеля, меди, тугоплавких и благородных металлов, которые подвергают разнообразным видам упрочняющей обработки — термической и термомеханической.

Классификация пружинных сталей и сплавов

Пружинные сплавы целесообразно разделять по их назначению.

Пружинные стали общего назначения используют в качестве конструкционных материалов, и поэтому они должны в первую очередь обладать высокими пределами прочности, упругости, выносливости и релаксационной стойкостью.

Пружинные стали и сплавы специального назначения. Эти сплавы наряду с повышенными механическими свойствами должны иметь определенные физико-химические и физико-механические свойства.

Стали общего назначения

К пружинным сталям общего назначения относятся преимущественно углеродистые и легированные стали, главным образом перлитного класса и, лишь в ограниченной степени, мартенситного класса (табл. 69). Эти стали обычно содержат повышенное содержание углерода (0,4—1,2%), что и определяет высокую степень их упрочнения вследствие холодной пластической деформации или мартенситного превращения при закалке.

Углеродистая сталь отличается низкой коррозионной стойкостью, сравнительно высоким температурным коэффициентом модуля упругости, и из-за сниженной релаксационной стойкости при небольшом нагреве. Поэтому она непригодна 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 получить 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

69. Химический состав (%) пружинных сталей общего назначения¹

Сталь	C	Mn	Si	Cr	Ni	Другие элементы	Примерное назначение
65	0,62—0,70	0,50—0,80	0,17—0,37	≤0,25	≤0,25	—	Пружины меха- низмов и машин
70	0,67—0,75	0,50—0,80	0,17—0,37	≤0,25	≤0,25	—	
75	0,72—0,80	0,50—0,80	0,17—0,37	≤0,25	≤0,25	—	
85	0,82—0,90	0,50—0,80	0,17—0,37	≤0,25	≤0,25	—	
У9А *	0,85—0,94	0,15—0,30	0,15—0,30	≤0,15	≤0,20	—	
У10А *	0,95—1,04	0,15—0,30	0,15—0,30	≤0,15	≤0,20	—	
У11А *	1,05—1,14	0,15—0,30	0,15—0,30	≤0,15	≤0,20	—	
У12А *	1,15—1,24	0,15—0,30	0,15—0,30	≤0,15	≤0,20	—	
50Г	0,47—0,55	0,70—1,00	0,17—0,37	≤0,25	≤0,25	—	
60Г	0,57—0,65	0,70—1,00	0,17—0,37	≤0,25	≤0,25	—	
65Г	0,62—0,70	0,90—1,20	0,17—0,37	≤0,25	≤0,25	—	
70Г	0,67—0,75	0,90—1,20	0,17—0,37	≤0,25	≤0,25	—	
55ГС	0,52—0,60	0,60—0,90	0,50—0,80	≤0,30	≤0,25	—	Рессоры автома- шин Пружины по- движного состава железнодорожного транспорта
50ХР	0,46—0,54	0,70—1,00	0,17—0,37	0,90—1,20	≤0,25	—	
50ХГА	0,47—0,54	0,80—1,00	0,17—0,37	0,95—1,20	≤0,25	—	
55ХГР	0,52—0,60	0,9—1,2	0,17—0,37	0,90—1,20	≤0,25	0,002—0,005 В	
50С2	0,47—0,55	0,60—0,90	1,50—2,00	≤0,30	≤0,25	—	
55С2	0,52—0,60	0,60—0,90	1,50—2,00	≤0,30	≤0,25	—	
55С2А	0,53—0,58	0,60—0,90	1,50—2,00	≤0,30	≤0,25	—	
60С2	0,57—0,65	0,60—0,90	1,50—2,00	≤0,30	≤0,25	—	
60С2А	0,58—0,63	0,60—0,90	1,60—2,00	≤0,30	≤0,25	—	
70С3А	0,60—0,74	0,60—0,90	1,40—2,80	≤0,30	≤0,25	—	Пружины механиз- мов и машин

Сталь	С	Мн	Сн	В	Элементы	Назначение
50ХФА 50ХГФА	0,46—0,54 0,48—0,54	0,50—0,80 0,80—1,0	0,17—0,37 0,17—0,37	0,80—1,10 0,95—1,10	$\leq 0,25$ $\leq 0,25$	0,10—0,20 V 0,15—0,25 V Пружины особо ответственного на- значения, рессоры легковых автомо- билей
45ХНМФА ³	0,42—0,50	0,50—0,80	0,17—0,37	0,80—1,10	1,30—1,80	0,20—0,30 Мо 0,10—0,20 V Крупные кла- панные пружины, торсионные валы
70С2ХА	0,65—0,75	0,4—0,6	1,40—1,70	0,2—0,4	—	— Пружины часо- вых механизмов
50ХСА 60С2ХА 60С2ХФА 65С2ВА 60С2Н2А	0,45—0,55 0,56—0,64 0,56—0,64 0,61—0,69 0,56—0,64	0,30—0,50 0,40—0,70 0,40—0,70 0,70—1,00 0,40—0,70	0,80—1,20 1,40—1,80 1,40—1,80 1,50—2,00 1,40—1,80	0,90—1,20 0,70—1,00 0,90—1,20 $\leq 0,30$ $\leq 0,30$	$\leq 0,25$ $\leq 0,25$ $\leq 0,25$ $\leq 0,25$ 1,40—1,70	— — 0,10—0,20 V 0,80—1,20 W — Крупные пружи- ны ответственного назначения

¹ По ГОСТ 14959—69. ² По ГОСТ 1435—74. ³ По ГОСТ 4543—61.

Примечание. Согласно ГОСТ 14959—69 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 Р и S в качественной стали $\leq 0,035\%$, а в высококачественной $\leq 0,025\%$ каждого.

также позволяет сильно уменьшить зональные остаточные напряжения, что повышает стабильность характеристик изделий во времени.

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 методом закалки и отпуска на заданный уровень прочности ленту или проволоку; 3) холоднокатаную и горячекатаную сталь для пружин, подвергаемые затем закалке.

Холоднодеформированная термически обработанная пружинная проволока. Для изготовления этой проволоки обычно применяют углеродистые стали с 0,4—1,0% углерода, реже с повышенным содержанием марганца (65Г), а в некоторых особых случаях — также и низколегированные стали 50ХФА, 70С2ХА, предварительно до холодной пластической деформации подвергнутые термической обработке — патентированию. Для проволоки максимальной прочности (I класс) обычно применяют стали У7А—У9А, для проволоки повышенной прочности (классы II и IIA) — сталь 65Г и для проволоки нормальной прочности (III класс) — сталь 45 (табл. 70).

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 ее пониженной прочности изготавливают лишь слабонагружаемые пружины. Проволоку I—III классов, как правило, изготавливают из углеродистых сталей, в том числе и 65Г, но для изготовления проволоки для пружин, которые работают при повышенных температурах и напряжениях, применяют низколегированные стали. Прочность проволоки тем больше, чем больше степень холодной пластической деформации или соответственно чем меньше ее диаметр. При этом наибольшее упрочнение при сохранении достаточной пластичности и вязкости достигается только в том случае, если перед волочением сталь приобретает структуру тонкопластинчатого сорбита.

Указанная структура получается в результате патентирования — термической обработки, заключающейся в аустенитизации катанки с последующим переохлаждением до температур верхней области пониженной устойчивости аустенита и выдержкой при этих температурах для полного завершения перлитного превращения. Режимы патентирования зависят от содержания в стали углерода и от диаметра заготовки.

В процессе волочения пластинки цементита приобретают определенную направленность и вытягиваются вдоль направления течения металла, а ферритные пластинки разбиваются на большое число субзерен, границы которых представляют собой скопление дислокаций, что и определяет высокий уровень упрочнения.

При использовании легированных сталей режимы патентирования существенно изменяются из-за возрастающей устойчивости переохлажденного аустенита, что требует повышения температуры и продолжительности изотермической выдержки в области превращения аустенита в сорбит. Эти изменения режима патентирования технологически трудно осуществить, и поэтому патентированию подвергают лишь низколегированные стали с относительно малоустойчивым переохлажденным

Диаметр, мм	Класс I			Класс II			Класс III			Класс IV		
	σ_B , кгс/мм ²	Число перегибов (не менее)	Число скручиваний (не менее)	σ_B , кгс/мм ²	Число перегибов (не менее)	Число скручиваний (не менее)	σ_B , кгс/мм ²	Число перегибов (не менее)	Число скручиваний (не менее)	σ_B , кгс/мм ²	Число перегибов (не менее)	Число скручиваний (не менее)
0,14	270—310	—	35	225—270	—	35	225—270	—	35	175—225	—	36
0,15	270—310	—	34	225—270	—	34	225—270	—	34	175—225	—	34
0,16	270—310	—	33	225—270	—	33	225—270	—	33	175—225	—	33
0,18	270—310	—	31	225—270	—	31	225—270	—	33	175—225	—	31
0,20	270—310	—	30	225—270	—	30	225—270	—	32	175—225	—	30
0,22	270—310	—	29	225—270	—	29	225—270	—	32	175—225	—	29
0,25	270—310	—	27	225—270	—	27	225—270	—	32	175—225	—	27
0,28	270—310	—	26	225—270	—	26	225—270	—	31	175—225	—	26
0,30	270—310	—	23	225—270	—	23	225—270	—	31	175—225	—	23
0,32	265—300	—	22	220—265	—	22	220—265	—	30	170—220	—	22
0,36	265—305	—	20	220—265	—	22	220—265	—	30	170—220	—	22
0,40	265—305	—	17	220—265	—	21	220—265	—	28	170—220	—	21
0,45	265—305	—	16	220—265	—	20	220—265	—	28	170—220	—	20
0,50	265—305	—	16	220—265	—	19	220—265	—	27	170—220	—	19
0,56	265—305	—	16	220—265	—	19	220—265	—	27	170—220	—	19
0,60	265—305	—	16	225—265	—	18	220—265	—	25	170—220	—	18
0,63	260—300	—	16	215—260	—	18	215—260	—	25	170—215	—	18
0,70	260—300	—	16	215—260	—	18	215—260	—	25	170—215	—	18
0,75	260—300	—	16	215—260	—	17	215—260	—	24	170—215	—	17
0,80	260—300	11	16	215—260	12	17	215—260	12	24	170—215	12	17
0,85	255—290	11	16	210—255	11	17	210—255	11	24	165—210	11	17
0,90	255—290	10	16	210—255	11	17	210—255	11	24	165—210	11	17
1,00	250—285	9	16	205—250	10	17	205—250	10	24	165—210	10	17
1,10	240—275	8	16	195—240	8	17	195—240	8	24	155—200	9	17
1,20	240—270	7	16	195—240	7	17	195—240	7	24	155—200	8	17
1,30	230—260	19	16	190—230	18	17	195—240	18	24	150—190	18	17
1,40	230—260	17	16	190—230	17	17	190—230	17	24	150—190	17	17

Диаметр, мм	Класс I			Класс II			Класс IIA			Класс III		
	σ_B , кгс/мм ²	Число перегибов (не менее)	Число скручиваний (не менее)	σ_B , кгс/мм ²	Число перегибов (не менее)	Число скручиваний (не менее)	σ_B , кгс/мм ²	Число перегибов (не менее)	Число скручиваний (не менее)	σ_B , кгс/мм ²	Число перегибов (не менее)	Число скручиваний (не менее)
1,50	220—250	15	16	185—220	15	17	185—220	15	24	145—185	15	17
1,60	220—250	13	16	185—220	13	17	185—220	13	24	145—185	13	17
1,70	210—240	11	15	180—210	10	17	180—210	10	24	140—180	11	17
1,80	210—240	10	15	180—210	10	17	180—210	10	24	140—180	11	17
2,00	200—230	8	14	180—210	9	16	180—210	9	23	140—180	10	16
2,20	190—220	7	13	170—200	8	15	170—200	8	22	140—175	9	15
2,30	190—220	6	13	170—200	7	15	170—200	7	21	140—175	8	15
2,50	180—205	6	12	165—195	7	15	165—195	7	21	130—165	8	15
2,80	175—200	7	11	165—195	9	14	165—195	9	19	130—165	10	14
3,00	170—195	4	10	165—195	5	13	165—195	5	18	130—165	7	13
3,20	170—195	4	10	155—185	5	13	155—185	5	18	120—155	7	13
3,40	165—190	3	9	155—180	5	13	155—180	5	18	120—155	6	13
3,50	165—190	3	8	155—180	5	13	155—180	5	18	120—155	5	13
3,60	165—190	3	7	155—180	5	13	155—180	5	18	120—155	5	13
4,00	160—185	4	6	150—175	6	13	150—175	6	18	115—150	6	13
4,50	150—175	4	6	140—165	5	12	140—165	5	16	115—145	5	12
5,00	150—175	3	4	140—165	4	9	140—165	4	13	110—140	4	9
5,60	140—170	5	4	135—160	6	6	135—160	6	8	105—135	6	6
6,00	145—170	3	2	135—160	6	4	135—160	6	6	105—135	6	4
6,30	—	—	—	125—145	6	—	—	—	—	100—125	6	—
7,00	—	—	—	125—145	6	—	—	—	—	100—125	6	—
8,00	—	—	—	125—145	5	—	—	—	—	100—125	5	—

Примечание. Для проволоки $\varnothing \leq 0,8$ мм испытание на перегиб заменяют испытанием на разрыв с условием $\frac{\sigma_{\text{Вузел}}}{\sigma_B} \geq 50\%$

аустенитом. Однако разработанный в последнее время новый процесс ступенчатого патентирования позволяет решить проблему патентирования и среднелегированных сталей. Свойства патентированной проволоки в результате последующей холодной пластической деформации зависят от величины общей (суммарной) деформации и от величины обжатий за один проход. Упрочнение тем выше, чем больше суммарная степень обжатия. Оптимальная величина частных обжатий должна быть примерно 10—12%.

В результате упрочняющей холодной пластической деформации патентированная проволока приобретает значительные остаточные напряжения, которые сильно снижают предел упругости, почти не влияя на предел прочности. Для снижения этих напряжений и повышения предела упругости и релаксационной стойкости — основных характеристик пружинной стали — готовые пружины после операций навивки или гибки подвергают последующему низкотемпературному отпуску обычно при 200—300° С. Рост предела упругости в результате этого отпуска достигает примерно 100% от исходной величины, тогда как предел прочности возрастает примерно лишь на 10%. Релаксационная стойкость пружин после отпуска возрастает по сравнению с неотпущенными примерно в два раза. Также возрастает и предел выносливости, правда, не столь значительно (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). При назначении режима отпуска следует учитывать влияние не только температуры, но и его продолжительности.

Рекомендуемые режимы отпуска пружин из патентированной высокоуглеродистой стальной проволоки: температура 175° С с выдержкой 2 ч или при 220—300° С, но с выдержкой 1 ч или при 350° С — 15 мин.

Пружины, изготовленные из патентированной и холоднодеформированной стальной проволоки или ленты, после дополнительного отпуска приобретают высокую прочность, в том числе и усталостную, при повышенной вязкости. Поэтому эта сталь рекомендуется для изготовления тяжело нагруженных пружин преимущественно из профилей малого сечения (толщины или диаметром до 1,5—2 мм). При больших диаметрах проволоки не удастся обеспечить высоких степеней обжатия, и поэтому стандартный комплекс механических свойств в этих сечениях ниже, но не уступает свойствам, получаемым после обычной закалки и отпуска. Однако и в этом случае по ограниченной выносливости и меньшей склонности к хрупкому разрушению пружины из патентированных сталей превосходят закаленные и отпущенные. В то же время у стали, закаленной и отпущенной на равную твердость с патентированной и холоднотянутой, более высокий предел упругости и большая релаксационная стойкость при 20° С, но при нагреве эта стойкость для стали после обеих упрочняющих обработок практически одинакова.

Термически обработанная (упрочненная) пружинная лента и проволока. Пружинную ленту изготавливают из углеродистой (У7А—У12А) или низколегированной (70С2ХА, 60С2А) стали. Лента отличается высокой точностью размеров, повышенной прочностью, высоким качеством отделки поверхности в результате шлифовки и полировки*, что определяет высокое сопротивление хрупкому разрушению и усталостную

прочность. Последняя может быть повышена шлифовкой не только поверхности, но и кромок ленты или получением закругленных кромок вследствие плющения под валами проволоочной заготовки.

Классификация термически обработанной ленты дана в табл. 71, а свойства — в табл. 72

71. Прочностные свойства термически обработанной ленты

Группа прочности	Предел прочности σ_B , кгс/мм ²	Твердость по Виккерсу HV
1П 2П 3П	130—160 161—190 ≥190	375—485 486—600 ≥600

72. Свойства вязкости (число переменных изгибов) термически обработанной ленты

Толщина ленты, мм	Радиус валков, мм	Число переменных изгибов (не менее)					
		Группа прочности					
		1П		2П		3П	
		Стали					
		65Г, У7А, У8А	У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА	65Г, У7А, У8А	У9А, У10А, У12А, 60С2А, 70С2ХА	65Г, У7А, У8А	У9А, У10, У12А, 60С2А, 70С2ХА
0,10	1	26	24	22	18	18	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	—	—

Из термически обработанной ленты изготовляют пружины сравнительно простой конфигурации путем вырубки с применением, если необходимо, небольшой гибки. После этих операций производят низкий отпуск при 200—300° С для снятия напряжений.

Помимо термически обработанной ленты, в промышленность для изготовления пружин также применяют и термически обработанную

* После шлифовки или полировки ленту подвергают низкотемпературному отпуску, который уменьшает возникающие при поверхностной обработке остаточные напряжения и создает окисную пленку желтую или синюю, способствующую лучшему сохранению смазки.

проволоку диаметром от 1,2 до 5,5 мм, изготавливаемую из сталей 65ГА, 68ГА, 68А, 50ХФА (см. табл. 73).

После закалки и отпуска свойства стальной проволоки зависят от ее диаметра (табл. 74).

73. Химический состав (%) сталей для термически обработанной проволоки

Сталь	C	Mn	Si	Ni	Cr	Al	Cu
65ГА	0,65 — 0,70	0,70 — 1,00	0,15 — 0,50	≤ 0,2	≤ 0,15	≤ 0,08	≤ 0,2
68ГА	0,65 — 0,70	0,70 — 1,00	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

Основные достоинства термически упрочненной проволоки — прямолинейность и повышенная релаксационная стойкость, особенно у про-

74. Характеристики механических свойств проволоки (ГОСТ 1071—67*)

Диаметр, мм	σ_B , кгс/мм ² (не менее)	Диаметр валков, мм	Число перегибов на 180° для про- волоки		Число скручиваний на 60°	
			I класс	II класс	I класс	II класс
			Не менее		Не менее	
1,20	180	10	10	9	10	7
1,40	175		8	7		8
1,60	175		7	6		
1,80	170		7	6		
2,00	170		6	5		
2,30	165		5	4		
2,50	165		4	3		
2,75	160		4	3		
3,00	160	20	8	7	10	8
3,20	160		8	7		
3,40	160		8	7		
3,50	150		7	6		
3,60	150		7	6		
3,75	145		7	6		
4,00	145		6	5		
5,00	135		3	5		

волоки повышенных диаметров. Стали этого типа используют главным образом для изготовления клапанных пружин.

Холоднокатаная и горячекатаная сталь для пружин. Пружинная сталь в виде холоднокатаной ленты может быть или в нагартованном состоянии, или после отжига, в том числе и после отжига на зернистый перлит. Из этих полуфабрикатов изготавливают пружины более сложной конфигурации и точных размеров, чем из указанных ранее полуфабрикатов. Пружинную холоднокатаную ленту изготавливают из углеродистых

сталей — конструкционных (сталь 85), в том числе сталей с повышенным содержанием марганца 50Г, 60Г и 65Г (см. табл. 69), инструментальных У7—У12 и У7А—У12А и пружинных легированных 60С2А, 50ХФА, 65С2ВА и 70С2ХА (см. табл. 1).

Свойства пружинной холоднокатаной ленты указаны в табл. 75.

Для производства пружин и рессор крупных сечений применяют сортовой и полосовой горячекатаный прокат. Эти упругие элементы изготовляют навивкой или штамповкой в холодном или горячем состоянии. Пружины и другие упругие элементы, изготовленные из полуфабрикатов последних двух типов, для достижения требуемого комплекса механических свойств подвергают упрочняющей обработке — закалке и отпуску.

Для изготовления пружин, рессор и тому подобных упругих элементов из указанных полуфабрикатов применяют углеродистые и легированные стали. Свойства и режимы термической обработки углеродистой стали приведены в табл. 76. Закалку пружин из этих сталей производят в воде или масле.

Твердость пружин после обычной закалки и отпуска, как правило, HRC 42—48. При более высокой твердости пружины склонны к хрупкому 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 кремнистых, а также из хромомарганцевых, хромованадиевых.

Рекомендуемые режимы термической обработки пружин из легированных сталей приведены в табл. 76.

75 Характеристики механических свойств пружинной ленты (ГОСТ 2283—69*)

Стали	Толщина, мм	Лента отожженная		Лента нагар- тованная
		σ_B , кгс/мм ²	δ_5 , %	σ_B , кгс/мм ²
		Не менее		
50Г, 60Г, 65Г, У7, У7А, У8, У8А	2	65	20	75—120
	2	75	10	
У8Г, У8ГА, У9, У9А, У10, У10А, У11, У11А, У12, У12А, 85	0,08—3,0	75	10	
50ХФА, 60С2А 60С2, 65С2ВА		90	10	80—120
70С2ХА		90	8	

Сталь	Критические точки, °C		Режим термической обработки			$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ_5 , %	ψ , %
	A_{c1}	A_{c2}	$t_{\text{зак}}$, °C	Закалочная среда	$t_{\text{отп}}$, °C				
65	727	752	840	Масло	480	80	100	10	35
70	730	743	830	»	480	85	105	9	30
75	730	—	820	»	480	90	110	9	30
85	730	—	820	»	480	100	115	8	30
У9А *	730	—	760—790	Масло или вода	300—420	—	—	—	—
У10А— У12А *	730	—	770—810	То же	300—420	—	—	—	—
60Г	—	—	840	Масло	480	80	100	8	30
65Г	—	—	830	»	480	80	100	8	30
70Г	—	—	830	»	480	85	105	7	25
55ГС	—	—	820	»	480	80	100	8	30
50С2	—	—	870	Масло	460	110	120	6	30
55С2—55С2А	775	840	870	или вода То же	460	120	130	6	30
60С2	750	820	870	Масло	460	120	130	6	25
60С2А	750	820	870	»	420	140	160	6	20
70С3А	—	—	860	»	460	160	180	6	25
50ХГ	750	775	840	»	440	110	130	7	35
50ХГА	750	775	840	»	440	120	130	7	35
55ХГР	750	790	830	»	450	125	140	5	30
50ХФА	—	—	850	»	520	110	130	8	35
50ХГФА	—	—	850	»	520	120	130	6	35
60С2ФА	—	—	850	»	410	170	190	5	20
60ХСА	—	—	850	»	520	120	130	6	30
65С2ВА	—	—	850	»	420	170	190	5	20
60С2Н2А	—	—	880	»	420	170	175	6	20
60С2ХА	—	—	870	»	420	160	180	5	20
60СГА	—	—	860	»	460	140	160	6	25

* При закалке в воде температуру принимают по нижнему пределу, при закалке в масле — по верхнему. Режимы термической обработки соответствуют применяемым в промышленности.

На рис. 17—20 показаны зависимости свойств некоторых широко распространенных сталей от температуры отпуска.

Помимо закалки и отпуска для упрочнения пружин часто применяют также изотермическую закалку на нижний бейнит — обычно при

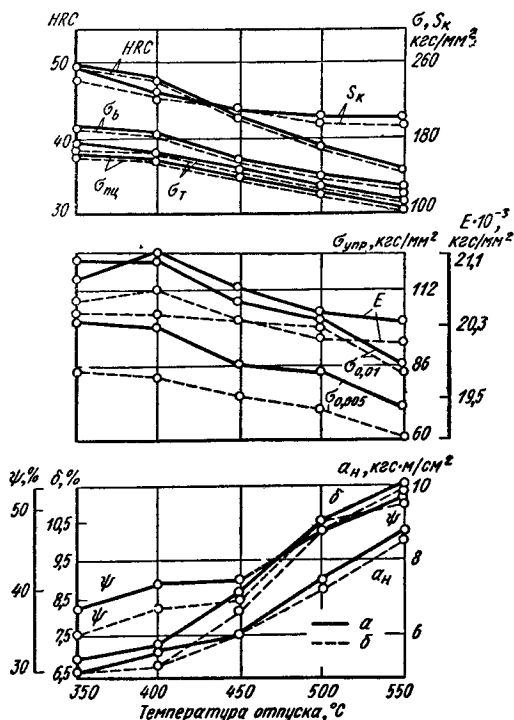


Рис. 17. Зависимость механических свойств сталей 50XГ (а) и 55XГР (б) от температуры отпуска

280—350° С. После изотермической закалки у стали повышаются пластичность, вязкость и уменьшается склонность к хрупкому разрушению. При этом уменьшаются уровень внутренних напряжений, деформация при закалке и склонность к хрупкому разрушению. Поэтому для пружин, подвергнутых изотермической закалке, допустима более высокая твердость — до HRC 50—52, чем после обычной закалки и отпуска. После изотермической закалки предел упругости и релаксационная стойкость ниже, чем после обычной закалки и отпуска. Они могут быть повышены путем дополнительного отпуска при температуре, равной температуре предшествующей изотермической выдержки при закалке.

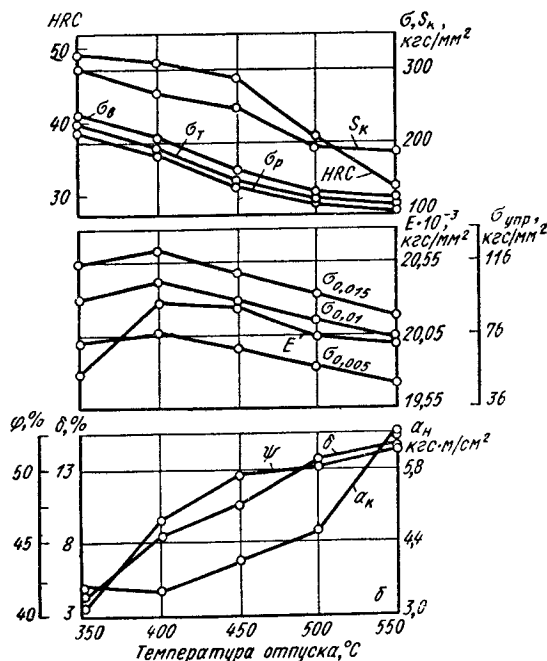
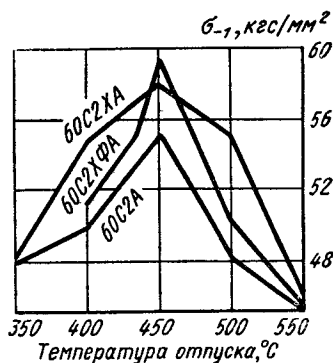


Рис. 18. Зависимость механических свойств стали 60C2 от температуры отпуска

Рис. 19. Зависимость усталостной прочности стали 60C2, 60C2ХФА и 60C2ХА от температуры отпуска



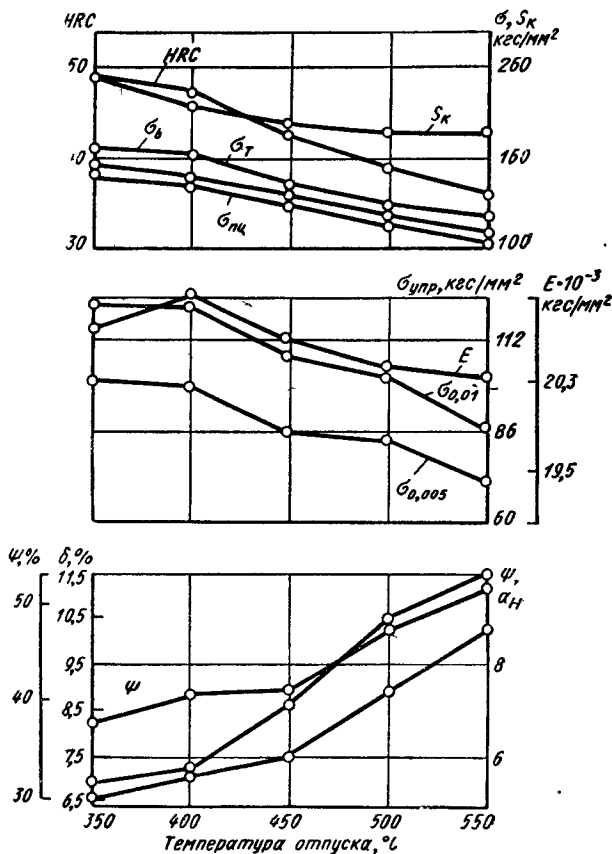


Рис. 20. Зависимость механических свойств стали 50ХФА от температуры отпуска

Пружинные стали и сплавы специального назначения

Сплавы этого класса целесообразно разделить на следующие группы: а) коррозионностойкие; б) немагнитные; в) с низким температурным коэффициентом модуля упругости; г) высокоэлектропроводные.

Коррозионностойкие стали и сплавы (см. табл. 77) применяют для изготовления пружин регулирующих устройств и приборов, работающих в коррозионноактивных 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

77 Химический состав (%) коррозионностойких пружинных сталей и сплавов (ГОСТ 5632-72*)

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Mo	Другие элементы
Стали мартенситного класса								
20X13	0,16—0,25	≤0,8	≤0,8	12,0—14,0	—	—	—	—
30X13	0,26—0,35	≤0,8	≤0,8	12,0—14,0	—	—	—	—
40X13	0,36—0,45	≤0,8	≤0,8	12,0—14,0	—	—	—	—
14X17H2	0,11—0,17	≤0,8	≤0,8	16,0—18,0	1,5—2,5	—	—	—
Стали аустенитного класса								
12X18H9	Не более 0,8	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	8,0—10,0	—	—	—
12X18H9T	Не более 0,12	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	8,0—9,5	5·C—0,8	—	—
08X18H10T	Не более 0,08	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	9,0—11,0	5·C—0,7	—	—
17X18H9	0,13—0,21	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	8,0—10,0	—	1,1—1,4	1,25—1,55 V
37X12H8T8MФБ	0,34—0,40	0,3—0,8	7,5—9,5	11,5—13,5	7,0—9,0	≤0,2	—	0,25—0,5 Nb
Аустенитно-мартенситные стали, упрочняемые фазовым наклепом и дисперсионным твердением								
09X15H8Ю	Не более 0,09	≤0,8	≤0,8	14,0—16,0	7,0—9,4	—	—	0,7—1,3 Al
09X17H7Ю1	Не более 0,09	≤0,8	≤0,8	16,5—18,0	6,5—7,5	—	—	0,7—1,1 Al
08X17H5M3	0,06—0,10	≤0,8	≤0,8	16,0—17,5	4,5—5,5	—	3—3,5	≤0,5 Al
0X17H7T **	≤0,05	≤0,6	0,8—1,2	16,5—17,5	6,5—7,5	0,85—1,20	—	≤0,5 Al
0X17H13T **	≤0,05	≤0,6	0,8—1,2	12,5—14,0	6,0—7,5	0,75—1,10	—	≤0,5 Al
Аустенитные сплавы, упрочняемые дисперсионным твердением								
36HXTЮ	≤0,05	≤0,5	0,8—1,2	11,5—13,0	35—37	2,7—3,2	—	0,9—1,2 Al
36HXTЮM5	≤0,05	≤0,5	0,8—1,2	12,5—13,5	35—37	2,7—3,2	4,0—6,0	1—1,3 Al
36HXTЮM8	≤0,05	≤0,5	0,8—1,2	11,5—13,0	35—37	2,7—3,2	7,0—9,0	0,9—1,2 Al
70HXMБЮ *	≤0,06	≤0,3	0,2—0,7	14,0—16,0	Осн	—	2,5—3,5	0,7—1,3 Al 8,0—9,0 Nb

* По ТУ 14 222-26-73

** По ТУ 14-1-193-72

(см. табл. 78). Пружины из этих сталей изготавливают методами холодной (или горячей) навивки или изгиба, а затем закалывают при 1000—1050° С с охлаждением в воде или масле и далее проводят отпуск при 300—350° С (если пружины работают при климатических температурах) и при 500—550° С (если они работают при нагреве). В первом случае сталь 30X13 имеет следующие характеристики механических свойств: $\sigma_B = 180$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2} = 135$ кгс/мм²; $\sigma_{пц} = 120$ кгс/мм²; $\psi = 45\%$ и $\delta = 10\%$, а после более высокого отпуска (500° С) $\sigma_B = 185$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2} = 150$ кгс/мм²; $\sigma_{пц} = 125$ кгс/мм²; $\psi = 35\%$ и $\delta = 11\%$.

У высокохромистых сталей 30X13 и 40X13 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 30X13 и 40X13, особенно тех, которые изготавливают методами горячей деформации и закалывают с нагревом в печах без защитной атмосферы, необходимы шлифовка и полирование поверхности. Более повышенная коррозионная стойкость, но при снижении прочности, достигается на стали с повышенным содержанием хрома (14X17H2). После закалки при 1000° С с охлаждением на воздухе и отпуска при 300—350° С $\sigma_B = 130$ кгс/мм², $\delta = 10\%$ и $a_n = 1,6$ кгс·м/см².

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 09X15H8Ю, 09X17H7Ю1, 08X17H5МЗ, 0X17H7ГТ, 0X7H13ГТ. 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 у практически безуглеродистых мартенситностареющих сталей, упрочняемых закалкой и отпуском (старение). Стали типа Н10Х12Д2ТБ, Н4Х12К15М4Т по прочности и коррозионной стойкости превосходят стали 30X13, 40X13, а также 14X17H2.

У стали типа Н10Х12Д2ТБ ($\leq 0,03\%$ С; $\leq 0,1\%$ Si; $\leq 0,1\%$ 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 характеристики технических свойств: $\sigma_B = 180$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2} = 170$ кгс/мм²; $\sigma_{0,002} = 130$ кгс/мм²; $\delta = 10\%$, а сталь типа Н4Х12К15М4Т ($\leq 0,02\%$ С; 11,5% Cr; 4% Ni; 14,5% Co; 4,1% Mo; 0,8% Ti) после закалки при 950° С, обработки холодом при —70° С (16 ч) и отпуска (старения) при 550° С (6 ч) $\sigma_B = 170$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2} = 158$ кгс/мм²; $\sigma_{0,002} = 125$ кгс/мм² и $\delta = 12\%$.

Эти стали устойчивы в морской воде и окислительных средах.

Упругие элементы из этих сталей можно изготавливать методами холодной штамповки из закаленных заготовок, а затем уже подвергать упрочняющему старению (отпуску). Возможен также и другой способ — горячая деформация (штамповка), а затем закалка и старение.

Немагнитные пружинные стали и сплавы. Более высокая коррозионная стойкость в сочетании с немагнитностью и отсутствием склонности к хрупким разрушениям характеризует аустенитные стали.

Широко применяют аустенитные стали типа 18-8 или 18-10, упрочняемые после закалки сильной пластической деформацией, в процессе которой, особенно при низких температурах, может образовываться мартенсит деформации, что увеличивает степень упрочнения, но в то же время делает сталь ферромагнитной.

Обычно стали этой группы, например наиболее типичную 08X18H10T, используют для изготовления пружин в виде проволоки или ленты.

Прочность проволоки тем больше, чем меньше диаметр или толщина. Так, при диаметре 8,01 мм $\sigma_B = 140 \div 160$ кгс/мм² и $\delta \geq 20\%$, а при диаметре 0,11—0,71 мм $\sigma_B = 175 \div 205$ кгс/мм² и число скручиваний не менее 4.

На полуфабрикатах (лента или проволока) из стали типа 18-8 или 18-10 диаметром или толщиной более 10 мм нельзя получить большие обжатия и соответственно повышенную прочность. Поэтому из этих сталей не изготавливают пружин больших сечений.

Технология изготовления пружин из коррозионностойких сталей указанного типа состоит из следующих операций: навивки, отпуска (обычно при 450° С), заневоливания и полирования.

При конструировании упругих элементов из стали 08X18H10T и 12X18H9T рекомендуется принимать модуль нормальной упругости равным $19 \cdot 10^3$ кгс/мм², модуль сдвига 7000 кгс/мм²; допускаемые напряжения * для пружин узлов с неограниченной долговечностью — 60—80 кгс/мм², а с ограниченной — 85—120 кгс/мм².

В тех случаях, когда нужна полная немагнитность в сильноупрочненном состоянии, применяют также после сильной деформации стали 17X18H9 и 37X12H8Г8МФБ. После навивки пружин производится отпуск, повышающий их работоспособность для первой стали при 450° С, а для второй — при 500° С.

Когда необходимо изготавливать немагнитные и коррозионностойкие пружины и другие упругие элементы сложной формы методами холодной пластической деформации с большим обжатием, глубокой и сложной вытяжкой, например, сифоны, гофрированные мембраны и т. п., используют аустенитные дисперсионно-твердеющие, т. е. упрочняемые термической обработкой сплавы. В закаленном аустенитном состоянии эти сплавы высокопластичны и легко деформируются давлением, а затем после деформации в процессе отпуска (старения) упрочняются. Эти сплавы упрочняются и в больших сечениях и поэтому могут быть применены для изготовления сравнительно крупных по размерам упругих элементов. К числу таких сплавов на железо-никель-хромовой основе относятся 36НХТЮ, 36НХТЮМ5 и 36НХТЮМ8 (см. табл. 77). Помимо повышенной коррозионной стойкости указанные сплавы также отличаются теплостойкостью: 36НХТЮ — до 200° С, 36НХТЮМ5 — до 250—300° С и 36НХТЮМ8 — до 300—350° С.

Термическая обработка и свойства этих сплавов указаны в табл. 78.

Для упругих элементов, у которых должна быть наиболее высокая коррозионная стойкость, особенно в окислительных средах, применяют сплавы на никель-хромовой основе 70НХМБЮ и 47ХНМ. У первого высокая коррозионная стойкость и теплостойкость, его можно использовать до 500—550° С. Термическая обработка и свойства этих сплавов приведены в табл. 78.

* Верхний предел — для проволоки $\varnothing$ 0,2 мм, а нижний — для $\varnothing$ 8 мм

78. Характеристики механических свойств и режимы термической обработки аустенитных сплавов *

Сплав	Режим	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	$\sigma_{0,005}$, кгс/мм ²	δ , %	HB
36НХТЮ	Закалка при 950° С и старение при 675° С (4 ч)	115—125	80—100	60—70	14—18	330—350
36НХТЮМ5	Закалка при 1000—1050° С и старение при 750° С (4 ч)	125—140	90—110	70—80	8—10	400—420
36НХТЮМ8'	Закалка при 980—1000° С и старение при 750° С (4 ч)	140—150	110—115	80—90	6—7	440—450
70НХМБЮ	Закалка при 1150° С и старение при 750° С (5 ч)	135—160	120—140	100—120	8—17	HRC 44—46
47ХНМ	Закалка при 1250° С и старение при 700—725° С (5 ч)	135—145	125—135	115—120	5—10	440—430

* См справочник «Прецизионные сплавы» М., «Металлургия», 1974, с. 442.

79. Химический состав (%) коррозионностойких, немагнитных и высокопрочных пружинных сплавов на Co—Cr—Ni-основе (ГОСТ 10994—74)

Сплав	C	Si	Mn	Co	Ni	Cr	Mo	W	Al	Ti
40КХНМ	0,07—0,12	≤0,5	1,8—2,2	39—41	15—17	19—21	6,4—7,4	—	—	—
40КХНМВ	0,09—0,11	≤0,5	1,8—2,2	39—41	14—17	18—20	3,0—4,0	3,5—4,5	—	—
40КНХМВТЮ	≤0,05	≤0,5	1,8—2,2	39—41	18—20	11,5	3,0—4,0	6—7	0,2—0,5	1,5—2,0

Для упругих элементов малых сечений и простой формы, но от которых требуется очень высокая прочность ($\sigma_B \geq 250 \div 300$ кгс/мм²), высокая усталостная прочность 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. 79. 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. 80.

80. Характеристики механических свойств и режимы упрочняющей обработки коррозионностойких, немагнитных и высокопрочных пружинных сплавов на основе системы Co—Cr—Ni *

Сплав	Режим обработки	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кгс/мм ²	$\sigma_{0.005}$, кгс/мм ²	δ , %	НV
40КХНМВ	Закалка при 1100—1150° С, деформация 80—85%, старение при 450—500° С (3 ч), проволока $\varnothing \leq 100$ мкм	320—380	240—300	185—195	—	700—800
40КХНМ	Закалка при 1100—1150° С, деформация, старение при 400—450° С (4 ч)	250—270	230—250	170	3—5	600—700
40КНХМВ ТЮ	Закалка при 1100—1150° С, холодное волочение с обжатием 85% и старение при 500—550° С (4 ч)	200—220	180—200	150—160	4—6	550—600

* См справочник «Прецизионные сплавы», М., «Металлургия», 1974, с. 442.

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 железо-никель-хромовой основе и упрочняются в результате термической и термомеханической обработки и старения. Составы и упрочняющие обработки указаны в табл. 81 и 82.

81. Химический состав (%) сплавов с низким и постоянным термопластическим коэффициентом (ГОСТ 10994—64)

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	0,4—0,8
42НХТЮА	≤0,05	0,5—0,8	0,4—0,8	41,5—43,5	4,9—5,7	2,2—3,0	0,5—1,0
44НХТЮ	≤0,05	0,5—0,8	0,5—0,8	43,5—45,5	5,2—5,8	2,2—2,7	0,5—1,0
36НХ11 *	0,15—0,25	0,2—0,4	0,3—0,6	35,5—37,5	10,5—11,5	—	—

* По ТУ 14-1-572—73

82. Характеристики механических свойств и режимы упрочняющей обработки сплавов с постоянным и низким термоэластическим коэффициентом

Сплав	Режим	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	$\sigma_{0,005}$, кгс/мм ²	δ , %	НВ
42НХТЮ	Закалка при 910°С, старение при 600°С	120—125	80—100	60—70	10—15	320—350
42НХТЮА	Закалка при 910°С, холодная пластическая деформация с обжатием 75%, старение при 700°С	130—140	—	—	5—6	—
44НХТЮ	Закалка при 910°С и старение при 600°С (3 ч) . .	120	80—90	60—65	10—15	300—320
36НХ11	Закалка, холодная пластическая деформация и старение при 500°С	130	120	—	—	—

Сплавы 42НХТЮ, 42НХТЮА и 36НХ11 имеют постоянный модуль упругости при температуре до 100° С, 44НХТЮ — до 200° С. Сплав 36НХ11 отличается от других заметно более высокой коррозионной стойкостью.

Высокоэлектропроводные сплавы. К этой группе относятся бериллиевые бронзы, фосфористая бронза и некоторые другие, указанные на стр. 431—440.

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СТАЛИ

При создании машин и механизмов с минимальной массой часто бывает необходимо применять высокопрочные стали. Несмотря на повышенную склонность к некоторым типам хрупких разрушений, высокопрочные стали при соблюдении определенных требований к конструированию и технологии могут вполне надежно применяться для изготовления весьма ответственных нагруженных деталей. Об этом свидетельствует большой опыт по их применению в СССР и за рубежом.

Кроме высокопрочных среднелегированных конструкционных сталей за последние годы довольно широко применяют высокопрочные нержавеющие стали, имеющие при той же прочности значительно большую вязкость и ряд важных технологических преимуществ. Кроме того, весьма перспективны высокопрочные мартенситностареющие стали.

Среднелегированные стали

Предел прочности и другие механические и технологические свойства этих сталей определяются в основном содержанием в них углерода. Легирующие элементы увеличивают прокаливаемость стали, т. е. максимальную толщину детали, при которой происходит закалка с образованием мартенситной структуры во всем сечении. В некоторой мере легирующие элементы способствуют увеличению вязкости и пластичности стали. Более существенное влияние на вязкость стали при той же прочности может оказать металлургическое качество металла, характеризующееся макроструктурой и плотностью слитка, а также величиной ликвационной неоднородности, чистотой по неметаллическим включениям и содержанием вредных примесей и газов.

Предел прочности стали после закалки в масле и низкого отпуска (200—250° С) при полной прокаливаемости в зависимости от содержания углерода примерно равен, кгс/мм²: 0,25% С — 160; 0,30% С — 180; 0,35% С — 190; 0,40% С — 200. После низкотемпературной изотермической закалки предел прочности на 10—15 кгс/мм² ниже.

Легирующие элементы различным образом влияют на свойства среднелегированных высокопрочных сталей.

Никель существенно увеличивает прокаливаемость, повышает сопротивление хрупкому разрушению (сопротивлению отрыву), понижает температуру хладноломкости, повышает вязкость в направлении, поперечном по отношению к волокну, способствует мелкозернистости стали.

Кремний замедляет процесс разупрочнения при отпуске, увеличивает прокаливаемость, существенно улучшает механические свойства при изотермической закалке.

Марганец существенно увеличивает прокаливаемость.

Хром увеличивает прокаливаемость, способствует мелкозернистости

Молибден, вольфрам существенно увеличивают прокаливаемость, способствуют мелкозернистости стали и повышению свойств в попереч-

ном направлении, препятствуют хрупкости, возникающей при медленном охлаждении в процессе отжига.

Чрезмерное легирование не улучшает механических свойств высокопрочных сталей.

С увеличением содержания углерода и легированности ухудшаются технологические свойства: сталь труднее отжигается и хуже механически обрабатывается, ухудшается свариваемость, увеличивается склонность к образованию холодных сварочных трещин, труднее исправляется перегрев стали при горячей деформации.

Из высокопрочных среднелегированных сталей следует применять стали с минимальным содержанием углерода (но достаточным для получения нужной прочности) и минимальным легированием, достаточным в то же время для обеспечения полной прокаливаемости в наиболее массивных сечениях детали. При этом желательно применять никеле-содержащие марки.

Неполная прокаливаемость может привести к потере не только прочности, но и вязкости.

В качестве высокопрочных сталей можно применять любые конструкционные стали, подвергнутые закалке и низкому отпуску. При этом весьма желательно, чтобы сумма содержания хрома, марганца, кремния и никеля была не ниже 2,5%, а при легировании дополнительно молибденом — не ниже 1,5—2,0%.

В табл. 83 приведены марки среднелегированных высокопрочных сталей, наиболее широко применяемые в отечественном машиностроении.

Самое широкое применение получили сталь 30ХГСА и ее модификация 30ХГСАМА, обладающие хорошим сочетанием механических и технологических свойств. Эти стали много лет с успехом используют для изготовления весьма ответственных деталей, в том числе сварных.

Для деталей крупного сечения (более 100 мм) при необходимости большой прокаливаемости целесообразно применять сталь 30Х2ГН2СВМА. Эту же сталь можно применять для деталей меньшей толщины, если необходима закалка на воздухе (например, для фиксации размеров при охлаждении и устранении закалочных деформаций), а также для деталей, работающих при повышенной температуре (до 300—400° С). В качестве более дешевых высокопрочных сталей, но имеющих сравнительно небольшую прокаливаемость, можно применять стали 30ХГСА, 35ХГС, 33ХС и 38ХС.

Для деталей, обрабатываемых на $\sigma_b = 180-200$ кгс/мм², применяют сталь 40ХГН3ВА после изотермической закалки.

Основные виды термической обработки для получения высокой прочности — закалка в масле или изотермическая низкотемпературная закалка с последующим низким отпуском. При изотермической закалке по сравнению с закалкой в масле несколько понижается предел прочности и текучести, однако увеличивается вязкость и примерно в 2—3 раза уменьшаются поковки.

Модуль упругости высокопрочных сталей примерно такой же, как у сталей малой и средней прочности (~19 000 кгс/мм²), поэтому упругая деформация деталей с увеличением уровня прочности изменяться не будет. Это нужно также учитывать при изготовлении деталей, работающих на сжатие.

При малой жесткости (большое отношение длины к радиусу инерции поперечного сечения) критические сжимающие напряжения, вызывающие потерю устойчивости, определяются согласно формуле Эйлера

83. Среднелегированные стали, используемые для обработки на высокую прочность, и их свойства

Сталь	σ_B , кгс/мм ²	Термическая обработка
30ХГСНА и 30ХГСНМА	140—160	Изотермическая закалка в жидкой среде с температурой 280—320° С (1 ч)
	150—170	Изотермическая закалка в жидкой среде с температурой 270—300° С (1 ч)
	160—185	Изотермическая закалка в жидкой среде с температурой 240—280° С (1 ч)
	170—190	Закалка в масле, отпуск при 220° С
25Х2ГНТА	150—165	Закалка в масле, отпуск при 220° С
30Х2ГН2СВМА	160—185	Закалка в масле или на воздухе, отпуск при 220° С
40ХГСНЗВА	180—200	Изотермическая закалка в жидкой среде с температурой 240—260° С (3 ч)
30ХГСА	Тот же что и у стали 30ХГСНА	Режимы закалки те же, что и у стали 30ХГСНА, но при значительно меньшей прокаливаемости (при изотермической закалке 15 мм)
33ХС	160—175	Изотермическая закалка в жидкой среде с температурой 240—280° С
38ХС	170—190	Изотермическая закалка в жидкой среде с температурой 240—280° С
35ХГСА	165—185	Изотермическая закалка в жидкой среде с температурой 240—280° С

модулем упругости E . В этих случаях применение высокопрочных сталей не оправдано, так как никаких преимуществ по прочности по сравнению с другими сталями не будет.

При большой жесткости (малое отношение длины к радиусу инерции поперечного сечения) величина критических сжимающих напряжений в значительной степени определяется пределом текучести, и поэтому применять высокопрочные стали в этом случае целесообразно (рис. 21).

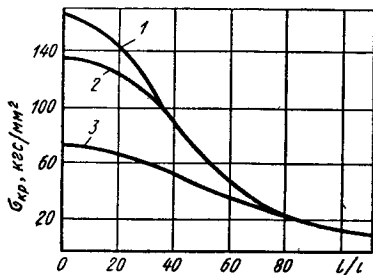


Рис. 21. Прочность ($\sigma_{кр}$) при продольном сжатии труб с шаровыми опорами из стали 30ХГСА различной жесткости: 1 — $\sigma_B = 165$ кгс/мм²; 2 — $\sigma_B = 135$ кгс/мм²; 3 — σ_B ; l — длина трубы, i — радиус инерции сечения трубы

На основании многолетней практики наиболее рациональным уровнем предела прочности высокопрочных сталей для различных деталей машин можно считать $\sigma_B = 165 \div 185$ кгс/мм² при закалке в масле и низком отпуске и $\sigma_B = 160 \div 180$ кгс/мм² при изотермической закалке. Применять стали с уровнем предела прочности $\sigma_B = 180 \div 200$ кгс/мм² можно только для сравнительно ограниченного круга деталей и при значительно более жестких требованиях к конструированию и технологии изготовления.

Термическая обработка

На рис. 22 приведены кривые изотермического распада аустенита сталей 30ХГСНА и 40ХГСНЗВА. Для улучшения механической обрабатываемости стали 30ХГСНА применяют неполный отжиг: нагрев до 780°C , охлаждение с печью до 650°C , выдержку в течение 5 ч, далее охлаждение с печью или на воздухе. Для смягчения стали 40ХГСНЗВА применяют отпуск при 670 — 690°C с выдержкой от 4 до 16 ч.

Максимальная вязкость закаленной высокопрочной стали получается при низком отпуске 200 — 230°C . Повышение температуры отпуска сталей 30ХГСНА и 40ХГСНЗВА выше 300°C не рекомендуется из-за понижения ударной вязкости (отпускная хрупкость 1-го рода). Поэтому при закалке в масле регулировать термической обработкой уровень прочности в пределах его высоких значений почти невозможно.

В СССР для упрочнения высокопрочных сталей широко применяют изотермическую закалку, в результате которой образуется структура нижнего бейнита или его сочетания с мартенситом. В этом случае, изменяя температуру ванны охлаждения для изотермической выдержки, можно регулировать уровень прочности стали (см. табл. 84). Однако закалка в ванне со слишком высокой температурой, при которой увеличивается устойчивость аустенита (см. рис. 22), приводит к хрупкости стали. Это объясняется интенсивным перераспределением углерода в стали и обогащением углеродом нераспавшихся в процессе изотермической выдержки участков аустенита, которые при последующем охлаждении до 20°C превращаются в участки высокоуглеродистого хрупкого мартенсита. Хрупкость стали при чрезмерном повышении темпе-

ратуры ванны во время изотермической заковки проявляется прежде всего в уменьшении поперечного сужения, а затем в резком падении ударной вязкости. По изменению твердости такая хрупкость не обнаруживается, поэтому нужно весьма тщательно контролировать и выдерживать заданную инструкцией температуру охлаждающей ванны.

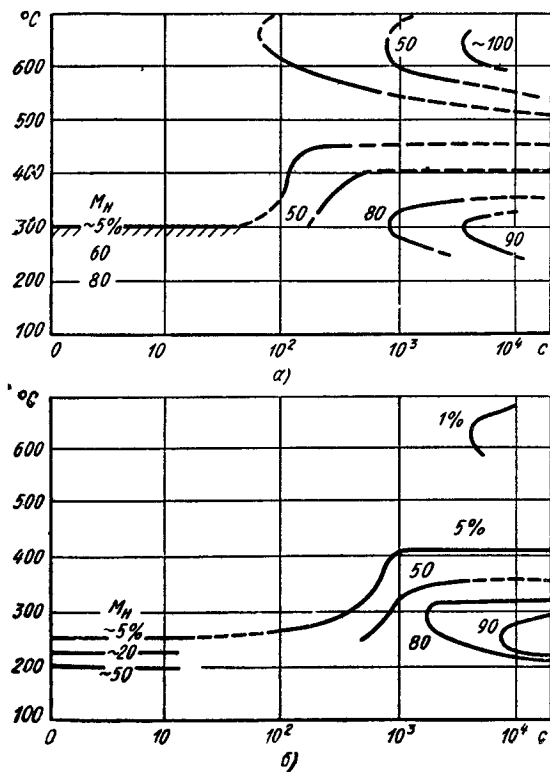


Рис. 22. Диаграмма изотермического распада аустенита сталей (Л. М. Певзнер, Т. Д. Кубышкина):

а — 30XГСНА и б — 40XГСНЗВА (ЭИ643)

В качестве среды для заковки можно использовать селитровые и щелочные ванны, однако для увеличения прокаливаемости и во избежание местных перегревов селитровых ванн желательно их оборудовать перемешивающими устройствами типа механических шнеков или мешалок; могут применяться барбатыры, через которые пропускают предварительно осушенный воздух. При нагреве деталей под заковку в соляных ваннах нельзя допускать раскисления ванн желтой кровяной солью $K_4Fe(CN)_6$, применяемой обычно для раскисления охла-

ждающих ванн при светлой изотермической закалке. При раскислении $K_4Fe(CN)_6$ ванны нагрева под закалку происходит насыщение азотом тонкого поверхностного слоя, что может привести к хрупкому разрушению деталей, имеющих концентраторы напряжений.

Требования при конструировании и разработке технологии

Для надежной работы деталей из высокопрочных сталей необходимо проектировать их с максимально возможными радиусами переходов. С увеличением концентрации напряжений сопротивление многоциклового и малоциклового усталости значительно уменьшается (рис. 23).

Важнейшие факторы, определяющие надежность деталей из высокопрочных сталей, — шероховатость и состояние поверхности. «Черная»

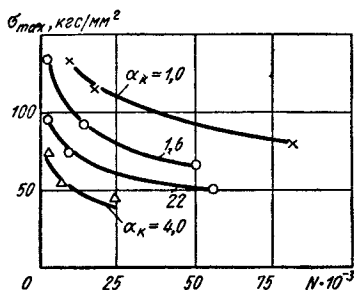


Рис. 23. Зависимость числа разрушения образцов с надрезом из стали 30ХГСНА; $\sigma_B = 175$ кгс/мм² при испытании на малоцикловую усталость от концентрации напряжений (α_K)

[С. И. Кишкина, Н. В. Анисимова]

необработанная после горячей штамповки поверхность во многих случаях допускается, однако места концентрации напряжений обязательно необходимо механически обрабатывать до удаления всего окисленного при горячей деформации слоя.

Важное значение для выносливости деталей имеет шероховатость поверхности после механической обработки. При этом следует учитывать, что наиболее неблагоприятная грубая поверхность понижает выносливость в том случае, когда риски от механической обработки направлены перпендикулярно потоку растягивающих напряжений. В особенности большое влияние оказывает шероховатость поверхности

на выносливость сталей с уровнем прочности около 200 кгс/мм².

Практика показала, что наиболее рациональными требованиями к шероховатости поверхности деталей из высокопрочных сталей следующие. $Ra = 2,5 \div 1,25$ — для мест значительной концентрации напряжения, в том числе поверхности отверстий; $Rz = 20 \div 10$ — для остальных мест действия растягивающих напряжений; $Rz = 40 \div 20$ — для сжатых зон деталей и $Rz = 80 \div 20$ — для участков деталей, работающих на сдвиг и продольную устойчивость. В первых двух случаях класс шероховатости может быть несколько понижен при совпадении направления рисков от механической обработки и действия растягивающих напряжений.

Один из наиболее действенных способов увеличения долговечности работы деталей из высокопрочных сталей — поверхностный наклеп, причем его эффективность возрастает с увеличением предела прочности стали. Для этих целей можно применять дробеструйный наклеп, виброупрочнение, пневмодинамическое упрочнение, гидрогалтовку дробью, обкатку роликами, алмазное выглаживание, раскатку отверстий, наклеп пескоструйной обдувкой.

Поверхностный наклеп увеличивает сопротивление многоциклового и малоциклового усталости, в особенности при коррозионной усталости.

Наклеп поверхности повышает сопротивление коррозии под напряжением и устраняет появление трещин на шлифованных поверхностях при гальванических обработках.

Влияние поверхностного наклепа на свойства высокопрочных сталей показано в табл. 84 и 85.

84. Влияние поверхностного наклепа на малоциковую усталость гладких образцов ($Ra = 1,25-0,63$) различных сталей (по данным Н. В. Анисимовой, С. И. Кишкиной)

Сталь	σ_B , кгс/мм ²	Максимальные напряжения цикла, кгс/мм ²	Наклеп	Число циклов до разрушения
30ХГСНА	170	136	Дробеструйный . .	24 600
		136	Без упрочнения . .	7 400
40ХГСН3ВА	180	136	Дробеструйный . .	22 300
		136	Без упрочнения . .	6 900
Н18К9М5Т	215	136	Вибронаклеп . . .	25 100
		136	Без упрочнения . .	7 400
1Х15Н4АМ3	155	117	Вибронаклеп . . .	23 000
		117	Без упрочнения . .	10 240
1Х15Н4АМ3	155	100	Вибронаклеп . . .	82 220
		100	Без упрочнения . .	19 870

85. Влияние поверхностного упрочнения на коррозионную усталость σ_{-1} высокопрочных сталей (по данным Э. М. Радецкой, С. И. Кишкиной)

Состояние поверхности	σ_{-1} , кгс/мм ² , стали 30ХГСНА		σ_{-1} , кгс/мм ² , стали 40ХГСН3ВА	
	Воздух	Водопродная вода	Воздух	Водопродная вода
Шлифованная	60	8	70	12
Шлифованная (виброшлифованная)	73	20	78	25
После обдувки металлическим песком	67	40	75	40
После наклепа дробью	70	50	83	60
После вибронаклепа	70	65	85	—
После обкатки роликом	80	75	78	70
После алмазного выравнивания	78	76	—	—

Поверхностный наклеп в значительной мере «облагораживает» сравнительно грубую поверхность после операций механической обработки, поэтому применять его экономически выгодно. Положительное влияние поверхностного наклепа объясняется созданием на поверхности благоприятных сжимающих напряжений, упрочнением поверхностного слоя в результате наклепа и улучшением, как правило, рельефа поверхности.

Наиболее эффективно благоприятное влияние поверхностного наклепа при работе высокопрочных сталей в условиях коррозионно-актив-

ной среды. Предел выносливости при испытании в воде на изгиб с вращением в результате поверхностного наклепа возрастет в несколько раз (см. табл. 85).

Предварительный поверхностный наклеп перед гальваническим хромированием восстанавливает сопротивление усталости, которое резко понижается в результате хромирования. Так, например, числа циклов при испытании на выносливость гладких образцов стали 30ХГСНА ($\sigma_B = 170$ кгс/мм²) при растяжении с максимальными напряжениями цикла 100 кгс/мм², по данным С. И. Кишкиной и Н. В. Анисимовой, следующие:

Обработка поверхности	Шлифование $Ra =$ $= 1,25 \Rightarrow$ $\Leftarrow 0,63$	Шлифование $Ra =$ $= 1,25 \Rightarrow$ $\Leftarrow 0,63$ и хромирование	Точение $Ra =$ $= 1,25 \Rightarrow$ $\Leftarrow 0,63$ и хромирование	Шлифование $Ra =$ $= 1,25 \Rightarrow$ $\Leftarrow 0,63$, гидропескоструйная обработка $Rz =$ $= 20 \Rightarrow 10$, хромирование	Шлифование $Ra =$ $= 1,25 \Rightarrow$ $\Leftarrow 0,63$, наклеп дробью и хромирование
Число циклов	50 129	6 948	8 358	13 256	70 026

Толщина хромированного слоя везде примерно 60 мкм.

Поверхностный наклеп перед хромированием высокопрочных сталей, кроме того, устраняет опасность образования мельчайших трещин под слоем хрома. Такие трещины появляются иногда в результате действия растягивающих поверхностных шлифовочных напряжений и наводороживания стали. Создавая значительные сжимающие напряжения на поверхности детали, поверхностный наклеп предотвращает возможность возникновения значительных растягивающих напряжений при нарушении режима шлифования.

Детали из высокопрочных сталей чувствительны к водородной хрупкости и коррозии под напряжением. Эти два вида хрупкости проявляются большей частью в так называемых процессах замедленного разрушения при действии постоянных напряжений: либо эксплуатационных, либо технологических.

В детали из среднелегированных сталей водород попадает, как правило, из ванны для гальванических покрытий, так как электролитическое осаждение металла на поверхности стали (на катоде) сопровождается адсорбцией и абсорбцией водорода. При этом поверхностные трещины или микротрещины могут возникнуть даже при самом гальваническом покрытии, если на поверхности детали имеют место растягивающие напряжения. Большей частью такие трещины возникают при эксплуатации из-за постоянно действующих растягивающих, эксплуатационных или технологических напряжений.

Наименьшее наводороживание стали происходит при хлористо-аммонийном кадмировании, значительно большее — при цианистом кадмировании и цинковании. Отпуск при 200° С, который обычно применяют для устранения или уменьшения действия водорода, приводит практически к обезводороживанию хромированных деталей. Однако цинк и кадмий препятствуют процессу обезводороживания, и поэтому

уменьшение водородной хрупкости при отпуске кадмированных и оцинкованных деталей происходит главным образом в результате диффузионного выравнивания водорода по толщине детали и уменьшения в связи с этим его концентрации в поверхностных слоях. Практика показала, что из всех видов гальванических покрытий для высокопрочных сталей допустимы только хромирование гладких поверхностей и хлористо-аммонийное кадмирование. Отпуск для обезводороживания при 200° С для хромированных деталей достаточно производить в течение 2 ч, а для кадмированных — 12—24 ч.

Предварительная пескоструйная обработка или другие виды поверхностного наклепа существенно уменьшают чувствительность высокопрочной стали всех марок к водородной хрупкости.

Детали из высокопрочных сталей следует тщательно защищать от коррозии под напряжением, например путем грунтования с горячей сушкой и металлизации цинком. Перед грунтованием нужно применять фосфатирование, а после металлизации — окраску эмалями. Трущиеся поверхности необходимо защищать периодически добавляемой смазкой, а в ряде случаев — хромированием. Болты несъемные лучше всего ставить на сыром грунте, следует окрашивать головки и выступающую резьбовую часть. Допускается применять хлористоаммонийное кадмирование.

Особое внимание должно быть уделено защите от коррозии внутренних, плохо вентилируемых поверхностей, в особенности разных щелей, возникающих при сварке замковых соединений или узлов с подкладными кольцами.

Основной метод борьбы с коррозией внутренних полостей — их герметизация. Иногда внутренние поверхности защищают герметиками.

Поверхностный наклеп, в том числе пескоструйная обработка, существенно увеличивает сопротивление высокопрочных сталей коррозии под напряжением.

С увеличением уровня прочности увеличивается чувствительность стали к хрупкости при смачивании расплавленными легкоплавкими металлами. При этом разрушения происходят макроразрывом при контакте напряженной стали с расплавленным кадмием, оловом, свинцом, литием, цинком и различными припоями независимо от того, действуют ли на стальную деталь внешние или внутренние напряжения. Если затвердевшие легкоплавкие покрытия не образовали трещин при расплавлении, то на свойства высокопрочных сталей они почти не влияют. Для борьбы с таким видом хрупкости необходимо строго выполнять два правила: 1) все стальные детали должны работать при температурах ниже (с определенным запасом) температуры плавления покрытий; 2) пайку деталей следует производить в ненапряженном состоянии.

Сварка и сварные соединения

Несмотря на повышенное содержание углерода, среднелегированные высокопрочные стали могут свариваться с высокой степенью надежности. Наибольшая опасность при сварке заключается в склонности этих сталей к образованию холодных сварочных трещин в шве и околошовных зонах. Такие трещины возникают при появлении в районе сварного шва неотпущенного мартенсита с сравнительно высоким содержанием углерода. Трещины часто появляются не сразу, а спустя некоторое время после окончания сварки.

Для исключения сварочных трещин сварку высокопрочных среднелегированных сталей следует вести, как правило, с подогревом до 200—250° С. Немедленно после сварки нужно помещать детали в печь с температурой 650° С и прогревать их там не менее 15 мин. При этом полностью исключается появление мартенситных структур при охлаждении.

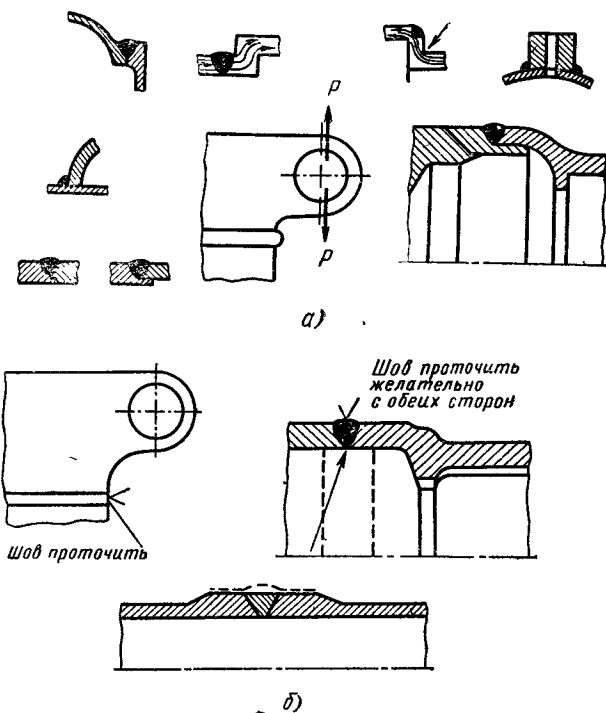


Рис. 24. Различные виды неправильно (а) и правильно (б) спроектированных сварных соединений

Высокопрочные стали можно сваривать аргонодуговой, ручной дуговой и автоматической сварками под слоем флюса. Контактные виды сварки, как правило, не следует применять из-за трудности предотвращения сварочных трещин и защиты нахлесточных соединений от коррозии.

Для уменьшения опасности образования сварочных трещин при выборе среднелегированных сталей нужно отдавать предпочтение сталям менее легированным и содержащим меньшее количество углерода. Однако длительный опыт показал возможность надежного производства и эксплуатации сварных деталей из сталей 30ХГСНА, 30ХГСНМА, 30Х2ГН2СВМА, 40ХГСНЗВА.

На работоспособность сварных соединений из высокопрочных сталей большое влияние оказывает форма сварного шва. Снятие усиления шва, как показано на рис. 24, приводит примерно к трехкратному увеличению долговечности при малоциклового усталости. Нельзя эксплуатировать конструкции, где были допущены неперехваты. Это неизбежно приводит к резкой потере долговечности. Наиболее надежно работают сварные швы, удаленные от места поворота силового потока. В зоне сварных швов не должно быть перепадов сечений, которые неизбежно приводят к концентрации напряжений. Примеры правильных и неправильных конструкций сварных соединений из высокопрочных сталей приведены на рис. 4.

Расчетные (разрушающие) напряжения на сварные швы в изделиях из высокопрочных сталей следует понижать до уровня не более 120 кгс/мм^2 при изгибе и 100 кгс/мм^2 при растяжении. Поэтому зона сварного шва должна быть усилена по сравнению с основным металлом. Усиление должно быть достаточно широким, с плавными переходами.

В отдельных случаях допускается сварка элементов, предварительно термически упрочненных. В этом случае в качестве присадочной проволоки рекомендуется использовать электроды из аустенитных сталей. Расчетный предел прочности должен быть не более $50\text{--}55 \text{ кгс/мм}^2$.

При сварке предварительно закаленных элементов предварительный подогрев и последующий нагрев после сварки производят при 200°C .

Интенсивно стареющая (мартенситностареющая) сталь Н18К9М5Т

За последние годы достигнуты серьезные успехи в разработке и освоении высокопрочных мартенситностареющих сталей, упрочняемых путем нагрева до $450\text{--}550^\circ \text{C}$. Основными достоинствами этих сталей являются способность упрочняться старением практически без поводки, значительно меньшая чувствительность, чем у среднелегированных высокопрочных сталей, к острым надрезам и трещинам, работоспособность до 450°C и хорошая свариваемость, в том числе и в упрочненном состоянии.

Мартенситностареющие стали содержат весьма малое количество углерода, максимально возможное количество никеля, а также во многих случаях молибден. В качестве элементов, вызывающих упрочнение при старении, большей частью используются Ti, Al, Cu, Mo и Co и в более редких случаях — Be и Si. Процесс упрочнения при старении заключается в образовании в мартенситной структуре сегрегаций в узлах дислокационной сетки, областей с упорядоченной структурой или весьма дисперсных выделений фаз, когерентно связанных с основной мартенситной структурой матрицы. Такими фазами могут быть NiTi, Ni₃Ti, NiAl, (NiFe)Al, Fe₃Mo, (FeNiCo)₃Mo и др.

Из высокопрочных мартенситностареющих наиболее широкое применение получила сталь Н18К9М5Т следующего состава: C $\leq 0,03\%$, Ni $\approx 18\%$, Co $\approx 9\%$, Mo $\approx 5\%$; Ti $\approx 0,5\text{--}0,6\%$.

Для деталей, изготавливаемых из листов и прутков малого сечения (до 30 мм), термическая обработка заключается в закалке с 820°C и старении при $480\text{--}520^\circ \text{C}$. Для деталей большей толщины необходимо применять сложную термическую обработку: закалку с 1200°C , двух или трех закалок с 940°C , закалку с 820°C и старение при 520°C .

Закалку желательно производить в воде, до потемнения поверхности, и дальше охлаждать деталь на воздухе. После закалки твердость стали $HRC\ 30$, и в этом состоянии сталь довольно легко механически обрабатывать. После старения твердость повышается до $HRC\ 52-53$. Типичные характеристики свойств стали в упрочненном состоянии следующие: $\sigma_B \approx 205\text{ кгс/мм}^2$; $\sigma_{0,2} \approx 195\text{ кгс/мм}^2$; $\delta_5 \approx 7-10\%$; $\psi \approx 45-58\%$; $a_K \approx 3-7\text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$; ударная вязкость образца с трещиной $a_{T.Y} = 0,8-1,0\text{ кгс}\cdot\text{м/см}^2$; предел прочности образца с надрезом радиусом $0,1\text{ мм}$ $\sigma_{B.H} = 270-280\text{ кгс/мм}^2$.

Сталь $H18K9M5T$ можно подвергать азотированию. При этом получается твердая и прочная сердцевина, позволяющая деталям выдерживать большие контактные и растягивающие нагрузки без разрушения азотированного слоя. Для минимального изменения размеров при азотировании целесообразно предварительное старение при температуре на $40-50^\circ\text{C}$ выше температуры азотирования. Режим азотирования: 520°C (50 ч), при этом глубина слоя $0,15-0,20\text{ мм}$; твердость поверхности $HRC\ 60$, а сердцевины $\sim HRC\ 48-49$.

Недостатки стали $H18K9M5T$ — сравнительно большая стоимость, сложная термическая обработка для деталей, изготовляемых из полуфабрикатов большой толщины, и повышенное сопротивление горячей деформации.

Коррозионностойкие стали

Слабостареющая сталь $08X15H5D2T$ содержит $C \leq 0,08\%$; $Cr \approx 15\%$; $Ni \approx 5\%$; $Cu \approx 2\%$; $Ti \approx 0,15-0,30\%$ (листы); $Ti \approx 0,03-0,15\%$ (прутки, поковки, штамповки и трубы). Сталь для прутков, поковок, штамповок и труб производят методом электрошлакового или вакуумнодугового переплава.

Непосредственно после закалки у стали $\sigma_B = 115-120\text{ кгс/мм}^2$ (прутки, штамповки) и $\sigma_B = 110\text{ кгс/мм}^2$ (листы). Отпуск при 350°C вызывает некоторое уменьшение, а старение при $420-450^\circ\text{C}$ — увеличение пределов прочности и текучести (табл. 86). При нагреве выше $450-500^\circ\text{C}$ прочность стали падает.

Наиболее целесообразная технология изготовления деталей из стали $08X15H5D2T$ следующая: предварительный отжиг при 650°C — $3-5\text{ ч}$, закалка штамповок, поковок, прутков или заготовок с 1000°C в воде* до потемнения поверхности с последующим охлаждением на воздухе. Далее следует отпуск при 350°C , полная механическая обработка (кроме посадочных мест), старение на $\sigma_B \geq 125\text{ кгс/мм}^2$ при $420-450^\circ\text{C}$.

Листы из этой стали поставляют в закаленном (нормализованном) состоянии и поэтому после формообразования подвергают только упрочняющему старению при 450°C . Для глубокой штамповки применяют нагрев заготовок до $950-1000^\circ\text{C}$, охлаждение до температуры не ниже 200°C , штамповку с охлаждением в штампе, последующее упрочнение старением при 450°C . Процессы старения происходят практически без поводок и коробления, что весьма важно для листовых деталей и механически обрабатываемых деталей сложной формы.

* Прутки $\varnothing$ до 30 мм и мелкие штамповки допускается закалывать на воздухе

86. Типичные характеристики механических свойств стали 08X15H5Д2Т

Полуфабрикат	Термообработка	σ_B	$\sigma_{0.2}$	δ_5	ψ	a_H	a_H при -70° С
		кгс/мм ²		%		кгс/см ²	
Прутки, штамповки	Закалка	118	70	14	65	20	15
	Закалка, отпуск 200° С . .	120	95	20	65	20	15
	Закалка, отпуск 350° С . .	113	97	18	70	18	13
	Закалка, старение 415— 450° С	130	110	18	58	14	6
	Отпуск 600—620° С (3 ч)	92	72	15	70	25	15
	Отжиг 650° С	100	80	15			
Листы, ленты	Закалка	120	140	10			
	Закалка, старение 450° С	140	130	11			
	Нагартовка 5—7%	128	115	7	—	—	—
	Нагартовка 5—7%, старе- ние 450° С	150	140	8			

У стали 08X15H5Д2Т хорошо сочетаются прочность и вязкость; это обеспечивает конструктивную надежность при работе весьма напряженных деталей. После отпуска при 600—625° С в течение 3 ч ее можно применять при криогенных температурах (до -196° С).

Сталь 08X15H5Д2Т хорошо сваривается в термически упрочненном состоянии без появления холодных или горячих сварочных трещин. При этом не нужен предварительный или последующий нагрев шва или сварной детали. В качестве присадочной проволоки для швов толщиной до 8 мм можно применять проволоку Св-Х15Н5Д2Т (Св-ЭП 410У-Ш). Наиболее желательно для швов всех толщин применять прочную и вязкую присадку Св-03Х12Н9М2С-ВИ (Св-ЭП 659А-ВИ). Прочность сварных соединений без последующей термической обработки $\sigma_B \geq 110$ кгс/мм². Ударная вязкость металла шва $a_H = 12 \div 17$ кгс·м/см² для присадки Св-03Х12Н9МГС-ВИ и $a_H \geq 7$ кгс·м/см² для присадки Св-Х15Н5Д2Т.

Основные виды сварки: аргонодуговая, точечная и роликовая. Возможна дуговая сварка аустенитным электродом.

Важнейшая особенность стали 08X15H5Д2Т — малые поковки при сварке, в том числе сложных крупногабаритных конструкций.

При сварке необходимы меры предосторожности: соблюдение нормальной защиты аргоном при аргонодуговой сварке, недопущение попадания на сварку влажного аргона или недостаточно осушенных электродов, что может привести к наводороживанию сварных швов.

Недостаток стали 08X15H5Д2Т — то, что зона металла, расположенная в нескольких миллиметрах от сварного шва, подвержена коррозии. Эту зону следует тщательно защищать от коррозии лакокрасочными покрытиями. Такая зона не образуется, когда предварительно перед сваркой производят отпуск при 600—650° С или детали после сварки подвергают закалке. Однако во втором случае старение нужно производить при 350—375° С на $\sigma_B \geq 110$ кгс/мм².

Последний метод термической обработки целесообразно использовать для баллонов, работающих длительно при больших газовых давлениях.

Во избежание хрупкости, связанной с окислением границ зерен на поверхности деталей при нагревах под горячую деформацию, черную поверхность следует удалять, желательно после закалки. Это относится ко всем деталям, изготовляемым из поковок, штамповок и горячекатаных прутков. Горячепрессованные профили и горячекатаные листы могут не подвергаться обработке поверхности при условии испытаний каждой партии на изгиб. При загибе на 90° после старения на $\sigma_B \geq 125$ кгс/мм² с радиусом, равным трем толщинам, на поверхности не должно быть трещин.

Коррозионностойкие стали переходного аустенитно-мартенситного класса 07X16H6 и 1X15H4AM3 соответственно содержат: C = 0,05÷0,09%; Cr ≈ 16,25%; Ni ≈ 6,25% и C ≈ 0,13%; N ≈ 0,07%; Cr ≈ 15%; Ni ≈ 4,5%; Mo ≈ 3%.

Стали этого класса после закалки имеют в основном аустенитную структуру. Упрочнения достигают обычно закалкой и обработкой холодом при $-(50 \div 70)^\circ \text{C}$. При этом образуются мартенсит и 20—25% остаточного аустенита, обеспечивающие высокую вязкость и пластичность стали. Стали этого класса выплавляются заданного фазового состава (количество мартенсита и аустенита)

Типичные свойства сталей 07X16H6 и 1X15H4AM3 приведены в табл. 87.

87. Типичные характеристики механических свойств коррозионностойких сталей переходного класса

Сталь, полуфабрикат	Термическая обработка	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	a_{II}	a_{IV}
		кгс/мм ²		%		кгс·м/см ²	
07X16H6, прутки, поковки	Закалка, обработка холодом при -70°C , отпуск при $250-400^\circ \text{C}$	130	115	20	70	14	8
07X16H6, листы, ленты	Закалка (мягкое состояние)	100	30	30			
	Закалка, обработка холодом при -70°C , отпуск при $250-400^\circ \text{C}$	120	90	23		16	9,5
1X15H4AM3	Закалка, обработка холодом при -70°C , отпуск при 200°C	160	125	20	60	15	8
	То же, но отпуск при 350°C	145	115	21	65	17	9

У обеих сталей хорошая коррозионная стойкость, в том числе и сопротивление коррозии под напряжением.

Сталь 1X15H4AM3 поставляют в виде поковок и штамповок, сталь 07X16H6 — в виде листа ленты, сварочной проволоки, прутков и штамповок.

Сталь 07X16H6 в мягком (закаленном) состоянии хорошо штампуется. Обе стали хорошо свариваются, без обязательного предварительного или последующего нагрева. Присадка для сварных швов, не подвергаемых термической обработке, 08X20H10Г6, для термически упрочняемых швов стали 07X16H6—проволока 07X16H6 или Св-03X12H9M2С, для 1X15H4AM3 — Св-Х15Н4АМЗ или Св-03X12H9M2С.

Для борьбы с водородом, содержащимся в стали в результате металлургического производства, рекомендуется все детали из прутков, поковок и штамповок, в особенности крупного сечения, а также детали, подвергающиеся действию постоянно приложенных напряжений, отпускать при 520° С в течение 10—20 ч в зависимости от сечения. Отпуск следует производить после отжига до закалки в минимальном сечении.

Весьма эффективно увеличивают усталостную прочность путем поверхностного наклепа. Черная поверхность на деталях, оставшаяся в результате нагрева под горячую деформацию, уменьшает сопротивление усталости, и поэтому ее необходимо удалять.

Стали переходного класса рекомендуется применять там, где нужно сочетание высокой прочности, вязкости, пластичности, свариваемости и коррозионной стойкости.

КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Общие сведения

Стойкость сталей и сплавов этого класса против электрохимической и химической коррозии (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной, солевой), межкристаллитной коррозии, коррозии под напряжением и др. определяется в первую очередь их составом.

Однако большое влияние на служебные свойства сталей и сплавов оказывают также термическая обработка, сварка, горячая пластическая деформация, качество поверхности металла и другие факторы.

В зависимости от основной структуры, полученной при охлаждении на воздухе после высокотемпературного нагрева, эти стали и сплавы подразделяют на следующие классы:

1) мартенситный — стали с основной структурой мартенсита (хромистые стали с 12—17% Cr, содержащие $>0,15$ С, специальные добавки Мо, W, V и небольшое количество Ni — до 3%);

2) мартенситно-ферритный — стали, содержащие в структуре кроме мартенсита не менее 10% феррита (хромистые стали с 13—18% Cr и низким содержанием С — до 0,15%, в ряде случаев с добавками Al, Ti, Ni, Si);

3) ферритный — стали, имеющие структуру феррита без $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ -превращений (хромистые стали с 13—30% Cr, низким содержанием С — до 0,15%, добавками Ti $\geq 0,5\%$, иногда также Nb, Si, Mo, Al);

4) аустенитно-мартенситный — стали, имеющие структуру аустенита и мартенсита, количество которых можно изменять в широких пределах (хромоникелевые стали, содержащие 12—18% Cr, 4—9% Ni, добавки Al, Mo и хромомарганцевоникелевые стали);

5) аустенитно-ферритный — стали, содержащие в структуре кроме аустенита не менее 10% феррита (хромоникелевые и хромомарганцевоникелевые стали с добавками Ti, Mo и других легирующих элементов);

6) аустенитный — стали, имеющие структуру аустенита (хромоникелевые стали с содержанием 18% Cr, 10% Ni и другие, нестабилизированные и стабилизированные Ti или Nb, в ряде случаев с добавками Mo, а также хромомарганцевоникелевые стали, в том числе с добавками N);

7) сплавы на никелевой основе с повышенным содержанием Mo, Cr и других элементов, имеющих структуру, подобную аустенитным сталям.

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали в соответствии с ГОСТами поставляют в виде следующего сортамента:

ГОСТ 7350—66* — сталь толстолистовая высоколегированная, коррозионностойкая, кислотостойкая и окалиностойкая;

ГОСТ 5582—61* — сталь тонколистовая коррозионностойкая и жаростойкая;

ГОСТ 9940—72* — трубы бесшовные горячекатаные из коррозионностойкой стали;

ГОСТ 9941—72* — трубы бесшовные холоднокатаные, холодно-тянутые из коррозионностойкой стали;

ГОСТ 2176—67 — отливки из высоколегированной стали со специальными свойствами.

Хромистые стали мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного классов

Коррозионностойкие хромистые стали можно разделить на три группы: с фазовым превращением (мартенситный класс); с частичным фазовым превращением (мартенситно-ферритный класс); без фазовых превращений (ферритный класс).

Механические, физические, коррозионные и технологические свойства, а в соответствии с этим и области применения хромистых сталей зависят от их химического состава и структуры (табл. 88, 89).

Эти стали применяют в различных отраслях промышленности: для клапанов гидравлических прессов, турбин, лопаток, арматуры крекинг-установок, карбюраторных игл, шарикоподшипников и втулок для нефтяного оборудования, режущего, мерительного и хирургического инструмента, оборудования заводов пищевой и легкой промышленности, предметов домашнего обихода и кухонной утвари и др.

Широкое практическое применение получили следующие хромистые коррозионностойкие стали.

1. Хромистые стали мартенситного класса 20X13, 30X13, 40X13. В этих сталях содержится ~13% Cr, что соответствует минимальному его содержанию, обеспечивающему повышенную коррозионную стойкость. Эти стали применяют преимущественно в термически обработанном состоянии, часто с тщательно шлифованной, а иногда и полированной поверхностью.

Структура и свойства этих сталей в значительной степени зависят от содержания в них углерода: с понижением содержания углерода в этих сталях появляется структурно свободный феррит, ухудшающий механические свойства, и они переходят из мартенситного в мартенситно-ферритный (сталь 12X13) и даже чисто ферритный (сталь 08X13) классы;

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	Nb	S	P
		Не более						Не более	
Стали мартенситного класса									
20X13	0,16—0,25	0,8	0,8	12,0—14,0	—	—	—	0,025	0,030
30X13	0,26—0,35	0,8	0,8	12,0—14,0	—	—	—	0,025	0,030
40X13	0,36—0,45	0,8	0,8	12,0—14,0	—	—	—	0,025	0,030
25X13H2	0,20—0,30	0,5	0,8— 1,2	12,0—14,0	1,5—2,0	—	—	0,15—0,25	0,08—0,15
20X17H2	0,17—0,25	0,8	0,8	16,0—18,0	1,5—2,50	—	—	0,025	0,035
95X18	0,09—1,00	0,8	0,8	17,0—19,0	—	—	—	0,025	0,030
09X16H4B	0,05—0,13	0,6	0,5	15,0—18,0	3,5—4,5	—	0,05—0,20	0,025	0,030
Стали мартенситно-ферритного класса									
12X13	0,09—0,15	0,8	0,8	12,0—14,0	—	—	—	0,025	0,030
14X17H2	0,14—0,17	0,8	0,8	16,0—18,0	1,5—2,5	—	—	0,025	0,030
Стали ферритного класса									
08X13	≤0,08	0,8	0,8	12,0—14,0	—	—	—	0,025	0,030
12X17	≤0,12	0,8	0,8	16,0—18,0	—	—	—	0,025	0,035
08X17T	≤0,08	0,8	0,8	16,0—18,0	—	5 C—0,80	—	0,025	0,035
15X25T	≤0,15	1,0	0,8	24,0—27,0	—	5 C—0,90	—	0,025	0,035
15X28	≤0,15	1,0	0,8	27,0—30,0	—	—	—	0,025	0,035

89. Характеристики механических свойств
и режимы термической обработки хромистых
коррозионностойких сталей мартенситного, мартенситно-ферритного
и ферритного классов

Сталь	Режим термической обработки, температура (°C), среда охлаждения	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	a_n , кгс м см²
		кгс/мм²		%		Не менее
08X13	Закалка, 1000—1050, масло; отпуск, 700—800, масло	60	42	20	60	10
12X13	Закалка, 1000—1050, воздух или масло; отпуск, 700—790, воздух, масло или вода	60	42	20	60	9
20X13	Закалка, 1000—1050, воздух или масло, отпуск, 660—770, воздух, масло или вода	66	45	16	55	8
30X13	Закалка 950—1020, масло; отпуск, 200—300, воздух или масло	Твердость HRC ≥ 48				
40X13	Закалка, 1000—1050, масло, отпуск, 200—300, воздух или масло	Твердость HRC ≥ 50				
14X17H2	Закалка, 975—1040, масло; отпуск 275—350, воздух	110	85	10	30	5
	Закалка, 975—1040, масло, отпуск, 500—530, воздух	120	90	12	62	4
20X17H2	Закалка, 975—1050, масло, обработка холодом, —70, отпуск, 275—350, воздух	150	125	7	—	3
95X18	Закалка, 1000—1050, масло, отпуск, 200—300, воздух или масло	Твердость HRC ≥ 55				
09X16H4B	Закалка, 1030—1050, воздух или масло; отпуск, 600—620, воздух	120	90	8	40	6
	Закалка, 970—980, воздух или масло; отпуск, 300—370, воздух	Высокая стойкость против коррозии				
12X17	Отжиг, 760—780, воздух или вода	40	25	20	50	—
08X17T	Отжиг, 760—780, воздух	50	30	20	45	—
15X25T 15X28	Отжиг, 680—770, воздух или вода; без термической обработки	45	30	20	45	—

оррозионная стойкость их при этом несколько повышается. С повышением содержания углерода снижается коррозионная стойкость и, кроме того, возрастает хрупкость.

2. Хромоникелевая сталь 20X17H2 мартенситного класса, имеет более высокие механические свойства и коррозионную стойкость, чем 13%-ных хромистых сталей; эта сталь хорошо поддается горячей и холодной штамповке, обрабатывается резанием, сваривается всеми видами сварки; твердость поверхностного слоя изделий из стали 20X17H2 при необходимости можно повысить до HRC 58—60 путем газового напирания или цементации.

3. 17%-ные хромистые стали ферритного класса 12X17 и 08X17T применяются в отожженном состоянии; у этих сталей удовлетворительная пластичность в горячем и в холодном состоянии; однако вследствие пониженной пластичности сварных соединений, связанной с ростом зерна в зонах, прилегающих к сварному шву, в результате воздействия высоких температур при сварке и пониженной коррозионной стойкости зон, расположенных вблизи сварных швов, изделия из этих сталей изготавливают преимущественно без применения сварки; введение

17%-ную хромистую сталь T1, связывающего углерод в карбиды (Fe₃C), способствует повышению сопротивляемости межкристаллитной коррозии (сталь 08X17T).

4. Высокохромистые стали ферритного класса 15X25T, 15X28T обладают высокой стойкостью в сильно-агрессивных средах, ввиду повышенной склонности этих сталей к росту зерна необходимо, чтобы начало прокатки было при температуре не выше 1000—1020° С и чтобы скорость сварки и охлаждения сварного шва и околошовной зоны была достаточно высокой; соблюдение этих условий также способствует повышению стойкости сталей к межкристаллитной коррозии.

Высокохромистые стали при нагреве в интервале температур 400—600° С склонны к охрупчиванию, которое проявляется в снижении ударной вязкости, относительного удлинения и в росте твердости.

Высокопрочные хромоникелевые стали аустенитно-мартенситного класса

Стали этого класса применяют в качестве конструкционного материала в различных областях техники, когда требуется сочетание высокой прочности и свариваемости при достаточной пластичности (см. табл. 90, 91).

Механические и физические свойства этих сталей зависят от количества аустенита, превращенного в мартенсит, и ряда вторичных процессов, связанных с образованием интерметаллидных или карбидных фаз, оказывающих дополнительное и часто значительное влияние на прочные свойства сталей.

Легированные компоненты (Mo, Al, Ti, Cu, Si и др.) либо способствуют выделению указанных выше упрочняющих фаз в α -фазе, либо участвуют в образовании в процессе старения.

Высокие прочностные свойства стали этого класса получают благодаря комплексной термической обработке, состоящей из закалки или нормализации при температурах 925—1050° С, обработки холодом при -70° С или высокого отпуска для дестабилизации аустенита при 745—770° С и старения при 350—500° С с охлаждением на воздухе.

90. Химический состав (%) и назначение высокопрочных коррозионностойких сталей аустенитно-мартенситного класса (ГОСТ 5032—72)

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Mo	S	P	Назначение
		Не более						Не более		
20X13H4Г9	0,15—0,30	0,8	8,0— 10,0	12,0— 14,0	3,7—4,7	—	—	0,025	0,050	Заменитель холодно- катаной стали марок 12X18H9 и 17X18H9 для прочных и легких конструкций, соеди- ненных точечной элек- тросваркой
09X15H8Ю	≤0,09	0,8	0,8	14,0— 16,0	7,0—9,4	0,7—1,3	—	0,025	0,035	Как высокопрочная сталь — для изделий, работающих в атмо- сферных условиях, ук- суснокислой и других солевых средах, и для упругих элементов
07X16H6	0,05—0,09	0,8	0,8	15,5— 17,5	5,0—8,0	—	—	0,020	0,035	То же Не имеет δ-феррита
08X17H5M3	0,06—0,10	0,8	0,8	16,0— 17,5	4,5—5,5	—	3,0—3,5	0,020	0,035	То же, что и сталь марки 09X15H8Ю, и для сернокислых сред

Сталь	C	Не более		Cr	Ni	Al	Mo	Не более		Назначение
09X17H7Ю	≤0,09	0,8	0,8	16,0— 17,5	7,0—8,0	0,5—0,8	—	0,020	0,030	Для крыльевых устройств, рулей, кронштейнов, работающих в морской воде
09X17H7Ю1	≤0,09	0,8	0,8	16,5— 18,0	6,5—7,5	0,7—1,1	—	0,025	0,035	Для судовых валов, работающих в морской воде
06X16H7M2Ю *	≤0,09	0,7	0,7	15,0— 16,5	6,5—7,5	0,5—1,0	1,0—2,0	0,030	0,030	Рекомендуется для дисков распыливающих сушилок при сушке двойного суперфосфата, клапанных пластин в компрессорах конвертированного газа, плунжеров и пружин карбонатных насосов
03X14H7B **	≤0,03	0,7	0,7	13,5— 15,0	6,0—7,2	—	0,4—0,8 W	0,020	0,030	Рекомендуется для валов погружных центробежных насосов, работающих в нефтяных скважинах

* Химический состав указан по ЧМТУ 1 612—69

** Химический состав указан по ТУ/ЗМЗ 78—70

91. Характеристики механических свойств и режимы термической обработки высокопрочных коррозионностойких сталей аустенитно-мартенситного класса

Сталь	Полу- фабрикат	Режим термической обработки, температура °С, среда охлаждения (время выдержки, ч)	σ_B	$\sigma_{0.2}$	δ_5	ψ	a_H , кгс/м см ²	ГОСТ или ТУ
			кгс/мм ²		%			
Не менее								
20Х13Н4Г9	Пруток	Закалка, 1070—1130, воз- дух	65	25	35	55	—	ГОСТ 5949—61
	Лист	Закалка, 1050—1080, вода или воздух	65	—	40	—	—	ГОСТ 5582—61
09Х15Н8Ю	Пруток	Нормализация, 925—975, воздух или вода, обра- ботка холодом, —70 (2), отпуск 375—500 (1)	120	90	10	45	4	ГОСТ 5949—61, ЧМТУ ЦНИИЧМ 194—59
	Лист	Нормализация, 1040—1080	110	—	20	—	—	ГОСТ 5582—61, ЧМТУ ЦНИИЧМ 1113—64
07Х16Н6	Пруток	Закалка, 975—1000, вода обработка холодом —70 (2); отпуск 350— 425 (1)	110	90	12	50	7,0	ЧМТУ ЦНИИЧМ 1184—62
	Лист	Нормализация, 975, вода, обработка холодом, —70 (2), отпуск 350— 425 (1)	110	85	12	—	—	ЧМТУ ЦНИИЧМ 1184—64

Сталь	Полу- фабрикат	Режим термической обработки, температура °С, среда охлаждения (время выдержки, ч)	σ_B	$\sigma_{0.2}$	δ_5	ψ	a_n	ГОСТ или ТУ
			кгс/мм ²		%		$\frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{см}^2}$	
			Не менее					
08X17H5M3	Пруток	Нормализация, 940—950; обработка холодом, —70 (2); отпуск 425 (1)	120	85	12	50	6	ЧМТУ ЦНИИЧМ 194—59
	Лист	Закалка, 930—940, воздух или вода, обработка хо- лодом, —70 (2), отпуск 440—460 (1)	120	80	8	—	—	ЧМТУ ЦНИИЧМ 317—60 325—60
09X17H7Ю	Лист	Закалка, 1030—1070, воз- дух, первый отпуск —740—760, воздух или вода, второй отпуск, 580—680, воздух	85	75	12	40	5	ГОСТ 7350—66*
09X17H7Ю1	Пруток	Закалка, 1030—1070, воз- дух; первый отпуск 740— 760, воздух или вода, второй отпуск, 550—600, воздух	85	75	12	40	5	ГОСТ 5949—61*
06X16H7M2Ю	Пруток	Закалка, 940—960, воздух; обработка холодом —70 (2), отпуск 400 (3)	110	90	10	40	4	ЧМТУ 1-612—69
03X17H7B	Пруток	Закалка, 900, воздух, от- пуск 400 (2)	110	100	12	55	6	ТУ/ЗМЗ 78—70
		Без термической обработки	90	80	12	55	6	

В случае применения этих сталей для изготовления прецизионных упругих элементов приборов с целью их упрочнения наряду с указанной термической обработкой целесообразно использовать термомеханическую обработку (ВТМО, холодную пластическую деформацию и т. д.) или двойное старение при температурах 450 и 400° С.

После полного цикла термической обработки коэффициент прочности сварного соединения этих сталей не ниже 0,9.

Хромоникелевые и хромомарганцевоникелевые стали аустенитно-ферритного и аустенитного классов

Стали этого типа получили широкое применение в различных отраслях промышленности в качестве коррозионностойкого и окалиностойкого материала. Это объясняется прочностью, высокой пластичностью, немагнитностью, повышенными механическими свойствами при высоких температурах, хорошей свариваемостью, а также высокой прочностью и пластичностью в сварных соединениях.

В табл. 92, 93 указаны химический состав этих сталей, механические свойства и режимы термической обработки.

Стали аустенитно-ферритного класса

Стали аустенитно-ферритного класса, характеризующиеся высоким содержанием хрома (18—22%) и пониженным (экономным) содержанием никеля (до 4—6%, а в отдельных случаях до 2%), имеют двухфазную аустенитно-ферритную структуру. Дополнительные легирующие элементы — Mo, Cu, Ti (Nb). Химический состав этих сталей таков, что соотношение аустенита и феррита после оптимальной термической обработки составляет примерно 1 : 1.

У сталей аустенитно-ферритного класса ряд преимуществ по сравнению с аустенитными сталями: более высокая (в 1,5—2 раза) прочность при удовлетворительной пластичности и сопротивляемости действию ударных нагрузок, большая стойкость против межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания.

Недостаток сталей аустенитно-ферритного класса — склонность к охрупчиванию в результате нагрева в интервале температур 400—750° С, при которых их эксплуатация не рекомендуется.

Хромоникелевые стали аустенитного класса

По объему производства в стране и за рубежом ведущее место занимают аустенитные стали 12X18H10T (08X18H10T) и 10X17H13M2T, которые имеют высокую коррозионную стойкость в широком диапазоне агрессивных сред и отличаются хорошей технологичностью.

Наиболее высокую коррозионную стойкость и пластичность стали этого типа приобретают в результате термической обработки, состоящей из нагрева до 1000—1050° С и быстрого охлаждения на воздухе или в воде. После такой обработки стали имеют однородную структуру аустенита.

Стали	Режим закалки: температура нагрева (°C) и среда охлаждения	σ_B	$\sigma_{0.2}$	δ_5	ψ
		кгс/мм ²		%	
		Не менее			
08X22H6T, 12X21H5T, 08X21H6M2T	Закалка, 950—1050, воздух или вода	60—70	35	16—25	45
10X14Г14Н4Т, 15ХН17АГ14, 12X17Г9АН4	Закалка, 1000—1100, воздух, масло или вода	65—70	25—35	35—40	50—55
08X17H13M2T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T, 08X17H15M3T, 12X18H9, 17X18H9, 12X18H9T, 04X18H10, 08X18H10, 08X18H10T, 12X18H10T, 06X18H11, 08X18H12T, 12X18H12T, 08X18H12Б	Закалка, 1050—1100, воздух, масло или вода	45—58	16—22	35—43	40—55

93. Химический состав (%) хромоникелевых и хро-
аустенитно-ферритного и аус

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni
<i>Стали аустенит</i>					
08X22H6T	≤0,08	≤0,8	≤0,8	21,0—23,0	5,3—6,
12X21H5T	0,09—0,14	≤0,8	≤0,8	20,0—22,0	4,8—5,
08X21H6M2T	≤0,08	≤0,8	≤0,8	20,0—22,0	5,5—6,
08X18Г8Н2Т	≤0,08	≤0,8	7,0—9,0	17,0—19,0	1,8—2,
15X18H12C4ТЮ	0,12—0,17	3,8—4,5	0,5—1,0	17,0—19,0	11,0—1
<i>Стали аусг</i>					
08X10H20T2	≤0,08	≤0,8	≤2,0	10,0—12,0	18,0—20
10X14Г14Н3	0,09—0,14	≤0,7	13,0—15,0	12,5—14,0	2,8—3,
10X14Г14Н4Т	≤0,10	≤0,8	13,0—15,0	13,0—15,0	2,8—4,
10X14АГ15	≤0,10	≤0,8	14,5—16,5	13,0—15,0	—
03X16H15M3	≤0,03	≤0,6	≤0,8	15,0—17,0	14,0—16
03X16H15M3B	≤0,03	≤0,6	≤0,8	15,0—17,0	14,0—16
15X17АГ14	≤0,15	≤0,8	13,5—15,5	16,0—18,0	≤0,6
12X17Г9АН4	≤0,12	≤0,8	8,0—10,5	16,0—18,0	3,5—4,
03X17H14M2	≤0,03	≤0,8	1,0—2,0	16,0—18,0	13,0—15
08X17H13M2T	≤0,08	≤0,8	≤2,0	16,0—18,0	12,0—14
10X17H13M2T	≤0,10	≤0,8	≤2,0	16,0—18,0	12,0—14
10X17H13M3T	≤0,10	≤0,8	≤2,0	16,0—18,0	12,0—14
08X17H15M3T	≤0,08	≤0,8	≤2,0	16,0—18,0	14,0—16
12X18H9	≤0,12	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	8,0—10
17X18H9	0,13—0,21	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	8,0—10
12X18H9T	≤0,12	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	8,0—9,
04X18H10	≤0,04	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	9,0—11
08X18H10	≤0,08	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	9,0—11
08X18H10T	≤0,08	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	9,0—11
12X18H10T	≤0,12	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	9,0—11
12X18H10E	≤0,12	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	9,0—11
03X18H11	≤0,03	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	10,5—12
06X18H11	≤0,06	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	10,0—12
03X18H12	≤0,03	≤0,4	≤0,4	17,0—19,0	11,5—13
08X18H12T	≤0,08	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	11,0—13
12X18H12T	≤0,12	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	11,0—13
08X18H12B	≤0,08	≤0,8	≤2,0	17,0—19,0	11,0—13
07X21Г7АН5	≤0,07	≤0,7	6,0—7,5	19,5—21,0	5,0—6,
03X21H21M4ГБ	≤0,03	≤0,6	1,8—2,5	20,0—22,0	20,0—22

ганцевоникелевых коррозионностойких сталей
ного классов (ГОСТ 5632—72)

Ti	Al	Mo	Nb	S	P	Прочие элементы
				Не более		

ритного класса						
C—0,65	—	—	—	0,025	0,035	—
'5—0,50	—	—	—	0,025	0,035	—
'0—0,40	—	1,8—2,5	—	0,025	0,035	—
'0—0,50	—	—	—	0,025	0,035	—
4—0,7	0,13—0,35	—	—	0,030	0,035	—

тного класса						
,5—2,5	≤1,0	—	—	0,030	0,035	—
—	—	—	—	0,020	0,035	—
5 (C—0,02)—0,6	—	—	—	0,020	0,035	—
—	—	—	—	0,030	0,045	N 0,15—0,25
—	—	2,5—3,0	—	0,015	0,020	—
—	—	2,5—3,5	0,25—0,50	0,015	0,020	—
—	—	—	—	0,020	0,035	N 0,25—0,37
—	—	—	—	0,020	0,035	N 0,15—0,25
—	—	2,0—2,8	—	0,020	0,035	—
.C—0,7	—	2,0—3,0	—	0,020	0,035	—
.C—0,7	—	2,0—3,0	—	0,020	0,035	—
.C—0,7	—	3,0—4,0	—	0,020	0,035	—
.3—0,6	—	3,0—4,0	—	0,020	0,035	—
—	—	—	—	0,020	0,035	—
—	—	—	—	0,020	0,035	—
.C—0,8	—	—	—	0,020	0,035	—
—	—	—	—	0,020	0,035	—
—	—	—	—	0,020	0,035	—
.C—0,7	—	—	—	0,020	0,035	—
.C—0,8	—	—	—	0,020	0,035	—
—	—	—	—	0,020	0,035	Se 0,18—0,35
—	—	—	—	0,020	0,035	—
—	—	—	—	0,020	0,035	—
0,005	—	—	—	0,020	0,035	—
.C—0,6	—	—	—	0,020	0,035	—
.C—0,7	—	—	—	0,020	0,035	—
—	—	—	10.C—1,1	0,020	0,035	—
—	—	—	—	0,030	0,030	N 0,15—0,25
—	—	3,4—3,7	15.C—0,8	0,020	0,030	—

В сталях, содержащие 18% Cr и 10% Ni, обычно вводят сильные карбидообразующие элементы (титан и ниобий), которые связывают углерод, являющийся вредной примесью.

У аустенитных сталей с низким содержанием ($\sim 0,03\%$) углерода 03X18H12 и 03X19H11 наблюдаются более высокие сопротивление межкристаллитной и ножевой коррозии после сварки, а также повышенная коррозионная стойкость в азотной кислоте высоких концентраций и в других агрессивных средах, что определяет их применение для изготовления химической аппаратуры, работающей в тяжелых условиях производства. Кроме того, отсутствие карбидных и карбонитридных включений в сталях с низким содержанием углерода обуславливает ее повышенные пластические свойства, высокую способность к полированию и хорошую свариваемость.

Хромоникелевые стали с молибденом (08X17H13M2T, 10X17H13M2T, 08X18H13M3T, 10X17H13M3T, 03X17H14M2, 08X17H15M3T) отличаются повышенной коррозионной стойкостью в таких агрессивных средах, как например, органические кислоты (уксусная, муравьиная, молочная, щавелевая), а также морская вода и некоторые другие. Однако у сталей, содержащих молибден, больше чем у хромоникелевых склонность к охрупчиванию в результате нагрева при $600-750^\circ\text{C}$ вследствие образования σ -фазы. Присутствие ферритной фазы в этих сталях снижает их коррозионную стойкость в азотной кислоте повышенных концентраций.

Из хромоникелевых сталей с молибденом применяют также сталь 03X21H21M4ГБ, из которой изготавливают детали, работающие в растворах фосфорной кислоты. В настоящее время эта сталь — основной конструкционный материал для изготовления сварного оборудования в производстве фосфорных минеральных удобрений, в процессе получения которых образуется экстракционная фосфорная кислота ($32\% \text{P}_2\text{O}_5$, температура до 60°C) с примесями фтора.

Хромомарганцевоникелевые и безникелевые стали аустенитного класса

Для экономии никеля за последние 10—15 лет в СССР выпускают экономнолегированные никелем и безникелевые стали, заменители марок 12X18H10T и 10X17H13M2T.

Аустенитная структура этих сталей обеспечивается дополнительным введением марганца или марганца с азотом вместо никеля (стали 10X14Г14Н3, 10X14Г14Н4Т, 10X14АГ15, 15X17АГ14, 12X17Г9АН4, 07X21Г7АН5).

В связи с несколько пониженным содержанием хрома, а также частичной или полной заменой никеля коррозионная стойкость хромомарганцевоникелевых и безникелевых сталей ниже, чем у сталей, содержащих 18% Cr и 10% Ni. Несмотря на это, они достаточно широко применяются в народном хозяйстве для изготовления бытовых приборов, торгового и пищевого оборудования, пассажирских вагонов, установок для сжижения газов и пр.

У стали 10X14Г14Н4Т невысокий предел текучести в термически обработанном состоянии и большее упрочнение при холодной деформации, чем у сталей, содержащих 18% Cr и 10% Ni. Стали 10X14Г14Н4Т и 07X21Г7АН5 применяют в конструкциях, эксплуатируемых при криогенных температурах.

Коррозионностойкие (кислотостойкие) сплавы

В табл. 94, 95 приведены химические составы кислотостойких сплавов на железоникелевой и никелевой основах, их механические свойства, режимы термической обработки и горячей обработки давлением.

Сплавы 06ХН28МДТ и 03ХН28МДТ на железо-никелевой основе, легированные Сг, Мо, Си и стабилизированные Ті, применяют в агрессивных средах, содержащих серную, азотную кислоты и их смеси, в целлюлозно-бумажной промышленности, производстве минеральных удобрений и т. д.

Недостаток этих сплавов — их относительно высокая склонность к межкристаллитной коррозии, возникающей в зоне термического влияния сварных соединений или после дополнительного нагрева в интервале умеренных температур. В результате термической обработки, а также с понижением содержания углерода (сплав 03ХН28МДТ) сопротивляемость межкристаллитной коррозии повышается.

В особо агрессивных средах применяют сплавы Н70МФ и ХН65МВ.

Сплав Н70МФ на никель-молибденовой основе характеризуется высокой прочностью и коррозионной стойкостью в серной кислоте при температуре 70° С, соляной кислоте в интервале всех концентраций и температур, в фосфорной кислоте и др. Введение в сплавы ванадия уменьшает их склонность к межкристаллитной коррозии после нагрева при 600—800° С и устраняет их восприимчивость к ножевой коррозии. Максимальное сопротивление коррозии сплав приобретает после закалки в воде или на воздухе при температуре 1050—1150° С. Сплав удовлетворительно деформируется в холодном состоянии и обрабатывается резанием, сваривается аргонодуговым методом.

В химической промышленности сплав применяют для изготовления реакторов, деталей насосов, теплообменников, чехлов термопар и др., в нефтеперерабатывающей промышленности для аналогичного оборудования, подвергающегося воздействию минеральных и органических кислот, в фармацевтической для изготовления нагревателей, кюветов и реакторов.

Сплав ХН65МВ на никель-хром-молибденовой основе отличается наилучшим сочетанием высокой коррозионной стойкости и сопротивляемости межкристаллитной коррозии с высокими значениями прочности и пластичности. Эти свойства сплав приобретает после закалки в воде при температуре 1000—1050° С. Сплав применяют для изготовления ректификационных колонн, пленочных испарителей, изомеризаторов, разлагателей и другого оборудования, стойкого в уксусной кислоте, окислительных средах, содержащих хлориды, и других окислительно-восстановительных средах.

Недостаток материалов Н70МФ и ХН65МВ — повышенная прочность при температурах горячей пластической деформации, что иногда ограничивает изготовление крупногабаритных изделий.

94. Химический состав (%) коррозионностойких кислотостойких сплавов (ГОСТ 5632—72) **

Сплав	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	W	Mo	V	Fe	S	P	Прочие элементы.
											Не более		
06ХН22МДТ	≤0,06	≤0,8	≤0,8	22,0— 25,0	26,0— 29,0	0,5— 0,9	—	2,5— 3,0	—	Основа	0,020	0,035	Сu 2,5—3,5
03ХН28МДТ	≤0,03	≤0,8	≤0,8	22,0— 25,0	26,0— 29,0	0,5— 0,9	—	2,5— 3,0	—	Основа	0,020	0,035	Сu 2,5—3,5
Н70МФ	≤0,05	≤0,2	≤0,5	≤0,3	Основа	—	—	25,0— 29,0	1,4— 1,7	≤4,0	0,020	0,020	—
ХН65МВ	≤0,03	≤0,15	≤1,0	14,5— 16,5	Основа	—	3,0— 4,5	15,0— 17,0	—	≤1,0	0,020	0,020	—

95. Режимы горячей и термической обработки, характеристики механических свойств кислотостойких сплавов

Сплав	Режим горячей обработки давлением [температура (°C), среда охлаждения]		Температура закали (°C), среда	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	a_H , кгс·м/см ²
				кгс/мм ²		%	
	начала	конца		Не менее			
06ХН28МДТ 03ХН28МДТ	1100—1150	850, воздух	1050—1080, вода, воздух или масло	55	25	35	10
Н70МФ ХН65МВ	1200—1220	950, воздух	1050—1100, вода	90	40	40	37

ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Жаропрочными называют стали и сплавы, сохраняющие при повышенных температурах в течение определенного времени высокую механическую прочность и обладающие при этом достаточной жаростойкостью.

Жаропрочность характеризуется в основном пределами ползучести и длительной прочности. Ориентировочно о жаропрочности судят также по механическим свойствам, определяемым кратковременным испытанием на растяжение при рабочей температуре.

Дополнительные характеристики жаропрочности: длительная пластичность, релаксационная стойкость, предел выносливости, термостойкость и др.

Жаропрочность стали (сплава) определяется химическим составом и структурой. К числу элементов, повышающих жаропрочность, относятся молибден, вольфрам, ванадий, ниобий, титан, кобальт, алюминий и отчасти хром и никель. Последний, наряду с марганцем, имеет значение главным образом как аустенитообразующий элемент (поскольку аустенитная структура создает наибольшую жаропрочность стали). На жаропрочные свойства хром влияет меньше, чем многие другие элементы. Однако его присутствие в стали или сплаве наряду с алюминием и кремнием повышает их жаростойкость (окалиностойкость). Поэтому хром — обязательный компонент жаропрочных сталей и сплавов.

Классификация. К жаропрочным сталям относят сплавы на основе железа, если содержание последнего превышает 50%.

В зависимости от суммарного содержания легирующих элементов жаропрочные стали могут быть низко-, средне- и высоколегированными.

В низколегированной стали суммарное содержание легирующих элементов не превышает 4—5%. Среднелегированной называется сталь с суммарным содержанием легирующих элементов от 5 до 9%, причем содержание каждого из них не должно превышать 5%. Высоколегированной называют сталь, в которой содержание любого легирующего элемента превосходит 5%, либо суммарное содержание всех легирующих более 10%.

По микроструктуре (получаемой после охлаждения на воздухе с высокой температуры) жаропрочные стали подразделяют на семь классов: перлитный, мартенситный, мартенситно-ферритный, ферритный, аустенитно-мартенситный, аустенитно-ферритный, аустенитный.

Низколегированные стали относятся к перлитному классу, среднелегированные — к перлитному, мартенситному или мартенситно-ферритному, высоколегированные — к любому из перечисленных классов, кроме перлитного.

К сплавам на железоникелевой основе относятся сплавы, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в железоникелевой основе. Суммарное содержание железа и никеля не менее 65%.

К сплавам на никелевой основе относятся сплавы, содержащие не менее 50% Ni, основная структура которых является твердым раствором хрома и других легирующих элементов в никеле (содержание железа не более 6—8%).

Стали перлитного класса. Среди низколегированных сталей высокой жаропрочностью отличаются молибденосодержащие стали, например, хромомолибденовые, хромомолибденованадиевые, хромомолибденовольфрамованадиевые, имеющие достаточно высокие сопротивление ползучести и длительную прочность при температурах до 565—580° С. Такие стали условно называют теплоустойчивыми.

Химический состав теплоустойчивых сталей перлитного класса приведен в ГОСТ 10500—63**. Они содержат 0,5—3,3% Cr; 0,25—1,2% Mo; 0,15—0,8% V. Некоторые марки содержат 0,3—0,8% W либо Nb.

Эти стали применяют для изготовления различных деталей в котлостроении, работающих длительное время (10 000—100 000 ч) при температурах 500—580° С, в частности, для паропроводных и пароперегревательных труб, а также для проката и поковок, используемых в турбинах и паровых котлах высокого давления.

Механические свойства сортового металла из перлитных сталей, предусмотренные ГОСТ 10500—63** или существующими ТУ, а также рекомендуемые режимы термической обработки приведены в табл. 96. Механические свойства при повышенных температурах, определяемые кратковременным испытанием на растяжение, как правило, не регламентируются. Решающее значение имеют нормы длительной прочности и ползучести при рабочих температурах в зависимости от длительности службы за время 10 000—100 000 ч (см. табл. 97). Сведения о примерном назначении сталей перлитного класса и их рабочие температуры приведены в табл. 98.

Стали мартенситного класса содержат 4,5—12% Cr, а также в значительно меньшем количестве Ni, W, Mo, V.

Стали марок 15X5, 15X5М, 15X5ВФ и 15X8ВФ широко применяют для изготовления элементов аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов — деталей насосов, задвижек, крепежных деталей, крекингowych труб, работающих при температурах 550—600° С. Стали этой же группы с более высоким содержанием Cr (6—10%) и с повышенным содержанием Si (2—3%) в основном применяют для изготовления клапанов двигателей внутреннего сгорания.

Сталь 11X11Н2ВМФ применяют для дисков компрессоров и для других деталей, работающих при температурах до 600° С с ограниченным сроком службы.

Механические характеристики мартенситных сталей приведены в табл. 96, характеристики жаропрочности — в табл. 97.

Стали мартенситно-ферритного класса содержат в структуре кроме мартенсита 10—25% феррита. Основная легирующая добавка и в этих сталях — Cr (11—13%), наряду с которым присутствуют менее значительные присадки Ni, W, Mo, Nb, V (модифицированные хромистые стали). Их термическая обработка заключается либо в закалке с отпуском, либо в нормализации с отпуском. Механические свойства при надлежащей температуре отпуска практически равноценны. Уровень жаропрочных свойств после оптимальной термической обработки для большинства сталей мартенситно-ферритного класса также примерно одинаков. Однако наиболее высокие (при обработке на одинаковую твердость) характеристики жаропрочности при 500—600° С у стали 18X12ВМБФР.

Эти стали изготовляют в виде сортового проката и применяют в турбостроении для лопаток и дисков турбин, а также для крепежных

Сталь	Класс	Режим термообработки				Характеристики механических свойств				
		Температура зачалки или нормализации, °С	Охлаждающая среда	Температура отпуска (или отжига), °С	Охлаждающая среда	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кгс/мм ²	δ_5 , %	ψ , %	a_K , кгс м/см ²
12МХ	Перлитный	920±10	Воздух	680—690	Воздух	42	26	21	45	6
15ХМ		900—920	»	630—650	—	45	28	20	45	7
12Х1МФ		960—980	»	740—760	Воздух	48	26	21	55	10
20ХМ		860—880	Масло	500—600	»	80	60	12	50	9
25Х1МФ		880—900	»	640—660	»	90	75	14	50	6
25Х2М1Ф		1030—1060	Воздух	680—720	»	90	75	10	40	3
18Х3МВ		960±10	Масло	660—680	»	65	45	18	—	12
20Х3МВФ		1030—1080	»	660—700	»	90	75	12	40	8
15Х5М	Мартенситный	950—980	Воздух	860±20	Воздух	45	22	20	50	12
15Х5		—	»	850—870	»	40	17	24	50	10
15Х5ВФ *		—	»	850—870	С печью	40	22	22	50	12
40Х9С2 *		—	»	850—870	»	75	50	15	35	—
40Х10С2М		1050	Воздух или масло	750±30	Масло	95	75	10	35	>2
30Х13Н7С2		1050 +800	Вода, масло	660—680	Воздух	120	80	18	25	>2
11Х11Н2В2МФ		А 1000—1020	Воздух или масло	660—680	»	90	75	12	50	8
16Х11Н2В2МФ		Б 1000—1020	То же	550—590	»	100	85	10	45	7
20Х13		1000—1030	»	680—720	Масло, воздух	66	45	16	55	8
12Х13	Мартенситно-ферритный	1020—1050	Воздух или масло	700—750	Масло	60	42	20	60	9
15Х11МФ		1030—1100	Воздух	700—740	»	70	50	15	55	12
15Х12ВНМФ		1000—1020	Масло	680—700	Воздух	75	60	15	45	6
18Х12ВМБФР		1050	»	650—700	»	75	50	14	50	6
15Х12В2МФ		1050	»	680	»	80	60	15	50	7

* Сталь применяют в отожженном состоянии

97. Пределы ползучести и длительной прочности легированных сталей перлитного и мартенситного классов, применяемых для длительной службы

Сталь	Класс	Режим термической обработки				Температура испытания, °C	Длительная прочность (кгс/мм²) за время, ч		Предел ползучести, кгс/мм², соответствующий 1% деформации за время, ч	
		Температура закалики или нормализации, °C	Охлаждающая среда	Температура отпуска, °C	Охлаждающая среда		10 000	100 000	10 000	100 000
12MX	Перлитный	920	Воздух	680—690	Воздух	480 510 540	25 16 11	20 12 7	22 — —	15 70 3,8
12X1MФ		960—980	»	740—760	»	520 560 580	20 14 12	16 10,8 9—10	18 11,8 9	13 8,4 6,2
25X1MФ		880—900	Масло	640—660	Вода	500 550	26—29 10—15	— —	— 9,0	8,0 3,0
25X2M1Ф		1050	Воздух	680—700	Воздух	550	18—22	14—48	—	7,0
18X3МВ		900±10	Масло	660—680	»	450 500 550	— — —	— — —	23 12 7,5	16 — —
20X3МВФ		1030—1080	»	660—700	»	500 550 580	34 20 14	30 16 10	18 13 —	15 10 5,0

Сталь	Класс	Режим термической обработки				Температура испытания, °C	Длительная прочность (кгс/мм²) за время, ч		Граница ползучести, кгс/мм², соответствующий 1% деформации за время, ч	
		Температура закалки или нормализации, °C	Охлаждающая среда	Температура отпуска, °C	Охлаждающая среда		10 000	100 000	10 000	100 000
15X5M	Мартенситный и мартенситно-ферритный	950—980	Воздух	860±20	Воздух	480	18	15	10,5	7,0
15X5BФ *		—		860±10		540	10	7,5	6,5	4,0
						500	12	9,2	8,5	6,0
						550	9,0	7,0	5,0	3,8
						600	6,5	5,2	3,8	2,8
12X13		1030—1050	Масло	730—750	»	470	26	22	—	—
						500	22	19	—	5,7
						530	19	16	—	—
15X12BHMФ		1000	»	680	»	550	25	22	—	10
						565	24	20	—	8—9
						580	19	16	—	7—8
						600	14—16	12	—	5—6
15X11MФ		1050	Воздух	740	—	550	20	13—15	—	9—10
						600	10	—	—	4—5
18X12BMBФР		1050	Масло	650—700	Воздух	560	25—30	22—26	—	15
						590	21—24	17—20	—	10
						620	14	11	—	5
15X12B2MФ		1050	»	680	»	575	17	15	—	7,5
						600	15	13	—	4,5
						630	11	8,5	—	—

* Сталь применяют в отожженном состоянии

98. Примерное назначение низколегированных жаропрочных сталей перлитного класса

Сталь	Назначение	Рабочая температура, °С	Срок службы	Температура начала интенсивного окалинообразования, °С
16М 12МХ 15ХМ 12МХФ 12Х1МФ 15Х1М1Ф 12Х2МФБ 12Х2МФР	Трубы пароперегревателей, паропроводов и коллекторов энергетических установок, арматура паровых котлов и паропроводов	500—510 500—510 520—530 540—550 570—585 570—585 585—600 600—620	Весьма длительный	— 570 570 570 600 600 630 640
18Х3МВ 20Х3МВФ 20Х3МВФ	Трубы для гидрогенизационных установок и нефтехимической аппаратуры Поковки (роторы, диски), болты	450—500 500—550 530—560	Длительный	600 600 600
25Х1МФ 25Х2М1Ф	Крепежные детали (болты, шпильки), плоские пружины	500—510 520—550	Длительный	600 600

деталей. Ориентировочная рабочая температура для стали 15Х12ВНМФ 550—580°С, для стали 18Х12ВМБФР — 570—600°С.

Стали аустенитного класса — в основном хромоникелевые стали с содержанием Cr и Ni в пределах от 7 до 25% каждого, наряду с которыми присутствуют W, Mo, Ti, Nb и др.

Это самая многочисленная группа жаропрочных (и жаростойких) сталей (см. ГОСТ 5632—72). В марках этих сталей приняты следующие обозначения для легирующих элементов: А — N, Б — Nb, В — W, Г — Mn, К — Co, М — Mo, Н — Ni, Р — В, С — Si, Т — Ti, Ф — V, Х — Cr, Ю — Al. Цифра после буквы указывает на округленное (среднемарочное) содержание этого элемента в процентах (при содержании менее 1% цифру не пишут) *. Например, марка 45Х14Н14В2М следующего состава: 0,45% С, 14% Cr, 14% Ni, 2% W и ≤1% Mo.

Характеристики механических свойств сортового проката из жаропрочных аустенитных сталей, а также оптимальные режимы термической обработки приведены в табл. 99.

В соответствии с особенностями легированного аустенита характеристики жаропрочных свойств аустенитных сталей более высокие (см. табл. 100), чем у жаропрочных сталей перлитного или мартенситного классов.

* Исключение — углерод, содержание которого первые две цифры марки выражают в десятых процента.

Сталь	Режимы термической обработки			Характеристики механических свойств				
	Температура закали, °C	Охлаждающая среда	Температура отпуска (старения), °C	Предел прочности σ_B , кгс/мм ²	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	Удлинение δ_5 , %	Поперечное сужение ψ , %	Ударная вязкость a_H , кгс м/см ²
10X11H20T3P	1150—1180	Воздух Масло	750 (16 ч)	85	50	10	15	?
10X11H23T3MP	1170—1200	Воздух	750 (16—25 ч)	90	60	8	10	3
09X14H16B	1110—1140	»	*	50	20	35	60	10
09X14H18B2B	1110—1140	»	*	50	20	35	—	—
09X14H19B2BP	1100—1150	»	*	50	22	38	50	14
09X14H19B2BP1	1130—1160	»	750	52	22	30	44	12
45X14H14B2M	**		820	72	32	20	35	5
37X12H8Г8МФБ	1140±10	Вода	770—800	85	60	15	20	2,5
30X13Г18Ф	1150±10	»	700 (10 ч)	70	36	30	40	8
08X16H13M2B	1100—1150	Вода, воздух	750	56	22	40	50	12
10X17H13M2T	1050—1100	Вода	*	52	22	40	55	—
08X17H15M3T	1050—1100	Воздух	*	50	20	35	45	—
08X15H25B4TP	1130—1150	»	730—750	75	45	20	35	8
08X15H25B4TP	**	»	700 (16 ч)	70	40	15	30	

Сталь	Режимы термической обработки			Характеристики механических свойств				
	Температура закали, °С	Охлаждающая среда	Температура отпуска (старения), °С	Предел прочности σ_B , кгс/мм ²	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	Удлинение δ_5 , %	Поперечное сужение ψ , %	Ударная вязкость a_n , кгс·м/см ²
12X18H9	1050—1100	Воздух, вода	700 (20 ч)	50	20	45	55	—
08X18H10T	1050—1100	То же	700 (20 ч)	52	20	40	55	—
12X18H9T	1050—1100	»	700 (20 ч)	55	20	40	55	—
12X18H12T	1050—1100	»	800 (10 ч)	55	20	40	55	—
08X18H12Б	1050—1100	»	*	50	18	40	55	—
36X18H25C2	1100—1150	»	*	65	35	25	40	—
30X19H9MBBT	1150—1180	»	750—800	68	35	35	40	6
55X20H4AГ9	1160—1190	Вода	760—780	100	65	8	10	—
20X20H14C2	1000—1100	Воздух, вода	*	60	30	35	30	—
20X23H13	1050—1150	То же	*	50	30	35	50	—
20X23H18	1100—1150	»	*	50	20	35	50	—
20X25H20C2 *	1100—1150	»	*	60	30	35	50	—

* Применяются без отпуска
 ** Без закали.

100. Пределы ползучести и длительной прочности жаропрочных аустенитных сталей, применяемых для длительной службы *

Сталь	Температура, °C	Длительная прочность (кгс/мм ²) за время, ч		Предел ползучести (кгс/мм ²), соответствующий 1% деформации за время, ч	
		10 000	100 000	10 000	100 000
09X14H16B	600	17	12	16	10
	650	11	7,7	10	6,5
	700	6,5	4,0	5,5	3,7
09X14H18B2B	600	18	14	12	11
	650	14	11	10,5	8,5
	700	9,0	6,5	6,0	5,0
09X14H19B2BP	650	16,8	13	14	11
	700	12,5	9,5	8,5	6,5
	750	7,0	5,5	—	—
09X14H19B2BPI	600	26	23	25	17
	650	21,5	19	20	14
	700	17	14	12	8,5—9
15X14H14B2M	550	21,5	17	17	9,2
	600	16	12	12,5	6,8
	650	11	8,5	7,0	4,0
12X18H10T	600	15	11	—	7,5
	650	8—10	—	—	3—4
30X19H9MBBT	600	24	22	—	11
	650	17	15	—	8,0
12X18H12T	600	17,0	13,5	—	—
	650	10,5	7,5	—	—
08X16H13M2B	600	20	15	14—17	9—12
	650	13	6*—9	10—12	5—7
	700	6—7	3—5	6	2
10X17H13M2T	550	28	24	—	11
	600	18	13	11	6
	650	11	7	9	5
	700	4/8 *	3	5,5 *	2,8 *
20X20H14C2	650	—	—	6,5	—
	700	—	—	3	—
	800	—	—	1	—
20X23H13	550	24	20	15	6
	600	19	15	7—8 **	5 **
	650	11	7,0	5—6 **	3 **
	700	6,0	3,6	3	1,4
20X23H18	600	15 **	10	9	6 **
	650	11	6*—8	5—6	4 **—5,4
	700	5 **—6	3,5	3,5	2,8 **—3,5
	800	2,1	1,2—2,1	—	0,7 **—1,2
20X25H20C2					

Почти, как у стали 20X23H18

* Режимы термической обработки см. табл. 99.

** Данные из зарубежных источников для сталей близкого химического состава.

Сталь 08X18H10T применяют как жаропрочную и жаростойкую. При температуре до 600° С у стали стабильные механические свойства, она устойчива против межкристаллитной коррозии и хорошо сваривается. Сталь этой марки изготавливают в виде сортового проката, поковок, листа, труб для энергетического и химического оборудования. Аналогичные свойства у стали X18H12T, которую применяют в тех же областях техники.

У комплексно-легированной стали 30X19H9MBT достаточно стабильные механические свойства и высокая длительная прочность при температурах до 650° С. Основное назначение этой стали — детали котлотурбостроения с рабочей температурой 550—600° С.

У хромоникельвольфрамовых аустенитных сталей 15X14H14B2M и 45X14H14B2M повышенные жаропрочность и сопротивление усталости при высоких температурах. Сталь 45X14H14B2M находит применение для выпускных клапанов двигателей внутреннего сгорания. Для длительных сроков службы при температурах 600—650° С рекомендуется сталь того же типа с пониженным содержанием С (до 0,15%) марки 15X14H14B2M, а также ее модификация с титаном (15X14H14B2MT).

Аустенитные стали 09X14H16B, 09X14H18B2B, 09X14H19B2BP и 09X14H19B2BP1 применяют, как правило, для изготовления деталей, работающих при температурах 650—700° С весьма длительное время. Механические свойства этих сталей при температуре 20° С похожи, но пределы длительной прочности и ползучести отличаются весьма существенно (см. табл. 99, 100). Наиболее жаропрочные из них стали 09X14H19B2BP1 и 09X14H19B2BP, которые применяют для изготовления пароперегревательных и паропроводных труб установок сверхвысокого давления.

Хромомарганцевые стали марок 37X12H8ГЗМФБ и 30X13Г18Ф — заменители жаропрочных сталей с более высоким содержанием никеля. Эти стали имеют достаточно высокую длительную прочность при температурах 500—650° С.

Сплавы на железо-никелевой основе могут быть разделены на две группы: 1) с содержанием 14—16% Cr и 32—38% Ni и 2) с содержанием 20—25% Cr и 25—45% Ni (либо Ni + Mn). Сплавы первой группы дополнительно легированы вольфрамом и титаном и обладают высокой (приблизительно равной) жаропрочностью (табл. 101). Сплавы второй группы благодаря повышенному содержанию Cr жаростойкие, по жаропрочным свойствам они уступают сплавам первой группы, например, сплав ХН38BT.

Сплавы ХН35BT, ХН35BMT, ХН35BTЮ поставляют преимущественно в виде горячекатаных и кованных прутков и полос, а также поковок. Из сплавов ХН35B5T, ХН38BT и Х25H16Г7AP в основном изготавливают горячекатаный и холоднокатаный лист и ленту, а из сплава ХН45Ю — также и трубы. В основном сплавы на железо-никелевой основе применяют для изготовления деталей паровых и газовых турбин.

Сплавы на никелевой основе (см. ГОСТ 5632 — 72**) подразделяют на две группы: 1) сплавы, применяемые преимущественно как жаропрочные, и 2) жаростойкие сплавы, обладающие необходимым минимумом жаропрочности (табл. 102).

Наиболее часто применяемые сплавы первой группы относятся к системе Ni—Cr—Ti—Al. Присутствие в этих сплавах Ti и Al в количествах, превышающих их предельную растворимость в твердом растворе при температурах 650—950° С, позволяет достигнуть после закалки и

101. Пределы длительной прочности и ползучести сплавов на железоникелевой основе *1

Сталь	Температура, °С	Длительная прочность (кгс/мм ²) за время, ч					Предел ползучести **, кгс/мм ²
		100	500	1000	10 000**	100 000**	
ХН35ВМТ	650	37	—	29	23	18	21 (1/10 ⁴); 14 (1/10 ⁵)
	700	28	—	22	18	14	
ХН35ВТ	800	15—17	—	10—11	6,8	—	
	600	—	—	32	27	23	
	650	—	—	22—23	19—20	15—16	17 (1/10 ⁴); 13 (1/10 ⁵); 11 (1/10 ⁶); 8 (1/10 ⁶)
	700	—	—	14	9,5	6,5	
ХН35ВТЮ	600	65—68	55—58	52—55	42—45	—	
	700	38—40	32—34	28—32	24—26	—	
	750	30—34	24—30	20—27	17—23	—	25 (0,2/100)
	800	21—24	15—18	12—16	—	—	13 (0,2/100)
ХН35В5Т	650	—	—	28	20	16	18 (1/10 ⁴); 13 (1/10 ⁵); 9 (1/10 ⁶); 12 (1/10 ⁶); 9 (1/10 ⁶); 8 (1/10 ⁶); 6 (1/10 ⁶); 6,3 (5/100)**; 2,1 (5/100) 0,9 (5/100)
	700	—	—	20	15	12	
	750	20	—	15	11	8	
ХН38ВТ	800	8—9	—	5,2	—	—	
	900	3—4	—	—	—	—	
	1000	—	—	—	—	—	
ХН45Ю	1000	2,0	—	—	—	—	
	1100	0,9	—	0,5	—	—	
	1200	0,5	—	0,25	—	—	

*1 После оптимальной термической обработки.

*2 Экстраполированные значения.

*3 В скобках в числителе — деформация в %, в знаменателе — время в ч.

*4 Определено на конических образцах.

отпуска существенного эффекта дисперсионного твердения благодаря выделению дисперсных частиц интерметаллической фазы типа $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$. Такая микроструктура делает сплав устойчивым против температурного воздействия при 700—800°С и выше.

Введение в дисперсионно-твердеющие сплавы этой группы W и Mo в сумме до ~10%, а также Nb дополнительно упрочняет твердый раствор, замедляет развитие диффузионных процессов и увеличивает количество дисперсной упрочняющей фазы. Количество дисперсной фазы увеличивают также путем увеличения суммарного содержания Ti и Al. Все это приводит к существенному возрастанию жаропрочности сплавов, что делает возможным их применение при температурах до 800—850°С и высоких напряжениях.

К особенностям состава никелевых жаропрочных сплавов относится присутствие в них небольших добавок поверхностно-активных элементов В, Се, иногда Ва и Mg), способствующих рафинированию металла и прочнению границ зерен, а также весьма небольшое содержание в них примесей (S, P, Pb и др.).

Термическая обработка этих сплавов заключается в одинарном или двойном нагреве до высоких температур (1080—1200° С) с охлаждением чаще всего на воздухе и последующем отпуске при температурах 700—850° С. Для наибольшей стабилизации исходной структуры применительно к деталям с длительным сроком службы рекомендуется проводить многоступенчатый отпуск при постепенно понижающейся температуре.

Жаропрочные никелевые сплавы изготавливают в виде сортового проката (прутки круглого сечения) и частично в виде поковок различной конфигурации.

Основное назначение этой группы высоколегированных сплавов — изготовление рабочих лопаток и дисков газовых турбин. Диски работают при более высоких напряжениях, чем лопатки (но при несколько пониженной температуре), поэтому материал диска должен иметь высокое сопротивление ползучести (особенно на ободу) и повышенную прочность (в ступичной части).

Прочность сплавов на никелевой основе сохраняется высокой вплоть до температур 800—900° С. Так, при 800° С предел прочности наиболее легированных сплавов составляет 70—80 кгс/мм², 100-часовая длительная прочность — 25—30 кгс/мм². В то же время характеристики пластичности δ и ψ удовлетворительны при всех температурах испытания и несколько снижаются в температурном интервале дисперсионного твердения (700—800° С). Остаточная деформация этих сплавов при испытаниях на длительную прочность при 700—800° С порядка 3—10%.

В табл. 102 приведены характеристики жаропрочности никелевых сплавов.

На рис. 25 приведены характеристики механических свойств широко применяемого в авиации сплава ХН77ТЮР при кратковременном нагружении при температурах 500—900° С. Зависимость длительной прочности этого сплава и его модификации без бора ХН77ТЮ от времени дана на рис. 26.

Для длительных сроков службы наилучшее сочетание длительной прочности и пластичности у сплава ХН65ВМТЮ, получившего широкое применение как материал для лопаточного аппарата стационарных газовых турбин ГТ-6, ГТН-9, ГТК-10, ГТК-16, ГТТ-12, ГТА-18, ГТУ-25, ГТУ-100. Этот сплав — основной лопаточный материал в стационарном газотурбостроении. Кроме того, благодаря исключительно высокой релаксационной стойкости этот сплав применяют для изготовления крепежных деталей турбин.

Из жаропрочных никелевых сплавов можно получать детали методом отливки (например, точным литьем по выплавляемым моделям).

Ко второй группе относятся сплавы марок ХН70, ХН60Ю, ХН70Ю, ХН78Т, ХН60В и ХН75МБТЮ, применяемые преимущественно как жаростойкие. Эти сплавы, за исключением двух последних, отличаются высоким содержанием Cr (20—30%) и практически однородной структурой твердого раствора после принятых режимов термической обработки (нагрев до 1000—1200° С с охлаждением в воде или на воздухе).

Эти сплавы выпускают в виде холоднокатаного или горячекатаного листа и применяют преимущественно для деталей газопроводных систем, работающих при умеренных напряжениях в условиях весьма высоких температур (до 1100—1200° С). У этих деталей кроме достаточной технологичности (прокатываемость, штампуемость, свариваемость) и высокого сопротивления газовой коррозии (окалиностойкость) должно быть

102. Пределы длительной прочности и ползучести сплавов на никелевой основе¹

Сталь	Температура, °С	Длительная прочность (кгс/мм ²) за время, ч					Пределы ползучести ² , кгс/мм ²
		100	200	300	1000	10 000 ²	
ХН65ВМТЮ	700	>60	—	—	40	30	30 (1/10 000)
	750	50	—	—	33	23	20 (1/10 000)
	800	30	—	—	20	14	12 (1/10 000)
ХН70ВМЮТ	600	78	75	74	65	53	—
	700	45—50	42—47	40—45	31—35	22—24	20 (1/10 000)
	800	22—25	21—23	19—22	14—16	—	8 (1/10 000)
ХН70ВМТЮ	700	48—52	—	42	(36)	—	30 (0,2/100)
	800	28—30	—	21	(18)	—	17 (0,2/100)
	850	18—20	—	—	(10)	—	17 (0,2/100)
ХН80ТБЮ	650	—	—	—	40	30—26	35 (1/10 000)
	700	—	—	—	27	17—18	22 (1/10 000)
ХН70МВТЮБ	700	48	42	—	—	—	18 (0,2/100)
	800	25	23	—	—	—	—
	850	48—52	—	38—42	36—39	28—32	36 (1/1 000)
ХН67ВМТЮ	700	28—30	—	23—25	18—20	12—15	—
	800	18—20	—	14—16	11—13	7—8	—
	900	12—14	—	9—10	7—8	4—4,5	6 (1/1 000)
ХН75МБТЮ	700	16—17	15	—	—	—	—
	800	8	7	—	—	—	4,3 (5/100) ⁴
	900	2,9	2,2	—	—	—	1,4 (5/100) ⁴
ХН78Т	700	10,5	—	—	3,2—3,5	—	—
	800	4,5	—	—	—	—	1,8 (5/100) ⁴
	900	1,5	—	—	—	—	0,7 (5/100) ⁴
ХН77ТЮР	600	68	66	—	—	45	72 (0,2/100)
	700	42	40	—	35	18	26 (0,2/100)
	800	20	—	—	15	—	15 (0,2/100)
ХН60Ю	800	6—8	—	—	4—5	—	—
	900	3,5	—	—	~2	—	2,4 (0,2/100)
	1000	0,6	—	—	—	—	1,0 (0,2/100)
ХН60ВТ	800	11	9,5	8,7	—	—	8,3 (5/100) ⁴
	900	5,2	4,3	4	—	—	3,4 (5/100) ⁴
	800	9—10	—	8	—	—	—
ХН70Ю	800	3,5—4	—	—	—	—	2,5 (5/100) ⁴
	900	—	—	—	—	—	—

¹ После оптимальной термической обработки² Экстраполированные значения³ В скобках в числителе — деформация в %, в знаменателе — время в ч⁴ Определено на конических образцах.

хорошее сопротивление термической усталости (термостойкость). Всем этим требованиям отвечают сплавы на никелевой основе.

У жаростойких листовых никелевых сплавов повышенная пластичность в холодном и горячем состоянии, но жаропрочность ниже, чем у сплавов первой группы. Так, длительная прочность за 1000 ч составляет 4—6 кгс/мм² при 800°С и 2—2,5 кгс/мм² при 900°С (см. табл. 102).

Зависимости теплопроводности и коэффициента линейного расширения от температуры для четырех типичных жаропрочных сплавов показаны на рис. 27, 28.

Сплавы на кобальто-никелевой основе. Дополнительное легирование никелевых сплавов кобальтом повышает их жаропрочные свойства,

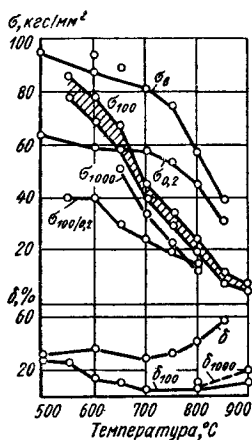


Рис. 25. Зависимость изменения характеристик механических свойств жаропрочного сплава XH77TЮР от температуры

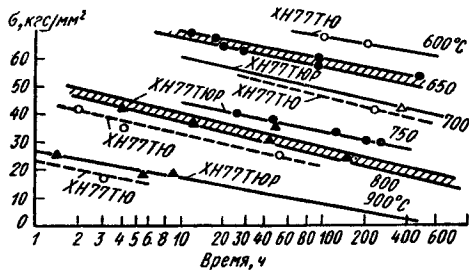


Рис. 26. Длительная прочность сплавов XH77TЮ и XH77TЮР

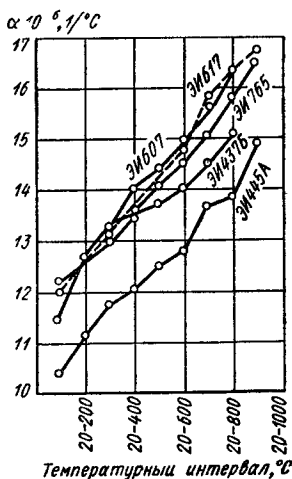


Рис. 27. Зависимость изменения коэффициента линейного термического расширения жаропрочных сплавов на никелевой основе от температуры

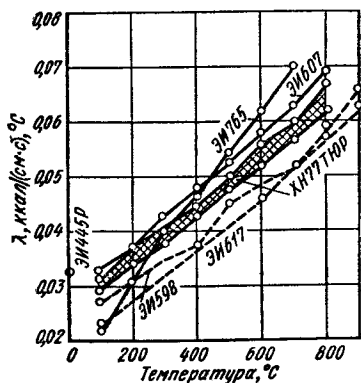


Рис. 28. Зависимость изменения теплопроводности жаропрочных сплавов от температуры

в магнитных цепях, работающих в переменных полях различных электрических машин, аппаратов и приборов.

Сталь, используемая в радиотрансформаторах, трансформаторах для автоматики и телефонной связи, должна иметь высокую проницаемость в слабых полях. Для двигателей и генераторов повышенных частот (400—2500 Гц) применяют сталь с низкими потерями на перемагничивание. У стали, применяемой для магнитопроводов силовых трансформаторов, также должны быть низкие потери и на вихревые токи. Для аппаратов с разветвленным магнитным потоком требуется изотропность магнитных свойств.

Листовую электротехническую сталь по структурному состоянию и магнитным свойствам разделяют на три группы:

1) горячекатаная изотропная сталь марок Э11, Э12, Э13, Э21, Э22, Э31, Э32, Э41, Э42, Э43, Э43А, Э45, Э46, Э47, Э48;

2) холоднокатаная малотекстурованная (изотропная) сталь марок Э1100, Э1200, Э1300, Э3100, Э3200;

3) холоднокатаная текстурованная (анизотропная) сталь марок Э310, Э320, Э330, Э330А, Э340, Э350, Э360, Э360А, Э370, Э380.

Буквы и цифры в марках электротехнической стали обозначают следующее: Э — электротехническая сталь; первая цифра (1, 2, 3, 4) — степень легирования кремнием: 1 — слаболегированная сталь, 2 — среднелегированная сталь, 3 — повышеннолегированная сталь, 4 — высоколегированная сталь; вторая цифра (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) — гарантированные электрические и магнитные свойства стали: 1, 2, 3 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 Гц (1 — нормальные удельные потери, 2 — пониженные, 3 — низкие), 4, 5, 6, 7, 8 — удельные потери для разных групп стали при перемагничивании с частотой 400 Гц, индукция и магнитная проницаемость в слабых и средних полях; третья цифра (0) — то, что сталь холоднокатаная текстурованная (анизотропная); третья и четвертая цифры (00) — что сталь холоднокатаная малотекстурованная (изотропная); А — особо низкие удельные потери.

104. Характеристики свойств горячекатаной изотропной электротехнической стали (толщина листа 0,5 мм)

Сталь	Магнитная индукция (Гс) при напряженности магнитного поля, А/см					Удельные потери, Вт/кг	
	B_{10}	B_{15}	B_{20}	B_{100}	B_{200}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$
	Не менее					Не более	
Э11	—	15 300	16 400	17 600	20 000	3,3	7,7
Э12	—	15 000	16 200	17 500	19 800	3,2	7,5
Э13	—	15 000	16 200	17 500	19 800	2,8	6,5
Э21	—	14 800	15 900	17 300	19 500	2,5	6,1
Э22	—	14 800	15 900	17 300	19 500	2,2	5,3
Э31	—	14 600	15 700	17 200	19 400	2,0	4,4
Э32	—	14 600	15 700	17 100	19 200	1,8	3,9
Э41	13 000	14 600	15 700	17 000	19 000	1,55	3,5
Э42	12 900	14 500	15 600	16 900	18 900	1,40	3,1
Э43	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	1,25	2,9
Э43А	12 900	14 400	15 500	16 900	18 900	1,15	2,7

По действующим стандартам (ГОСТ 802—58 и 9925—61) выпускают 31 марку горячекатаной и холоднокатаной электротехнической стали. Горячекатаную сталь выпускают в виде листов толщиной от 0,1 до 1 мм, холоднокатаную — в виде листов и ленты толщиной от 0,05 до 0,5 мм. Свойства сталей приведены в табл. 104, 105, 106.

105. Характеристики холоднокатаной малотекстурованной стали толщиной 0,5 мм

Сталь	Магнитная индукция (Гс) при напряженности поля, А/см				Удельные потери, Вт/кг	
	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{200}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$
	Не менее				Не более	
Э1100	15 300	16 400	17 600	20 000	3,3	7,5
Э1200	15 300	16 400	17 600	20 000	2,8	6,5
Э1300	15 500	16 400	17 600	20 000	2,5	5,8
Э3100	15 000	16 000	17 300	19 600	1,7	3,7
Э3200	14 800	15 800	17 200	19 500	1,5	3,4

106. Характеристики свойств холоднокатаной текстурованной стали

Сталь	Толщина листа, мм	Магнитная индукция (Гс) при напряженности поля, А/см					Удельные потери, Вт/кг		
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{200}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{15/50}$
		Не менее					Не более		
Э310	0,50	16 000	17 500	18 300	19 100	19 800	1,1	2,45	3,2
Э320	0,50	16 500	18 000	18 700	19 200	20 000	0,95	2,1	2,8
Э330	0,50	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,8	1,75	2,5
Э310	0,35	16 000	17 500	18 300	19 100	19 800	0,8	1,75	2,5
Э320	0,35	16 500	18 000	18 700	19 200	20 000	0,7	1,5	2,2
Э330	0,35	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,6	1,3	1,9
Э330А	0,35	17 000	18 500	19 000	19 500	20 000	0,5	1,1	1,6

Электротехническая сталь склонна к старению — увеличению потерь с течением времени или при нагреве до 120—150° С, причем склонность к старению выше у низколегированных сталей. ГОСТ 802—58, 9925—61 нормируют коэффициент старения — не более 3% для высоколегированных сталей, не более 6% для средне- и повышеннолегированных сталей и не более 9% для слаболегированных сталей.

Удельное электрическое сопротивление (электросопротивление) стали возрастает с повышением содержания кремния. Среднее удельное электросопротивление слаболегированной стали 0,25 (Ом·мм²)/м, среднелегированной стали — 0,40 (Ом·мм²)/м, повышеннолегированной стали — 0,50 (Ом·мм²)/м, высоколегированной стали — 0,60 (Ом·мм²)/м.

Для получения заданных электрических и магнитных свойств сталь подвергают отжигу по режиму: температура 1150° С, выдержка 4—6 ч, в защитной среде, охлаждение до 400° С со скоростью не более 50° С/ч.

Магнитно-мягкие сплавы

У магнитно-мягких сплавов специального назначения на железной, железо-никелевой и железо-кобальтовой основах высокие магнитные характеристики в сочетании с комплексом других свойств, обусловленных их особенностями их применения.

Состав сплавов, выпускаемых металлургической промышленностью по ГОСТ 10160—75 и техническим условиям, и их классификация в зависимости от свойств приведены в табл. 107.

Сплавы с наименьшей начальной $\mu_0 = (20 \div 100) \cdot 10^3$ Гс/Э и высокой максимальной $\mu_{\max} = (100 \div 1000) \cdot 10^3$ Гс/Э проницаемостью и малой коэрцитивной силой — 79НМ, 80НХС, 76НХД, 83НФ, 77НМД — выпускают в виде ленты толщиной от 0,005 до 1 мм и применяют для изготовления сердечников малогабаритных трансформаторов, реле, магнитных экранов, головок аппаратуры для магнитной записи.

Из ленты толщиной менее 0,05 мм изготавливают сердечники импульсных трансформаторов, магнитных усилителей, элементы счетно-решающих устройств.

При толщине ленты более 0,05 мм сплавы практически изотропны, в более тонких лентах наблюдается анизотропия магнитных свойств.

Сплавы пластичны, поддаются штамповке, сварке, механической обработке; применяются в отожженном состоянии. Режимы термической обработки и магнитные свойства сплавов этой группы указаны в табл. 108.

Механические воздействия, приводящие даже к незначительной пластической деформации или остаточным напряжениям, ухудшают свойства сплавов, поэтому всю механическую обработку следует проводить до окончательной термической обработки.

Сплавы 50НХС и 12Ю характеризуются высокой магнитной проницаемостью ($\mu_{\max} = 15\,000—100\,000$ Гс/Э) и повышенным электросопротивлением ($\rho = 0,9 \div 1,0$ Ом·мм²/м).

Сплав 50НХС применяется для магнитных сердечников, работающих в импульсном режиме намагничивания. Изготавливается в виде ленты толщиной от 0,02 до 1,0 мм. Сплав 12Ю применяют для магнитопроводов, испытывающих механические воздействия; у него повышенная твердость и прочность. Структура сплава — однофазный α -твердый раствор. Изготавливается в виде кованых прутков $\varnothing 15—80$ мм. При механической обработке требует малых подач и обильного охлаждения.

У сплава 50Н высокая магнитная проницаемость ($\mu_{\max} = 20\,000 \div 100\,000$ Гс/Э) и повышенная индукция насыщения (B_s — не менее 15 000 Гс), его применяют для витых и штампованных сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, трансформаторов звуковых частот, дросселей, реле и деталей магнитных цепей, работающих без подмагничивания или с малыми подмагничивающими полями.

Изготавливается в виде лент толщиной 0,02—2,5 мм, листа 3—22 мм, прутков $\varnothing 8—100$ мм, проволоки $\varnothing 0,1—2,0$ мм.

Сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса 50НП, 68НМП, 34НКМП, 40НКМП имеют коэффициент прямоугольности $K_{\Pi} = \frac{B_r}{B_s} = 0,85 \div 0,98$, повышенную магнитную проницаемость ($\mu_{\max} = 40\,000 \div 300\,000$ Гс/Э), высокую индукцию насыщения. Прямоугольность петли гистерезиса связана с кристаллографической текстурой и обеспечивается специальной технологией прокатки и термической обработки ленты. Эти сплавы применяют для сердечников магнитных усилителей, импульсных

па	Основная характеристика	Сплав	Ni	Co	Mo	Cr	Si	Прочие элементы
I	Наивысшая магнитная проницаемость в слабых полях	79НМ 80НХС 76НХД 83НФ 77НМД	78,5—80,0 79,0—81,0 75,0—76,5 83,0—84,5 75,5—78,0	— — — — —	3,8—4,1 — — — 3,9—4,5	— 2,6—3,0 1,8—2,2 — —	— 1,1—1,5 — — —	— — Cu 4,8—5,2 V 4,8—5,1 Cu 4,8—6,0
II	Высшая магнитная проницаемость и повышенное удельное электросопротивление	50НХС 12Ю	49,5—51,0 —	— —	— —	3,8—4,2 —	1,1—1,4 —	— Al 11,8—12,8
III	Высокая магнитная проницаемость и повышенная индукция технического насыщения	50Н	49,5—50,5	—	—	—	—	—
IV	Прямоугольная петля гистерезиса	50НП 68НМП	49,5—50,5 67,0—69,0	— —	— 1,5—2,5	— —	— —	— —
V	Низкая остаточная индукция и постоянная магнитная проницаемость	47НК 68НМ	46,0—48,0 67,5—69,0	22,5—23,5 —	— 1,5—2,5	— —	— —	— —
VI	Высокое техническое насыщение	50КФ 49КФ	— —	49—51 48,0—49,5	— —	— —	— —	V 1,5—2 V 1,3—1,8

* Остальное — железо.

Примечания 1 Сплавы содержат минимальное количество технологических примесей 2 Сплавы 50НП и 68НМП по химическому составу соответствуют сплавам 50Н и 68НМ, но отличаются прямоугольной петлей гистерезиса.

108. Типичные характеристики магнитных свойств ленты из сплавов с наивысшей и высокой магнитной проницаемостью

Сплав	Термическая обработка		Толщина ленты, мм	$\mu_0 \cdot 10^{-3}$, Гс/Э	$\mu_{\max} 10^{-3}$, Гс/Э	H_c , Э	$B_S \cdot 10^{-3}$ Гс, не менее
	Режим отжига	Скорость охлаждения					
79НМ	1100—1150° С 3 ч, вакуум или водород	До 600° С — 100—200° С/ч, далее — не менее 400° С/ч	0,05—0,08 0,1—0,18 1,0—0,35	16 20 25	90 120 150	0,04 0,03 0,02	7,5
80ХСН	1100—1150° С 3 ч, вакуум или водород	До 400° С — 100° С/ч, далее на воздухе	0,04—0,02 0,1—0,18 1,0—0,55	18 22 30	70 120 170	0,05 0,03 0,012	6,5
76НХД	1100—1150° С 3 ч, вакуум или водород	До 500° С — 50° С/ч, до 300° С — 10° С/ч, далее не менее 400° С/ч	0,04—0,02 0,1—0,18 0,2—0,3	10 15 18	50 120 150	0,065 0,025 0,02	7,5
77НМД	1100—1150° С 3 ч, вакуум или водород	—	0,05 0,10 0,20—0,35	40 50 30	140 120 100	0,03 0,02 0,03	6,0
50НХС	1100—1150° С 3 ч, вакуум или водород	100° С/ч до 400° С, далее на воздухе	0,02—0,04 0,10—0,18 0,55—1,0	1,5 2,5 3,0	15 25 20	0,25 0,16 0,12	10
50Н	1100—1150° С 3 ч, вакуум или водород	100° С/ч до 400° С, далее на воздухе	0,02—0,04 0,35—0,5 1,1—2,5	2,3 3,0 2,8	25 30 25	0,2 0,12 0,16	15

Сплав	Термическая обработка		Толщина ленты мм	$\mu_0 \cdot 10^{-2}, \text{ Гс/Э}$	$\mu_{\text{max}} \cdot 10^{-2}, \text{ Гс/Э}$	$H_c, \text{ Э, не более}$	$B_s \cdot 10^{-2}, \text{ Го}$	$K_n = \frac{B_r}{B_s}$	ГОСТ или ТУ
	Режим отжига	Скорость охлаждения		Не менее					
50НП	1100—1150° С в вакууме или водороде	До 600° С— 100—200° С/ч, до 200° С — не более 400° С/ч	0,05 0,01	1 0,7	35 20	0,23 0,4	15	0,83 0,85	ГОСТ 10160—75 ЧМТУ 975—63
68НМП	1-я операция — 1100—1200° С в вакууме или водороде	До 600° С— 100—200° С/ч, далее 400° С/ч	0,20—0,10 0,08 0,02		300 600 200	0,05 0,03 0,05	11,5	0,95	ТУ 968—63 ТУ 14-1-267—72 ТУ 14-1-267—72
	2-я операция — отжиг в магнитном поле 10—15 Э, 600—650° С, 0,5—1 ч	До 200° С — 25— 100° С/ч							

трансформаторов, модуляторов, магнитных элементов вычислительных машин. Изготавливаются в виде холоднокатаной ленты толщиной от 0,005 до 0,5 мм.

Магнитные характеристики приведены в табл. 109.

У сплава 47НК после термомагнитной обработки в поперечном магнитном поле постоянная магнитная проницаемость, малая нелинейность кривой намагниченности в интервале индукций от 0 до (10—12) кГс и низкая остаточная индукция. После выдержки в поперечном магнитном поле в интервале температур от 600 до 550° С и медленного охлаждения со скоростью 20—50° С/ч у сплава 47НК по ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1455—67 следующие магнитные свойства:

$$\mu_0 \geq 900 \text{ (1250} \div \text{1350) Гс/Э; } \mu_{\max}/\mu_0 \leq 1,15 \text{ (1,08} \div \text{1,10);}$$

$$B_r/B_{10} \leq 0,05 \text{ (0,03} \div \text{0,04)}.$$

Сплав в виде ленты толщиной 0,01—0,1 мм применяют для сердечников магнитных систем измерительных приборов, широкополосных трансформаторов, катушек постоянной индуктивности.

Сплав 50КФ в виде поковок применяют для сердечников соленоидов, полюсных наконечников в постоянных полях, в виде лент и полос— для изготовления пакетов ультразвуковых преобразователей. Нормируемые по ЧМТУ 1-513—69, ЧМТУ 4-217—69 и ТУ 14-222-8—71 характеристики: $B_{11} \geq 15\,000$ Гс; $B_{16} \geq 17\,000$ Гс; $B_{25} \geq 19\,000$ Гс; $B_{38} \geq 20\,000$ Гс; $B_{47} \geq 21\,000$ Гс; $B_{63} \geq 22\,000$ Гс; $B_{150} \geq 22\,500$ Гс; $\mu_0 \geq 700$ Гс/Э; $\lambda_s \geq 60 \cdot 10^{-6}$.

Сплавы 68НМ и 79НЗМ характеризуются высокой магнитной проницаемостью и большим приращением индукции при однополярном импульсном намагничивании. После термомагнитной обработки в поперечном поле сплава 68НМ его проницаемость при уровне 3000—4000 Гс/Э мало зависит от поля и температурный коэффициент проницаемости не более $8 \cdot 10^{-4}$ 1/°С в интервале температур 60—120° С. Сплав выпускают в виде ленты толщиной 0,006—0,02 мм и используют для катушек постоянной индуктивности, дросселей фильтров, широкополосных трансформаторов.

Магнитно-твердые сплавы

Литые дисперсионно-твердеющие сплавы на основе системы Fe—Ni—Co—Al имеют самую высокую из всех промышленных материалов магнитную энергию $(BH)_{\max}$. Их применяют для постоянных магнитов.

Состав и основные магнитные свойства этих сплавов приведены в табл. 110.

Высокая коэрцитивная сила сплавов обусловлена структурным превращением $\alpha_2 \rightarrow \alpha + \alpha_2$, в результате которого возникает структура, представляющая собой однодоменные анизотропные выделения α -фазы на основе железа, расположенные в направлении (100) в маломангнитной α_2 -матрице.

Термическая обработка сплавов без кобальта или с низким его содержанием (ЮНД4, ЮНД8С, ЮНДК15) заключается в медленном нагреве до температуры существования однородного твердого раствора 1250—1280° С, охлаждении на воздухе и последующем отпуске при 580—600° С.

Для сплавов с более высоким содержанием Со (>18%) и имеющих более высокую температуру Кюри регулируемое охлаждение, начиная с температуры гомогенного твердого раствора (1280—1300° С), проводят в магнитном поле. При этом возникает магнитная текстура и магнитные

Сплав	Химический состав, % *					$(BH)_m \cdot 10^6$, Гс/Э	H_c , Э	B_r , Гс
	Ni	Al	Co	Cu	Прочие	Не менее		
ЮНД4	24—25	13—14	—	3—4	Ti 0,2—0,3 Si 0,1—0,2	0,9	500	5 000
ЮНДК15	18—19	8,5—9,5	14—15	3—4	Ti 0,2—0,3	1,5	600	7 500
ЮН14ДК24	13,5—14,5	7,5—8,5	23,5—24,5	2,5—3,5	—	4,5	600	12 500
ЮН14ДК25А	13,5—14,5	8,0—8,5	24,0—26,0	3,5—4,0	Ti $\geq$ 0,03	7,0	650	13 300
ЮН14ДК25БА	13,5—14,0	8,0—8,5	24—26	3,5—4,0	Nb 0,8—1,0 Ti $\geq$ 0,3	7,0	720	13 000
ЮНДК31Т3БА	13,0—13,5	6,8—7,2	30,5—31,5	3,0—3,5	Ti 3,0—3,5 Nb 0,9—1,1	8,0	1 150	11 500
ЮНДК35Т5	14,0—14,5	6,8—7,2	30,5—31,5	3,0—3,5	Ti 5,0—5,5	4,5	1 380	8 000
ЮНДК35Т5БА	14,0—14,5	6,8—7,2	34,5—35,5	3,3—3,7	Ti 4,7—4,5	9,0	1 380	10 200
ЮНДК35Т5АА	14,0—14,5	7,0—7,5	34,0—35,0	2,5—3,0	Nb 0,8—1,1 Ti 5,0—5,5 Si 0,1—0,2	10,0	1 400	10 500
ЮНДК40Т8АА	14,0—14,5	7,2—7,7	39,0—40,6	3,0—4,0	Ti 7,0—8,0 Si 0,1—0,2	8,0	1 800	9 000
ЮНДК42Т8	13,5—14,5	7,5—8,5	41,5—42,5	3,0—4,0	Ti 8,0—9,0	4,5	1 900	7 500

* Остальное — железо, в сплав ЮНДК35Т5БА введено 0,05—0,1% Се.

свойства сплавов значительно улучшаются. При обработке сплавов с содержанием кобальта выше 30% применяют изотермическую выдержку при 770—830° С (в зависимости от состава) в магнитном поле. Все сплавы подвергают ступенчатому высокотемпературному отжигу.

Литые сплавы для постоянных магнитов отличаются высокой твердостью, хрупкостью, низкой механической прочностью, склонны к трещино- и сколообразованию. Поддаются только шлифованию, электроэрозционной и анодно-механической обработке.

Металлокерамические магнитно-твердые материалы. Для металлокерамических магнитов (ММК) используют порошки литых или деформируемых сплавов на основе систем Fe—Ni—Al—Co, Cu—Ni—Co, Cu—Ni—Fe, Co—Pt, Fe—Co—Mo и др.

Магниты изготавливают прессованием для получения конечной формы (иногда с дополнительной обработкой резанием), затем спекают и подвергают термической обработке по тем же режимам, что и литые сплавы того же состава. Иногда целесообразно изготовлять прокат из спеченных металлокерамических материалов, из которого можно штамповкой или механической обработкой получить магнит нужной формы.

У готовых металлокерамических магнитов обычно пористость от 2 до 5% (объемных). По магнитным свойствам металлокерамические магнитные материалы незначительно уступают литым сплавам, однако у порошковой технологии ряд преимуществ: меньшие потери и отходы материала, более высокая производительность труда, меньший объем механической обработки, большая однородность изделий по свойствам.

Деформируемые сплавы для постоянных магнитов. Основное преимущество деформируемых магнитно-твердых сплавов — возможность получать их в виде тонких сечений — листа, ленты, проволоки, иногда даже порядка нескольких микрон.

Деформированный сплав ЮНДК-24 выпускают в соответствии с ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1499—70 в виде горячекатаных листов толщиной от 3 до 16 мм. Режим термической обработки сплава для получения высокой коэрцитивной силы состоит из двух операций: 1) закалка от 1280—1300° С с охлаждением в магнитном поле 1000—1200 Э. Скорость охлаждения регламентирована только в интервале 900—700° С и составляет 1—2° С/с; 2) ступенчатый отпуск при 600 и 580° С с выдержками в течение 2 и 8 ч соответственно.

Деформированный сплав изотропен, имеет более высокие магнитные [$H_c \geq 580$ Э, $B_r \geq 12\,800$ Гс, $(BH)_m \geq 4 \cdot 10^6$ Гс·Э] и механические свойства, чем аналогичный по составу литой сплав, устойчивость его к климатическим, вибрационным и ударным воздействиям выше. У деформированного сплава ниже твердость и лучше обрабатываемость, чем у литого. Повышенная пластичность деформированного сплава при высоких температурах позволяет применять горячую вырубку и штамповку заготовок магнитов.

Сплавы системы Fe—Ni—Al—Nb (20НЮ, 22НЮ, 25НЮ, табл. 111), выпускаемые в соответствии с ЧМТУ/ЦНИИЧМ 5800—57 в виде горячекатаных листов толщиной от 1,5 до 10 мм, предназначены для дешевых малогабаритных магнитов.

Термическая обработка этих магнитов следующая: нагрев до 1200° С и последующее охлаждение на воздухе или в горячей воде. Возможна закалка от 1200° С в масле с последующим отпуском при 600° С в течение 8—12 ч. Твердость сплавов после горячей прокатки HRC 40—45, после окончательной обработки HRC 50—55. Возможные методы обработки

для получения изделий (магнитов) — горячая штамповка, электроэрозсионная или анодномеханическая резка.

Сплавы 58КФА, 52КФБ, 52КФВ (см. табл. 112) выпускают в виде проволоки $\varnothing$ 0,5—3,0 мм, полос и лент толщиной от 0,2 до 1,3 мм. После холодной деформации твердость сплавов HRC 32—40 и их можно механически обрабатывать (резка, штамповка, высечка и др.). Термическая обработка после холодной деформации — отпуск при 600—620 °C. После окончательной обработки твердость HRC 58—62.

111. Химический состав * (%) и характеристики магнитных свойств сплавов системы Fe—Ni—Al—Nb по ЧМТУ/ЦНИИЧМ 5800—57

Сплав	Ni	Al	Nb	H_c , Э	B_r , Гс
20НЮ	19,5—20,5	8,4—9,6	3,7—4,2	150—180	8000—7000
22НЮ	21,5—22,5	8,4—9,6	3,7—4,2	220—260	8000—7000
25НЮ	24,5—25,5	8,4—9,8	3,7—4,2	400—500	6000—5000

* C ≤ 0,05%, Si ≤ 0,4%, Mn ≤ 0,6% (остальное Fe)

Легированные магнитно-твердые стали (табл. 113) изготавливают по ГОСТ 6862—71 в виде горячекатаных или кованых прутков. В состоянии поставки стали имеют невысокую твердость — от HB 229—285 для стали EX3 до HB 341—369 для стали EX5K5. Магнитные свойства стали получают после термической обработки, состоящей из нормализации, высокого отпуска (для сталей EX5K5 и EX9K15M2), закалки и низкого отпуска (100° C).

112. Химический состав * (%) и характеристики магнитных сплавов системы Fe—Co—V (ЧМТУ/ЦНИИЧМ 5009—55)

Сплав	Co	V	H_c^{**} , Э	B_r , Гс	$H_c B_r \cdot 10^{-4}$, Гс/Э
52КФА	51—53	12,6—13,5	500/350	$\frac{6\ 000}{6\ 000}$	3,2,3
52КФБ	51—53	11,6—12,5	350/300	$\frac{8\ 500}{7\ 500}$	3/2,4
52КФВ	51—53	11,0—11,5	300/220	$\frac{10\ 000}{10\ 000}$	3/2,4

* C ≤ 0,2%, Si и Ni ≤ 1,0%, остальное — Fe.
 ** В числителе — характеристики проволоки, в знаменателе — листа.

113. Химический состав * (%) и характеристики магнитных свойств легированных магнитно-твердых сталей (ГОСТ 6862—71)

Сплав	C	Cr	W	Mo	Co	H _c , Э	B _r , Гс
						не менее	
EX3	0,9—1,1	2,8—3,6	—	—	—	60	9 500
EB6 (E7B6)	0,68—0,78	0,3—0,5	5,2—6,2	—	—	60	10 000
EX5K5	0,9—1,05	5,5—6,5	—	—	5,5—6,5	90	8 500
EX9K15M2 (EX9K15M)	0,9—1,05	8,0—10,0	—	1,0—1,7	13,5—16,5	150	8 000

* Во всех сплавах содержание Mn 0,20—0,40%, Si 0,17—0,40%; Ni ≤ 0,30%, P ≤ 0,03%, S ≤ 0,02%, остальное Fe.

114 Химический состав и коэффициент линейного расширения сплавов с минимальным ТКЛР

Сплав	Химический состав*, %			Интервал температур °C	Средний ТКЛР·10 ⁶ 1/°C (не более)	Термическая обработка
	Ni	Co	Прочие			
36H	35—37	—	—	20—80	1,5	Закалка в воде при 840° C, отпуск при 315° C (1 ч)
32HКД	31,5—33	3,3—4,2	Cu	20—100	1,0	Закалка в воде при 860° C, отпуск при 315° C (1 ч)
36HХ	35—37	—	Cr	20—100	2,0	Закалка в воде при 840° C, отпуск при 315° C (1 ч)
39H	38—40	—	—	20—100	3—4	Отжиг при 850° C, охлаждение на воздухе
35HKT	34—35	5—6	Ti 2,2—2,8	20—60	3,5	Закалка в воде при 950° C, отпуск при 650° C (4 ч)

* Сплавы содержат минимальное количество примесей (C ≤ 0,03%, Si ≤ 0,3% Mn ≤ 0,4%, S и P ≤ 0,02%), остальное Fe

Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения

Сплавы, основной характеристикой которых является температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), в зависимости от величины ТКЛР и назначения делят на три группы:

- 1) сплавы с минимальным ТКЛР (36Н, 36НХ, 39Н, 32НКД, 35НКТ);
- 2) сплавы с низким и средним ТКЛР (29НК, 34НК, 30НКД, 42Н, 38НКД, 52Н, 47НХР, 18ХТФ, 58Н);
- 3) немагнитные сплавы со средним ТКЛР (75НМ, 80НМВ, 70НВД).

Сплавы с ТКЛР, близким к нулю (типа инвар), применяют в метрологии, приборостроении, электронике для деталей с высокой стабильностью размеров в интервале температур от 4,2 до 420 К.

Наиболее широко известны сплавы 36Н (инвар), имеющий $\text{ТКЛР} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и 32НКД (суперинвар) с $\text{ТКЛР} \approx (0,5 - 0,8) \cdot 10^{-6}$. Для деталей, работающих при низкой температуре, и труб в криогенной технике применяют сплавы 36НХ и 39Н, структура и свойства которых стабильны до температуры жидкого гелия. Для нагруженных деталей высокоточных приборов, а также для точных пружин применяют сплав 35НКТ, приобретающий в результате закалки и старения наряду с низким ТКЛР повышенные механические свойства (табл. 114).

Сплавы этой группы пластичны, хорошо обрабатываются резанием, полируются, свариваются. При сварке целесообразно использовать специальную присадочную проволоку из сплавов 36НГ6 и 36НГТ. Сплавы применяют в состоянии после отжига, нормализации или закалки с отпуском. Для повышения стабильности геометрических размеров в течение длительного времени сплавы после закалки и отпуска подвергают длительному старению при 100°C в течение не менее чем 48 ч.

Сплавы с низким и средним ТКЛР предназначены для вакуумно-плотных соединений с неорганическими диэлектриками — стеклом, керамикой, сапфиром, слюдой и т. д. Эти сплавы в интервале температур ниже точки Кюри имеют ТКЛР, близкий к ТКЛР соответствующих диэлектриков (табл. 115), что обеспечивает низкий уровень напряжений в спае.

Из этой группы сплавов наиболее широко применяется в промышленности сплав 29НК (ковар). Его используют для соединения с термостойкими стеклами С52-1, С49-2 и др. в радиолампах, полупроводниковых приборах, электроннолучевых трубках и других электровакуумных приборах. Сплав технологичен, хорошо обрабатывается резанием, сваривается, штампуются. Изготавливается в виде поковок, прутков, полос, ленты толщиной от 0,02 до 2,5 мм, проволоки диаметром от 0,02 до 3,5 мм, трубок диаметром от 10 до 1 мм.

Структура сплава — однофазный γ -твердый раствор, устойчивый до температуры -70°C . При более низкой температуре возможно образование α -фазы, сопровождающееся изменением объема и ТКЛР. Сплав с содержанием никеля на верхнем пределе допуска по ГОСТ 10994—68 не претерпевает превращений при охлаждении до -196°C .

Склонность к мартенситному превращению при низких температурах имеет также сплав 30НКД. Остальные сплавы с низким и средним ТКЛР имеют стабильную структуру γ -твердого раствора до температуры жидкого гелия.

Для сплавов 47НД и 52Н, применяемых для герметизированных магнитоуправляемых контактов (герконов), кроме ТКЛР нормируются

115. Химический состав и нормируемые характеристики свойств сплавов с низким и средним ТКЛР

Сплав	Химический состав*1, %			Средний ТКЛР·10°, в интервале температур, °С			Температура перегиба (не ниже), °С	Примечание
	Ni	Co	Прочие	20—300	20—400	20—500		
29НК	28,5—29,5	18—17	—	4,6—5,5	4,5—5,2	5,9—6,4	420	Спаян со стеклами С50-1, С52-1 и др.
30НКД	29,5—30,5	13—14,2	Cu 0,3—0,5	3,3—4,3	3,8—4,6	5,9—6,7	390	Спаян со стеклом С38-1, С48-1
38НКД	37,5—38,5	4,5—5,5	Cu 4,5—5,5	7,0—8,0	7,0—8,0	8,0—9,0	400	Спаян со стеклом С72-1, С76-4
47НД	46—48	—	Cu 4,5—5,5	9,2—10,2	9,2—10,2	9,8—10,8	440	Спаян со стеклом С87-1, С89-2, С90-1
47НХР	46—48	—	Cr 4,5—6,0 В 0,02	8,5—9,5	9,2—10,2	9,8—10,8	330	Спаян со стеклом С87-1, С89-2, С90-1
47НХ*2	46—47,5	—	Cr 0,7—1,0	—	8,0—9,0	—	—	Спаян со стеклом С76-4, С82-1
34НК	33,5—34,5	11,5—12,5	—	5,2—6,1	5,1—6,0	6,0—7,0	380	Спаян с керамикой 22ХС
42Н	41,5—42,5	—	—	4,5—5,0	Не нормируется		—	Спаян с керамикой
52Н	51—53	—	—	9,6—10,6	9,6—10,6	9,8—10,8	480	Герметизированные реле
58Н*3	57,5—59,5	—	—	10,8—11,5	—	—	—	Штриховые меры, линейки прецизионных станков
18ХТФ	—	—	Cr 17—19 Ti 0,4—0,8 V 0,25—0,45	—	—	11,0—11,4	—	Спаян со стеклом С89-2, С90-1 и др.

*1 Сплавы содержат минимальное количество примесей ($C \leq 0,05$, $Si \leq 0,3\%$, $Mn \leq 0,4\%$, S и $P \leq 0,02\%$), остальное — Fe.

*2 Данные в интервале температур 20—450° С.

*3 Данные в интервале температур 20—40° С.

Сплав	ρ , (Ом·мм ²)/м	λ , кал/(см·с·°C)	μ_c , °C	B_s , Гс	H_c , Э	E	σ_B	δ , %
						кгс/мм ²		
36Н	0,80	0,03	230	8 700	0,16	15 000	44—48	35—40
32НҚД	0,78	0,032	220	10 600	0,16	14 400	44—48	38—45
35НКТ	0,85	0,033	210	5 900	0,19	16 400	115—120	8—10
28НҚ	0,50	0,040	440	13 500	0,93	14 500	48—60	≥23
30НҚД	0,50	0,049	400	13 600	0,9	14 000	48—60	≥23
38НҚД	0,50	0,045	405	13 000	0,42	15 000	45—55	≥23
47НД	0,45	0,045	550	13 000	0,28	15 000	45—55	≥23
47НХР	0,90	0,043	350	7 000	0,38	14 000	45—55	20—25
47НХ	0,40	0,048	410	13 000	0,29	14 000	45—55	20—25
34НҚ	0,50	0,048	390	—	—	14 500	48—60	20—25
42Н	0,58	—	—	—	—	14 200	45—55	—
52Н	0,42	0,040	500	23 500	0,2	16 000	45—55	—
58Н	0,40	0,05	—	—	—	—	45—55	—
18ХТФ	0,60	0,052	—	10 500	1,6	18 000	40—50	—
75НМ	1,29	—	—	—	—	23 500	102	40
80НМВ	0,99	—	—	—	—	22 900	90	40
70НВД	1,00	—	—	—	—	27 700	70	35

и характеристики магнитных свойств: соответственно B должно быть не менее 13 000 и 13 500 Гс, а H_c — не менее 0,2 Э (для обоих сплавов).

У сплава 58Н (инвар-стабиль) высокая стабильность размеров и ТКЛР во времени, его применяют для рабочих эталонов длины и линеек, встраиваемых в прецизионные станки.

Немагнитные сплавы на никелевой основе 80НМВ, 75НМ имеют средний ТКЛР $(11+14) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ в интервале от -196 до $+900^\circ\text{C}$, коррозионную стойкость, высокие прочностные свойства и хорошую пластичность.

Физические и механические свойства сплавов с заданным ТКЛР приведены в табл. 116.

Сплавы с высоким электрическим сопротивлением

Сплавы этой группы применяют для изготовления нагревателей промышленных и лабораторных печей и бытовых приборов, а также резисторов, терморезисторов и тензорезисторов (тензодатчиков).

Сплавы для нагревателей. У них должны быть высокое удельное электросопротивление; высокая жаростойкость и достаточная жаропрочность (крипоустойчивость); удовлетворительная пластичность в холодном состоянии.

Наиболее широко для электронагревателей применяют сплавы на основе систем Fe—Cr—Al и Ni—Cr (нихромы). Состав выпускаемых промышленностью сплавов приведен в табл. 117, а их основные свойства — в табл. 118. Сплавы наиболее высокого качества обозначают индексами А и Н, они отличаются прецизионной технологией изготовления, а также наличием микродобавок редкоземельных элементов, повышающих жаростойкость сплавов.

Сплавы Fe—Cr—Al склонны к так называемой 475-градусной хрупкости. При медленном охлаждении ниже 500°C или выдержке в интервале $450\text{--}500^\circ\text{C}$ сплавы охрупчиваются. Для устранения хрупкости

117. Химический состав (%) сплавов
для электронагревателей (ГОСТ 12766—67 *)

Сплав	Mn	Si	Cr	Ni	Al
X13Ю4	≤0,7	≤1,0	12—15	≤0,6	3,5—5,5
0X23Ю5	≤0,5	≤0,7	21,5—24,5	≤0,6	4,5—5,5
0X23Ю5А	≤0,3	≤0,6	21,5—23,5	≤0,6	4,6—5,3
0X27Ю5А	≤0,3	≤0,6	26,0—28,0	≤0,6	5,0—5,8
X15Н60	≤1,5	0,4—1,5	15—18	55—61	≤0,2
X15Н60-Н	≤0,6	1—1,5	15—18	55—61	≤0,2
X20Н80 **	≤0,7	0,4—1,5	20—23	Остальное	≤0,2
X20Н80-Н **	≤0,6	1—1,5	20—23	То же	≤0,2

* Во всех сплавах содержится минимальное количество С, S, Р, остальное — Fe

** В сплаве X20Н80 Fe ≤ 1,5%, в сплаве X20Н80Н Fe ≤ 1,2%.

118. Характеристики свойств сплавов для электронагревателей

Сплав	Рабочая температура, °C		ρ , Ом·мм ² /м	$\frac{R_{1000}^{\circ}\text{C}}{R_{20}^{\circ}\text{C}}$		Живучесть, ч (не менее), при $I_{\text{пред}}$		σ_B , кгс/мм ²			δ , % при 20° C	$\alpha_{10}^{1200^{\circ}\text{C}}$ (при 20° C)	$C_{\text{теп}}$, кал/(г·°C)	$\lambda_{20-1200^{\circ}\text{C}}$, кал/см·°C
	оптимальная	предельная				I класс	II класс	20° C	800° C	1000° C				
X13Ю4	90	1000	1,18—1,34	1,112 *		120	80	—	—	1	20	1	0,12	0,030
0X23Ю5	1150	1200	1,29—1,45	1,033		120	80	66	12	1,7	14	17,45	0,11	0,030
0X27Ю5А	1175	1200	1,30—1,40	1,033		120	80	67,5	8,9	1,3	15	15,0	0,11	0,030
0X27Ю5А	1250	1300	1,37—1,47	0,998		100	60	66	17	6,0	22	16,3	0,11	0,032
X15Н60	950	1000	1,06—1,17	1,139		—	—	—	—	—	22	16,5	0,10	0,035
X15Н60Н	1000	1100	1,06—1,17	1,138		150 **	100 **	67	21	7,3	20			
X20Н80	1050	1100	1,04—1,16	1,078		—	—	—	—	—	20			
X20Н80-Н	1150	1200	1,04—1,16	1,076		150 ***	100 ***	—	—	—	20			

* $R_{900^{\circ}\text{C}}/R_{20^{\circ}\text{C}}$

** Температура испытания 1125° C

*** Температура испытания 1175° C

Сплав	ρ , Ом·мм ² /м	$\alpha_{\rho} \cdot 10^5$ 1/°C	Интервал рабочих темпера- тур, °C	Тензо- чувстви- тельность	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ТУ	Назначение
Н80ХЮД	1,4—1,5	± 3	20—300	—	90—100	8—18	ТУ 141-41—71	Проволока для малогабаритных прецизионных резисторов
Н63ГХ	1,3—1,4	± 3	20—200	—	80—100	8—18	ТУ 141-41—71	Проволока для малогабаритных прецизионных резисторов
ЭП-277	$\geq 1,4$	≤ 5	20—150	—	≥ 90	≥ 10	ЧМТУ 1-337—68	То же
Х20Н75Ю	1,3—1,4	± 3	20—300	$2 \pm 0,05$	90—100	10—20	ЧМТУ 1515—71	Проволока и лента для малогабаритных прецизионных печатных резисторов, жаростойких тензорезисторов
НГ45Ф	1,75—2,0	— (4÷10)	20—150	$2 \pm 0,05$	70—100	4—18	ЧМТУ 1494—70	То же
НМ23ХЮ	1,5—1,6	≤ 3	20—500 20÷ — 196	$2,2 \pm 0,05$	≥ 130	≥ 18	ТУ 14-222-19—72	Проволока и лента для малогабаритных прецизионных резисторов и жаростойких тензорезисторов
0Х21Ю5ФМ	1,4—1,5	≤ 4	20÷600 20÷ — 196	$2,7 \pm 0,05$	≥ 80	8—15	ЧМТУ 1551—66	Проволока для жаростойких тензорезисторов
0Х21Ю9	$\geq 1,65$	— (4÷5)	20—800 20÷ — 196	$2,15 \pm 0,05$	≥ 75	5—10	—	То же

применяют закалку в воде от 750—860° С. При температурах выше 950° С происходит быстрый рост зерна, также понижающий пластичность сплавов.

Нихромы более пластичны как в исходном состоянии, так и в процессе эксплуатации.

Сплавы для резисторов и тензорезисторов. К этим сплавам кроме требований, предъявляемых к сплавам для нагревателей (кроме жаропрочности), предъявляют следующие требования: малый или заданный по величине и знаку температурный коэффициент электросопротивления; низкая ТЭДС в паре с медью; тензочувствительность $S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$.

Важнейшие свойства и область применения сплавов даны в табл. 119.

Сплавы выпускают в виде проволоки диаметром 0,02—0,4 мм и ленты толщиной 0,01—0,1 мм. Сплавы Н63ГХ изготавливают также в виде прутков для литья микропровода в стеклянной изоляции.

СТАЛИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПОСОБОВ ВЫПЛАВКИ

Рост требований к качеству металла привел к тому, что наряду с созданием новых сталей и сплавов нашли применение новые специальные способы выплавки сталей и сплавов более высокого качества, чем выплавляемые в обычных дуговых и индукционных электропечах.

Характеристика специальных способов выплавки

Электрошлаковый переплав (ЭШП)—наиболее распространенный в СССР способ специальной выплавки стали.

Процесс ЭШП идет при атмосферном давлении. Конец плавящегося электрода опущен в расплавленный шлак (масса шлака равна 2—4% от массы слитка), температура которого 1700—2000° С. Капли металла, стекая с электрода, проходят через шлак в жидкую ванну металла. Шлак нагревается выделяющимся теплом благодаря проходящему току. Электрический ток, чаще переменный или реже постоянный, проходит через электрод, шлак, наплавленный металл и через дно медного кристаллизатора к подведенному к нему кабелю.

Отсутствие огнеупоров позволяет выбрать и строго регулировать оптимальный для стали данной марки (группы) химический состав шлака.

Масса слитка — от 0,2 до 150 т.

Поверхность слитка в отличие от поверхности при других способах плавки и разливки стали получается чистой, покрытой тонким слоем шлака, который легко удаляется.

Вакуумная индукционная плавка (ВИП). Вакуумная, как и открытая, индукционная печь состоит из огнеупорного тигля, помещенного внутри индуктора, через который проходит ток высокой частоты. Индуктор с тиглем помещен в герметичную камеру вместе с обычной чугунной изложницей или несколькими изложницами или отдельно от нее (от них) в зависимости от емкости тигля и массы отливаемых слитков.

Разрежение обычно 10^{-2} или 10^{-3} мм рт. ст., температура нагрева металла и время его выдержки регулируются, их предельные значения ограничиваются износостойкостью огнеупорного тигля и возможностью загрязнения металла неметаллическими включениями. Испарение ком-

понентов, входящих в состав плавящегося металла, например марганца, также ограничивает степень разрежения в ВИП.

Для сокращения длительности плавки отбирают шихтовые материалы с минимальным содержанием фосфора и других вредных примесей. Емкость тиглей промышленных ВИП — от 0,2 до 60 т.

Вакуумный дуговой переплав (ВДП). Кристаллизатор и нижняя часть электрода находятся в общей цилиндрической камере. Электрический ток подводится кабелем к верхней части электрода и отводится от нижней части кристаллизатора.

Необходимость относительно большой скорости плавления электрода ограничивает время пребывания жидкого металла под действием вакуума, что уменьшает степень рафинирования металла. Результаты переплава в значительной степени зависят от качества исходного металла. Повторный переплав металла в вакууме повышает его свойства за счет дополнительной рафинировки, что используется в промышленности.

В промышленности нашли применение ВДП с массой слитка от 0,2 до 50 т

Электронно-лучевой переплав (ЭЛП). Источник нагрева металла в ЭЛП — кинетическая энергия направленного от электронной пушки потока электронов, или электронного луча, превращающаяся в тепловую энергию при столкновении электронов с поверхностью плавящегося электрода

В ЭЛП различной конструкции используют одну или несколько электронных пушек, лучи из которых направлены на конец электрода, поддерживаемого над медным водоохлаждаемым кристаллизатором. Часть потока электронов может быть направлена на поверхность расплавленного металла в кристаллизаторе для поддержания заданной температуры металла.

Расплавляемый электрод с заданным химическим составом (с учетом испарения некоторых компонентов в вакууме) перемещается по мере оплавления.

Время выдержки жидкого металла в кристаллизаторе и температуру металла можно регулировать в относительно широком диапазоне, что особенно важно для удаления в вакууме вредных примесей с низкой температурой испарения.

Размеры электродов могут быть разнообразнее, чем при ЭШП и ВДП, где их сечение и длина согласованы с размерами кристаллизаторов.

Плазменно-дуговая плавка (ПДП). В настоящее время в промышленности используют ПДП с керамическим тиглем и с водоохлаждаемым медным кристаллизатором.

Источник тепла — плазма, создаваемая в плазмотронах продувкой потока аргона или другого газа через вольтовую дугу. При использовании аргона температура направленного потока составляет 3000—4000° С. Плазмтроны направляют плазменный поток на шихтовые материалы или плавящийся электрод.

В ПДП с водоохлаждаемым кристаллизатором применяют герметичную камеру, что создает широкие возможности в варьировании давления (вакуум или повышенное давление), состава газовой среды (окислительная, нейтральная, восстановительная) и температуры. Таким образом в ПДП могут быть созданы условия, предотвращающие испарение состава

вляющих. Использование высокотемпературной плазмы позволяет проводить глубокую рафинировку металла при небольшом вакууме. Вакуумная система ПДП проще и дешевле, чем ВДП.

Влияние специальных способов выплавки на свойства стали

Электрошлаковый переплав. Влияние переплава в ЭШП под шлаком $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ на химический состав стали 40ХН2МА показано в табл. 120.

120. Химический состав (%) стали 40ХН2МА
в зависимости от способа выплавки

Способ выплавки	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
ОДП *	0,41	0,59	0,25	0,014	0,011	0,76	1,47	0,17	0,20
ЭШП **	0,41	0,59	0,20	0,014	0,003	0,78	1,42	0,17	0,20

* Обычная дуговая плавка.
** Средний из трех проб.

Применение ЭШП уменьшает анизотропию механических свойств стали 1Х12Н2ВМФ (табл. 121).

121. Изменения механических свойств стали 1Х12Н2ВМФ
в зависимости от способа выплавки

Способ выплавки	Расположение образцов	δ_5 , %	ψ , %	$\sigma_{\text{н}}$, кгс·см/см ²
ОДП	В продольном направлении	16,2	70,1	18,4
	В поперечном направлении	11,5	45,1	7,8
ЭШП	В продольном направлении	16,0	71,8	16,3
	В поперечном направлении	14,8	66,0	12,0

Улучшение макроструктуры стали после переплава в ЭШП видно из норм, установленных для конструкционной легированной стали в ГОСТ 4543—71 (табл. 122).

Исследование сплава ХН62МВКЮ ГОСТ 5632—72**, переплавленного в ЭШП, показало общее снижение количества неметаллических включений на 43—77% по сравнению с имеющимся в металле электродов, а количество оксидов и сульфидов уменьшилось с 2,5 до 1 балла. При этом содержание водорода уменьшилось на 24—92%, а содержание азота составляло 36—137% от исходного. На содержание азота, по-видимому, оказывают влияние состав и количество шлака, а также различие электрического режима отдельных плавов.

**122. Макроструктура стали ЭШП и обычных способов выплавки
(ГОСТ 4543—71)**

Категория стали	Макроструктура стали, балл (не более)					
	Центральная пористость	Точечная неоднородность	Ликвационный квадрат	Общая пятнистая ликвация	Краевая пятнистая ликвация	Подусадочная ликвация
Качественная /	3	3	3	1	1	1
Высококачественная	2	2	2	Не допускается		1
Электрошлакового переплава (ЭШП)	1	1	1	То же		—

Вакуумно-индукционная плавка (ВИП). Плавка по этому методу приводит к снижению содержания примесей цветных металлов, что видно на примере выплавки жаропрочного сплава (табл. 123).

Снижаются также содержание и размеры неметаллических включений, что видно из сравнения результатов выплавки пружинного сплава 36НХТЮ в открытой индукционной печи ОИП и в ВИП (табл. 124).

**123. Содержание примесей (%)
после ВИП**

Объект исследования	Pb	Bi	Cu
Шихта	0,001	0,001	0,050
Металл после ВИП	0,0005	0,0005	0,034

**124. Средний балл
неметаллических включений
после ВИП и ОИП**

Способ выплавки	Нитриды	Карбонитриды	Оксиды	Силикаты
ОИП	4	0,5	0,5	0
ВИП	2,5	< 0,5	0	0

Содержание водорода, кислорода и азота при одинаковой с открытой печь исходной шихте должно снижаться (табл. 125). При большем содержании водорода в шихте для ВИП, плохом перемешивании расплавленного металла и недостаточной выдержке рафинируемого сплава под вакуумом можно получить обратный результат.

125. Содержание газов в сплаве 79НМ

Способ выплавки	O ₂	N ₂	H ₂ , см ³ /100 г
	%		
ОИП	0,0040	0,002	6
ВИП	0,0015	0,001	10

Снижение содержания вредных цветных металлов и газов, уменьшение количества неметаллических включений приводит к повышению длительной жаропрочности жаропрочных сплавов и магнитных свойств сплава типа пермаллой (табл. 126 и 127).

126. Жаропрочность сплавов ХН70ВМТЮ и ХН70ВМТЮФ

Способ выплавки	Время до разрушения после ОДП и ВИП, ч	
	ХН70ВМТЮ *	ХН70ВМТЮФ **
ОДП	98	92
ВИП	142	116
* Температура испытания 850° С, напряжение 20 кгс/мм ² ** Температура испытания 850° С, напряжение 27 кгс/мм ² .		

127. Характеристики магнитных свойств сплава 79НМ

Способ выплавки	Начальная магнитная проницаемость, Гс/Э	Максимальная магнитная проницаемость, Гс/Э
ОИП	31 700	123 000
ВИП	33 200	204 000

Вакуумно-дуговой переплав (ВДП). При ВДП мало изменяется содержание основных элементов в стали, лишь несколько снижается содержание марганца и кремния в случае наличия окислов на поверхности электрода или недостаточной раскисленности металла электрода. Содержание азота и кислорода в металле в результате ВДП значительно уменьшается (табл. 128).

128. Химический состав (%) стали после ОДП и ВДП

Способ выплавки	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	N ₂	O ₂
ОДП	0,99	0,42	0,31	0,009	1,59	0,12	0,014	0,005
ВДП	0,97	0,39	0,29	0,009	1,58	0,11	0,003	0,003

Содержание примесей с низкой температурой испарения даже при небольшом их количестве в металле электрода значительно снижается в результате переплава в ВДП. В табл. 129 приведены результаты анализа стали ШХ15 после выплавки методом ВДП.

В табл. 130 показано влияние способа выплавки и качества исходных электродов (в случае ВДП) на усталостную прочность стали ШХ15.

Применение переплава в ВДП повышает срок службы теплостойких подшипников из стали типа быстрорежущей (0,8% С, 0,2% Si, 0,3% Mn, 4% Cr, 4,25% Mo, 1% Va) (табл. 131).

129. Содержание примесей (%) в стали ШХ15 после ОДП и ВДП

Способ выплавки	Pb	Bi	Sb	Sn
ОДП	0,00006	0,00033	0,012	0,0005
ВДП	0,00004	0,00025	0,008	0,0005

130. Усталостная прочность стали ШХ15 различными методами выплавки

Способ выплавки	Число плавов	Предел выносливости, кгс/мм ² , на базе 2 · 10 ⁶ циклов	Число плавов	Предел выносливости, кгс/мм ² , на базе 1 · 10 ⁶ циклов
ОДП	8	71,2	8	59,6
В кислородной мартеновской печи	2	84,5	1	—
ВИП	1	91,5	—	82,0
ВДП (электрод из металла основной электропечи)	3	80,5	3	74,5
ВДП (электрод из металла кислой электропечи)	2	96,0	2	90,0

131. Долговечность подшипников в зависимости от способа выплавки стали

Способ выплавки	Число плавов	Время до выхода из строя 10% подшипников, тыс. ч
ОДП	6	1600
ВИП	10	2050
ВДП	14	3000

132. Долговечность подшипников после повторных переплавов ВДП

Способ выплавки	Время до выхода из строя 10% подшипников, млн. ч	Увеличение времени службы, %
ОДП	21,7	—
ВДП	38,0	70
ВДП (два переплава)	60,0	130
ВДП (пять переплавов)	77,0	260

В табл. 132 показано влияние повторных переплавов в ВДП на увеличение времени службы подшипников из стали ШХ15.

Электронно-лучевой переплав (ЭЛП). Более глубокий вакуум, возможное повышение температуры и длительности рафинировки металла в вакууме в условиях ЭЛП по сравнению с ВДП снижает содержание неметаллических включений и газов. Результаты сравнительных испытаний стали ШХ15, выплавленной ВДП и ЭЛП, приведены в табл. 133.

133. Содержание (%) неметаллических включений после ВДП и ЭЛП

Способ выплавки	Оксиды	Сульфиды	Нитриды	Сумма включений	Кислород	Азот
ВДП	0,0123	0,0038	0,0027	0,0188	0,0026	0,0089
ЭЛП	0,0013	0,0013	0,0018	0,0044	0,0010	0,0015

Влияние переплава в ЭЛП на химический состав высокопрочной стали, содержание газов и неметаллических включений приведено в табл. 134 и 135.

134. Химический состав (%) высокопрочной стали после ОДП и ЭЛП

Способ выплавки	C	Si	Mn	Cr	Cu	S
В открытой электропечи						
ОДП	0,41	1,8	0,81	1,8	0,14	0,007
ЭЛП (плавка № 1)	0,42	1,15	0,16	1,7	0,06	0,004
ЭЛП (плавка № 2)	0,42	1,16	0,12	1,64	0,06	0,003

135. Содержание газов и неметаллических включений (%) после ЭЛП и ОДП

Способ выплавки	O ₂	N ₂	H ₂	Неметаллические включения
ОДП	0,0024	0,0055	0,00192	0,010
ЭЛП (плавка № 1)	0,0012	0,0028	0,00032	0,0025
ЭЛП (плавка № 2)	0,0004	0,0036	0,00025	0,0020

ЭЛП стали ВКС-1 заметно уменьшает количество неметаллических включений и содержание газов, что ведет к улучшению механических свойств высокопрочной стали (табл. 136).

136. Характеристики механических свойств высокопрочной стали ВКС-1 после ОДП и ЭЛП

Способ выплавки	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ_5 , %	a_H , кгс·м/см ²
ОДП	205	170	10,4	5,9
ЭЛП (плавка № 1)	214	179	9,6	7,6
ЭЛП (плавка № 2)	221	187	9,0	7,4

При переплаве коррозионностойкой хромоникелевой аустенитной стали методом ЭЛП стандартные механические свойства несколько повышаются, тогда как ударная вязкость значительно возрастает (например, с 4,7 до 8,1 кгс·м/см²), а в хромистых сталях в несколько раз. При этом наряду со снижением содержания неметаллических включений и газов повышаются технологическая пластичность (горячая) и полируемость стали.

Повышение длительной прочности после переплава в ЭЛП сплава нимоник показано в табл. 137.

137. Жаропрочность сплава нимоник после ЭЛП и ОДП

Способ выплавки	Длительная прочность *, ч	Удлинение *, %	Длительная прочность **, ч	Удлинение **, %
ОДП	58	8,6	28	3,2
ЭЛП	114	14,3	50	11,4

* Температура испытания 850° С, напряжение 4,2 кгс/мм².
 ** Температура испытания 820° С, напряжение 27 кгс/мм².

Влияние переплава в ЭЛП на плотность, содержание газов и неметаллических включений стали ШХ15 по сравнению с другими способами переплава показано в табл. 138.

138. Содержание неметаллических включений и плотность стали после специальных способов выплавки

Способ выплавки	Плотность стали, кгс/см ³	Содержание, %				
		Оксиды	Сульфиды	Нитриды	O ₂	N ₂
ОДП	7,8162	0,0126	0,0096	0,0020	0,0033	0,0104
ЭШП	7,8239	0,0108	0,0013	0,0019	0,0024	0,0082
ВДП	7,8190	0,0094	0,0042	0,0019	0,0023	0,0070
ПДП	7,8284	0,0071	0,0041	0,0001	0,0022	0,0075
ЭЛП	7,8295	0,0058	0,0012	0,0001	0,0016	0,0033

В результате ЭЛП отмечается (табл. 139) уменьшение размеров включений в штамповой стали 4Х4М2ВФС.

Плазменно-дуговая плавка (ПДП). Выплавка стали в ПДП с керамическим тиглем повышает пластичность стали (табл. 140).

Переплав электродов в ПДП (с кристаллизатором) приводит к снижению содержания кислорода и неметаллических включений (табл. 141).

В случае переплава в ПДП не наблюдается потерь марганца и хрома (табл. 142).

139. Характеристика неметаллических включений после ЭШП, ЭЛП и ОДП

Способ выплавки	Включения, средние баллы (по 6 образцам) по ГОСТ 1778-70					
	Оксиды строчечные	Оксиды точечные	Сульфиды	Силикаты хрупкие	Силикаты недеформируемые	Нитриды
ОДП	1,2	2,0	1,4	1,9	3,2	1,7
ЭШП	0,3	0,8	0,1	0,3	0,9	0,5
ЭЛП	0,1	0,5	—	0,1	0,9	0,5

140. Пластичность и вязкость стали 12НЗМА после специальных способов выплавки

Способ выплавки	Емкость печи, т	Содержание газов, %		Характеристики механических свойств		
		Кислород	Азот	Относительное удлинение δ_5 , %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кгс м/см ²
ОМП *	60	0,0027	0,013	10,3	42,8	7
ЭШП	9	0,0016	0,012	—	—	—
ПДП	0,3	0,0017	0,010	11,6	72,8	22,9
ОИП	0,1	0,0006	0,010	14,1	51	7,2

* Основная мартеновская плавка.

141. Содержание газов и неметаллических включений в сплаве 58Н после ОИП и ПДП

Способ выплавки	Содержание, %			Неметаллические включения, % (объем)
	O ₂	N ₂	H ₂	
ОИП	0,009	0,005	Не определ.	0,046
ПДП	0,0035	0,003	0,001	0,022

Комбинированные способы выплавки. Высокопрочная мартенситно-старееющая сталь, легированная титаном, в сечениях более 40—50 мм охрупчивается; вследствие медленного охлаждения от температур конца деформации в интервале 1000—700° С в процессе этого охлаждения по границам аустенитного зерна выделяется сетка карбидов и карбонитридов титана.

142. Химический состав (%) стали после ПДП и ОДП

Способ выплавки	C	Si	Mn	Cr	Cu	Al
ОДП	1,03	0,33	0,43	1,45	0,07	0,032
ПДП	0,96	0,31	0,45	1,44	0,07	0,010
ОДП	1,03	0,27	0,39	1,43	0,08	0,018
ПДП	0,95	0,24	0,36	1,40	0,09	0,013

Глубокий вакуум и высокая температура при переплаве в ЭЛП в сочетании с предварительной выплавкой металла для электрода в ВИП обеспечивают получение лучших механических свойств этой стали (табл. 143)

143. Характеристики механических свойств стали после специальных способов выплавки

Способ выплавки	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	a_n , кгс м/см ²
ОИП	194	5	27,5	2,5
ОИП—ВДП	205	5	31	3,5
ОИП—ЭЛП	205	8,5	48	4,5
ВИП—ЭЛП	212	9,5	54,5	5,2

При использовании комбинированных способов выплавки уменьшаются количество и размеры неметаллических включений в стали ШХ15 (табл. 144).

144. Характеристика неметаллических включений стали ШХ15 после двойного переплава

Способ выплавки	Содержание неметаллических включений, % (объем)					
	Оксиды	Сульфиды	Нитриды	Сумма включений	Количество	
					до 6 мкм	6 мкм
ЭШП—ВДП	0,0004	0,0009	0,0008	0,0021	207	8
ЭШП—2ВДП	0,0003	0,0004	0,0004	0,0011	95	8
ВИП—ВДП	0,0004	0	0,0001	0,0005	77	0

Эти же способы выплавки повышают ударную вязкость стали 30ХГСНМА (табл. 145).

145. Ударная вязкость, кгс·м/см², стали 30ХГСНМА после комбинированных способов выплавки

Способ выплавки	Температура, °С	
	700	+20 *
ОДП	3,0	1,0
	1,7	0,7
ВДП	5,0	1,4
	3,1	1,1
ВДП + ВДП	5,8	1,5
	3,8	1,3
ВИП + ВДП	5,8	2,3
	4,8	2,0

* Образцы с надрезом

Примечание В числителе — ударная вязкость в продольном направлении, в знаменателе — в поперечном направлении

Основные области применения

Шарикоподшипниковую сталь для изготовления приборных, специальных и особонагруженных подшипников, работающих в тяжелых условиях и с длительным ресурсом, выплавляют в СССР методами ЭШП и комбинированными способами.

За последние годы метод ЭШП широко распространился в Англии, США, Франции и других странах, конкурируя с ВДП как более дешевый способ. Переплав ЭШП получает широкое распространение в производстве быстрорежущей стали. Уменьшение величины карбидов и карбидной ликвации приводит к повышению стойкости режущего инструмента и снижению стоимости обработки на металлорежущих станках.

Выплавку ВИП и комбинированным способом ВИП—ВДП широко используют в США для жаропрочных сплавов, применяемых в авиационной промышленности для изготовления деталей реактивных двигателей.

Метод ВИП используется для выплавки прецизионных сплавов с высокими электромагнитными свойствами, нержавеющей стали, из которой изготавливают тонкостенные полированные трубки, а также изделия с зеркальной полировкой.

Снижение анизотропии и повышение усталостной прочности наряду с резким уменьшением ликвации благоприятно сказывается на службе штампового инструмента, штамповые стали для ответственных дорогостоящих штампов выплавляют методами ЭШП и ВДП.

У высокопрочных легированных конструкционных сталей при выплавке в открытых электропечах после термической обработки недоста-

точные пластичность и вязкость, выплавка их методами ЭШП и ВДП обеспечивают повышение вязкости.

С развитием изготовления печей для электроннолучевой и плазменно-дуговой выплавки большей емкости и снижением стоимости переплава в этих печах они найдут более широкое применение.

Сортамент продукции

Сталь электрошлакового переплава (ЭШП) поставляют заводы качественной металлургии в том же сортаменте, что и стали, выплаваемые в открытых дуговых электропечах.

Сталь вакуумно-дугового переплава (ВДП) изготавливают в виде круглых слитков, которые подвергаются ковке на заготовку и сутунку, что ограничивает ее сортамент и число заводов — изготовителей проката из этой стали.

Сталь вакуумно-индукционной плавки (ВИП) в настоящее время отливают в слитки массой менее 1 т. Необходимое использование 4—6-кратной степени обжатия ограничивает сортамент проката из этой стали.

Сталь электронно-лучевого переплава и плазменно-дуговой плавки в настоящее время отливают в слитки небольшой массы, и это определяет сортамент проката из этой стали.

Перспективы развития

Развитие производства сталей специальных способов выплавки определяется расширением области их применения, что главным образом связано со стоимостью их изготовления.

Основной путь снижения стоимости стали специальной выплавки — увеличение мощности специальных электропечей. Массу слитков, как правило, целесообразно увеличивать до принятой при выплавке стали в открытых дуговых печах, что возможно при производстве стали методами ЭШП и ВДП и требует совершенствования конструкции и оборудования печами большей емкости ВИП, ЭЛП и ПДП.

Удешевление стоимости электродов для переплава путем изготовления их прокаткой вместоковки и отливкой вместо прокатки иковки также позволяет существенно снизить стоимость передела в печах с кристаллизаторами.

Совершенствование конструкций электропечей с одновременным снижением расхода электроэнергии и увеличением производительности также является эффективным путем уменьшения стоимости передела стали специальной выплавки.

С другой стороны, повышение эффективности использования стали специальной выплавки связано с полной выявлением ее свойств и четкой оценкой ее преимуществ по сравнению со сталью обычных способов производства.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Основные виды термической обработки *

Основные виды термической обработки (табл. 146), изменяющие структуру и свойства стали и применяемые в зависимости от требований к полуфабрикатам (отливкам, поковкам, прокату и т. д.) и готовым изделиям, следующие: отжиг; нормализация; закалка; отпуск и старение.

Отжиг (табл. 147), цель которого — приблизить фазовое и напряженное состояние стали к равновесному, обычно разделяют на отжиг I и II рода.

Отжиг I рода включает в себя процессы гомогенизации, рекристаллизации и снятия остаточных напряжений. Характерная особенность этого вида отжига — то, что указанные процессы происходят независимо от того, имеются ли при этой обработке фазовые превращения или нет.

Отжиг II рода (фазовая перекристаллизация) бывает нескольких разновидностей: полный, неполный, изотермический и сферондизирующий. При отжиге II рода конечное структурное состояние и свойства стали определяют происходящие в процессе их проведения фазовые превращения.

Разновидностями отжига II рода являются также такие процессы, как нормализация и одинарная термическая обработка.

Закалку применяют для упрочнения стали, что ведет к образованию неравновесных структур (аустенита, мартенсита, бейнита и т. д.). В зависимости от нагреваемого объема закалку обычно разделяют на объемную и поверхностную.

В зависимости от метода охлаждения, принятого при закалке, различают закалку непрерывную, прерывистую, ступенчатую, изотермическую и закалку с самоотпуском.

Отпуску подвергают закаленную сталь для перевода неравновесной структуры в более равновесную, обеспечивающую заданный комплекс свойств. Температура отпуска не превышает точки A_{c1} . В зависимости от температуры нагрева различают отпуск высокий, средний и низкий. К отпуску следует отнести и процесс старения. Под старением применительно к стали следует понимать нагревы незакаленной стали, находящейся в неравновесном состоянии, для получения более стабильного состояния. Старение может быть термическим и деформационным.

Нагрев для термической обработки

Основная задача нагрева стали при термообработке (отжиг, нормализация, закалка) — перевод исходной структуры в аустенит и получение возможно более мелкого зерна. Представление об изменениях фазового состава, происходящих в условиях очень медленного нагрева выше

* Классификация различных видов термической обработки дается по акад. Бочвару А. А. и рекомендациям по классификации и терминологии термической обработки комиссии по стандартизации СЭВА

Термическая обработка	Условия нагрева	Охлаждение	Назначение
<i>Отжиг I рода</i>			
Отжиг гомогенизационный ¹	На 150—300° С выше точки $A_{с1}$, чаще 1100—1150° С. Продолжительность выдержки 8—15 ч. Скорость нагрева не менее 100° С/ч	Медленное (с печью)	Для крупных фасонных отливок и слитков из легированной стали с целью получения однородной (гомогенной) структуры путем устранения (ослабления) дендритной ликвации Для уменьшения возможности образования флокенов, шиферности, карбидной ликвации и других дефектов после обработки под давлением и улучшения механических свойств фасонных отливок
Отжиг рекристаллизационный ²	Выше температуры начала рекристаллизации. Чаще 660—710° С (табл. 147). Продолжительность выдержки 3—6 ч (садка до 20 т)	Медленное до 550° С (под колпаком или муфелем)	После холодной обработки под давлением (калибровка, прокатка, вытяжка, штамповка, волочение и т. д.) как межоперационная обработка для уменьшения твердости и увеличения пластичности (снятия наклепа)
Отжиг, уменьшающий напряжения	200—700° С	Медленное	Для снятия остаточных напряжений после литья, сварки, пластической деформации или механической обработки
<i>Отжиг II рода</i>			
Отжиг полный ³	На 30—50° С ⁴ выше точки $A_{с1}$	Медленное до 500—550° С, чтобы обеспечить распад австенита	Для доэвтектоидных сталей с целью снижения твердости

Отжиг изотермический	На 30—50° С выше точки A_{c3} (для доэвтектоидной стали) или A_{c1} (для заэвтектоидной стали)	Ускоренное до температуры наименьшей устойчивости аустенита в перлитной области (чаще 650—680° С), выдержка при данной температуре для полного распада аустенита и последующее относительно ускоренное охлаждение (рис 33, <i>в</i> — кривая 4)	Для ускорения отжига небольших садов проката или поковок из легированной стали
Отжиг неполный	В интервале температур A_{c1} и A_{c3} (<i>Аст</i>)	Медленное до 500—650° С	Для снижения твердости, улучшения обрабатываемости, снятия внутренних напряжений
Отжиг сфероидизирующий (для сфероидизации цементита)	Несколько выше температуры A_{c1}	а) 30—40° С — 1 ч до 600° С и далее на воздухе, б) 20—30° С — 1 ч до 680° С, выдержка для выравнивания температуры садки и далее снижение температуры до 600° С с той же скоростью. Дальнейшее охлаждение — на воздухе	Для инструментальных сталей с целью снижения твердости, улучшения обрабатываемости резанием, подготовки структуры и окончательной термической обработки и устранения остаточных напряжений, а также для низко и среднеуглеродистых сталей (листочки, прутки) перед холодной штамповкой или волочением для повышения пластичности
Нормализация (отжиг нормализационный) *	На 50—60° С выше точки A_{c3} для эвтектоидной или <i>Аст</i> для заэвтектоидной стали	Нормализация	
		На спокойном воздухе (рис 33, <i>а</i> — кривая 2)	Для получения мелкого зерна, равномерного распределения структурных составляющих, улучшения обрабатываемости низкоуглеродистой стали, устранения карбидной сетки в заэвтектоидной стали перед сфероидизацией, улучшения механических свойств, снижения порога хладноломкости

Термическая обработка	Условия нагрева	Охлаждение	Назначение
Закалка			
Закалка непрерывная (в одном охладителе)	На 30—50° С выше точки A_{c2} для стали доэвтектоидной или точки A_{c1} для заэвтектоидной стали или температуры растворения избыточных фаз в сплавах	Чаще быстрое охлаждение (вода, масло и другие среды) для переохлаждения аустенита до мартенситной точки M_n . Скорость охлаждения должна быть выше критической V_K (рис. 33, а — кривая 3)	В сочетании с отпуском — для получения высокой твердости, износостойкости, а также для получения высоких механических свойств
Закалка прерывистая (в двух средах)	То же	Сначала быстрое охлаждение в воде до температуры несколько выше M_n с последующим более медленным охлаждением в масле. Выдержка в воде — ориентировочно в течение 1 с на каждые 5—6 мм диаметра (толщины)	Для инструмента из углеродистой стали. Замедленное охлаждение в области температур образования мартенсита способствует уменьшению остаточных напряжений и деформаций (коробления)
Ступенчатая закалка (см. табл. 149)	То же	В расплавленных солях, имеющих температуру несколько выше точки M_n . Выдержка в расплавленных солях должна обеспечить выравнивание температуры по сечению изделий, но не вызвать распада аустенита Окончательное охлаждение — на воздухе или в другой закалочной среде (рис. 33, б — кривая 4)	Для закалки мелкого инструмента из углеродистой стали (У8, У10, У12, У13), более крупного из легированной (Х, 9ХВГ, ХВГ, 9ХС и др.) и быстрорежущей стали (Р18, Р12, Р9 и др.) Для уменьшения напряжений, деформаций (коробления) и предупреждения образования трещин

		ное охлаждение — на воздухе (рис 33, в — кривая б)	на при изотермической закалке инструментальных сталей (6ХС, 5ХВС2, 9ХС, ХВГ и др) на твердость HRC 40—50 для повышения пластичности, предела выносливости и сопротивления износу
Закалка с самоотпуском	То же	В воде или масле в течение времени, достаточного для прокаливания изделий на определенную глубину с последующим замедленным охлаждением на воздухе для отпуска вследствие выравнивания температуры по сечению за счет теплоты, сохранившейся во внутренних слоях изделий	Для местной закалки изделий, имеющих несложную конфигурацию, и при индукционной поверхностной закалке
Закалка с обработкой холодом	—	Закалка, заключающаяся в продолжении охлаждения до температуры M_K	Для повышения твердости и стабильности размеров Рекомендуется для сталей, у которых точка M_K лежит в области отрицательных температур
Низкий отпуск	150—250	Отпуск Медленное или ускоренное охлаждение	Для снижения внутренних напряжений, сохранения высокой твердости и износостойкости при повышении сопротивления хрупкому разрушению Для режущего и мерительного инструмента, после поверхностной индукционной закалки, после закалки цементированных изделий и т д

Термическая обработка	Условия нагрева	Охлаждение	Назначение
Средний отпуск	350—500	Медленное или ускоренное охлаждение	Для пружин и рессор. Обеспечивает высокий предел упругости
Высокий отпуск	500—680	Медленное или быстрое (масло, вода) для сталей, склонных к обратимой отпускной хрупкости	Для получения максимальной вязкости при сохранении относительно высоких значений предела прочности и текучести и повышенного сопротивления хрупкому разрушению; для получения минимальных внутренних напряжений

¹ При гомогенизации образуется крупное зерно. Измельчают зерно при последующей прокатке (ковке) и термической обработке. Длительность гомогенизации 80—100 ч и более. Вместо отжига слитков можно производить гомогенизацию деформированной заготовки, увеличив время нагрева перед последним пределом.

² В последнее время после протяжки (калибровки) сортового металла, а также для жести широко применяют рекристаллизационный отжиг с индукционным нагревом.

³ Применение отжига целесообразно в тех случаях, когда требуется фазовая перекристаллизация для измельчения зерна и устранения неоднородности микроструктуры, возникающей в стали после прокатки (ковки). Если требуется только снижение твердости, то рекомендуется высокий отпуск при 660—700° С. Продолжительность высокого отпуска — 0,55—0,65 ч на 1 т садки.

⁴ Стали, имеющие близкие значения критических точек и устойчивость переохлажденного аустенита для отжига, объединяют в одну группу. Их подвергают отжигу одновременно одной садкой в печи.

⁵ Нормализация удорожает и удлиняет процесс обработки, и поэтому следует принимать все необходимые меры на предшествующих стадиях металлургического передела, чтобы предотвратить рост зерна во время предыдущих нагревов и образование цементитной (карбидной) сетки в заэвтектоидной стали. Для легированных сталей охлаждение на воздухе приводит к полной или частичной закалке. Поэтому после их нормализации производят высокий отпуск, особенно, когда изделия имеют небольшие размеры.

⁶ Температура расплавленных солей для углеродистой инструментальной стали — 160—180° С, для легированной — до 220° С и для быстрорежущей — 400—500° С.

147. Температура рекристаллизационного отжига стали

Вид обработки давлением, после которой выполняется отжиг	Стали	Температура отжига, °C
Холодная прокатка	08, 08КП, 10КП, 15, 20 10Г2А, 12Г2А 12Х17 10Х18Н9	680—700 550—570 800—850 1050—1150
Холодная вытяжка (штамповка)	08, 08КП, 10, 15, 20	600—650
Холодное волочение труб	10, 15, 25, 30, 35, 40, 45, 50, У7, 15Х, 20Х, 15ХМ, 40Х, 30ХГСА, ШХ15 38ХМЮА 12Г2А 10Х18Н9Т	680—700 750—770 620—640 1100—1150
Холодная протяжка (калибровка) прутков	У7, У8, У9, У10, У12, У13, Ф ШХ15, Х, 9Х, Х05, 9ХС, ХГС, ХВГ, 30ХГСА, 40Х Р18, Р9, Х12, Х12Ф1, 1Х13, 2Х13, 3Х13, 4Х13 12ХН3А, 37ХН3А, 40ХНМА 18Х2Н4ВА	700 730 760 670 660
Холодное волочение проволоки	Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, 08, 10, 15, 20—50, У7—У12	690—710

температуры фазовых превращений, дает диаграмма состояния железо—углерод (рис. 29).

Однако в реальных условиях нагрева превращения протекают при более высоких температурах, чем это указано на диаграмме железо—углерод. Чем больше скорость нагрева, тем выше температура превращения (рис. 29).

Зернистость стали. При нагреве в области температур существования стабильного аустенита (выше критических) происходит рост зерна аустенита.

Для характеристики поведения стали при нагреве в отношении изменения зерна принято различать три вида зерна аустенита.

1. Начальное зерно аустенита — аустенитное зерно в момент окончания превращения перлита в аустенит.

2. Природное (наследственное) зерно аустенита. Различают два предельных случая: а) наследственно-мелкозернистую сталь, у которой заметный рост зерна имеет место лишь при сильном перегреве выше точки A_{c2} для доэвтектоидных сталей и выше A_{c1} для заэвтектоидных сталей; б) наследственно-крупнозернистую сталь, у которой быстрый рост зерна аустенита наблюдается сразу при повышении температуры выше критических точек A_{c1} (A_{c3}) и далее также идет ускоренно.

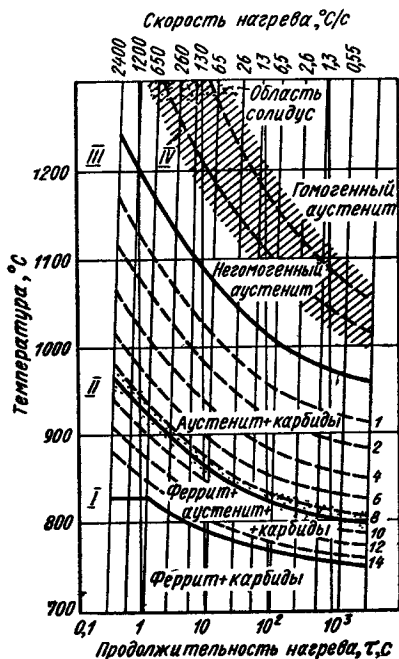


Рис. 29. Диаграмма превращения феррито-карбидной структуры в аустенит при разных температурах скорости нагрева для стали, содержащей 1,0% С и 1,5% С (штриховые линии и цифры рядом покрывают количество нерастворившихся в аустените карбидов при данных условиях нагрева в %):

I — начало превращения перлит (феррито-карбидной структуры аустенит), II — конец превращения феррита в аустенит, III — конец растворения карбидов в аустенит, IV — область температур гомогенизации аустенита (выше этой области температур аустенит однороден)

Наследственное зерно определяется условиями раскисления и составом стали. Стали, раскисленные алюминием, наследственно-мелкозернистые.

В сталях, раскисленных алюминием, образуются дисперсные частицы AlN , тормозящие рост зерна аустенита. Растворение этих частиц влечет за собой быстрый рост зерна. Нерастворенные в аустените карбиды легирующих элементов (TiC , VC , NbC и др.) также задерживают рост зерна.

3. Действительное зерно аустенита — это зерно, полученное при нагреве стали до той или иной температуры. Действительное зерно аустенита определяет и величину зерна перлита или феррита.

Свойства стали определяет действительное зерно. Величина зерна аустенита не оказывает существенного влияния на свойства, получаемые при испытании на статическое растяжение (σ_B , $\sigma_{0.2}$, δ , ψ), и твердость, но с ростом зерна резко снижается ударная вязкость, особенно при высокой твердости (после закалки и низкого отпуска), уменьшается работа распространения трещины и повышается порог хладноломкости. Чем крупнее зерно, тем более склонна сталь к закалочным трещинам и деформациям. При одинаковой твердости сталь с крупным зерном лучше обрабатывается резанием, но это имеет ограниченное практическое применение.

Наследственное зерно определяет технологию термической обработки. Наследственно-мелкозернистая сталь менее чувствительна к перегреву, поэтому она имеет более широкий интервал температур нагрева при термической обработке.

Выявление зерна аустенита производится по стандартной методике (ГОСТ 5639—65). Балл по зерну устанавливается под микроскопом при увеличении в 100 раз путем сравнения видимых на шлифе зерен с эталонными (рис. 30).

148. Режим ступенчатой закалки инструментальной стали
(по Ю. А. Геллеру)

Сталь	Температура закалки, °C	Температура изотермической выдержки (соляная ванна), °C	Твердость HRC
У7А	800—820	150—180	59—61
У8А—У9А	780—790		60—62
У10А—У12А	790—810		61—62
Х06	810—830		62—64
ХВ	820—840		62—64
У13Х (Х05)	810—830		62—64
85ХФ	820—850		62—63
9ХС	870—880	160—200	62—64
ХГСВ	860—875	160—200	62—63
ХГС	860—870	160—180	61—63
ХВГ	830—850	160—200	61—63
Х (ШХ15)	845—855	160—180	61—64
6ХС	860—875	250—300	45—50
Р9	1280—1300	400—500 (250—350)	60—61
Р18	1240—1250	400—500 (250—350)	60—61

Температура аустенитизации. Температура отжига, нормализации и закалки большинства легированных конструкционных сталей и многих инструментальных сталей также устанавливается несколько выше A_{c3} (доэвтектоидные стали) или A_{c1} (заэвтектоидные стали) (см. табл. 147, 148, 149).

Чрезмерное повышение температуры связано с ростом зерна аустенита и поэтому ведет к снижению механических свойств, особенно к увеличению хрупкости.

Для многих сталей температура аустенитизации под закалку значительно превышает точки A_{c1} или A_{c3} и определяется температурой растворения карбидов в аустените и получения нужной степени легированности γ -твердого раствора. Это повышение температуры не сопровождается перегревом, так как замедленно растворяющиеся или нерастворенные карбиды тормозят рост зерна аустенита. Так, при нагреве под закалку хромистых сталей, например 20Х13 и 30Х13 (11—14% Cr), до 900°С (несколько выше A_{c3}) завершается $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение, но в структуре остается большое количество карбидов. Поэтому для растворения карбидов типа $Me_{23}C_6$ и легирования аустенита эти стали закалывают с температур, значительно превышающих A_{c3} (1050—1150°С)*.

Быстрорежущие стали под закалку нагревают до очень высоких температур (1225—1290°С). Лишь при таком нагреве растворяется достаточное количество специальных карбидов и аустенит в предельной степени насыщается легирующими элементами, но зерно при этом остается мелким.

Продолжительность нагрева при аустенитизации стали. Продолжительность нагрева под отжиг, нормализацию, закалку должна обеспечить прогрев изделия (заготовки полуфабрикатов и т. д.) по сечению

* Более высокие температуры приводят к увеличению количества избыточного δ -феррита.

149. Режимы изотермической закали конструкционной стали

Сталь	Максимальная толщина или диаметр изделий, мм	Температура нагрева для изотермической закали, °C	Температура закалочной ванны, °C	Время выдержки в ванне, мин	Предел прочности после изотермической закали, кгс/мм ²
25Х2ГНТА	Для труб и пластин — 15; для цилиндрических изделий — 30	870—880	200—260	30—40	140—160
40ХНВА	Для труб и пластин — 15; для цилиндрических изделий — 30	870—880	315—325	20—30	100—110
30Х2Н2ВА	Для труб и пластин — 25; для цилиндрических изделий — 30	870—880	300—325	30—40	100—110
30ХГСА	Не более 15	870—890	370—400 * 360—390	15—20 15—20	110—120 120—140
30ХГСНА и 30ХГСНМА	80—100	890—910	280—320 270—300 240—280	60 60 60	140—160 150—170 160—175

* Чем больше сечение детали, тем ниже температура закалочной ванны.

и завершение фазовых превращений, но не должна быть слишком большой, чтобы не вызвать роста зерна и обезуглероживания поверхностных слоев стали.

Общая продолжительность нагрева

$$\tau_{\text{общ}} = \tau_{\text{с. п}} + \tau_{\text{и. в.}}$$

где $\tau_{\text{с. п}}$ — продолжительность сквозного прогрева до некоторой конечной температуры (определяется формой и размером изделия, их расположением, типом печи, составом и свойствами стали и т. д.); $\tau_{\text{и. в.}}$ — продолжительность изотермической выдержки при данной температуре (не зависит от формы и размера изделия и определяется только составом и исходным состоянием стали).

Для определения $\tau_{\text{общ}}$ чаще пользуются опытными данными (см. табл. 150, 151, 152) или эмпирическими формулами.

При отжиге (нормализации) сортового проката и мелких поковок скорость нагрева не ограничивают и устанавливают ее максимально возможной по тепловой мощности печи (чаще 100° C/ч). В этом случае

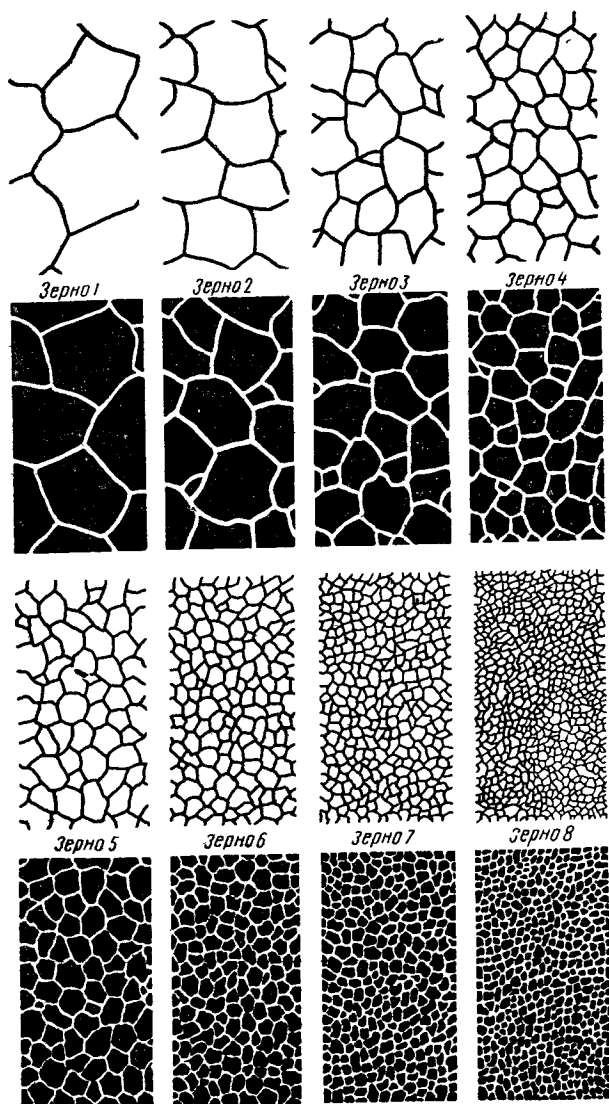


Рис. 30. Шкала размеров зерна [цифры указывают номер (балл) зерна], увеличение в 100 раз.

металл загружают в печь непосредственно после выгрузки предыдущей садки (температура печи 400—500° С). Общую продолжительность выдержки (с учетом продолжительности прогрева) для поковок чаще определяют исходя из средней нормы времени на 1 мм поперечного сечения поковки. Для поковок из углеродистой стали эта норма составляет 1,0—1,2 или 1,4—1,6 мин/мм при укладке соответственно в один или несколько рядов по высоте. Для легированных сталей норма соответственно 1,3—1,6 или 2,0—2,2 мин/мм. Продолжительность выдержки сортового проката установлена опытным путем в зависимости от типа печи, группы сталей, массы садки (табл. 150).

150. Нормы выдержки при отжиге сортового проката в камерных печах *

Стали	Выдержка (ч) на 1 т при массе садки			
	10—15 т	15—20 т	20—25 т	25—30 т
Инструментальные легированные, быстрорежущие	0,7—0,75	0,65—0,7	0,6—0,65	0,55—0,6
Инструментальные углеродистые	0,6—0,65	0,55—0,6	0,5—0,55	0,45—0,5
Шарикоподшипниковые	0,95—1,05	0,85—0,95	0,75—0,85	0,65—0,75

* Время отсчитывается с момента достижения в печи заданной температуры.

На машиностроительных заводах продолжительность сквозного прогрева изделий под закалку принимают согласно данным табл. 151.

151. Ориентировочная продолжительность нагрева изделий для закалки до 800—850° С в различных печах

Место нагрева	Продолжительность нагрева (с) на 1 мм диаметра или толщины изделия		
	Круглое сечение	Квадратное сечение	Прямоугольное сечение
В электропечи	40—50	50—60	60—75
В пламенной печи	35—40	45—50	55—60
В соляной ванне	12—15	15—18	18—22
В свинцовой ванне	6—8	8—10	10—12

Для крупных изделий, например штампов, рекомендуются нормы нагрева, указанные в табл. 152.

На других заводах принято следующее время нагрева (мин) на 1 мм сечения: в электропечи — 1,5—2, в пламенной печи — 1,0, в соляной ванне — 0,5 и в свинцовой ванне — 0,1—0,15.

152. Продолжительность нагрева и выдержки штампов
(в пламенной печи) для закалки

Операция	Продолжительность операции для штампов с наименьшей стороной, мм					
	300	350	400	500	600	700
Выдержка после загрузки в печь (600—650° С)	30 мин	30 мин	1 ч	1 ч 30 мин	2 ч	2 ч
Нагрев до температуры закалки (920—870° С)	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 00 мин	3 ч 40 мин	4 ч
Примечание. При нагреве в электрической печи эти нормы увеличиваются на 30—40%.						

153. Значения коэффициента K_1 для различных сталей

Стали	Температура нагрева, °С	K_1 , мин/см
Углеродистые и низколегированные ¹ (45, 50, У8, У10, ПХ, 40Х, 50Х, 9ХС, Х, ХГР)	800	12,5
	850	11,3
	870	10,8
	900	10
	950	8,8
Высокохромистые ² и среднелегированные (ХВСГ, Х12, Х6ВФ)	1000	8,0
	1050	7,4
	1100	6,7
	1150	6,0
Быстрорежущие ² (Р18, Р12Ф2, Р12, Р9 и др.)	1200	5,4
	1210	5,3
	1220	5,1
	1230	5,0
	1240	4,9
	1250	4,8
	1275	4,4
	1300	4,1
	560 ³	10,3
¹ Предварительный подогрев до 400—500° С и окончательный нагрев в расплаве, содержащем 78% BaCl + 22% NaCl ² Предварительный подогрев до 860—880° С и окончательный нагрев в расплаве 100% BaCl ₂ ³ Нагрев при отпуске в расплаве KNO ₃ .		

Продолжительность изотермической выдержки при заданной температуре принимают равной 15—25% от продолжительности сквозного прогрева. Однако такая выдержка непригодна для изготовления инструмента сложной формы.

Для практического определения продолжительности нагрева стальных изделий сложной формы при всестороннем нагреве хорошие результаты дает формула, предложенная Е. А. Смольниковым:

$$\tau_{\text{общ}} = K_1 \frac{V}{F} K_{\phi} K_k + \tau_{\text{н. в.}}$$

где K_1 — коэффициент, зависящий от состава и физических свойств нагреваемой стали, температуры и способа нагрева (значения коэффициента даны в табл. 153); $\frac{V}{F}$ — характеристический размер, представляющий собой отношение объема нагреваемого тела V к его поверхности F . Эта величина определяется из формул, приведенных в табл. 154, или по специальной номограмме; K_{ϕ} — критерий формы (см. табл. 154); K_k — коэффициент конфигурации нагреваемого изделия, величина которого для инструментов различного типа находится в пределах от 0,45—0,65 (круглые плашки, червячные, резьбовые насадные и торцовые насадные фрезы) до 0,85—1,0 (резьбонакатные ролики, ножи, плоские плашки, цилиндрические фрезы и все «гладкие тела», не имеющие канавок).

154. Формулы для определения $\frac{V}{F}$ и K_{ϕ}

Тело	$\frac{V}{F}$	K_{ϕ}
Шар	$\frac{D}{6}$	1
Куб	$\frac{D}{6}$	1,4
Длинный сплошной цилиндр	$\frac{DH}{4H + 2D}$	$1 + 0,2 \frac{D}{H}$
Прямая призма с основанием в виде любых правильных многогранников	$\frac{DH}{4H + 2D}$	$1 + 0,2 \frac{D}{H} + \frac{1}{N + 1}$
Полый цилиндр (кольцо)	$\frac{(D - d) H}{4H + 2(D - d)}$	$1 + 0,2 \frac{H}{D - d}$
Пластина (параллелепипед)	$\frac{ABC}{2(AB + AC + BC)}$	$1 + 0,2 \left(\frac{C}{B} + \frac{C}{A} \right)$

Примечание. В таблице приняты обозначения: D — диаметр (диаметр вписанного круга), см; d — внутренний диаметр, см; A, B, C — габаритные размеры, см; N — число граней; H — толщина (высота) изделий, см.

Условное обозначение	Название	Состав, % (объемные)						Точка росы, °C	Выход атмосферы из 1 м³ или 1 кг исходного продукта
		CO	CO₂	H₂	CH₄	N₂	H₂O		
КГ ВО	Эндотермическая атмосфера с частичным сжиганием при $\alpha = 0,25$ в присутствии катализатора	21	0,5	40	2	37	До 0,06	До -20	4—4,5
ПС 06	Богатая экзотермическая атмосфера с частичным сжиганием при $\alpha = 0,6$ без очистки и осушки	10	6	15	0,5	68,5	2,3	+20	7—21
ПСО 06	То же, но с очисткой и осушкой	10	0,1	16	1,5	72,5	0,01	-40	6,5—19
ПС 09	Бедная экзотермическая атмосфера с почти полным сжиганием при $\alpha = 0,9$ без очистки и осушки	1	10	1	—	88	2,3	+20	8,5—29
ПСО-09	То же, но с очисткой и осушкой	2	0,1	2	—	96	0,01	-40	7,5—22
ДА	Диссоциированный аммиак без осушки	—	—	75	—	25	0,01	-40	2,64
ПСА-08	То же, но с осушкой (безводный диссоциированный аммиак)	—	—	75	—	25	0,002	-60	2,64
2	Диссоциированный аммиак с частичным дожиганием водорода при $\alpha = 0,7-0,9$ с глубокой осушкой .	—	—	7—20	—	93—80	0,1—0,01	-20 ± -40	4,4—3,8
	Технический азот очищенный от примесей кислорода при помощи водорода, диссоциированного аммиака в присутствии катализатора	—	—	2—4	—	96—98	До 0,0018	До -65	—

**156. Основные типы контролируемых атмосфер,
рекомендуемых для термической обработки деталей из различных сталей и сплавов**

Материалы изделий	Операции				
	Светлый отжиг	Светлая нормализация	Светлая или чистая закалка	Светлое старение и светлый низкий отжиг	Светлый отпуск и подогрев до 700° С
Малоуглеродистые стали	ДА; ПСА-08; ПСО-09	ПСА-08; ПСО-09	—	ПСО-09; очищенный азот	ПСО-09; очищенный азот
Средне- и высоколегированные стали	ПСО-06; ПСО-09	ПСО-06; ПСО-09; КГ-ВО	ПСО-06; КГ-ВО	ПСО-09; очищенный азот	ПСО-09; очищенный азот
Легированные стали	ПСО-06; ПСО-09	ПСО-06; КГ-ВО; ПСО-09	ПСО-06; КВ-ВО	ПСО-09; очищенный азот	ПСО-09; очищенный азот
Легированные инструментальные и быстрорежущие стали	ПСО-06; ПСО-09	ПСО-06; ПСО-09; КГ-ВО	ПСО-06; КГ-ВО	ПСО-09; очищенный азот	ПСО-09; очищенный азот
Нержавеющие стали	ДА; Н ₂ ; ПСА-08 Вакуум 1·10 ⁻² мм рт. ст.	ДА; водород; ПСА-08	ДА; Н ₂ ; ПСА-08 Вакуум 1·10 ⁻² мм рт. ст.	ПСА-08	—
Жаропрочные сплавы на никелевой основе	—	—	Вакуум 1·10 ⁻² мм рт. ст.; очищенный аргон, гелий, водород, ДА, ПСА-08	Вакуум 1·10 ⁻² мм рт. ст.; очищенный аргон, гелий	— — —
Электротехнические стали и трансформаторное железо	ДА; ПСА-08; водород; вакуум 1·10 ⁻² мм рт. ст.	—	—	—	—

Величина $\tau_{н.в}$ должна быть минимальной, но должна и обеспечить завершение фазовых превращений в стали и необходимую концентрацию углерода и легирующих элементов в аустените.

Величина $\tau_{н.в}$ для углеродистых сталей (45, 50, У7, У8, У10, У13) составляет 1,0 мин, для легированных сталей (40Х, 50Х, 11Х, Х, ХВГ и др.) 1,5—1,9 мин, для высокохромистых (Х12, Х12Ф1) 3,2—3,1 мин, для быстрорежущих (Р9, Р12, Р18) 1,1—1,7 мин. Инструмент сечением 8—10 мм или меньшим, но нагреваемый целыми партиями, следует подогревать. Инструмент из углеродистых и малолегированных сталей предварительно подогревают до 300—500° С, а быстрорежущие стали подвергают двухступенчатому подогреву при 400—500° С и 840—860° С или 400—500° С и 1040—1060° С. Подогрев уменьшает деформацию и позволяет сократить продолжительность нагрева при высоких температурах.

Выбор среды. При нагреве в пламенных или электрических печах взаимодействие печной атмосферы с поверхностью нагреваемого изделия приводит к окислению и обезуглероживанию стали. Для предохранения изделий от окисления и обезуглероживания в рабочее пространство печи вводят защитную газовую среду (контролируемые атмосферы).

В табл. 155, 156 приведен состав наиболее часто применяемых атмосфер.

Контролируемые атмосферы представляют собой искусственные газовые атмосферы, обычно получаемые в специальных газоприготовительных установках—генераторах из различных видов твердых, жидких и газообразных материалов с последующим их сжиганием и очисткой продуктов сгорания от различных вредных компонентов (серы, аммиака).

При термической обработке жаропрочных сплавов нередко применяют вакуум (10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст.). Недостаток глубокого вакуума при высокотемпературном нагреве — возможность обеднения сплавов легирующими компонентами.

Режущие и другие мелкие инструменты чаще нагревают в расплавленных солях. При правильном выборе состава (табл. 157) и тщательном

157. Составы солей, применяемых для подогрева и окончательного нагрева инструмента под закалку

Соль	Состав, % ¹	Температура применения, °С	Назначение
БН2	68 BaCl ₂ + 30 NaCl + 2 MgF ₂ 78 BaCl ₂ + 22 NaCl 56 KCl + 44 NaCl ²	780—950 750—900 750—900	Для углеродистых и малолегированных сталей
БМ3 БМ5	97 BaCl ₂ + 3 MgF ₂ 95 BaCl ₂ + 5 MgF ₂	1000—1300 1200—1300	Для быстрорежущей стали

¹ Для предотвращения обезуглероживания нагреваемых изделий в соляные ванны вводят ректификаторы — буру, ферросилиций, фтористый магний

² Применяют для светлой закалки, так как не образует осадка при взаимодействии с едкими щелочами, в которых охлаждается изделие

раскислении ванн в них обеспечивается хорошая защита от окисления и обезуглероживания. Для таких ванн обычно применяют хлористые соли (CaCl_2 и NaCl , BaCl_2 и др.), так как, например, в углекислых солях, содержащих кислород, возможны окисление и обезуглероживание.

Охлаждение при термической обработке

Фазовые превращения. Для установления режима охлаждения при различных видах термической обработки, обеспечивающего получение заданной структуры, а следовательно, и свойств стали, используются диаграммами изотермического (рис. 31) и термокинетического (рис. 32) распада переохлажденного аустенита.

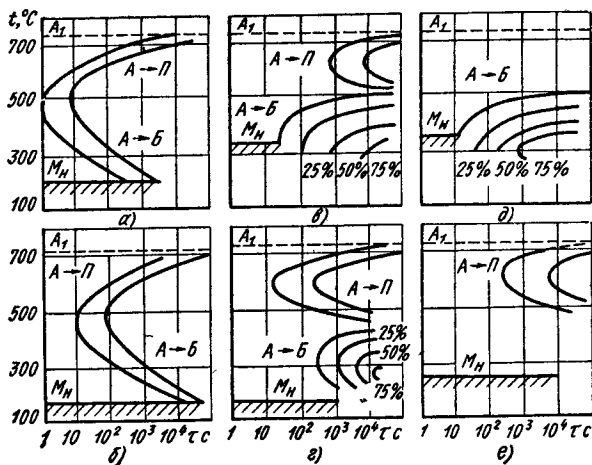


Рис. 31. Основные виды диаграмм изотермического превращения переохлажденного аустенита:

а — углеродистые стали, *б* — низколегированные стали, не содержащие карбидообразующих элементов, *в* — легированные конструкционные стали, *г* — легированные инструментальные стали, *д* — сложнолегированные конструкционные стали, *е* — высокохромистые стали (X13)

В зависимости от степени переохлаждения аустенита различают превращения трех типов (см. рис. 31).

Перлитное превращение протекает в верхнем районе температур, прилегающих к критической точке A_1 (или интервалу A_1). Это превращение заключается в диффузионном распаде переохлажденного аустенита с образованием эвтектоида (феррит + карбид).

Продукты перлитного превращения обычно имеют пластинчатое строение. Чем больше степень переохлаждения, тем тоньше получающаяся ферритно-цементитная структура, т. е. меньше межпластиночное расстояние (Δ_0). Пластинчатые структуры эвтектоидного типа часто определяют как перлит, сорбит и троостит.

Мартенситное превращение (см. рис. 31 и 32). Мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. Мартенситное превращение происходит только после переохлаждения аустенита до температуры, отвечающей точке M_H , и протекает в интервале температур $M_H - M_K$. Превращение носит бездиффу-

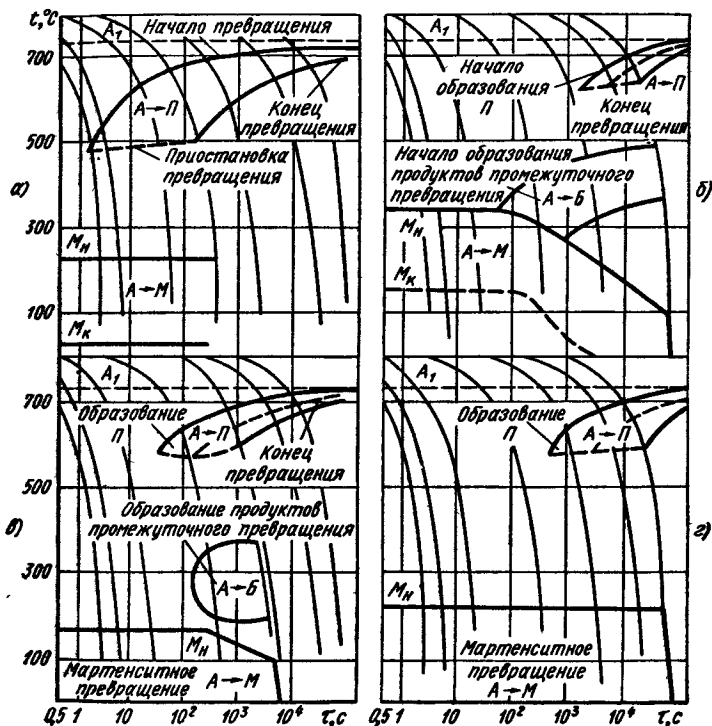


Рис. 32. Основные виды термокинетических диаграмм превращения переохлажденного аустенита:

а — углеродистые стали; б — легированные конструкционные стали; в — легированные инструментальные стали; г — высокохромистые стали (типа Х13)

зионный характер. Содержание углерода в мартенсите в общем случае такое же, какое было в исходном аустените.

Положение мартенситных точек M_H и M_K определяется составом аустенита и не зависит от скорости охлаждения. Углерод и все легирующие элементы (за исключением Со) понижают точки M_H и M_K . Мартенситное превращение обычно не идет до конца. Количество остаточного аустенита после закалки тем больше, чем ниже температура мартенситных точек, т. е. чем больше в аустените углерода и легирующих элементов. Если прервать охлаждение в области температур между M_H и M_K ,

то наблюдается явление стабилизации переохлажденного аустенита. При возобновлении охлаждения мартенситное превращение начинается лишь после дополнительного переохлаждения относительно температуры, при которой охлаждение было прервано. Количество образующегося в итоге мартенсита оказывается меньше, чем при непрерывном охлаждении. Явление стабилизации проявляется более сильно с увеличением выдержки в интервале температур $M_n - M_k$ и зависит от температуры, при которой эта выдержка производилась. Температура, ниже которой проявляется этот эффект стабилизации, обозначается M_s .

Структура мартенсита в низко- и среднеуглеродистых сталях имеет форму реек (реечный мартенсит), вытянутых в одном направлении. Чаще образуется пакет из реек (массивный мартенсит). В высокоуглеродистых сталях мартенсит образует пластины, которые в плоскости шлифа имеют вид игл.

У мартенсита высокая твердость, но низкое сопротивление отрыву и пониженный предел прочности в условиях жестких схем нагружения, что связано с высокой хрупкостью.

Прочность стали с мартенситной структурой можно повысить предварительной деформацией аустенита — термомеханическим упрочнением или небольшой деформацией мартенсита.

Бейнитное (промежуточное) превращение протекает между температурными областями перлитного и мартенситного превращения (см. рис. 31 и 32). В результате промежуточного превращения образуется особая структура — бейнит.

Бейнит представляет собою смесь из α -твердого раствора, претерпевшего мартенситное превращение и несколько пересыщенного углеродом, и частиц карбидов.

Различают: а) верхний бейнит, образующийся при 500—350° С, имеет перистый вид, в котором частицы карбидов образуют изолированные узкие частицы; б) нижний бейнит, образуется при 350—250° С, имеет пластинчатое (игльчатое) строение. Карбидные частицы в нижнем бейните располагаются внутри пластинок (игл) α -фазы.

Как и мартенситное превращение, промежуточное превращение чаще не идет до конца. Нераспавшийся при изотермической выдержке аустенит при последующем охлаждении может в той или иной степени претерпевать мартенситное превращение или сохраняться (остаточный аустенит).

Промежуточное превращение находит большое применение в промышленности, так как основанная на его протекании термическая обработка (изотермическая закалка) на нижний бейнит обеспечивает высокие механические свойства и, что особенно важно, высокую конструктивную прочность.

Описанные ранее диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита показывают, какие превращения возможны в выбранной стали, при каких температурах они протекают и какова интенсивность их развития при данной температуре.

По этим диаграммам превращений можно: 1) устанавливать режимы охлаждения при изотермической закалке и отжиге, ступенчатой закалке и т. д.; 2) определять приблизительно скорость охлаждения в различных температурных интервалах для получения требуемой структуры или предотвращения образования нежелательных структур, 3) качественно характеризовать прокаливаемость стали, 4) устанавливать общий харак-

тер режимов охлаждения поковок (проката), предупреждающих образование флокенов, больших внутренних напряжений, трещин и т. д.

Закономерности распада переохлажденного аустенита в процессе непрерывного охлаждения можно представить графически в виде термокинетических диаграмм, которые позволяют не только качественно, но и количественно описывать превращения аустенита при охлаждении с любыми скоростями, а также характеризовать получаемые при этом структуры и их свойства. Особенно важны эти диаграммы для определения режимов охлаждения при закалке крупных изделий.

На рис. 32 приведены термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита.

Термокинетические диаграммы позволяют: 1) устанавливать точные режимы охлаждения при отжиге, нормализации и закалке; 2) количественно характеризовать прокаливаемость, судить о структуре и механических свойствах стали после охлаждения с различными скоростями, а следовательно, о структуре и механических свойствах по сечению изделия после термической обработки, когда превращение развивается при непрерывном понижении температуры. Для этого нужно совместить термокинетические диаграммы для данной стали с опытными кривыми охлаждения в различных сечениях тела при охлаждении в той или другой среде.

Режимы. Скорость охлаждения при термической обработке определяется требуемой конечной структурой, а следовательно, и требуемыми свойствами стали.

Перлитное и промежуточное превращения в зависимости от химического состава стали и условий предварительной обработки протекают с различной скоростью в разных интервалах температур. Поэтому вид изотермических и термокинетических диаграмм превращения переохлажденного аустенита для разных групп сталей различен (см. рис. 31 и 32).

В углеродистых и некоторых сталях, легированных никелем, кремнием и медью, максимумы скоростей перлитного и промежуточного превращений наблюдаются при близких температурах. Поэтому на диаграмме изотермического превращения переохлажденного аустенита виден только один минимум устойчивости переохлажденного аустенита, чаще при температуре 500—550° С. При температурах выше этого минимума устойчивости протекает диффузионное перлитное превращение, а при температурах ниже этого минимума — промежуточное (бейнитное) превращение. При непрерывном охлаждении на термокинетической диаграмме для этих сталей отмечается лишь диффузионное перлитное и бездиффузионное мартенситное превращения (см. рис. 33).

Получить бейнитную структуру при непрерывном охлаждении углеродистых и других указанных выше сталей практически не удастся. При малых скоростях охлаждения переохлажденный аустенит этих сталей распадается на ферритно-цементитную структуру (перлит) различной степени дисперсности, а при больших скоростях охлаждения образуется мартенсит.

Легирование стали карбидообразующими элементами (Cr, Mn, Mo, W), а также кремнием приводит к полному или частичному разделению областей перлитного и промежуточного превращений (см. рис. 31 и 32).

После полного отжига доэвтектоидных сталей следует медленное охлаждение (см. рис. 33, а, кривая 1), во время которого происходит

распад аустенита при малых степенях переохлаждения, т. е. при повышенной температуре, с образованием дифференцированной структуры из перлита и феррита (см. рис. 30, б). Такая структура обеспечивает наименьшую твердость стали. По условиям охлаждения различают обычный и изотермический отжиг (рис. 33, а, кривая 5). Чем выше устойчивость переохлажденного аустенита, тем медленнее должно быть охлаждение при обычном отжиге для обеспечения распада аустенита в верхнем интервале.

Медленное охлаждение, особенно легированных сталей, склонных к отпускной хрупкости, следует проводить до 500—600° С. После распада аустенита в перлитной области дальнейшее охлаждение можно ускорять и выполнять даже на воздухе.

Если после отжига должен быть низкий уровень остаточных напряжений, например для отливок или поковок сложной конфигурации, то медленное охлаждение проводят почти до комнатной температуры.

Для предотвращения образования флокенов в крупных поковках из высоколегированных сталей (18Х2Н4ВА, 34ХНЗМФА) применяют сложные ступенчатые режимы охлаждения, например медленное охлаждение до 300—350° С, затем после выдержки нагрев до 600—650° С с длительной выдержкой (иногда до 100 ч) и медленное охлаждение до 100° С.

Скорость охлаждения при отжиге регулируют, охлаждая печи с закрытой или открытой дверцей, с полностью или частично выключенным обогревом.

При отжиге доэвтектоидных углеродистых сталей для получения перлитно-ферритной структуры достаточно скорость охлаждения 50—100° С/ч (в зависимости от размеров поковки) до температуры 600° С, а далее охлаждение ведут на воздухе.

При отжиге сталей 45Г2, 15Х, 20Х, 30Х, 35Х, 45Х, 15ХР, 15ХФ, 15ХМ, 20ХГ, 20ХМ, 30ХМ, 12ХНЗ, 20ХНЗ, 37ХНЗ, 12Х2Н2, 20Х2Н2, 12Х2Н4, 38ХМЮА, 20ХНМ, 40ХНМ, 20Х2Н2М, 30ХНЗМ и др. рекомендуется медленное охлаждение со скоростью 15—50° С/ч до температуры 600° С и далее на воздухе. Чем крупнее поковка, тем медленнее должно быть охлаждение при отжиге во избежание образования значительных внутренних напряжений. Не следует, однако, стремиться к излишне медленному охлаждению, так как это приводит к образованию крупных скоплений феррита и ухудшению свойств после последующей закалки.

При высоком содержании углерода в легированном аустените максимальная скорость его превращения обычно соответствует области перлитного превращения (см. рис. 31 и 32). Перлитному превращению может предшествовать выделение избыточных карбидов. Такая кинетика изотермического превращения переохлажденного аустенита характерна для многих инструментальных сталей, например, 9Х, 9ХФ, ХГ, ХВГ, Х12, Х12М, Р12, Р18, Р18Х5 и др. Эти стали сравнительно легко отжигаются как при обычном медленном охлаждении от аустенитного состояния, так и при изотермическом режиме. Скорость охлаждения при отжиге сталей типа Х, ХГ, 9Х, ХВГ, Х12, Х12М, Р9, Р18 равна 30° С/ч до температуры 680—700° С и далее на воздухе. Для получения структуры зернистого перлита в этих сталях скорость охлаждения должна быть меньше. В этом случае охлаждение в области температур перлитного превращения должно обеспечить не только распад аустенита на феррито-карбидную структуру, но и достаточную степень коагуляции

карбидных частиц. Коагуляция карбидов происходит при охлаждении до $620-650^{\circ}\text{C}$, и поэтому последующее охлаждение мало влияет на структуру. Однако во избежание появления больших остаточных напряжений медленное охлаждение проводят до $550-600^{\circ}\text{C}$.

Во многих случаях для получения зернистого перлита также применяют изотермический отжиг (см. табл. 146). Для предотвращения появления трещин при окончательной термической обработке сталей Р12, Р18, Х12, Х12М иногда рекомендуют изотермический отжиг с выдержкой при $720-780^{\circ}\text{C}$.

Ускорение охлаждения при нормализации приводит к распаду аустенита при больших степенях переохлаждения, что увеличивает дисперсность ферритно-карбидной структуры и повышает количество структуры эвтектоидного типа. Это, естественно, повышает прочность и твердость нормализованной стали по сравнению с отожженной.

Особенно сильно возрастает твердость легированных сталей при нормализации, когда во время охлаждения на воздухе возможно образование даже мартенсита. Поэтому для легированных сталей, когда требуется полная фазовая перекристаллизация, проводят нормализацию с последующим высоким отпускком*, что экономически эффективнее, чем отжиг. В некоторых низкоуглеродистых высоколегированных сталях, например 18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА, 25Х2Н4М, 35ХН4М (см. рис. 31, б и 32, в) и некоторых других, устойчивость аустенита в области температур перлитного превращения столь велика, что экспериментально не обнаруживается. В этих сталях происходит только промежуточное и мартенситное превращения. Поэтому отжиг сталей этого типа невозможен. Для исправления структуры применяют нормализацию (закалку на воздухе) с последующим высоким отпускком для снижения твердости при 660°C . Это примерно на $40-50^{\circ}\text{C}$ ниже точки A_{c1} . Более высокая температура отпуска не гарантирует от случайного нагрева выше A_{c1} (особенно нужно учитывать, что трудно выдержать одинаковую температуру по всей большой садке металла). Кроме того, неоднородность стали по химическому составу в микрообъемах и между разными плавками приводит к тому, что при температуре нагрева, близкой к A_{c1} , также возможно фазовое $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращение с образованием аустенита.

Структура закаленной стали — мартенсит. Поэтому скорость охлаждения при закалке должна быть выше критической, т. е. больше минимальной скорости охлаждения, при которой подавляется диффузионное перлитное и промежуточное превращения и аустенит переохлаждается до мартенситной точки M_n (см. рис. 33, а). Критическая скорость закалки, естественно, тем ниже, чем больше устойчивость переохлажденного аустенита.

Устойчивость аустенита зависит от его химического состава: все легирующие элементы, исключая кобальт, повышают устойчивость переохлажденного аустенита, особенно в области перлитного превращения.

Устойчивость переохлажденного аустенита тем выше, чем крупнее его зерно и чем однороднее его состав. Неравномерное распределение концентрации углерода и легирующих элементов в аустените и наличие

* Для снижения твердости чаще применяют только высокий отпуск при температуре несколько ниже точки A_{c1} .

нерастворимых частиц (карбидов, нитридов и т. д.) снижает устойчивость аустенита и повышает критическую скорость заковки.

Чем ниже критическая скорость закалки, тем медленнее должно быть охлаждение изделий при закалке для получения структуры мартенсита.

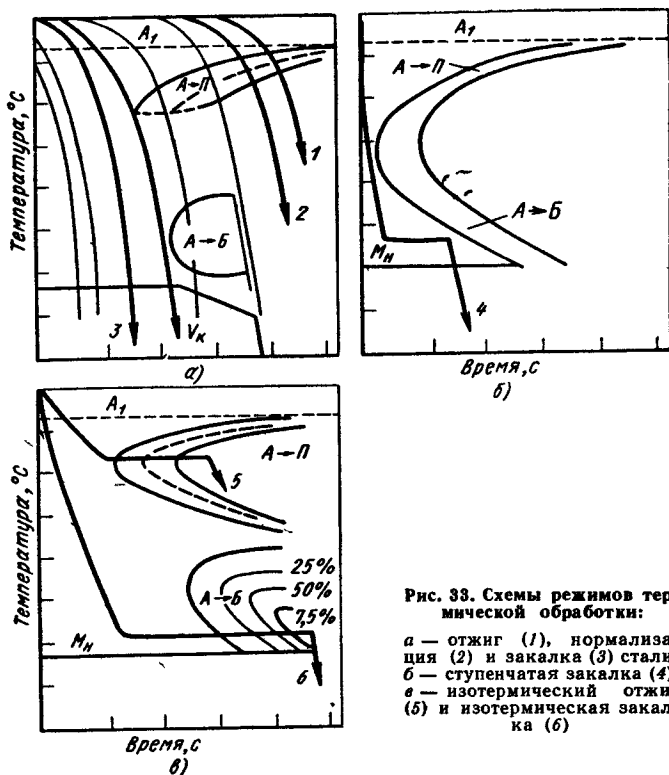


Рис. 33. Схемы режимов термической обработки:

а — отжиг (1), нормализация (2) и закалка (3) стали; б — ступенчатая закалка (4); в — изотермический отжиг (5) и изотермическая закалка (6)

Ступенчатую закалку следует применять для уменьшения деформации инструмента (см. табл. 149 и рис. 33, б — кривая 4). После ступенчатой закалки сталь имеет структуру мартенсита или мартенсита с карбидами в заэвтектоидных сталях.

Некоторые конструкционные стали для улучшения свойств подвергают изотермической закалке (рис. 33, в — кривая б) с выдержкой в нижней зоне температур промежуточного превращения (см. табл. 149). В результате изотермической закалки структура этих сталей состоит из нижнего бейнита и некоторого количества (10—20%) остаточного аустенита. Такая структура обеспечивает высокую прочность и сопротивление хрупкому разрушению, а также резко уменьшает чувствительность к надрезу. При изотермической выдержке в верхнем интер-

вале промежуточного превращения сохраняется большое количество нераспавшегося аустенита, который при последующем охлаждении превращается в мартенсит. В результате после охлаждения сталь будет состоять из верхнего байнита, неотпущенного мартенсита и остаточного аустенита. Такой структуре соответствуют низкие механические свойства.

Прокаливаемость стали. Под прокаливаемостью стали понимают глубину закаленной зоны. Если действительная скорость охлаждения в сердцевине изделия равна критической или превышает ее, то у стали структура мартенсита по всему сечению и, значит, сквозная прокаливаемость. Если в сердцевине изделия критическая скорость не будет достигнута, то изделие прокалится лишь на некоторую глубину. В этом случае в сердцевине произойдет диффузионный распад аустенита с образованием структур троостита, сорбита или даже перлита, что приведет к снижению прочности.

Влияние диаметра заготовки на механические свойства стали 40 после закалки в воде и последующего отпуска при 500° С показано в табл. 158.

158. Характеристики механических свойств стали 40 в зависимости от диаметра заготовки после закалки от 850° С в воде и отпуска при 500° С

Диаметр заготовки, мм	$\sigma_{\text{в}},$ кгс/мм ²	$\delta, \%$	$\sigma_{\text{н}},$ кгс/см ²
15	80	16	15
30	75	15	10
50	70	15	7
100	65	13	5

159. Зависимость твердости полумартенситной зоны от содержания углерода в стали

Содержание углерода, %	Сталь	
	Углеродистая	Легированная
0,08—0,17	—	25
0,18—0,22	25	30
0,23—0,27	30	35
0,28—0,32	35	40
0,33—0,42	40	45
0,43—0,52	45	50
0,53—0,62	50	55

Чем ниже критическая скорость закалки, тем выше прокаливаемость стали. Объективная характеристика прокаливаемости стали — критический диаметр, под которым понимают наибольшее сечение цилиндра из данной стали, которое в результате закалки получает так называемую полумартенситную структуру (троосто-мартенситную) в сердцевине. Появление этой структуры приводит к резкому изменению свойств (снижению твердости).

Существует несколько способов определения прокаливаемости: по виду излома, распределению твердости по сечению, а также методом торцевой закалки. Наиболее простым и надежным методом для конструкционных сталей является метод торцевой закалки (ГОСТ 5657—69).

Для испытания изготавливают цилиндрический образец (рис. 34, б), который нагревают до заданной температуры, подвергают закалке с торца на специальной установке (рис. 34, а) и измеряют твердость образца по длине. Результаты испытания стали на прокаливаемость

либо выражают числом прокаливаемости l_c (где l — расстояние от охлажденного торца до точки с полумартенситной твердостью; c — значение этой твердости по табл. 159), либо изображают в виде графика (рис. 35, а).

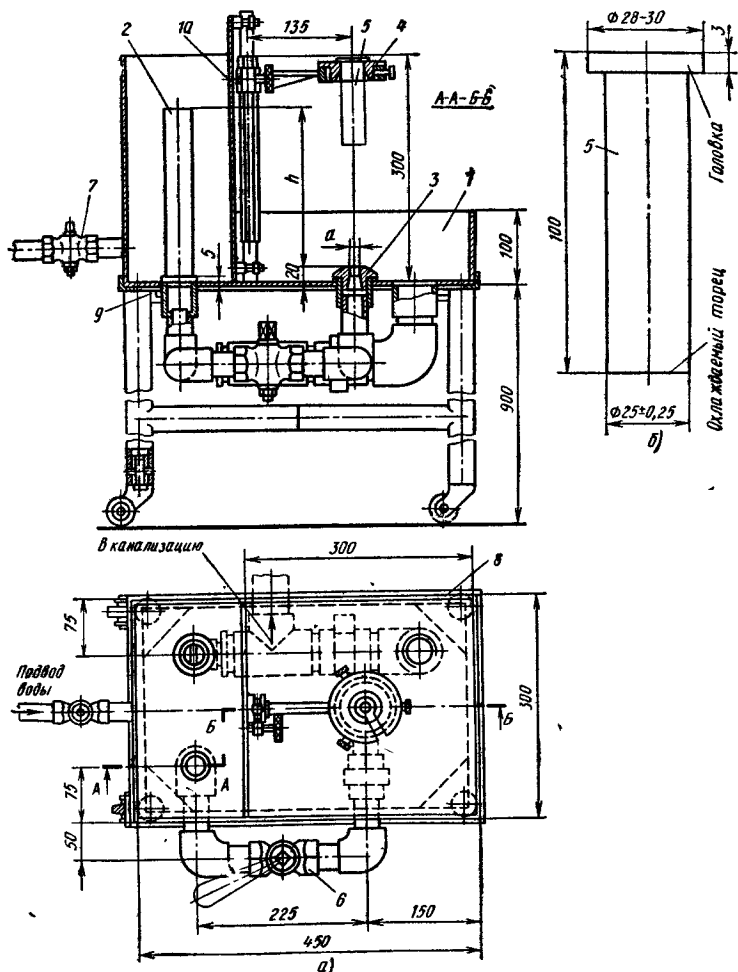


Рис. 34. Установка (а) и образец (б) для определения прокаливаемости стали методом торцевой закалки:

1 — бачок; 2 — уравнильная трубка; 3 — сопло; 4 — установочная шайба; 5 — образец для торцевой закалки; 6 — рабочий кран; 7 — кран подвода воды; 8 — стол прибора; 9 — установочный винт; 10 — кронштейн

Построив зависимость распределения твердости по длине образца и проведя горизонталь, соответствующую твердости полумартенситной зоны (см. табл. 159) для данной стали, по пересечению этой линии с кривой определяют протяженность закаленной зоны. Критический

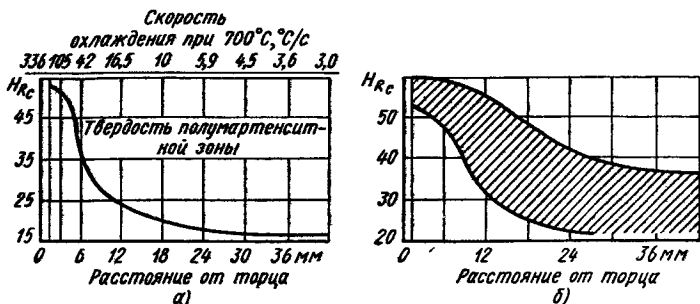


Рис. 35. Прокаливаемость сталей 40 (а) и 40XНМA (б)

диаметр можно определить по кривым на рис. 36, если известно расстояние от торца до твердости полумартенситной зоны.

Прокаливаемость разных плавок стали одной и той же марки может колебаться в некоторых пределах в зависимости от действительного содержания присутствующих элементов, от величины зерна и т. д. Поэтому для характеристики марки стали строят не кривую, а полосу прокаливаемости (см. рис. 34, б).

Полумартенситная структура во многих случаях не обеспечивает максимума механических свойств изделий. Поэтому нередко прокаливаемость определяют по глубине проникновения закаленного слоя до структуры, состоящей из 95% мартенсита и 5% троостита.

Критический диаметр для 95% мартенсита примерно на 25% меньше критического диаметра, определенного по полумартенситной зоне. Критический диаметр для 95% мартенсита при закалке в воде для сталей 40 и 45 не превышает 10—12 мм. Критический диаметр для 95% мартенсита при нижнем пределе легирующих элементов после закалки в масле для сталей 40X, 45X, 30XМ, 33XГC составляет 15—25 мм, для 40XНМ — 40 мм и высоколегированной стали 35XНЗМФ — более 100 мм.

Высоколегированные стали с малой критической скоростью охлаждения, например 18X2Н4ВА, 18X2Н4МА, закаливают на воздухе, что

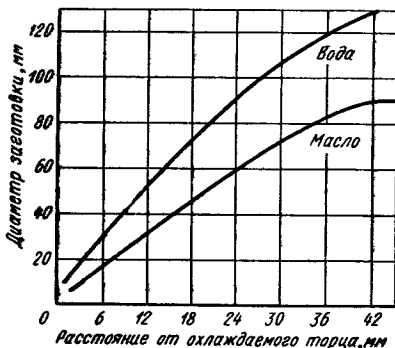


Рис. 36. График для определения критического диаметра по расстоянию от водоохлаждаемого закаливаемого торца (ГОСТ 5657—69)

уменьшает деформацию обрабатываемых изделий. Прокаливаемость таких высоколегированных сталей весьма велика (критический диаметр для 95% мартенсита — более 100 мм).

Далеко не всегда надо стремиться к сквозной прокаливаемости, так как с повышением концентрации легирующих элементов, увеличивающих устойчивость переохлажденного аустенита, как правило (исключение составляют никель и молибден), растет склонность к хрупкому разрушению. Следовательно, для изготовления изделий нужно выбирать сталь, обеспечивающую определенную прокаливаемость.

Охлаждающие среды для закалки. Охлаждение при закалке должно обеспечивать в общем случае получение структуры мартенсита в пределах заданного сечения изделия (определенную прокаливаемость) и не должно вызывать закалочных дефектов: трещин, деформаций, коробления и высоких растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях.

Наиболее желательна умеренная скорость охлаждения при высоких температурах (выше критических), высокая (выше критической закалки) в интервале температур A_1 — M_n для подавления процессов диффузионного распада переохлажденного аустенита в области перлитного и промежуточного превращения и замедленное охлаждение в интервале температур мартенситного превращения M_n — M_k . Высокая скорость охлаждения в мартенситном интервале температур резко увеличивает уровень остаточных напряжений. Чем выше скорость охлаждения в мартенситном интервале, тем выше вероятность образования закалочных трещин. В то же время слишком замедленное охлаждение в интервале температур M_n — M_k может привести к частичному отпуску мартенсита и увеличению количества остаточного аустенита вследствие явления стабилизации, что снижает твердость стали.

Обычно для закалки используют кипящие жидкости — воду, водные растворы солей и щелочей, масло. При закалке в этих средах различают три периода: 1) период пленочного кипения, когда скорость охлаждения сравнительно невелика (рис. 37); 2) период пузырькового кипения, наступающий при полном разрушении паровой пленки, которое наблюдается при охлаждении поверхности до температуры ниже критической; в этот период происходит быстрый отвод теплоты; 3) период конвективного теплообмена, который отвечает температурам

160. Относительная охлаждающая способность закалочных сред

Охлаждающая среда, ее температура, °С	Температурный интервал пузырькового кипения, °С	Относительная интенсивность охлаждения в середине интервала пузырькового кипения
Вода, 20	400—100	1,0
Вода, 40	350—100	0,7
Вода, 80	250—100	0,2
10%-ный раствор NaCl в воде, 20	650—100	3,0
10%-ный раствор NaOH в воде, 20	650—100	2,0
50%-ный раствор NaOH в воде, 20	650—100	2,0
Масло минеральное, 20—200	500—250	0,3

ниже температуры кипения охлаждающей жидкости; теплоотвод в этот период происходит с наименьшей скоростью.

В табл. 160 приведены примерный температурный интервал пузырькового кипения и относительная скорость охлаждения в середине этого интервала для различных охлаждающих сред

При закалке углеродистой и некоторых низколегированных сталей, имеющих малую устойчивость переохлажденного аустенита, в качестве охлаждающей среды применяют воду и растворы в воде NaCl и NaOH.

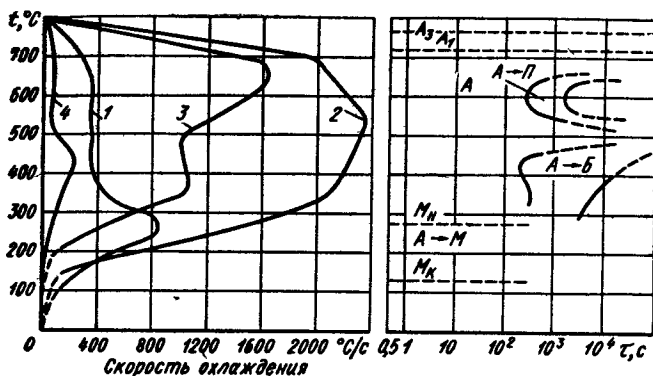


Рис. 37. Скорость охлаждения в различных кипящих жидкостях при разной температуре:

1 — вода; 2 — 10%-ный раствор NaCl; 3 — 50%-ный водный раствор NaOH; 4 — масло

У воды есть существенные недостатки:

1) высокая скорость охлаждения в области температур мартенситного превращения, что нередко приводит к образованию закалочных дефектов;

2) резкое ухудшение закалочной способности с повышением температуры (см. табл. 160).

Быстрее и равномернее охлаждают сталь 8—12%-ные водные растворы NaCl и NaOH при 20° С. Для стали с низкой критической скоростью закалики рекомендуются растворы NaOH повышенной концентрации (30—50%).

Увеличение закаливаемости и прокаливаемости достигается путем применения струйного или душевого охлаждения, широко используемого при поверхностной закалке.

Применение душевого или струйного охлаждения водой при закалке конструкционных углеродистых и низколегированных сталей обеспечивает их значительное упрочнение, не достигаемое при других способах охлаждения. Объясняется это предотвращением отпуска мартенсита в процессе закалики и возникновением на поверхности сжимающих напряжений.

Усовершенствованный метод охлаждения — с помощью смесей воды и воздуха, подаваемых через форсунки. Изменяя соотношение между

количеством воды и воздуха, а также давление смеси, можно менять скорость охлаждения от скорости, соответствующей охлаждению на воздухе, до значений, значительно превышающих скорость охлаждения в воде. Водовоздушные среды применяют для крупных поковок, рельсов, труб и т. д.

Для легированных сталей, обладающих высокой устойчивостью переохлажденного аустенита при закалке, применяют минеральное масло (чаще нефтяное).

Одно из достоинств масла как закалочной среды — небольшая скорость охлаждения в мартенситном интервале температур, что уменьшает возникновение закалочных дефектов и приводит к постоянству закаливающей способности в широком интервале температур среды (20—150° С). Недостаток масла — повышенная воспламеняемость (температура вспышки 165—300° С), высокая стоимость, недостаточная стабильность и низкая охлаждающая способность в области температур перлитного превращения (см. рис. 9). Температура кипения масла на 150—300° С выше, чем у воды. В процессе кипения масла происходит процесс его разложения (крекинг-процесс) и на изделиях образуется газо-паровая пленка. Режим пленочного кипения в масле распространяется на сравнительно узкий интервал температур (750—500° С), и максимум скорости охлаждения относится к температурам 450—350° С (см. рис. 9). Конвективный теплообмен происходит при более высоких температурах (от 350—380° С до комнатной температуры).

Для закалки чаще применяют масла нормальной вязкости: индустриальные 12 и 20, масла индустриальные селективной очистки (ГОСТ 8675—62) и индустриальное выщелоченное 20В (веретенное 3В). Последнее масло дешево и по скорости охлаждения в области температур перлитного и промежуточного превращения аустенита превосходит масла 12 и 20. Однако благодаря лишь частичной очистке масло 20 В не рекомендуется для применения в маслоохладительных системах большой емкости вследствие образования трудноудаляемых осадков.

Часто применяют смесь разных количеств индустриальных масел 12 и 20.

Для сохранения светлой поверхности изделий к минеральным маслам добавляют некоторые органические вещества или различные фракции синтетических жирных кислот (типа $C_nH_{2n}O_2$). Наилучшие результаты получены при добавлении к минеральному маслу типа 12 около 20% высокомолекулярной кислоты («кубковый осадок» $n \geq 20$). Эту смесь с успехом применяют для закалки изделий, нагреваемых в атмосфере эндогаза. Охлаждающая способность масла, содержащего «кубковый осадок», выше, чем у масла без присадки.

Высокая охлаждающая способность у смеси масел трансформаторного и авиационного МС-20 (3 : 1).

Закалочную способность масла повышают введением в него различных добавок (ацелсаркозина и сульфоновых кислот, эфиров карбоновых кислот и др.). Температуру масла при закалке следует поддерживать в пределах 60—90° С, что при правильной эксплуатации маслоохладительных систем не создает трудностей. При повышении температуры выше указанной вязкость масла снижается, однако это не вызывает существенного увеличения скорости охлаждения, но повышает пожарную опасность и ускоряет окисление и термическое разложение масла.

При более низкой температуре повышается вязкость масла и снижается равномерность охлаждения.

В последние годы для закалки применяются и специальные закалочные масла с хорошими антиокислительными свойствами и сопротивлением загущению (табл. 161). Для обеспечения постоянства скорости охлаждения масла используют при определенной рабочей температуре.

161. Нефтяные масла для закалки¹

Масло	Вязкость, 50° С	Темпера- тура вспышки, °С	Кислот- ность, КОН, не более	Зольность, %, не более	Рабочая темпера- тура, °С
МЗМ-16	2—4	140	0,5	0,4	30—40
МЗМ-26	3—4,5	170	0,5	0,6	80—120
МЗМ-120	13—19,5	230	1,0	18	160—200

¹ Масло изготовляют из нефти и присадок (инол и алкилсалицилат кальция), добавляемых для улучшения антиокислительных и моющих свойств масел.

Емкость закалочного бака должна быть такой, чтобы скорость охлаждения была неизменной. При закалке с 850° С в баке должно быть 12,5 л масла на 1 кг охлаждаемой стали, а при закалке с 950° С — 17,5 л масла на 1 кг стали.

Иногда для закалки применяют кипящий (псевдооживленный) слой. По охлаждающей способности кипящий слой занимает промежуточное положение между воздухом и маслом.

Для ступенчатой и изотермической закалки чаще применяют расплавленные соли (смеси KNO_3 и NaNO_2 , NaNO_3 и NaNO_2 , NaNO_3 и KNO_3 , а также щелочи NaOH и KOH), реже горячее масло высокой вязкости с температурой вспышки около 300° С (цилиндровое 24, 38 или 52).

Селитры немного окисляют поверхность, щелочи дают чистую поверхность.

Скорость охлаждения расплавленных солей возрастает при перемешивании и с понижением их температуры. Если принять скорость охлаждения воды при 20° С за единицу, то относительная скорость охлаждения в интервале температур 650—550° С в расплавленных солях при перемешивании при 160° С — 0,39, при 200° С — 0,36 и при 400° С — 0,21.

Добавление к соляным расплавам небольшого количества воды (около 0,5—0,7%) вызывает кипение и увеличивает их охлаждающую способность в 4—5 раз, что повышает прокаливаемость и позволяет производить ступенчатую и изотермическую закалку изделий большого сечения. При добавлении воды перемешивание расплава не ускоряет охлаждения, так как при этом усиливается испарение водяных паров.

При ступенчатой закалке инструмента из быстрорежущей стали в качестве охлаждающей среды обычно используют расплавы KNO_3 .

или NaOH или смесь 70% $\text{KNO}_3 + 30\%$ NaOH, которые не разъедают поверхность инструмента.

Обычно температура ванны при закалке инструмента из легированной и углеродистой стали 160—200° С. В этом случае применяют расплав, содержащий 50% $\text{KNO}_3 + 50\%$ NaNO_2 или 80% KOH + 20% NaOH, с добавкой воды.

Для ступенчатой (горячей) закалки крупного инструмента из углеродистой стали рекомендуются низкоплавкие смеси солей 53% $\text{KNO}_3 + 40\%$ $\text{NaNO}_3 + 7\%$ NaNO_2 с добавкой 2—4% воды. Рабочая температура такого расплава 110—125° С.

Для изотермической закалки конструкционных сталей обычно применяют расплав щелочей 20% NaOH и 80% KOH, часто с добавкой воды.

Для снижения коробления деталей сложной формы при закалке применяют охлаждение в штампах или в специальных приспособлениях.

Отпуск

Отпуск (см. табл. 147) — одна из важнейших технологических операций термической обработки стали.

Мартенсит и остаточный аустенит — метастабильные фазы — и при длительной выдержке даже при комнатной температуре претерпевают распад. Повышение температуры резко ускоряет распад этих фаз и приводит к образованию феррито-карбидной структуры. Превращения, протекающие при отпуске, а также снятие остаточных напряжений существенно изменяют свойства стали (рис. 38). В зависимости от требуемых свойств назначают следующие виды отпуска.

Низкий отпуск (см. табл. 146). В интервале температур до 350° С происходит распад мартенсита с выделением из него карбидов. В результате распада мартенсита образуется отпущенный мартенсит, представляющий собой обедненный углеродом мартенсит (α -раствор) и частицы карбидов цементитного типа. При отпуске многих легированных конструкционных, а также высокоуглеродистых сталей, имеющих повышенное количество остаточного аустенита, при температуре 200—300° С происходит его распад. В результате этого превращения остаточного аустенита в бейнит образуются те же фазы, что и при отпуске мартенсита при той же температуре, но структурное состояние этих фаз не такое, как у фаз, получаемых при превращении мартенсита.

Распад мартенсита при низком отпуске (150—250° С) углеродистых и легированных сталей уменьшает их склонность к хрупкому разрушению.

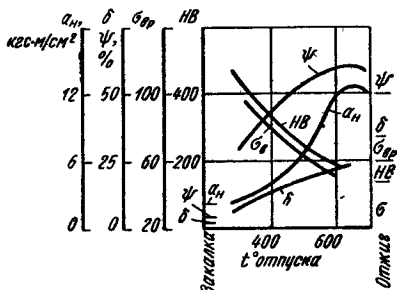


Рис. 38. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали 45

Низкотемпературный отпуск проводят в электропечах с принудительной циркуляцией воздуха, в масляных ваннах и в расплавленных солях — 50% KNO_3 и 50% NaNO_3 . Жидкие среды обеспечивают быстрый и равномерный нагрев и более точное регулирование температуры.

Средний отпуск (300—500° С). После такого отпуска структура стали состоит из тонкой смеси феррита и цементита, имеющих форму, приближающуюся к сфероидальной. Такую структуру называют троостит отпуска.

Средний отпуск (350—400° С) средне- и высокоуглеродистых сталей (0,5—1,0%) обеспечивает высокие предел упругости, предел выносливости и большую релаксационную стойкость. Поэтому этот вид отпуска используют после закалки пружин. Температуру отпуска пружин из углеродистой стали в зависимости от требуемого предела прочности, предела упругости и вязкости обычно принимают равной 350—400° С.

Легированные пружинные стали подвергают отпуску при более высоких температурах. Температуру отпуска кремнистых сталей (55С2, 60С2) устанавливают в пределах 400—450° С. Сложнолегированные кремнистые пружинные стали отпускают при 400—450° С, сталь 50ХГ — при 440° С и сталь 50ХФА — при 420° С.

Более высокие температуры отпуска наряду с повышенными упругими свойствами обеспечивают лишние пластичность и вязкость и меньшую склонность к хрупкому разрушению.

Длительность отпуска устанавливают исходя из требований к механическим и упругим свойствам.

Охлаждение после отпуска при 400—450° С иногда проводят в воде, что способствует образованию на поверхности полезных сжимающих остаточных напряжений. Это увеличивает ограниченную долговечность и предел выносливости пружин.

При проведении отпуска при температуре 300—400° С (в зависимости от состава стали) нужно учитывать возможность возникновения отпускной хрупкости. Отличительной особенностью этого вида хрупкости является ее необратимый характер; повторный отпуск при той же температуре не повышает вязкости. Хрупкое состояние обусловлено неоднородным распадом мартенсита и остаточного аустенита по границам и в объеме зерен. Следствие этого — неоднородное развитие пластической деформации при нагружении и возникновение областей, находящихся в объемно-напряженном состоянии, что ведет к хрупкости.

Для повышения вязкости средний отпуск на троостит ($HRC\ 54—52$) необходим и для теплостойких штамповых сталей типа 3Х2В8Ф, 4Х5В4ФСМ, 4Х5ВАФС, 4Х5МС, 4Х8В2 и др. Этот отпуск выполняют сразу после закалки (для предупреждения трещин). Нередко для крупных штампов применяют двукратный отпуск, который улучшает механические свойства.

Высокий отпуск (500—680° С). Повышение температуры отпуска выше 500° С в углеродистых и многих легированных сталях не ведет к изменению фазового состава по сравнению с составом после среднего отпуска. Однако с повышением температуры изменяется структура; происходит процесс коагуляции и сфероидизации карбидов и изменение субструктуры α -фазы. После высокого отпуска возникает структура, называемая сорбитом отпуска.

Легированные элементы Мо, W, Cr, V замедляют процесс коагуляции. Поэтому после отпуска при одинаковой температуре сталь, леги-

рованная этими элементами, сохраняет более высокую дисперсность карбидных частиц и соответственно большую прочность.

Как следствие процесса коагуляции карбидной фазы твердость, сопротивление отрыву, предел прочности, текучести и упругости понижаются, а пластичность и вязкость повышаются (см. рис. 38).

Закалка с высоким отпуском — термическое улучшение, применяемое главным образом для конструкционных сталей, позволяет получить высокие механические свойства — сочетание хорошей прочности с пластичностью. Улучшение значительно повышает конструкционную прочность стали¹, уменьшая чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивая работу для пластической деформации при движении трещины (работу развития трещины) и снижая температуру верхнего и нижнего порога хладноломкости.

Отпуск при 550—600° С в течение 1—2 ч почти полностью снимает остаточные напряжения, возникшие при закалке. Дальнейшее увеличение длительности нагрева практически не ведет к уменьшению внутренних напряжений. Чаше длительность высокого отпуска — 1,0—6 ч в зависимости от габаритных размеров изделия. Иногда длительность высокого отпуска увеличивают до нескольких десятков часов, чтобы обеспечить выделение водорода и тем снизить опасность возникновения флокенов.

Улучшению подвергают детали из конструкционной углеродистой и легированной стали, содержащей 0,3—0,45% С (30Х, 40Х, 40ХН, 40ХНМ, 40ХГ, 30ХГН, 38ХНВА, 30ХН2ВФА и др.), которые испытывают в работе значительные ударные и вибрационные нагрузки и поэтому должны обладать высокой конструктивной прочностью.

Следует иметь в виду, что во многих сталях, легированных, например, марганцем, кремнием или хромом (и особенно при одновременном легировании стали хромом и никелем, хромом и марганцем, хромом и кремнием и т. п.), после отпуска в интервале 500—600° С проявляется обратимая отпускная хрупкость.

Для устранения обратимой отпускной хрупкости многие детали из легированных сталей охлаждают после высокого отпуска в масле, а более крупные детали — в воде. Однако даже охлаждение в воде для многих крупногабаритных деталей из глубоко прокаливающихся хромоникелевых сталей не приводит к достаточно быстрому охлаждению внутренних частей, в которых развивается отпускная хрупкость. В этом случае стали добавочно легируют молибденом или вольфрамом (40ХНМ, 18Х2Н4ВА и др.), что значительно уменьшает склонность к обратимой отпускной хрупкости. Детали из этих сталей после высокого отпуска можно охлаждать на воздухе, а наиболее крупные — в масле.

Следует учитывать, что отпуск может вызвать новые напряжения, если нагрев и особенно охлаждение были быстрыми. Поэтому режимы нагрева и охлаждения при отпуске регламентируют.

¹ Под конструктивной прочностью понимают ту прочность, которая проявляется в стали в условиях ее реального применения (в виде детали, конструкции).

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Химико-термической обработкой называется поверхностное насыщение стали тем или иным элементом (например, углеродом, азотом, алюминием, хромом и др.) путем нагрева изделия до заданной температуры в твердой, газовой или жидкой среде, легко выделяющей диффундирующий элемент, выдержки при этой температуре и последующего охлаждения. В отличие от термической обработки химико-термическая меняет не только структуру, но и химический состав поверхностных слоев, что позволяет в более широких пределах изменять свойства стали.

Цементация (науглероживание)¹

Цементацией (науглероживанием) называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагревании в соответствующей среде — карбюризаторе (табл. 162).

После цементации следует термическая обработка — закалка и низкий отпуск.

Назначение цементации и последующей термической обработки — придать поверхностному слою высокую твердость и износостойкость, повысить предел контактной выносливости и предел выносливости при изгибе и кручении.

Цементации подвергают низкоуглеродистые стали (15, 20, 15Х, 15ХФ, 18ХГТ, 25ХГТ, 18ХНМА, 30ХГМ, 20ХНМ, 12ХНЗА, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА и др.), у которых после цементации и закалки достигается высокая твердость на поверхности и сохраняется вязкая сердцевина.

Цементации подвергают детали после механической обработки, включая в некоторых случаях и шлифование. Припуск на обработку для нешлифованных деталей принимается 0,2 мм и более, а для шлифованных 0,05—0,15 мм.

Цементацию, как правило, проводят при температурах выше точки $A_{с3}$ (930—950° С), когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в больших количествах (рис. 39).

При температуре цементации (выше точки $A_{с3}$) диффузионный слой состоит из аустенита, а после медленного охлаждения — из продуктов его распада (феррита и цементита). Концентрация углерода при этом чаще не достигает предела насыщения при данной температуре.

У цементованного слоя концентрация углерода по глубине переменная, убывающая от поверхности к сердцевине детали (рис. 39, б). Поэтому после медленного охлаждения в структуре цементованного слоя можно различить (от поверхности к сердцевине) три зоны (рис. 39, в): заэвтектоидную, состоящую из перлита и вторичного цементита, образующего сетку по бывшему зерну аустенита (заэвтектоидная зона в цементованном слое чаще отсутствует); эвтектоидную, состоящую из одного пластинчатого перлита; доэвтектоидную, состоящую из перлита и феррита. Количество феррита в доэвтектоидной зоне непрерывно возрастает по мере приближения к сердцевине.

¹ В скобках дано наименование, рекомендуемое Институтом Совета экономической взаимопомощи по стандартизации.

Карбюризатор (насыщающая среда), его состав	Температура, °С	Общая продолжительность процесса, ч	Глубина слоя, мм	Примечание
<i>Цементация в твердом карбюризаторе</i>				
1. Древесный уголь (березовый) в смеси с 20—25% BaCO_3 и 3,5—5% CaCO_3 (ГОСТ 2704—66)	930—950	4—15 (см. табл. 3)	0,5—1,5	Ящики загружают в печь, нагретую до 600—700° С либо имеющую рабочую температуру. Охлаждают ящики на воздухе
2. Каменноугольный полукокс в смеси с 10—15% BaCO_3 и 3,5% CaCO_3 (ГОСТ 5535—50). Зернистость 5—10 мм. влажность не более 5—6%. Рабочая смесь состоит из 25—30% свежего (1 или 2) и 70—75% отработанного карбюризатора. Содержание BaCO_3 в рабочей смеси—5—7% **				
<i>Газовая цементация</i>				
Эндотермическая атмосфера (около 20% CO , 40% H_2 , 40% N_2) + 5—8% природного газа CH_4 **	930—950	6—10	0,7—1,5	Процесс проводят в методических безмуфельных шахтных и камерных печах. В печи поддерживают постоянное давление (25—30 мм вод. ст.) Охлаждение — в закалочной среде (при непосредственной закалке) или колодцах
Эндотермическая атмосфера + 3—5% природного газа (до 98% CH_4)	930—950	6—10	0,7—1,5	
Экзо-эндогаз (20% CO , 20% H_2 , 60% N_2 + 0,5—5% CH_4) **	930—950	6—10	0,7—1,5	
Газы, получаемые из керосина, синтина, различных спиртов, карбофлюида, карбодрила, смеси этанола и металлацетата, ацетона и пропана и т. д. непосредственно в печи для цементации	930—950	4—10	0,8—1,6	Процесс проводят в шахтных или камерных печах. Загружают изделия в печь при 930—950° С. Перед началом цементации из муфеля печи должен быть вытеснен воздух продувкой цементующим газом во избежание окисления и обезуглероживания деталей. Охлаждение производят в колодцах или на воздухе **

Карбюризатор (насыщающая среда), его состав	Темпе- ратура, °C	Общая продолжи- тельность процесса, ч	Глубина слоя, мм	Примечание
<i>Цементация в жидком карбюризаторе</i>				
78—85% Na_2CO_3 (или K_2CO_3) + 10—15% NaCl + 6—8%	870—900	0,5	0,15—0,2	Для мелких деталей и нормалей. Недостаток — неравномерная глуби- на слоя. Карбид кремния добавляют после расплавления солей. Регенерация ван- ны производится через 3,0 ч добавкой 0,5—1,0% SiC от массы солей и Na_2CO_3 до требуемого уровня ванны
*¹ Существует много карбюризаторов (см табл 165), однако чаще применяют готовые карбюризаторы, приведенные в этой таблице. Карбюризатор не должен содержать вредных примесей (сера, зола), должен обладать достаточной прочностью, чтобы не дробиться и образовывать пыль, сохранять активность при повторном применении и давать минимальную усадку при цементации. При повышении температуры цементации нужно снижать содержание солей до 2—3%. *² Состав реальной эндотермической атмосферы, полученной на основе городского газа или пропана, изменяется в широких пределах: 17,5—25% CO, 36,5—44% H_2, до 2,0% CH_4, 0,15—1,5% CO_2, 0,1—2,3% H_2O (водяной пар) и остальное до 100% N. При использовании богатых углеводородами газов для уменьшения сажевыделения в печь добавляют 1,5—2,0% NH_3. *³ Чем меньше глубина слоя, тем выше содержание CH_4. Вследствие уменьшения содержания водорода в печной атмосфере прочность цементованных деталей возрастает. *⁴ При использовании шахтных печей неизбежен контакт нагретой поверхности цементованных изделий с воздухом при подстуживании их на воздухе или переносе в закалочный бак, что вызывает обезуглероживание и резкое снижение предела выносливости.				

За техническую глубину цементованного слоя чаще принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной (доэвтектоидной) зон или реже глубину до первых участков феррита (см. рис. 39, в) *.

Для оценки глубины слоя за рубежом принята так называемая эффективная глубина слоя, оцениваемая по глубине распространения диффузионной зоны с твердостью до $HV\ 500$ ($HRC\ 50$). Эффективная

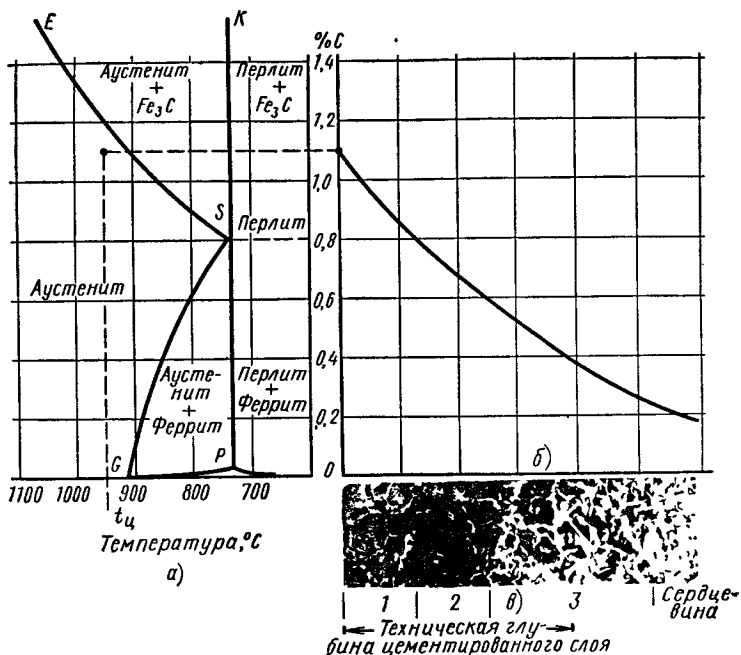


Рис. 39. Диаграмма состояния Fe—C (а), распределение углерода по глубине (б) и микроструктура цементированного слоя (в)

глубина зависит, с одной стороны, от количества углерода в мартенсите, а с другой стороны, от результатов закалки. Для деталей, испытывающих высокие контактные нагрузки, эффективную глубину можно определять до $HV\ 600$ или $HV\ 700$.

Глубина цементованного слоя для деталей, изготавливаемых из стали, содержащей не более 0,17% С, составляет 15% от наименьшей толщины или диаметра цементуемого сечения. При содержании в стали более 0,17% углерода глубина слоя снижается до 5—9%, а для изделий, работающих на износ и не испытывающих больших удельных

* Глубину слоя измеряют на отожженных образцах. Иногда за техническую глубину принимают полную глубину слоя

нагрузок, — до 3—4% от наименьшей толщины или диаметра цементуемого сечения. Чаше толщина слоя 0,5—1,6 мм.

Концентрация углерода в поверхностном слое в зависимости от назначения детали составляет 0,7—1,25%.

В случае цементации сталей, легированных карбидообразующими элементами, при температуре диффузии может образоваться двухфазный слой — аустенит и карбиды, имеющие глобулярную форму. В этом случае средняя концентрация углерода на поверхности может превышать растворимость углерода в аустените при данной температуре. Концентрация углерода в сталях, содержащих Cr, Mn, W, Mo или V, может достигать 1,8—2,0%.

Влияние легирующих элементов в конструкционных сталях на глубину слоя невелико.

Технология цементации

Перед цементацией детали очищают от окалины, жира и т. д. Нередко цементации подвергают только часть детали. В индивидуальном и мелкосерийном производстве на местах, не подлежащих цементации, оставляют припуск, величина которого в 1,5—2 раза превышает глубину слоя. В массовом и крупносерийном производстве места, не подлежащие цементации, защищают электролитически омеднением (толщина слоя меди 40—60 мкм).

Нередко применяют противоцементационные обмазки (табл. 163), асбестовые или металлические чехлы.

163. Составы некоторых обмазок, применяемых для защиты от цементации¹

Состав	Содержание, %	Примечание
Тальк Белая глина Вода	50 25 25	Разводят на жидком стекле. При высокой температуре образуется стекловидная пленка, препятствующая проникновению углерода. Применяют при цементации твердым карбюризатором.
Глина шамотная Асбестовая мелочь	90 10	Смесь разводят на воде. Применяют для предохранения отверстий при цементации твердым карбюризатором.
Маршалит Бура Тальк	85—90 1,5—2,0 10—15	Разводят на жидком стекле. Применяют при газовой цементации.
Песок Глина Бура Нитрид натрия	44 40 13 3	Разводят на жидком стекле и наносят в два слоя. Применяют при газовой цементации.

¹ Обмазки наносят в жидком или пастообразном состоянии на поверхность детали, после чего просушивают ее в специальных шкафах при комнатной температуре. Толщина каждого слоя 2—3 мм.

В табл. 162 приведены различные методы цементации.

Цементация в твердом карбюризаторе. Для этого обрабатываемые изделия упаковывают в ящики.

В ящик засыпают слой карбюризатора толщиной 30—40 мм. На него укладывают первый ряд деталей, выдерживая расстояние 10—15 мм между деталями и до боковых стенок ящика. Между рядами деталей по высоте ящика толщина карбюризатора также должна быть 10—15 мм.

Последний (верхний) ряд засыпают слоем карбюризатора 35—40 мм, чтобы компенсировать его усадку. Зазоры между крышкой и стенками ящика замазывают огнеупорной глиной и просыпают.

Нередко ящик загружают в печь вверх дном.

Недостатки цементации твердым карбюризатором: 1) непроизводительная затрата энергии на прогрев карбюризатора и ящиков; 2) большая длительность процесса (табл. 164); 3) необходимость больших производственных площадей; 4) трудность регулирования процесса; 5) невозможность непосредственной закалки после цементации и т. д.

164. Ориентировочная продолжительность цементации (ч)
в твердом карбюризаторе при 910—930° С *

Минимальный размер ящика, мм	Глубина слоя, мм **			
	0,5—0,7	0,7—0,9	0,9—1,2	1,2—1,5
100	4—5	5—6	6—7,5	7,5—9
150	4,5—5,5	5,5—6,5	6,5—8,5	9—11
200	5,5—6,5	6,5—7,5	7,5—9,5	10—12
250	6,5—7,5	7,5—8,5	8,5—10,5	11—14

* Продолжительность нагрева может меняться в зависимости от состава карбюризатора, типа печи, формы ящиков, массы деталей и т. д.

** Ориентировочно время нагрева до 930—950° С можно принять равным 6—8 мин на каждый сантиметр наименьшего размера ящика

Однако универсальность и простота цементации твердым карбюризатором обуславливают широкое применение ее, особенно на заводах мелкосерийного производства. Для цементации используют камерные, реже шахтные печи (для длинных деталей). На заводах массового производства цементацию осуществляют в толкательных непрерывно действующих печах с комплексной механизацией всех стадий процесса. Составы твердых карбюризаторов приведены в табл. 165.

Газовую цементацию применяют на заводах массового и крупносерийного производства (см. табл. 162). Опыт показывает экономическую эффективность использования газовой цементации и в мелкосерийном производстве. При газовой цементации изделие нагревают в газовой атмосфере, содержащей углеводороды (чаще CH_4 , CO , H_2 , CO_2 , H_2O , N_2) (см. табл. 162). Науглероживание стали происходит в основном из-за реакции распада окиси углерода и метана при температуре цементации. Применение газовой цементации позволяет сократить

165. Составы твердых карбюризаторов

Состав	Содержание, %	Примечание
BaCO_3 Na_2CO_3 CaCO_3 Мазут Древесный уголь	12—15 1,0—1,5 3,0—5,0 4,5—5,0 Остальное	Обеспечивает стабильные результаты и может использоваться при массовом выпуске деталей
$\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{BaCO}_3)$ CaCO_3 Древесный уголь	10 3,0 Остальное	При цементации ответственных деталей лучше применять BaCO_3
Na_2CO_3 Торфяной кока	6—10 Остальное	Недорог, но требует хорошей герметизации цементационных ящиков во избежание усадки и оголения деталей
Ацетат бария $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ Полукокс Древесный уголь	10 75—80 10—15	Обладает высокой активностью. Возможно пересыщение цементованного слоя углеродом

длительность процесса для получения заданной глубины слоя, механизировать и автоматизировать процесс, упростить последующую термическую обработку и сократить потребные площади цеха.

Большое достоинство газовой цементации — возможность автоматически регулировать состав цементующей газовой среды для обеспечения заданной концентрации углерода на поверхности цементированного слоя.

На заводах массового производства газовую цементацию чаще проводят в эндотермической атмосфере (см. табл. 163) в безмуфельных методических или шахтных (муфельных и безмуфельных) печах.

Углеродный потенциал атмосферы регулируют по содержанию CO_2 или H_2O в атмосфере. Эндотермическая атмосфера в зависимости от точки росы или от содержания CO_2 может науглеродить и обезуглеродить поверхность стали или находиться с ней в состоянии равновесия, без изменения состава поверхностного слоя. На рис. 40 приведены кривые равновесия между эндотермической атмосферой и содержанием углерода в углеродистой и легированной стали (на рис. 40, а, б потенциал атмосферы определяли по точке росы, а на рис. 40, в — по содержанию CO_2).

Для ускорения процесса цементации в 1,5—2 раза используют комбинированные атмосферы. Сначала цементацию ведут в атмосфере с высоким углеродным потенциалом (1,2—1,5%), а в конце процесса — в атмосфере с меньшим потенциалом (до 0,7—0,9%). В методических печах регулирование углеродного потенциала атмосферы осуществляется по зонам.

При проведении цементации этим методом следует иметь в виду, что содержание углерода на поверхности слоя снижается только из-за углерода, растворенного в аустените.

Снижение в аустените концентрации углерода и легирующих элементов (вследствие образования карбидов) приводит к уменьшению закаливаемости и прокаливаемости цементованного слоя и механических свойств стали (рис. 41). Этого можно избежать, если цементацию производить с постоянным потенциалом углерода 0,8—1,0%, но время насыщения при этом значительно возрастет. В процессе газовой цементации в эндотермической атмосфере легированных сталей возможно

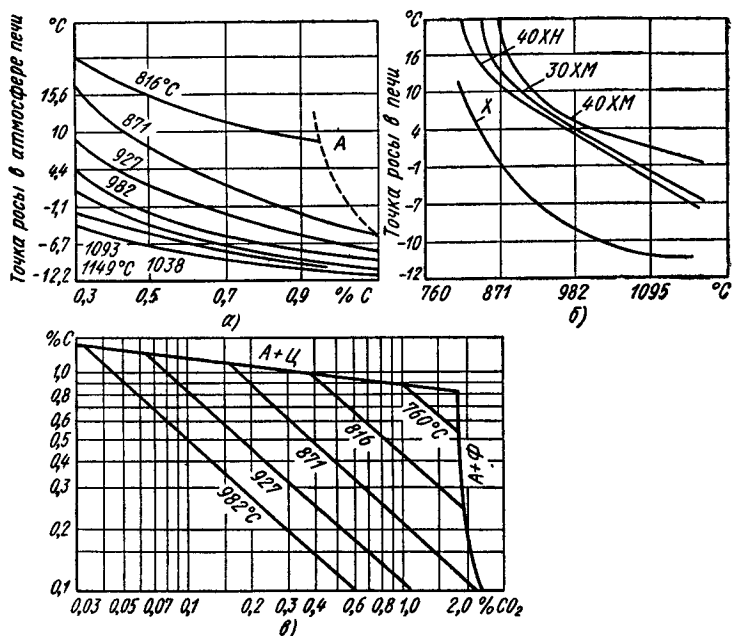


Рис. 40. Кривые равновесия между эндотермической атмосферой и содержанием углерода в углеродистой стали (а, в) и легированной (б) стали: а, б — потенциал

внутреннее окисление таких элементов, как Cr, Mn и Ti, отличающихся большим сродством к кислороду по сравнению с железом. Легирующие элементы образуют окислы типа $n \text{ FeO} \cdot \text{Me}_2\text{O}_3$. Окисление легирующих элементов в поверхностной части слоя (до 0,03 мм) также понижает устойчивость аустенита, и при последующей закалке в цементованном слое образуется трооститная сетка, понижающая его твердость и предел выносливости стали. Добавка к цементующей атмосфере (в конце процесса) аммиака уменьшает вредное влияние «внутреннего окисления».

Растворяясь в аустените, азот повышает его устойчивость, частично восполняя потери хрома и марганца. Однако следует иметь в виду, что при высоком содержании в атмосфере аммиака в диффузионном слое

может образоваться так называемая «темная составляющая» (видимо, поры), снижающая механические свойства стали. Для устранения «внутреннего окисления» рекомендуется подвергать цементации стали, легированные молибденом.

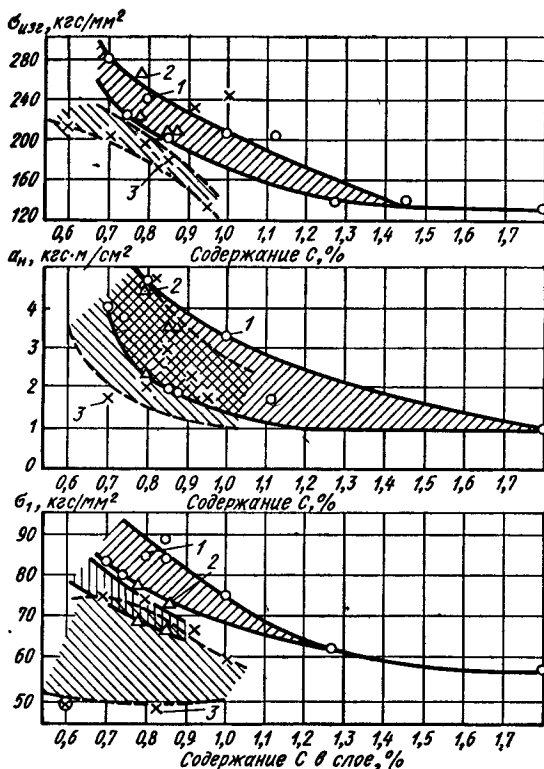


Рис. 41. Влияние технологии цементации на механические свойства стали 25ХГТ:

1 — цементация при постоянном потенциале углерода; 2 — цементация сначала производилась в атмосфере с высоким потенциалом по углероду (1,4%), а затем потенциал снижался до 0,8 С, 3 — оптимальная концентрация углерода получена в процессе подстуживания при закалке

На многих заводах для получения цементирующего газа применяют жидкие углеводороды, вводимые в рабочее пространство печи (см. табл. 162).

Высокая термическая устойчивость и хорошая испаряемость жидких углеводородов позволяют в одном рабочем пространстве получить газ и провести цементацию.

Жидкие карбюризаторы должны обеспечить: 1) минимальное саже- и коксообразование; 2) образование большого количества газа из единицы массы (объема) в процессе его распада; 3) минимальное содержание сернистых соединений, вызывающих разъедание деталей и арматуры печи. Наименьшей склонностью к саже- и коксообразованию и наибольшим газообразованием отличаются карбюризаторы, состоящие из парафиновых углеводородов (C_nH_{2n+2}). Наличие в карбюризаторе нафтеновых (C_nH_{2n}) и ароматических (C_nH_n) углеводородов приводит к образованию большого количества сажи (кокса), что резко замедляет науглероживание, требует очистки печи и деталей и затрудняет закалку в штампах. Лучшие жидкие карбюризаторы — спирты (например, бутиловый спирт), спирты в смеси с водой, синтин, карбофлюид и другие смеси органических соединений, например, этанол (C_2H_5OH) и метилацетат (CH_3COOCH_3), ацетон (CH_3COCH_3) и пропан (C_3H_8) и др.

Расход карбюризатора устанавливают в зависимости от объема рабочего пространства печи исходя из того, что площадь поверхности цементируемых деталей должна быть пропорциональна массе садки. В табл. 166 даны средние значения расхода карбюризатора, которые следует уточнять в зависимости от типа карбюризатора, температуры процесса и других факторов.

166. Расход карбюризатора (керосин, синтин и др.) при цементации в шахтных печах

Печь	Объем рабочего пространства, м ³	Расход карбюризатора ¹ , капли/мин	
		при нагреве	при выдержке
Ц25	0,03	20—30	40—60
Ц35	0,04	25—35	60—70
Ц60	0,08	30—60	60—90
Ц90	0,25	60—70	120—150
Ц105	0,35	50—75	120—150
Ц205	0,85	60—80	150—180
ШЦН20	0,03	25—35	40—60
ШЦН45А	0,10	35—45	60—90
ШЦН65А	0,14	35—45	70—90
ШЦН95А	0,34	50—75	120—150

¹ Принято, что в 1 см³ карбюризатора содержится в среднем 22 капли.

При использовании обычных шахтных печей типа Ц состав отходящих газов колеблется в широких пределах: 2—6% CH_4 , 20—28% CO , 55—70% H_2 . В этих условиях регулировать углеродный потенциал очень трудно.

Общая продолжительность цементации состоит из времени нагрева деталей до рабочей температуры (930—950° С), выдержки для получения заданной глубины слоя и времени подстуживания (в печи или колодцах). Время подогрева для шахтных печей типа Ц — 1—4 ч. Продолжительность выдержки для получения требуемой глубины слоя устанавливают, руководствуясь табл. 167 и 168.

167. Зависимость глубины цементованного слоя от времени выдержки при 930° С (без учета времени нагрева) при применении различных карбюризаторов

Глубина слоя, мм	Время выдержки, ч		
	Керосин	Пиробензол	Синтин
0,7—1,1	5—7	4—6	3—4
1,0—1,3	7—9	6—8	5—6
1,3—1,6	9—11	8—10	6—8
1,6—1,9	11—13	10—12	9—10

168. Средние значения скорости газовой цементации (мм/ч) при различных температурах

Глубина слоя, мм	Температура, °С				
	900	925	950	975	1000
До 0,5	0,45	0,55	0,75	—	—
0,5—1,0	0,30	0,40	0,55	0,75	0,95
1,0—1,5	0,2	0,30	0,4	0,55	0,75
1,5—2,0	0,15	0,20	0,25	0,35	0,55

В печах непрерывного действия при определении продолжительности выдержки следует исходить из средней скорости цементации за все время обработки, включая время нагрева до температуры цементации. Среднюю скорость цементации при 930—950° С принимают равной 0,1—0,12 мм/ч при глубине слоя до 0,12 мм.

Другие методы цементации. Некоторое применение для мелких деталей нашла цементация в жидкой ванне (см. табл. 162). При индивидуальном производстве иногда применяют цементацию в пастах (табл. 169). Детали покрывают слоем пасты толщиной 3—4 мм, загружают в ящики, кромки которых промазывают глиной. Процесс ведут при 930—950° С в течение 1,5—3,0 ч для получения слоя глубиной 0,6—1,0 мм.

169. Составы паст для цементации

Компонент	Содержание, %		
	I	II	III
Газовая сажа	28	—	—
Голландская сажа	—	30	55
Кальцинированная сода	3,5	10	30
Железосинеродистый калий	1,5	—	—
Веретенное масло	67	40	—
Декстрин	—	20	—
Щавелевокислый натрий	—	—	15

Если местная цементация необходима главным образом для повышения износостойкости, производят насыщение из образцов с использованием индукционного или другого вида локального нагрева.

Для ускорения процесса температуру газовой цементации иногда повышают до $1000\text{--}1050^\circ\text{C}$, если сталь наследственно мелкозернистая.

Термическая обработка стали после цементации и свойства цементованных деталей

Окончательные свойства цементованные изделия приобретают в результате термической обработки, выполняемой после цементации (табл. 170). Эта обработка необходима для исправления структуры, а нередко и измельчения зерна сердцевины и цементованного слоя; получения высокой твердости цементованного слоя и хороших механических свойств сердцевины; устранения карбидной сетки в цементованном слое, которая может возникнуть при пересыщении его углеродом.

Примечания: 1. При всех вариантах обработки заключительная операция — низкий отпуск при $160\text{--}180^\circ\text{C}$ в течение 1—2 ч.

2. Для уменьшения коробления вложенных деталей закалку рекомендуется вести в оправках и штампах. При непосредственной закалке из цементационной печи необходимо учитывать интенсивность охлаждения, обеспечивающего получение структуры мартенсита и исключающего образование трещин и повышенных деформаций. Увеличение садки на поддон проходных безмуфельных печей более 100 кг приводит к повышенному разбросу в структуре, твердости и деформации деталей в пределах одного поддона.

Уменьшение скорости охлаждения вызывает снижение поверхностной твердости и прокаливаемости цементованного слоя, уменьшение предела выносливости и долговечности деталей, особенно при наличии внутреннего окисления.

В результате термической обработки поверхностный слой приобретает структуру мартенсита или мартенсита с небольшим количеством избыточных карбидов в виде глобулей. Твердость слоя для углеродистой стали $HRC\ 60\text{--}64$, а для легированной стали $HRC\ 56\text{--}61$. Снижение твердости объясняется повышенным количеством остаточного аустенита.

Структура сердцевины зависит от состава обрабатываемой стали и режима закалки. Сердцевина деталей из углеродистой стали состоит из феррита и перлита, а деталей из легированных сталей — из феррита и мартенсита (или бейнита) при закалке с температуры ниже A_{c3} (для сердцевины), бейнита или низкоуглеродистого мартенсита при закалке с температуры выше A_{c3} . Низкоуглеродистый мартенсит обеспечивает высокую прочность и достаточную вязкость сердцевины. Сохранение обособленных участков или сетки феррита нежелательно, так как это сопровождается снижением прочности, пластичности и вязкости цементованного изделия. Твердость сердцевины $HRC\ 20\text{--}40$.

При одинарной закалке высоколегированных сталей в структуре цементованного слоя сохраняется большое количество (до 50—60% и более) остаточного аустенита, снижающего твердость. Для разложения остаточного аустенита после цементации чаще применяют высокий отпуск при температуре $600\text{--}640^\circ\text{C}$, затем закалку с пониженной температуры и низкий отпуск (см. табл. 170). Иногда стали, содержащие большое количество остаточного аустенита, после закалки абрабатывают при температуре $70\text{--}80^\circ\text{C}$; это превращает большую часть

170. Режимы термической обработки цементованных деталей

Условия термической обработки	Общая характеристика термической обработки	Примечание
Непосредственная закалка в масле (расплавленные соли 160—180° С) из цементационной печи с подсуживанием до 800—850° С (до температуры выше $A_{с2}$ сердцевины стали) Быстрое или медленное охлаждение после цементации, закалка с 760—780° С или с температуры выше $A_{с2}$ сердцевины стали	Не измельчает зерна стали. Подсуживание уменьшает коробление деталей и повышает твердость слоя вследствие снижения количества остаточного аустенита. Рекомендуется для сравнительно малолегированных наследственно мелкозернистых сталей (15Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 25ХГМ, 25ХНМ, 25ХГР, 20ХН, 15ХНТА и др.) При быстром охлаждении не образуется карбидная сетка, но увеличивается коробление деталей. Для полной закалки сердцевины нагрев производят выше $A_{с2}$. Для уменьшения коробления иногда применяют ступенчатую закалку (160—180° С)	Широко применяют после газовой цементации в методических безмуфельных печах Применяют после цементации твердым карбюризатором и газовой в шахтных печах
Цементация с замедленным охлаждением, высокий отпуск при 600—640° С, 3—10 ч закалка с пониженной температуры (780—800° С — 20Х2Н4А и 800—820° С — 18Х2Н4ВА)	Высокий отпуск вызывает распад остаточного аустенита и образование легированных карбидов. При нагреве стали под закалку карбиды лишь частично растворяются в аустените. При последующей закалке аустенит претерпевает мартенситное превращение, количество остаточного аустенита резко снижается, а твердость возрастает	Применяют после цементации высоколегированных сталей (20Х2Н4А, 18Х2Н4ВА и др.), когда в цементованном слое много остаточного аустенита. После отпуска обработка резанием
Охлаждение после цементации на воздухе (или вместе с ящиком), двойная закалка или нормализация и закалка	Первая закалка (или нормализация) с 880—900° С устраняет карбидную сетку и измельчает зерно сердцевины. Нормализация дает меньше коробления, но не всегда устраняет карбидную сетку в слое. Вторая закалка с 760—830° С измельчает зерно цементованного слоя	Применяют редко, после цементации в твердом карбюризаторе ответственных деталей для получения высоких механических свойств. В результате двойного нагрева происходят большие коробления деталей и обезуглероживание

остаточного аустенита в мартенсит, в результате чего значительно повышается твердость. Однако после обработки холодом износостойкость и контактная выносливость ухудшаются.

Свойства цементованного слоя

Содержание углерода на поверхности цементованного слоя зависит от характера изделия. Для получения высокого сопротивления хрупкому разрушению при ударно-усталостных нагрузках (инструмент

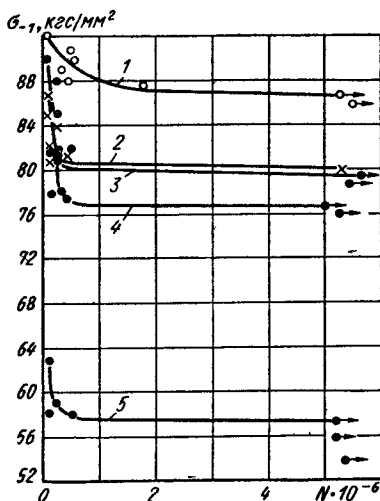


Рис. 42. Влияние глубины цементованного слоя на предел выносливости стали 12ХН3А:

1 — глубина слоя 0,4 мм; 2 — глубина слоя 0,85 мм; 3 — 1,65 мм; 4 — 1,3 мм; 5 — ложная цементация

буровой техники и др.) концентрация углерода на поверхности должна быть 0,7—0,8%, для оптимального сопротивления усталостному разрушению при изгибе — 0,8—1,0% и для максимального сопротивления контактной усталости и износу — 1,0—1,25% С.

После цементации, закалки и низкого отпуска твердость на поверхности HRC 58—64.

Цементация с последующей термической обработкой повышает предел выносливости (рис. 42) и резко понижает чувствительность к концентраторам напряжений, что является следствием образования в цементованном слое благоприятных остаточных напряжений сжатия (рис. 43).

Максимально повышается предел выносливости при цементации на сравнительно небольшую глубину (рис. 44), когда цементованный слой имеет после закалки мартенситную структуру и в нем возникают высокие

остаточные напряжения сжатия. В этом случае очаг усталостного разрушения, как правило, лежит под упрочненным слоем в районе перехода сжимающих напряжений в растягивающие.

С увеличением глубины слоя ($\frac{\Delta}{R} \geq 0,16-0,20$) остаточные напряжения сжатия уменьшаются, а, как следствие этого, снижается предел выносливости и очаг разрушения перемещается в цементованный слой. Чем выше твердость сердцевины (больше в стали углерода), тем при меньшей толщине слоя снижается предел выносливости. Чрезмерное повышение твердости сердцевины (более HRC 40—42) не только сильно уменьшает сжимающие напряжения в слое, но может привести к образованию растягивающих напряжений, резко снижающих усталостную прочность.

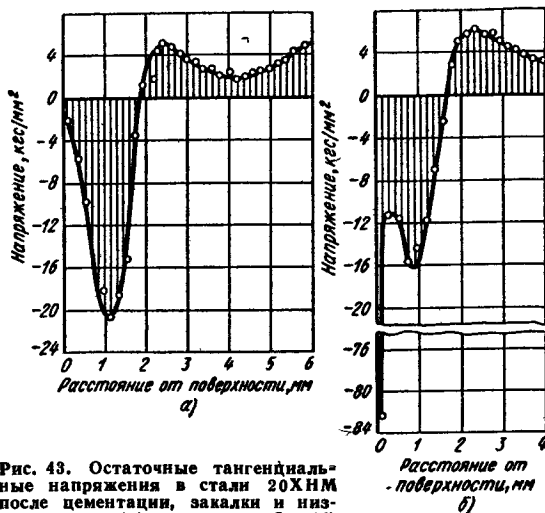


Рис. 43. Остаточные тангенциальные напряжения в стали 20ХНМ после цементации, закалки и низкого отпуска (а) и наклепа дробью (б)

Наличие в цементованном слое немартенситных продуктов превращения вследствие внутреннего окисления или образования карбидов легирующих элементов снижает предел выносливости, поверхностную твердость и износостойкость. Предел контактной выносливости цементованной стали достигает 200 кгс/мм².

Чаще всего контактная усталостная прочность (усталостное выкрашивание) с увеличением глубины слоя возрастает. Понижение контактной прочности с уменьшением глубины цементованного слоя проявляется тем сильнее, чем ниже твердость сердцевины.

Поэтому выбирать оптимальные параметры цементованного слоя и сердцевины следует на основе анализа конкретных условий работы детали, исходя из того, чем определяются долговечность и надежность — контактной или изгибной усталостной прочностью.

Опыт показывает, что для изделий, испытывающих высокие контактные напряжения и требующих высокого предела выносливости, сталь должна содержать углерода 0,17–0,22% ($\sigma_B = 120 \div 150$ кгс/мм², HRC 38–42) при глубине слоя $\frac{\Delta}{R} = 0,16 \div 0,2$ и концентрации углерода 1,1–1,2%.

Дополнительно предел выносливости цементованных изделий может быть повышен

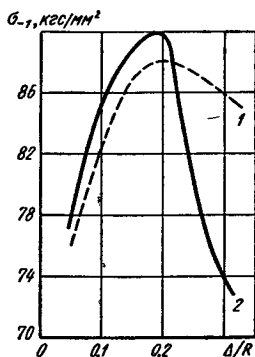


Рис. 44. Влияние глубины цементованного слоя на предел выносливости сталей 18ХГМ (1); и 30ХГТ (2):

Δ — глубина; R — радиус детали

дробеструйным наклепом, обкаткой роликами или вибронаклепом. В результате такой обработки остаточный аустенит превращается в мартенсит, растут сжимающие напряжения на поверхности (см. рис. 43) и, как следствие этого, дополнительно повышается предел выносливости.

Можно рекомендовать после цементации и закалку при индукционном нагреве, в процессе которой измельчается зерно, что вызывает повышение предела выносливости.

Азотирование

Азотированием называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя азотом путем нагревания в среде, содержащей аммиак.

Азотирование применяют для повышения поверхностной твердости и износоустойчивости, увеличения предела выносливости, а также коррозионной и эрозионной стойкости различных изделий.

При азотировании железа и углеродистых сталей структура диффузионного слоя (табл. 171 и рис. 45) находится в полном соответствии с диаграммой состояния железо—азот.

171. Строение азотированного слоя, полученного при разных температурах

Температура азотирования	При температуре насыщения *	После охлаждения	
		быстрого	медленного
Ниже эвтектондной (см. рис. 45)	$\varepsilon \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha$	$\varepsilon \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha$	$\varepsilon + \gamma'_{\text{изб}} \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha + \gamma'_{\text{изб}}$
Выше эвтектондной	$\varepsilon \rightarrow \gamma' \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$	$\varepsilon \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha' \rightarrow \alpha$	$\varepsilon + \gamma'_{\text{изб}} \rightarrow \gamma' \rightarrow \alpha + \gamma' \rightarrow \alpha + \gamma' \rightarrow \alpha + \gamma'_{\text{изб}}$ эвт.
Выше 910° С	γ	α'	$\alpha + \gamma'$

* Многие легирующие элементы повышают растворимость азота в α -фазе. ε - и γ -фазы носят карбонитридный характер

Примечания: 1. Расположение фаз дано от поверхности вглубь.

2. ε -фаза — твердый раствор на базе нитрида Fe_{2-3}N (4,55—11,0% N). Кристаллическая решетка — гексагональная ($a = 2,702 \text{ \AA}$ и $c = 2,764 \text{ \AA}$ и $c = 4,373\text{—}4,414 \text{ \AA}$).

3. γ' -фаза — твердый раствор на базе нитрида Fe_4N (5,3—5,75% N). Кристаллическая решетка ГЦК ($a = 3,791\text{—}3,801 \text{ \AA}$).

4. α -фаза — твердый раствор азота в α -железе. Кристаллическая решетка ОЦК ($a = 2,8664 \text{ \AA}$). Растворимость азота при +20° С в α -фазе не превышает 0,11%.

5. γ -фаза — твердый раствор азота в γ -железе. Кристаллическая решетка ГЦК ($a = 3,613 \text{ \AA}$ при 1,45% N и $a = 3,648 \text{ \AA}$ при 2,79% N).

6. α' -фаза — азотистый мартенсит.

При переходе от одной фазы к другой в азотированном слое происходит резкий перепад концентраций, который устанавливается при температуре диффузии и сохраняется после охлаждения (рис. 45).

При азотировании легированных сталей на поверхности образуется ϵ -фаза $(\text{Fe, Me})_{2-3}(\text{N, C})$, за которой следуют α -фаза *, избыточная

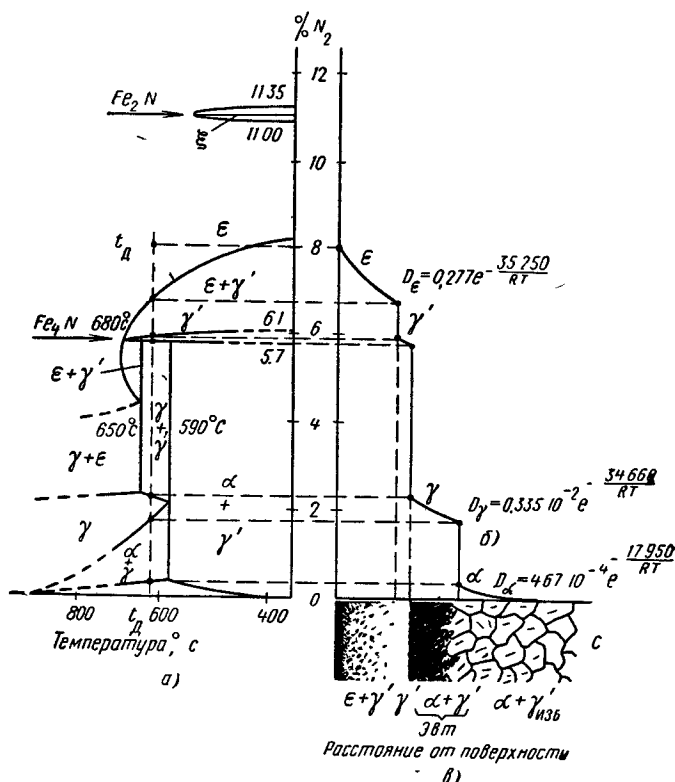


Рис. 45. Диаграмма состояния Fe—N (а), распределение концентрации азота по глубине (б) и микроструктура азотированного слоя (в). Азотирование при температуре t_d

γ' -фаза $(\text{FeMe})_4\text{N}$, нитриды легирующих элементов MeN (AlN , VN , TiN) и Me_2N (Cr_2N , Mo_2N и др.) и исходные карбиды.

Эта часть слоя имеет характерное сорбитообразное строение и отличается от сердцевины тем, что более сильно травится (рис. 46). При температуре выше эвтектондной при азотировании образуется γ -фаза, претерпевающая в процессе охлаждения эвтектондный распад $\gamma \rightarrow \alpha + (\text{FeMe})_4\text{N}$ (см. рис. 45) или мартенситное превращение.

Азотированию можно подвергать любые стали. Когда требуется высокая твердость и износостойкость, азотируют сталь 38ХМЮА. В последние годы для изделий, упрочняемых азотированием, чаще используют конструкционные улучшаемые стали, не содержащие алю-

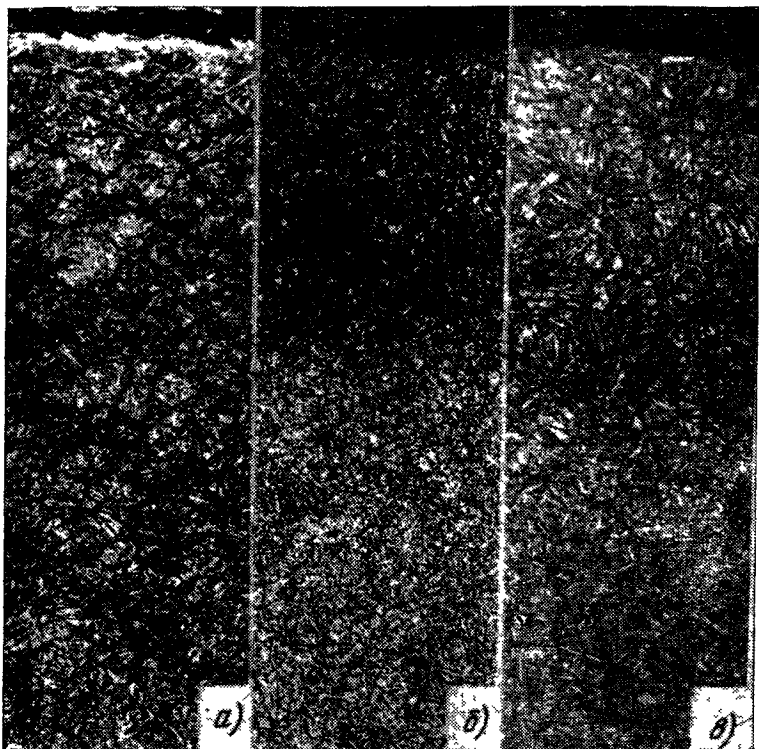


Рис. 46. Микроструктура азотированного слоя стали:

а — 38ХМЮА ($\times 180$); б — 18Х2Н4А ($\times 200$); в — 30ХЗВА ($\times 200$)

миния, например, 40Х, 40ХФА, 20Х3МВФ, 30Х3МФ1, 38ХНМФА, 40ХГМ, 20ХЗВА, 20ХН2МФ, 18Х2Н4ВА и др.

Азотирование широко применяют для коррозионностойких и жаропрочных сталей, мартенситно-старееющих сталей, а в последнее время и для инструментальных и штамповых сталей (Р18, Р9, Х12М, Х12Ф1, Х6ВФ, 5ХНМ, 5ХНТ, 40ХСМФ, 4Х5МФС и др.).

Технология газового азотирования

В общем виде технологический процесс азотирования изделий из стали 38ХМЮА можно представить в виде следующих последовательных этапов: 1) предварительной термической обработки, цель которой — придать стали требуемые механические свойства; 2) механической обработки детали, включая шлифование; 3) защиты мест, не подлежащих азотированию; 4) азотирования; 5) окончательного шлифования или доводки изделия в соответствии с заданными допусками.

Предварительную термообработку — закалку и высокий отпуск — обычно проводят в заготовках.

Температура отпуска после закалки должна превышать температуру азотирования.

Для ответственных изделий со сложной конфигурацией перед шлифованием рекомендуется стабилизирующий отпуск для снятия внутренних напряжений, которые возникают в изделии при резании и могут быть источником повышенных деформаций при азотировании. Стабилизирующий отпуск производят при 550—600° С в течение 3—10 ч с последующим медленным охлаждением (печь, воздух).

Нередко бывает необходимо отдельные части изделия предохранить от азотирования. Для этого чаще всего гальванически покрывают оловом места, не подлежащие азотированию. Защитное действие олова проявляется в том, что при температуре азотирования оно расплавляется и удерживается на поверхности стали в виде тонкой непроницаемой для азота пленки благодаря действию сил поверхностного натяжения. Толщина оловянного покрытия должна быть 6—8 мкм. Для местной защиты от азотирования нержавеющей сталей применяют химическое (толщина 8—10 мкм) или гальваническое (толщина до 30 мкм) никелирование.

На многих заводах применяют жидкое стекло. Перед покрытием детали обезжиривают, промывают горячей водой, а затем окунают в жидкое стекло и просушивают при 90—120° С в течение 1,5 ч. Пленка жидкого стекла должна быть прозрачной, без просветов и механических повреждений.

При азотировании коррозионностойких сталей необходимо с поверхностей, подлежащих азотированию, удалить пленку окислов, препятствующую диффузии азота в металл. Удаляют окисную пленку травлением в водных растворах кислот или введением в рабочее пространство печи хлористого аммония или четыреххлористого углерода.

Рекомендуемые режимы азотирования конструкционных и нержавеющей сталей приведены в табл. 172 и 173, а инструментальных сталей — в табл. 174.

Выбор температуры процесса азотирования для изделий из конструкционных сталей определяется требованиями к толщине и твердости слоя: при высокой твердости и небольшой толщине слоя рекомендуется применять низкую температуру, при больших толщинах и меньшей твердости — более высокую температуру; при больших толщинах и высокой твердости применяют двухступенчатый режим сначала при 500—520° С и далее при 540—580° С (рис. 47, 48).

Время выдержки отсчитывается с момента достижения в печи заданной температуры и назначается в зависимости от требуемой глубины насыщения слоя и температуры процесса азотирования (см. рис. 10). Не следует стремиться к большой глубине слоя. При большой глубине

слоя снижается предел выносливости, возрастают деформации (коробление) детали. Обычно дается значительный припуск на азотируемые детали для устранения возникающих изменений размеров и формы, что нельзя признать правильным. При рациональной укладке изделий в печи, минимальной температуре и толщине слоя коробление и деформации невелики.

Скорость протекания аммиака должна быть такой, чтобы диссоциация аммиака была в требуемых пределах (табл. 175).

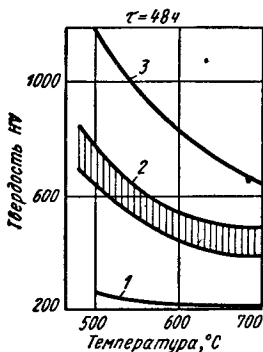


Рис. 47. Зависимость изменения твердости азотированного слоя от температуры процесса:

1 — углеродистая сталь (40, 45 и др.), 2 — легированные конструкционные стали (40Х, 18Х2Н4ВА, 20ХГНМ и др.), 3 — сталь 38ХМЮА

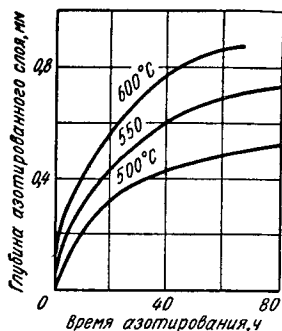


Рис. 48. Изменение глубины азотированного слоя в зависимости от температуры и продолжительности процесса

ном азотом (аргоном) до 70—80%. Снижение хрупкости применительно к стали 38ХМЮА связано с уменьшением концентрации азота в ϵ -фазе и уменьшением ее развитием. Глубина азотированного слоя, его твердость и сопротивление износу при разбавлении аммиака азотом до 80% не изменяются, но коррозионная стойкость несколько снижается.

В процессе насыщения стали азотом возможны изменение размеров и деформация деталей. Чем выше температура, больше глубина слоя азотирования и сложнее деталь, тем больше деформация. Изменение размеров детали с одинаковыми по глубине слоями азотирования тем больше, чем меньше толщина стенки изделия и больше диаметр.

Азотирование применяют и для повышения коррозионной стойкости. Азотированный слой устойчив против коррозии в атмосфере, водопроводной воде, перегретом паре и ряде других сред. Высокой коррозионной устойчивостью обладает лишь высокоазотистая ϵ -фаза.

Поэтому для получения надежной защиты от коррозии необходимо стремиться к развитию ϵ -фазы. Процесс антикоррозионного азотирования осуществляется при 600—750 °C в течение 0,25—6 ч. Чем выше

172. Рекомендуемые режимы азотирования конструкционных и нержавеющих сталей

Сталь	Температура азотирования, °C	Продолжительность выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Твердость азотированного слоя, HV
38ХМЮА	500—520 540 510 для 1-й ступени 550 для 2-й ступени	48—60 36—48 15 25	0,40—0,50 0,5—0,6 0,5—0,6	1000—1100 900—100 850—1000
38ХВФЮА/ 18Х2Н4ВА 40ХНМА	490—510 510 для 1-й ступени 540 для 2-й ступени	24—48 40—50 25 35	0,38—0,4 0,35—0,40 0,5—0,6	850—950 750—850 600
30Х3МФ1С 25Х2Н2МФ и 25Х3Н3МФ 30Х2Н2ВА	560 560 575 510 для 1-й ступени 540 для 2-й ступени	24 25 25 25 35	0,5 0,4 0,5 0,5—0,6	900—950 850 750 750
40ХНМА 40ХНВА 30Х2Н2ВА 30Х2Н2ВФА 30Х2Н2ВФМА	500—520	50—60	0,5—0,6	640 700 700 700
40ХНВА 30Х2Н2ВА	510 для 1-й ступени 540 для 2-й ступени	25 30	0,6—0,7	640 700
30Х2Н2ВФА 30Х2Н2ВФМА 30Х3ВА	500—525	60—80	0,35—0,55	700 700 750—800
10Х13	500 550 600	48 48 48	0,14—0,16 0,25—0,30 0,35—0,40	1000—1050 900—950 800—850
20Х13	500 550 600	48 48 48	0,10—0,12 0,25—0,30 0,30—0,40	1000—1050 900—950 780—830
15Х11МФ 15Х12ВМФ	530 для 1-й ступени 580 для 2-й ступени	10 20	0,35—0,4	900—950
4Х14Н14В2М	560 600	60 48	0,10—0,12 0,10—0,12	800—900 750—800
25Х18Н8В2	560 560 600	24 40 24	0,12—0,14 0,16—0,20 0,12—0,16	950—1100 900—950 900—950
12Х18Н9 08Х18Н10Т	560	50—60	0,2—0,25	1000—1100
Н18К9М5Т	500 450	24 48	0,25 0,25	900 900—950

Сталь	Температура азотирования, °С	Продолжительность выдержки, ч	Глубина слоя, мм	Твердость слоя, HV	Примечание
<i>Гильзы цилиндров дизелей</i>					
38ХМЮА (38ХВФЮ)	510 (1-я ступень) 540 (2-я ступень)	12 42	0,5—0,8	950—1000	Азотирование проводят в контейнерных печах с передвижной нагревательной камерой и двумя муфелями. Гильзы устанавливают вертикально, буртами вверх
<i>Коленчатый вал дизеля</i>					
18Х2Н4ВА	490—500	40—48	0,35—0,4	600	Валы укладывают на специальные приспособления на 6—8 крайних щек с приподнятой средней частью. Хорошие результаты получены при вращении вала
<i>Валы, планки, трубчатые изделия в станкостроении</i>					
40Х 40ХФА 18ХГТ 38ХМЮА	510	18—24	Не менее 0,25	500—610 610—700 630—720 850—950	Шпиндели для опор качения, ходовые винты пар скольжения
	510 (1-я ступень) 540 (2-я ступень)	15—20 25—40	Не менее 0,25		Шпиндели для опор скольжения, гильзы, втулки, пиноли, червяки делительных пар
30ХЗВА	510 (1-я ступень) 540 (2-я ступень)	15—20 25—40	Не менее 0,25	720—800	Ходовые винты пар качения и пар скольжения, накладные направляющие планки и др.
<i>Зубчатые колеса (станкостроение)</i>					
40ХФА	510	—	(0,1—0,13) но не более 0,6	610—700	Азотирование применяют для колес, не переключаемых или редко переключаемых (при обеспечении синхронизации зубчатой пары в момент

	580 (2-я ступень)	20			износа в коррозионной среде
15X11МФ 15X12ВМФ *	530 (1-я ступень) 580 (2-я ступень)	10 18	0,3—0,4	850—900	Лопатки соплового аппарата, штоки, втулки, седла, клапаны
<i>Клапаны дизелей</i>					
4X14Н14В2М *	550 575 (1-я ступень) 630 (2-я ступень)	55—60 25 35	0,1—0,12 0,1—0,2	900—1000 850—900	При азотировании крупнозернистой стали часто наблюдается шелушение азотированного слоя. При крупном зерне рекомендуется предварительная закалка от 1050° С
<i>Коленчатые валы и втулки в тепловозостроении *</i>					
Высокопрочный чугун марки ВПЧ, ВПЧНМ	550—560 (1-я ступень, степень диссоциации 30—40%)	30	0,7	HRC 40 ** (при слое 0,3 мм шейки коленчатого вала)	Максимальный износ азотированных втулок составляет 0,03—0,06 мм на диаметр за 5000 ч работы дизеля, а неупрочненных из легированного чугуна 0,2—0,3 мм
	570—580 — 2-я ступень, степень диссоциации 40—65% или	60		HRC 43—50 ** при слое	Износостойкость азотированных валов в 5—8 раз выше, чем неупрочненных. Предел выносливости коленчатых валов в результате азотирования повышается на 30—40%. Диаметральный износ шеек валов дизеля ТЭП-60 за 600 000 км пробега составляет 0,013 мм, а износ шеек неупрочненных коленчатых валов 0,11 мм
	550—560 — 1-я ступень, степень диссоциации 25—35%,	30		0,4—0,5 мм (втулки цилиндров)	
	560—570 — 2-я ступень, степень диссоциации аммиака 40—50%	30			
	570—580 — 3-я ступень, степень диссоциации 50—60%	30			

* Для удаления окисной пленки перед азотированием производится травление поверхности или при азотировании в муфель печи вводят NH_4Cl (CCl_4).

** После окончательной механической обработки. Шейки валов шлифуются после азотирования для исправления корабления, галтели полируются.

Сталь	Режим азотирования		Твердость слоя, ** HV	Глубина слоя, мм	Примечание
	Темпе- ратура, °C	Время, ч			
P9, P18	510—520	0,25—1,0 *	1340—1460	0,01—0,025	Для повышения вязкости первый отпуск проводить при 350° С, а последующие при 560° С
X12M, X12Φ1	510—520	8—12	1100—1200	0,08—0,12	—
3X2B8Φ, 4X5B2ΦС и др.	530—540	12—16	1100	0,2—0,25	Лучшей прочностью, вязкостью и разгаростойкостью азотированные штампы обладают после закалки с 1000—1050° С и отпуска при 560—600° С ***

* Для мелкого инструмента (диаметром менее 15 мм) 15—20 мин, для более крупного диаметром (16—30 мм) 25—35 мин и крупного (диаметром более 30 мм) 60 мин.

** Азотированный слой обладает высокой теплостойкостью. Твердость HV 700 сохраняется до 650—700° С.

*** В некоторых случаях, например для штампов и пресс-форм, испытывающих высокие нагрузки и не подвергаемых шлифованию, применяют азотирование перед закалкой. В этом случае азотирование ведут при 520° С 12 ч или при 560—580° С 10 ч для получения слоя глубиной 0,15—0,20 мм. После нагрева под закалку глубина слоя возрастает до 0,20—0,25 мм. Температура закалки обычно 1000—1050° С, что на 30—50° С ниже по сравнению с принятыми при обычной обработке. Твердость слоя, полученного у стали 3X2B8Φ, составляет HV 780—830 (HRC 64—65) и у сталей 4X5B2ΦС — HV 900—950 (HRC 67—68), что ниже, чем твердость слоя, полученного после закалки и отпуска, но значительно выше твердости неазотированной стали. При нагреве до 620—640° С твердость снижается до HRC 50. После такой обработки в диффузионном слое отсутствуют ε-фаза и нитридная сетка, что повышает на 20—30% прочность и вязкость стали по сравнению с азотированием после отпуска.

175. Температура азотирования и степень диссоциации аммиака для конструкционных и нержавеющих сталей

Стали	Температура азотирования, °C	Степень диссоциации, %	Стали	Температура азотирования, °C	Степень диссоциации, %
Конструкционные	500—520	20—40	Нержавеющие	500	15—25
	520—540	30—50		560	25—40
	540—560	40—60		600	35—50
				650	50—70

температура азотирования и меньше габарит изделия, тем меньше должна быть продолжительность процесса для получения коррозионно-стойчивого азотированного слоя.

Эксплуатационная стойкость изделий с антикоррозионным покрытием зависит от плотности слоя. Наличие в азотированном слое пор приводит к интенсивной коррозии оголенных точек основного металла.

Азотирование в тлеющем разряде (ионное азотирование)

Азотирование в тлеющем разряде проводят в разреженной азото-содержащей атмосфере при подключении обрабатываемых деталей к отрицательному электроду (катоде). Анодом является контейнер установки. При обработке деталей сложной конфигурации применяют специальные профилированные аноды. Между катодом (деталью) и анодом возбуждается тлеющий разряд, и ионы газа, бомбардируя поверхность катода, нагревают ее до температуры насыщения. Процесс ионного азотирования реализуется в две стадии: I — очистка поверхности катодным распылением; II — собственно насыщение.

Катодное распыление проводится в течение 5—60 мин при напряжении 1100—1400 В и давлении 0,1—0,2 мм рт. ст. В процессе катодного распыления температура поверхности детали не превышает 250° С. Температура азотирования 470—580° С, разрежение 1—10 мм рт. ст., рабочее напряжение 400—1100 В, продолжительность процесса составляет от нескольких минут до 24 ч.

Ионное азотирование (по сравнению с печным) имеет следующие преимущества:

1. Ускорение диффузионных процессов в 1,5—2 раза.
2. Ионное азотирование позволяет получить диффузионные слои регулируемого состава и строения.
3. Незначительные деформации изделий и высокий класс чистоты поверхности.
4. Азотирование коррозионностойких, жаропрочных и мартенситно-старееющих сталей без дополнительной депассивирующей обработки.
5. Значительное сокращение общего времени процесса за счет уменьшения времени нагрева и охлаждения садки.
6. Большая экономичность процесса, повышение коэффициента использования электроэнергии, сокращение расхода насыщающих газов.

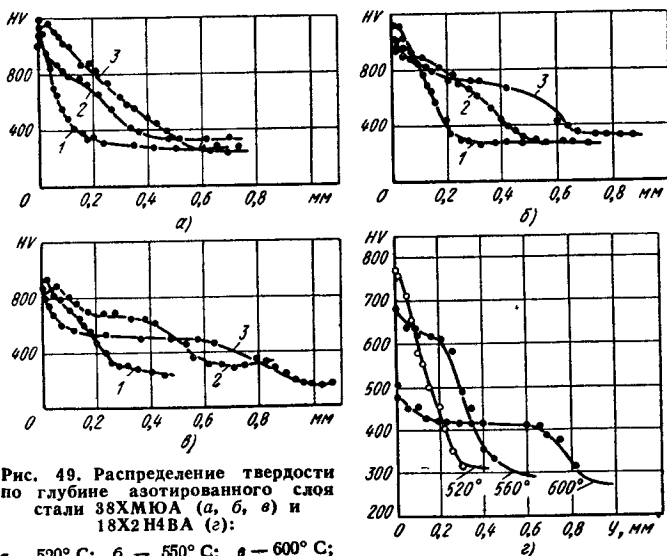
7. Процесс нетоксичен и отвечает требованиям по защите окружающей среды.

Ионное азотирование применяют для обработки различных сталей и сплавов, азотируемых сталей-нитраллоев, инструментальных, мартенситно-старееющих, нержавеющей хромистых и хромоникелевых сталей, чугунов и т. д.

Для защиты поверхности от азотирования используют гальванические покрытия, например, никелевые толщиной 10—15 мкм и экраны.

Свойства азотированной стали

Азотированный слой обладает высокой твердостью (см. табл. 172) и износостойкостью. Распределение твердости по глубине азотированного слоя различных сталей можно видеть на рис. 49. Азотированный слой обладает высоким сопротивлением износу и задиру. Износостой-



кость азотированной стали в 1,5—4 раза выше износостойкости закаленных высокоуглеродистых и цементованных сталей. Твердость азотированного слоя не изменяется при нагреве до 450—500° С.

Сплошное азотирование изделий при правильном конструктивном оформлении надрезов, галтелей и т. д. является одним из основных методов повышения предела выносливости детали. Надрезы, царапины, резкие переходы сечений, отверстия и т. д., понижающие предел выносливости, после азотирования практически не оказывают ослабляющего влияния. Влияние азотирования тем сильнее, чем меньше размеры поперечного сечения и выше конструктивные или технологические концентраторы напряжений (табл. 176).

176. Влияние азотирования на предел выносливости

Сталь	Тип образца	Предел выносливости σ_{-1} , кгс/мм ²	
		после улучшения	после азотирования
45	Гладкий, $\varnothing = 7,5$ мм С надрезом, $R = 0,5$ мм	44 25	61 48
38ХМЮА	Гладкий, $\varnothing = 7,5$ мм С надрезом, $R = 0,3$ мм	48,5 37	62 68
18Х2Н4ВА	Гладкий, $\varnothing = 7,5$ мм С надрезом, $\varnothing = 7,5$ мм Гладкий, $\varnothing = 30$ мм То же, 40 мм С надрезом, $\varnothing = 30$ мм С надрезом, $\varnothing = 40$ мм	54 22,7 40 33 17,8 16,3	70 52 45 40 27 23
38ХНМФА	Гладкий, $\varnothing = 7,5$ мм С надрезом	51,1 14,3	69 54
38ХГМ	Гладкий, $\varnothing = 7,5$ мм Гладкий трубчатый, $\varnothing = 40$ мм С буртом, $r = 0,055$ мм, диаметром 40 мм С поперечным отверстием, $\varnothing = 5$ мм С посадкой кольца	50 49 24 14 18	66 52 42 29 44
Примечания: 1. Азотирование проводилось при 520—540° С, глубина слоя 0,35—0,45 мм. 2. На образцах диаметром 7,5 мм надрез с углом 60° и глубиной 0,24 мм.			

Основной причиной повышения предела выносливости является образование в азотированном слое благоприятных остаточных напряжений сжатия (рис. 50).

Максимальный предел выносливости получается при сравнительно небольшой глубине слоя. Для деталей без концентраторов напряжений рост предела выносливости наблюдается лишь при отношении глубины слоя (Δ) к радиусу (R), равном 0,1—0,2. При наличии концентраторов напряжений максимальное значение предела выносливости достигается

при $\frac{\Delta}{R} = 0,01$. При дальнейшем увеличении глубины слоя предел выносливости или не изменяется, или снижается вследствие уменьшения напряжения сжатия в слое и увеличения напряжений растяжения в сердцевине.

Особенно резко это сказывается, когда глубина азотированного слоя соизмерима с толщиной сечения детали. Одновременно следует учитывать, что с увеличением длительности процесса происходит разупроч-

нение сердцевины. Предел прочности может снижаться на 10—20% в зависимости от температуры и состава стали. Это уменьшает предел выносливости, так как разрушение начинается под слоем.

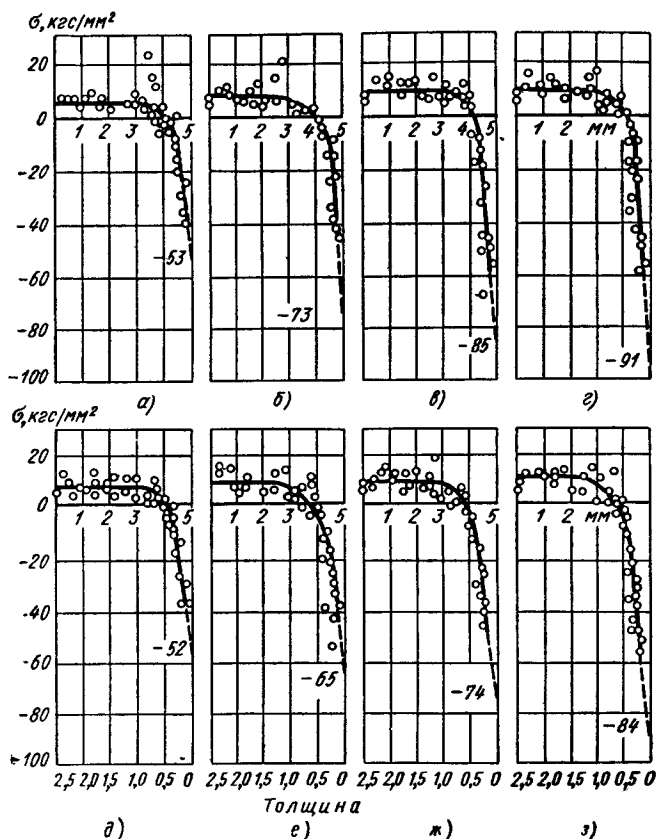


Рис. 50. Распределение остаточных напряжений по глубине азотированного слоя стали 20ХГНМ (а, б, в, г) и 40ХГМ (д, е, ж, з): а, д — 550° С (50 ч); б, е — 525° С (100 ч); в, ж — 500° С (100 ч); г, з — 475° С (150 ч)

Чем выше температура азотирования, тем ниже абсолютное значение предела выносливости (рис. 51). Это связано с разупрочнением сердцевины и уменьшением остаточных напряжений сжатия.

Чрезмерное повышение степени диссоциации аммиака понижает предел выносливости.

После проведения процесса азотирования нередко требуется дополнительно обработать слой. Шлифование на глубину 0,05 мм (при общей глубине слоя 0,4—0,45 мм) не сопровождается снижением усталостной прочности. Более глубокое шлифование понижает предел усталости. Надрез глубиной, превышающей глубину упрочнения слоя, снимает упрочнение, вызванное азотированием.

Чтобы предупредить нарушение твердого поверхностного слоя, необходимо тщательное охлаждение при шлифовании. При этом нельзя допускать высоких скоростей шлифования и следует соблюдать пред-

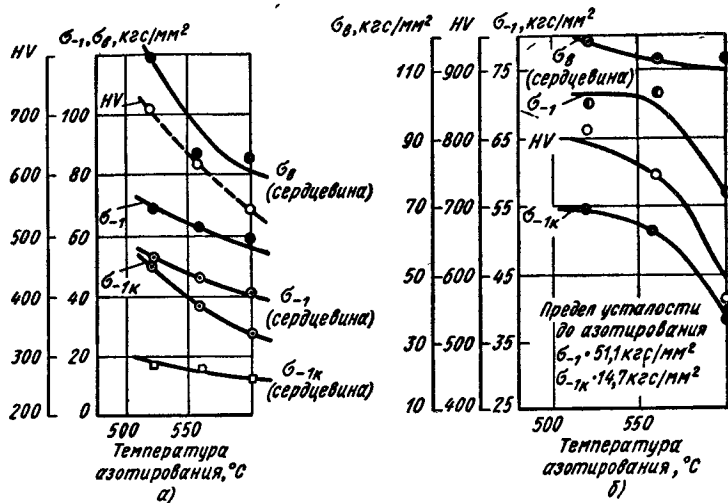


Рис. 51. Влияние температуры азотирования на механические свойства стали 18X2H4BA (а) и 38XHMФA (б)

осторожность при транспортировке и монтаже деталей. Применение местного предохранения от азотирования или удаления слоя в таких местах устраняет эффект азотирования.

Предел выносливости азотированных деталей, как это видно из табл. 177, может быть повышен обкаткой роликами.

Обкатка роликами существенно уменьшает неблагоприятное влияние шлифования и улучшает чистоту поверхности. Правка азотированных деталей снижает предел выносливости. Стойкость против образования питтингов у азотированных конструкционных сталей невелика. При повышенных контактных напряжениях глубина азотированного слоя должна быть не менее 0,4—0,5 мм. Азотирование следует использовать в тех случаях, когда контактные напряжения не слишком велики и деталь работает в условиях трения скольжения (или абразивного износа). Азотирование повышает сопротивление стали кавитационной эрозии. Азотирование режущего и накатного инструмента (сверл, метчиков, накатников и т. д.) из быстрорежущей стали повышает

177. Влияние обкатки роликами на предел выносливости азотированных образцов из стали 18Х2Н4ВА *

Вид упрочнения	Предел выносливости, σ_{-1}	
	кгс/мм ²	%
Улучшение	35	100
Улучшение, обкатка галтелей и цилиндрической части	61,8	173
Азотирование	58	163
Азотирование и обкатка галтелей **	63	177
Азотирование, обкатка галтелей и цилиндрической части	67	188

* Образцы с концентратором напряжения в виде галтельного перехода (коэффициент концентрации 1,95)
 ** Упрочняющая деформация азотированного слоя проводится при удельном давлении 500—650 кгс/мм². Более низкое давление не повышает предел выносливости, а более высокое вызывает растрескивание и шелушение слоя.

их стойкость в 1,5—2 раза. Азотирование повышает в 4—5 раз устойчивость против разрушения пресс-форм из сталей 3Х2В8Ф и 4Х5В2ФС в расплавленных алюминиевых сплавах.

Азотирование в жидких средах (низкотемпературное цианирование, углеродоазотирование, тенифер-процесс)

Жидким азотированием называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении стали одновременно азотом и углеродом при температуре в интервале, как правило, 560—580° С в расплаве, содержащем цианистые соли (табл. 178).

Диффузионный слой, образующийся в указанных ваннах при температуре 570° С, состоит из двух зон (рис. 52) 1) поверхностной, состоящей в основном из ϵ -фазы (Fe, Me)₃(NC), и 2) диффузионной, которая состоит из азотистого α -раствора, нитрида железа (Fe, Me)₄N (γ' -фазы) и исходных карбидов (рис. 52).

Глубина карбонитридного слоя не превышает 15—16 мкм. Общая глубина слоя составляет 0,15—0,5 мм.

Карбонитридная зона способствует увеличению задиристости, уменьшает коэффициент трения, повышает износостойкость, обуславливает хорошую прирабатываемость трущихся поверхностей и сопротивление коррозии. На поверхности карбонитридной зоны нередко образуются поры, что снижает твердость и контактную прочность. Регулируя активность насыщающей среды (концентрации азота в слое) и длительность процесса (глубину слоя), можно устранить пористость. В зависимости от температуры и продолжительности процесса качество карбонитридного слоя можно определить по диаграммам преимущественных режимов (рис. 53). Отдельные поры не влияют на твердость

и пластичность карбонитридной зоны и позволяют улучшить прирабатываемость путем удержания смазки в поверхностных порах. При постоянном режиме насыщения пористость может возникнуть вследствие содержания в расплаве $K_4Fe(CN)_6$.

Чем больше в стали нитридообразующих элементов (Cr, Mo, W, V, Ti и т. д.), тем выше ее твердость: для углеродистых сталей HV 150—300, а для легированных конструкционных сталей HV 500—700, для стали 38ХМЮА HV 950—1000 и высоколегированных сталей X13, X18, X18H9 HV 750—1100. Азотирование в расплавленных солях значительно повышает предел выносливости (рис. 54), что связано с образованием в упрочненном слое остаточных напряжений сжатия.



Рис. 52. Микроструктура азотированного (цианированного) слоя на железе (а), стали 25 (б) и стали 40Х (в). Увеличение в 250 раз

Азотирование применяют для упрочнения деталей широкой номенклатуры. В автостроении обрабатывают коленчатые и кулачковые валы, рычаги управления, шестерни масляных насосов, крыльчатки водяных насосов, в станкостроении — шестерни и шпиндели, в химическом машиностроении — детали насосов, шнеки, цилиндры экструдеров и т. д. Значительное применение азотирование получило в инструментальном производстве.

Иногда применяют сульфацианирование, т. е. одновременное насыщение поверхности стали азотом, углеродом и серой. Процесс проводят

178. Жидкое азотирование (низкотемпературное цианирование)

Состав ванны при загрузке	Рабочий состав ванны, %	Температура, °C	Продолжительность, ч	Примечание
---------------------------	-------------------------	-----------------	----------------------	------------

Цианид-цианатная ванна

85% (40% KCN, 60% NaCN) + + 15% Na ₂ CO ₃	KCN } 42—48% NaCN } — 50% Na ₂ CO ₃ — остальное	570	1—3	Фирма «Дегусса» (ФРГ), тенифер-процесс. Процессы ведут в титановых тиглях при продувке воздухом туфтридин-процесс (США)
KCNO или NaCNO — 25—40% KCN или NaCN — 50% Na ₂ CO ₃ — остальное	NaCN — 45% KCNO — 32% Na ₂ CO ₃ — 23%	500—600	1—3	

Ванны на основе карбамида *

(NH ₂) ₂ CO — 55% (карбамид)	NaCNO — 20—40% NaCN — 12—20% Na ₂ CO ₃ — 50—60%	560—580	1—4	Цианат натрия получен при предварительном плавлении карбамида и кальцинированной соды
NaCNO — 25—35% (32%) ** KCl — 28—40% (38%) ** Na ₂ CO ₃ — 25—35% (30%) **		560—580	1—4	

* Фирма «Дегусса» разработала ванну на основе мочевины и поташа с добавкой регенератора (триазин), благодаря которому соль в процессе работы восстанавливается и уменьшается выпадение железистых осадков, требующих частой смены расплава.

** Даны предпочтительные цифры.

при 560—580° С в средне- или высокоцианистых ваннах, содержащих сернисто- или сернокислые соли (Na₂S₂O₃, Na₂CO₃, Na₂SO₄, Na₂S и др.) в количестве 2—25%

Строение сульфиданированного слоя такое же, как после низкотемпературного цианирования (жидкого азотирования), но на самой поверхности образуется тонкий слой сульфида FeS.

Сульфиданирование уменьшает коэффициент трения, повышает износостойкость, противозадирные свойства и предел выносливости.

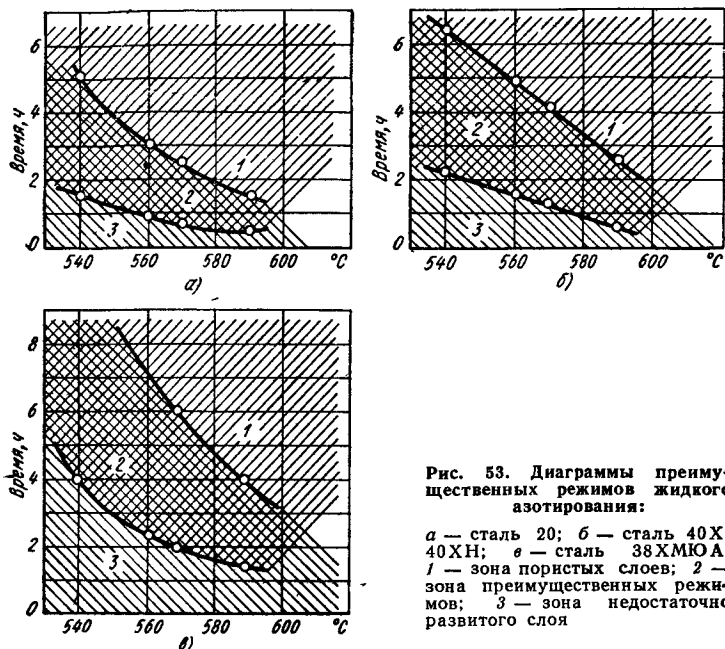


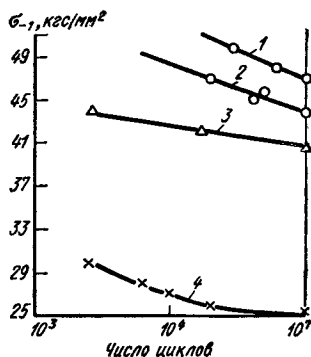
Рис. 53. Диаграммы преимущественных режимов жидкого азотирования:

а — сталь 20; б — сталь 40Х, 40ХН; в — сталь 38ХМЮА; 1 — зона пористых слоев; 2 — зона преимущественных режимов; 3 — зона недостаточно развитого слоя

Значительно улучшается приработка сопряженных трущихся поверхностей.

Высокая токсичность процессов «жидкого азотирования» ограничивает возможность его применения.

Рис. 54. Влияние жидкого азотирования при 570° С (90 мин) на предел выносливости стали: 1 — охлаждение в воде; 2 — на воздухе; 3 — с печью; 4 — до азотирования



Азотирование с добавками углеродосодержащих газов (низкотемпературная нитроцементация, углеродоазотирование, никотрирование)

Химико-термическая обработка проводится при температуре 560—580° С в атмосферах аммиака с добавками углеродосодержащих газов (табл. 179).

179. Низкотемпературная нитроцементация (никотрирование)

Насыщающая среда	Темпе- ратура, °С	Продол- житель- ность процесса, ч	Примечание
Эндогаз (40% H_2 + 20% CO + 40% N_2) + 50% NH_3	570	0,5—3	После окончания процесса охлаждение в светлокалящем масле или в потоке защитного газа. Охлаждение в масле повышает предел выносливости
Экзо-эндогаз (20% H_2 + 20% CO + 60% N_2) с точкой росы 0° С + 50% NH_3	570	0,5—3	
Аммиак + экзогаз (90% N_2 + 10% CO_2)	570	1—6	
Продукты пиролиза керосина, спирта или синтина — 50% + NH_3 , 50%			

Примечание. При применении эндогаза ниже 700° С возможен взрыв. Для предотвращения взрыва рекомендуется следующая технология, у передней дверцы создают пламенный затвор, печь нагревают до 800° С, подают при этой температуре эндогаз и аммиак, далее снижают температуру до 620° С, печь постоянно продувают газом, загружают детали и проводят процесс при 570° С.

В результате низкотемпературной нитроцементации образуется диффузионный слой, аналогичный получаемому при жидком азотировании (см. рис. 52).

Низкотемпературная нитроцементация повышает твердость на поверхности, сопротивление износу и задиру, обеспечивает хорошую прирабатываемость и высокий предел выносливости.

Процесс рекомендуется вести в герметизированных камерных печах с загрузочным тамбуром и масляным закалочным баком.

Высокотемпературная нитроцементация (азотонауглероживание, карбонитрирование)

Высокотемпературной нитроцементацией называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре, как правило, 800—950° С в газовой среде (табл. 180).

Наилучшие результаты получаются при использовании эндотермической атмосферы (с регулируемым потенциалом углерода), к которой добавляют аммиак (табл. 180)

180. Нитроцементация стали

Насыщающая среда	Температура, °C	Глубина слоя, мм	Примечание
Эндогаз (20% CO, 40% H ₂ , 40% N ₂) + 3—5% CH ₄ (необработанный природный газ) + 3—5% NH ₃ *	860	0,25—1,0	Процесс ведут в безмуфельных методических печах. Углеродный потенциал регулируют по точке росы или содержанию CO ₂ . Приборы для регулирования потенциала азота не разработаны
Маловодородистый экзо-эндогаз (20% CO, 20% H ₂ , 60% N ₂) + 0,5—0,8% CH ₄ + 2—4% NH ₃ Маловодородистый эндогаз + 1,5% CH ₄ + 4—6% NH ₃	860 820—860	0,5—0,8 0,2—0,5	То же Применение маловодородистой эндотермической атмосферы устраняет возможность возникновения водородной хрупкости
Природный газ (97—98% CH ₄) + 20—25% NH ₃	860	0,6—0,9	Процесс ведется в шахтных печах типа Ц
Триэтилоламин (C ₂ H ₅ OH) ₃ + 10% H ₂ O	860—930	0,2—1,0 0,8—1,5	Процесс ведется в шахтных и ретортных шнековых печах Дозированную подачу триэтилоламина в печь осуществляют с помощью топливного насоса. Через охлаждаемую водой трубку или с помощью электромагнитного дозатора
Карбюризатор (синтин, керосин, спирт и др.) + 5—50% NH ₃ от общего объема **	860—930	0,4—1,5	Процесс ведется в шахтных печах

* Из-за отсутствия приборов автоматического регулирования азота подача NH₃ в атмосферу должна строго контролироваться.

** Рекомендуется подавать в печь азот для лучшей циркуляции газа в рабочей реторте печи. В печь Ц60 рекомендуется вводить 43—49% керосина (0,5 л/мин), 14—17% NH₃ (2,1 см³/мин) и 34—43% технического азота (1,5 л/мин азота).

Для получения слоя глубиной 0,6—0,8 мм выдержка в методических безмуфельных печах при 860° С должна составлять 6—8 ч и для глубины 0,8—1,0 мм 10 ч.

При проведении нитроцементации в шахтных печах с использованием триэтаноламина или газа, полученного из жидких карбюризаторов (керосин, спирт, синтин и т. д.) в смеси с аммиаком (см. табл. 180), для установления времени выдержки можно пользоваться данными, приведенными в табл. 181.

181. Приближенные значения средней скорости нитроцементации, мм/ч, при различных температурах процесса

Глубина слоя, мм	860° С	930° С	950° С
До 0,5	0,20	0,40	0,50
0,5—1,0	0,15	0,30	0,40
1,0—1,5	0,12	0,2	0,30

После высокотемпературной нитроцементации следует закалка непосредственно из печи с подстуживанием до температуры 800—825° С. Применяют и ступенчатую закалку. После закалки проводят отпуск при температуре 130—180° С.

Нитроцементованный слой легко обезуглероживается, что приводит к резкому снижению механических свойств. Поэтому нужно соблюдать особую предосторожность при переносе деталей из печи в закалочный бак; повторная закалка нитроцементованной стали в атмосфере без регулирования углеродного потенциала не рекомендуется.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя должна состоять из мелкоигольчатого мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25—30% остаточного аустенита. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска *HRC* 58—64 (*HV* 570—690). Высокое содержание остаточного аустенита обеспечивает хорошие приработочные свойства, например у нешлифуемых автомобильных шестерен, и их бесшумность в работе. Максимальные показатели прочности достигаются только при оптимальном для данной стали содержании углерода и азота (рис. 55) на поверхности нитроцементованного слоя. Для стали 25ХГТ при глубине слоя 0,5—0,75 мм оптимальная сумма N и C — 1,05—1,25%, для стали 25ХГМ — 1,3—1,65% и для стали 40Х — 1,0—1,25%. Во избежание пересыщения слоя азотом и углеродом добавка к эндотермическому газу аммиака и природного газа при нитроцементации должна быть возможно меньшей (см. табл. 181). Азота в слое должно быть не меньше того количества, которое устраняет вредные последствия внутреннего окисления (~0,1—0,15%). При высоком содержании азота (более 0,4—0,5%) на поверхности образуется «темная составляющая». Оба дефекта микроструктуры понижают предел выносливости при изгибе и контактную прочность. При минимальной концентрации углерода в нитроцементованном слое в микроструктуре появляется троостит. При высоком содержании углерода образуются

карбонитриды, располагающиеся преимущественно по границам зерен в виде сплошной или разорванной сетки.

Наиболее легко карбонитриды образуются в стали, легированной титаном, ванадием и хромом.

Переход углерода и легирующих элементов в карбонитриды понижает устойчивость аустенита, что также ведет к появлению в слое

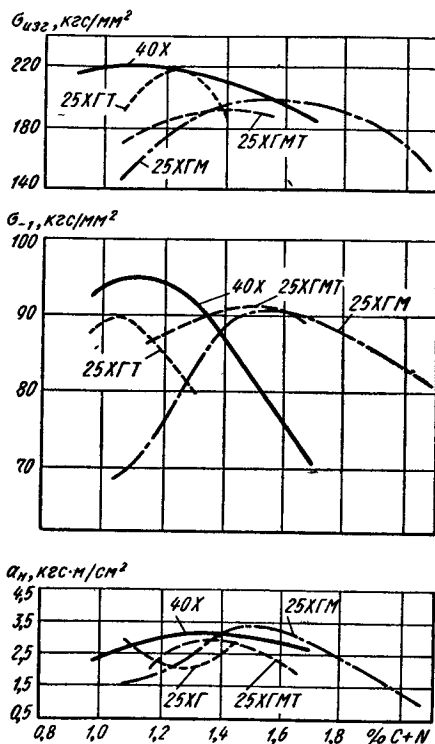


Рис. 55. Механические свойства сталей 40Х, 25ХГТ, 25ХГМ и 25ХГМТ в зависимости от суммарного содержания углерода и азота в нитроцементированном слое

троостита. Образование сетки карбонитридов и троостита снижает предел выносливости, пластичность и вязкость. Оптимальная концентрация углерода в сумме $C + N$ на поверхности нитроцементированного слоя стали 25ХГТ — 0,65—0,9%, а для стали 25ХГМ — 0,75—1,2%.

Высокотемпературная нитроцементация имеет ряд преимуществ по сравнению с газовой: процесс происходит при более низкой температуре (850—870° С вместо 930—960° С); глубина слоя меньше; меньше деформации и коробления изделий; выше сопротивление износу и коррозии.

Нитроцементация по сравнению с жидкостным цианированием (табл. 182), в свою очередь, имеет ряд преимуществ: не нужно применять ядовитые соли, можно регулировать содержание углерода в слое,

182. Состав ванн и режимы высокотемпературного цианирования конструкционной стали

Состав ванны	Температура, °C	Продолжительность процесса, ч	Глубина слоя, мм	Примечание
50% NaCN, 50% NaCl (20—25% NaCN, 25—50% NaCl, 25—50% Na ₂ CO ₃)	840	0,5	0,15—0,2	После цианирования непосредственно из ванны производят закалку, а затем дают отпуск при 180—200° C. Содержание азота в цианированном слое 0,8—1,2% и углерода 0,6—0,7%. Твердость слоя HRC 59—62
	840	1,0	0,2—0,25	
	870	0,5	0,2—0,25	
	870	1,0	0,25—0,35	
10% NaCN, 40% NaCl, 50% BaCl ₂ (8—12% NaCN, 30—55% NaCl, < 10% Na ₂ CO ₃ , < 15% BaCl ₂)**	840	1,0—1,5	0,25—0,3	Детали после цианирования охлаждают на воздухе, а затем закаливают с нагревом в соляной ванне или печи и подвергают отпуску при 180—200° C. Содержание азота в слое 0,2—0,3% и углерода 0,8—1,2%. Твердость на поверхности HRC 58—64
	900	1,0	0,5—0,5	
	900	2,0	0,7—0,8	
	900	4,0	1,0—1,2	
8% NaCN, 10% NaCl, 82% BaCl ₂ (3—8% NaCN, ≥ 30% BaCl ₂ , ≥ 30% NaCl, ≥ 40% BaCO ₃)**	900	0,5	0,2—0,25	То же
	900	1,5	0,5—0,8	
	950	2,0	0,8—1,1	
	950	3,0	1,0—1,2	
	950	5,5	1,4—1,6	

* В скобках дан рабочий состав ванн

** В процессе эксплуатации активность ванн снижается. Поэтому ванны периодически освежают добавлением цианистого натрия (90—95% NaCN) Освежение высокотемпературных ванн производят цианистым натрием и хлористым барием (1 : 4).

обрабатывать детали средних и крупных размеров, использовать более производительное технологическое оборудование и его механизацию.

Однако при применении нитроцементации вместо цементации (цианирования) для получения высоких механических свойств необходимо учитывать особенности процесса, чтобы избежать формирования дефектных структур в нитроцементованном слое и ухудшения механических свойств.

Высокотемпературное цианирование (азотонауглероживание)

Под высокотемпературным цианированием понимают химико-термическую обработку, заключающуюся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при тем-

пературе, как правило, 800—950° С в расплаве, содержащем цианистые соли (см. табл. 182).

Высокотемпературное цианирование применяют для изделий из низкоуглеродистых и среднеуглеродистых сталей (35, 40, 35X, 40X и т. д.).

Цианирование применяют для повышения поверхностной твердости, износостойкости, предела выносливости при изгибе и контактной выносливости. Структура после цианирования аналогична той, которая образуется при высокотемпературной нитроцементации. С повышением температуры содержание азота в слое понижается, а содержание углерода возрастает, и по своим свойствам слой приближается к цементованному.

После цианирования нередко в упрочненном слое можно наблюдать неблагоприятное распределение остаточных напряжений, что уменьшает предел выносливости. Поэтому целесообразно после термической обработки производить поверхностный наклеп (например, дробеструйный). Дробеструйный наклеп изменяет эпюру напряжений и значительно повышает предел выносливости.

Достоинство высокотемпературного цианирования—небольшая продолжительность процесса (см. табл. 182), малые деформации и коробления сложных деталей и высокое сопротивление износу и коррозии.

Недостатки цианирования — трудность выдерживания постоянного состава ванны, большие потери тепла вследствие излучения поверхности ванны, токсичность и высокая стоимость применяемых солей.

Работа с ядовитыми солями, их транспортировка, хранение, загрузка ванны, нейтрализация солей и т. д. требуют особых мер предосторожности, что стало основной причиной сравнительно небольшого распространения этого процесса в промышленности.

Борирование

Борированием называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагревании в соответствующей среде (табл. 183).

Борирование применяют для повышения износостойкости изделий, в том числе работающих при повышенных температурах или в агрессивных средах. Борированный слой обладает высокой твердостью, износостойкостью (главным образом, абразивной), коррозионной стойкостью (кислотостойкостью)*, окислительной стойкостью (до 800° С) и теплоустойчивостью. Борированию могут быть подвергнуты любые стали.

Борированный слой имеет характерное «иглочатое» строение и состоит из боридов FeB (на поверхности) и Fe₂B. Под слоем боридов располагается переходный слой, состоящий из α-раствора бора в железе. На легированных сталях под слоем сплошных боридов образуется зона α-раствора, боридов железа и легирующих элементов.

Борирование применяют для повышения износостойкости втулок грязевых нефтяных насосов, дисков пяты турбобуры, вытяжных, гибочных и формовочных штампов, деталей пресс-форм и машин для литья под давлением и т. д. Стойкость указанных деталей после борирования возрастает в 2—10 раз.

* За исключением азотной кислоты.

183 Методы борирования стали *

Насыщающая среда (боризатор)	Темпе- ратура, °C	Вре- мя, ч	Глу- бина слоя, мм	Примечание
Борирование в порошкообразных смесях				
Порошки аморфного бора карбида бора или ферробора + 30—40% глинозема + 1—3% NH_4Cl	950— 1050	3—6	0,1—0,3	Изделия помещают в ящики, заполненные боризатором. Применяют борирование порошками в среде водорода и вакууме
Электролизное борирование				
Расплавленная бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)	900— 950	2—6	0,1—0,4	Плотность тока на катоде (деталь) 0,15—0,2 А/см ² (анод — графитовый стержень), напряжение 6—24 В. При введении в буру 50—60% B_2O_3 или 30% Na_2SiO_3 скорость насыщения возрастает. Для повышения жидкотекучести к буре добавляют 10—15% NaCl . Рекомендуется для деталей простой формы
Расплавленная бура + 40—60% борного ангидрида	900— 950	2—4	0,15— 0,35	
Жидкостное борирование				
Расплавленная бура + 30—40% карбида бора (B_4C) или ферробора	950— 1000	3—5	0,15— 0,4	Рекомендуется для деталей сложной формы
Расплавленные соли (50% BaCl_2 + 50% NaCl) + 10% B_4C или 20% ферробора	900— 1000	1—3	0,05— 0,25	
Газовое борирование				
Диборан (B_2H_6), разбавленный водородом (от 1 до 150)	800— 850	2—4	0,05— 0,2	Позволяет проводить процесс при низких температурах (500—550° С). Недостаток — токсичность и взрывоопасность газов
Треххлористый бор, разбавленный водородом (BCl_3 , H_2 = 0,05)	750— 950	3—6	0,05— 0,25	

* Повышение температуры борирования выше 950° С увеличивает хрупкость слоя. При работе борированных деталей в условиях больших удельных нагрузок для упрочнения сердцевины производят непосредственную закалку из ванны для борирования, лучше ступенчатую или изотермическую

После борирования нередко производят закалку и отпуск для упрочнения сердцевины.

Во избежание образования трещин в диффузионном слое рекомендуется изотермическая закалка.

Диффузионное насыщение стали металлами

Диффузионным насыщением металлами называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали металлами для изменения его состава и структуры. Поверхностное насыщение стали металлами, а также таким элементом, как кремний, можно осуществлять при температуре 900—1050° С упаковкой изделия в порошкообразные смеси (обычно ферросплавы и 0,5—5% H_2Cl), погружением в расплавленный металл, если диффундирующий элемент имеет невысокую температуру плавления (например, цинк, алюминий), или насыщением из газовой среды. При газовом методе используют летучие хлористые соединения металлов ($AlCl_3$, $CrCl_2$, $SiCl_4$ и т. д.), образующиеся при действии хлора (или хлористого водорода) на металлы или их сплавы с железом при высоких температурах.

Между хлоридами и железом происходит обменная реакция, в результате которой образуется диффундирующий элемент в атомарном виде, который адсорбируется поверхностью и диффундирует в решетку железа ($MeCl_x + Fe \rightarrow FeCl_x + Me$).

Насыщение поверхности изделия двумя и большим количеством компонентов (например, В и Al, В и Si, Si и V, Cr и V, Cr и Al, Cr и Si, Al и Si и т. д.) позволяет в большой мере изменять свойства поверхностных слоев.

Однако многокомпонентное насыщение не получило еще промышленного применения.

Алитирование (алюминирование)

Алитированием называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали алюминием, как правило, при температуре 700—1100° С в соответствующей среде (табл. 184). Алитированный слой чаще представляет твердый раствор алюминия в α -железе. На поверхности возможно образование интерметаллидных фаз Fe_3Al , $FeAl$, $FeAl_2$ и Fe_2Al_5 . Увеличение содержания в стали углерода и легирующих элементов тормозит диффузию алюминия.

В результате алитирования сталь приобретает высокую окислостойкость (до 850—900° С), так как в процессе нагрева на поверхности алитированных изделий образуется плотная пленка окиси алюминия Al_2O_3 , предохраняющая металл от окисления. Алитированный слой обладает хорошим сопротивлением коррозии в атмосфере и морской воде. Твердость алитированного слоя (на поверхности) до HV 500, износостойкость низкая. При высоком содержании алюминия (более 30%) слой хрупок. Тонкие алитированные слои (0,05—0,07 мм), содержащие до 20% Al, хорошо деформируются в холодном и горячем состоянии. Алитированию подвергают топливники газогенераторных машин, чехлы термопар, детали разливочных ковшей, клапаны и другие детали, работающие при высоких температурах.

Метод алитирования	Насыщающая среда	Температура, °C	Время, ч	Глубина слоя, мм	Примечание
В порошкообразных смесях	а) 49,5% порошка алюминия + 49,5% Al_2O_3 + 1,0% NH_4Cl б) 99% ферроалюминия + 1,0% NH_4Cl в) 48% ферроалюминия + 48% песка + 4% NH_4Cl	950—1050	6—12 ²	0,25—0,6	Алитирование проводят в железных или никромовых ящиках. Упаковка — как для цементации. Смесь употребляют многократно с добавкой 10—15% свежей смеси
В ваннах с расплавленным алюминием	Расплавленный алюминий + 8—12% Fe (во избежание растворения деталей)	720—750	0,25—1,0 ²	0,1—0,3	На поверхности расплава рекомендуется создавать слой флюса (например, 40% $NaCl$, 40% KCl , 10% Na_2AlF_6 , 10% AlF_3) для очистки деталей, лучшего удаления налипшего металла и уменьшения разъедания поверхности деталей ³
Металлизация с последующим отжигом	На поверхности детали напыляют слой алюминия (0,7—1,2 мм), на который наносится обмазка (серебристый графит 50%, огнеупорная глина 20%, кварцевый песок 30%, жидкое стекло 10%) ⁴	900—950	2—4	0,2—0,4	Толщина обмазки 0,8—1,5 мм. Обмазка просушивается при 80—100° C

¹ Существуют и другие методы алитирования (электролизное, в аэрозолях, газовое и т. д.), однако они не нашли применения в промышленности.

² Для снижения содержания алюминия в слое и уменьшения его хрупкости алитированные детали иногда отжигают при 900—1050° C — 4—5 ч. Глубина слоя при этом возрастает на 20—40%.

³ Для устранения налипания расплава применяют обдувку поверхности струей воздуха; встряхивание (вибрацию) деталей в слое флюса; вращение детали в слое флюса.

⁴ Иногда в обмазку добавляют 1—2% NH_4Cl .

Хромирование

Хромированием называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали хромом, как правило, при температуре 900—1400° С в соответствующей среде (табл. 185).

Хромирование обеспечивает повышенную устойчивость против газовой коррозии (окалиностойкость) до температуры 800° С, высокую коррозионную стойкость в таких средах, как пресная вода, морская вода, азотная, уксусная и фосфорная кислоты, и эрозионную стойкость при низкой и высокой температурах. Хромирование сталей, содержащих более 0,3—0,4% С, повышает твердость и износостойкость. Хромировать можно любые стали.

Диффузионный слой, получаемый при хромировании технического железа, состоит из раствора хрома в α -железе. Если при хромировании используют NH_4Cl , на поверхности иногда образуется тонкая пленка нитрида хрома (Cr_2N). Слой, получаемый при хромировании стали, состоит из поверхностной зоны карбидов хрома $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$, $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$. Под карбидным слоем находится переходной слой с высоким содержанием углерода, состоящий из эвтектоида $\alpha + (\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$. Карбидный слой на поверхности образуется в результате диффузии углерода из внутренних слоев к поверхности навстречу хрому. Углерод обладает большей скоростью диффузии, чем хром, поэтому для образования карбидного слоя используется не весь углерод. Карбидный слой обладает высокой твердостью. Твердость слоя, полученного хромированием железа и низкоуглеродистой стали (08, 10, 15), составляет HV 150—300, а хромированием стали — HV 1200—1300.

Для деталей, работающих в агрессивных средах, хромированный слой должен состоять из α -фазы и иметь глубину 0,1—0,15 мм. Для деталей, работающих в условиях сильного износа и коррозии, рекомендуется карбидный слой глубиной 0,025—0,03 мм.

Для повышения механических свойств сердцевины после хромирования допустима термическая обработка — нормализация или улучшение.

Хромирование применяют для деталей паросилового оборудования, пароводяной арматуры, клапанов, вентиляей; патрубков, а также деталей, работающих на износ в агрессивных средах.

Силицирование

Силицированием называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали кремнием (табл. 186), как правило, при температуре 800—1100° С в соответствующей среде.

У силицированного слоя высокая устойчивость против коррозии в морской воде, в кислотах (HNO_3 , H_2SO_4 , HCl и др.) при комнатной и повышенных температурах, повышенная износостойкость (после предварительной проварки в масле при 175—200°), при этом сравнительно низкая твердость (HV 200—250).

Силицированный слой представляет собой твердый раствор кремния в α -железе. При газовом силицировании на поверхности может образоваться слой упорядоченного соединения Fe_3Si (α' -фаза), обладающий высокой твердостью (HV 700—800). Содержание кремния в слое чаще 15—20%. Силицированный слой хрупок и нередко порист. В тех

185. Методы хромирования стали

Насыщающая среда	Температура, °C	Время, ч	Глубина слоя, мм *	Примечание
<i>Хромирование в порошкообразных смесях</i>				
50% феррохрома ** (или хрома) + 48—49% Al_2O_3 + 1—2% NH_4Cl (или NH_4J , или NH_4F , или NH_4Br и др.)	1000—1050	6—12	0,1—0,15 (0,01—0,03)	Детали упаковывают в железные (нихромовые) контейнеры (ящики) в двойными крышками, либо трубы. Для повышения герметичности применяют контейнеры с плавкими затворами
<i>Хромирование в вакууме</i>				
Порошок хрома, образующий при высокой температуре в вакууме паровую фазу	1000—1100	4—12	0,05—0,25 (0,01—0,04)	Вакуум 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. позволяет получить поверхность высокого качества. Недостатки: высокая температура процесса, трудность обработки крупногабаритных изделий
<i>Глубокое хромирование в вакууме</i>				
Феррохром	1400—1450		1,5—8	Чаще хромируют слябы, заготовки труб и проката из низкоуглеродистой стали. Перегрев устраняется в процессе нагрева и пластической деформации при получении готовых листов, труб, прутков
<i>Газовое хромирование</i>				
Через хром (феррохром) пропускают HCl или $HCl + H_2$, Cl_2 . Хромирование идет за счет $CrCl_2$	1000—1050	6—12	0,1—0,20 (0,02—0,05)	Процесс ведут в ретортах, печах с вращающейся ретортой, а также ящиках с двойными крышками или плавкими затворами. Недостаток — взрывоопасность
Галогены хрома $CrCl_2$ или $CrCl_3 + H_2$, или CrF_2 и др. (готовые соли)	1000—1050	6—12	0,1—0,20 (0,02—0,05)	
<i>Хромирование в керамической массе</i>				
Пористый фарфор или пеношамотный кирпич или глина (5—10 мм), поры которых заполнены хлоридами хрома + хром (феррохром)	1050	5—6	0,1—0,12	Непрерывность хромирования обеспечивается проведением процесса в потоке H_2

Продолжение табл. 185

Насыщающая среда	Температура, °C	Время, ч	Глубина слоя, мм *	Примечание
<i>Жидкое хромирование</i>				
Расплавленные соли BaCl_2 , MgCl_2 , CaCl_2 и др., к которым добавляют 10—30% CrCl_2 или феррохром	980	10—15	0,01—0,03	Над зеркалом ванны пропускается H_2
* В скобках дана глубина карбидного слоя. ** Применяют низкоуглеродистый феррохром марок Хр0000, Хр000, Хр00, Хр0, Хр01, Хр1. Смесь может быть повторно использована 5 раз.				

186. Методы силицирования стали

Насыщающая среда	Температура, °C	Время, ч	Глубина слоя, мм	Примечание
<i>Силицирование в порошкообразных смесях</i>				
Ферросилиций 75% + шамот 20% (или Al_2O_3) + NH_4Cl 5%	1100—1200	6—12	0,15—0,8	
<i>Газовое силицирование</i>				
При пропускании Cl (HCl) через реакционное пространство с деталями и ферросилицием Si 75 или Si 90 (или карбидом кремния SiC)	950—1050 (чаще 980)	2—5	0,4—0,8	Проводят в муфельных печах. Количество SiC (или ферросилиция) — 1/10 массы деталей; давление в печи 30—50 мм вод. ст.
Смесь $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ * или $\text{SiCl}_4 + \text{Ar}$ или $\text{SiCl}_4 + \text{N}$	950	2—3	0,4—0,6	Наиболее интенсивно процесс идет в среде $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$
SiH_4 (моносилан) + H_2 или $\text{SiH}_4 + \text{Ar}$	950	2—3	0,4—0,6	Моносилан получают путем диспропорционирования триэтаксисилана $[\text{SiH}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3]$ в присутствии металлического Na
* Водород или другой несущий газ пропускают через сосуд с жидким SiCl_4.				

случаях, когда диффузионный слой должен обладать антифрикционными свойствами, пористость сохраняют, особенно для систем с постоянной смазкой. Если силицирование проводят для повышения коррозионной стойкости, слой должен быть плотным. Пористость можно устранить спеканием. Для этого изделие быстро нагревают до $1200\text{--}1210^\circ\text{C}$, дают короткую выдержку 10—30 с. Спекание происходит с участием жидкой фазы. При диффузии в сталь кремния он оттесняет углерод с поверхности вглубь. Поэтому под силицированным слоем в среднеуглеродистых сталях образуется высокоуглеродистая зона (0,8—1,0% C). Силицирование рекомендуется для различных деталей машин в химической, бумажной и нефтяной промышленности.

Цинкование

Цинкованием называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали цинком, как правило, при температуре $300\text{--}550$ и $700\text{--}1000^\circ\text{C}$ в соответствующей среде. Применяют для повышения коррозионной стойкости в атмосфере, бензине, маслах и горячих газах ($300\text{--}500^\circ\text{C}$), содержащих сероводород. Цинковое покрытие нестойко в кислотах и щелочах.

К основным методам цинкования относятся:

горячее цинкование, когда протравленные и промытые изделия через слой флюса погружают в расплавленный цинк ($440\text{--}480^\circ\text{C}$) и выдерживают в нем 15—25 с; глубина слоя 0,02—0,03 мм;

цинкование в порошке цинка (75—90% Zn); выполняется в ящиках или в печах с вращающейся ретортой при температуре $350\text{--}450^\circ\text{C}$ в течение 1—10 ч, глубина слоя 0,03—0,08 мм;

цинкование в парах цинка производится при $700\text{--}1000^\circ\text{C}$ в печи, через которую пропускается водород; для получения паров цинка в печь вводится цинковая пыль в смеси с 20—40% глинозема; глубина слоя 0,15—0,2 мм и более.

В диффузионном слое на самой поверхности может образоваться η -фаза (твердый раствор железа в цинке), далее слой интерметаллидных фаз FeZn_{13} , FeZn_7 , $\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$ и, наконец, твердый раствор цинка в железе.

Для повышения коррозионной стойкости различных изделий (листы, трубы, проволока, различная посуда, аппаратура для получения спиртов, холодильников, газовых компрессоров и т. д.) чаще применяют цинкование путем погружения в расплав цинка.

ЧУГУН

Классификация

Чугун — это многокомпонентный, железоуглеродистый сплав с содержанием углерода свыше 2%, претерпевающий эвтектическое превращение. Чугун — наиболее распространенный материал для изготовления отливок благодаря хорошим технологическим свойствам и относительной дешевизне.

Область применения чугуна расширяется вследствие непрерывного повышения его прочностных и технологических свойств, а также

187. Виды чугунных отливок и область их применения

Виды отливок	Назначение отливок и условия их применения
Из обычного серого чугуна	Определяющий фактор — механические свойства: при σ_B до 24 кгс/мм ² отливки изготавливают из простых чугунов, при σ_B более 24 кгс/мм ² применяют модифицирование, легирование и их сочетание
Из высокопрочного чугуна	Как конструкционный материал с высокой прочностью и удовлетворительной пластичностью (иногда вместо стали). Могут обладать и специальными свойствами. Структуру получают путем введения специальных модификаторов (Mg, Zr) в жидкий чугун
Из чугуна со специальными свойствами	При необходимости обеспечить деталям свойства жаростойкости, ростостойкости, жаропрочности, коррозионной стойкости, немагнитности и др.
Из ковкого чугуна	Для изготовления деталей машин, требующих высокой прочности и пластичности. Получение структуры основано на специальном отжиге отливок, имеющих в литом состоянии структуру белого чугуна
Из белого чугуна	Для отливок, не требующих механической обработки и работающих в условиях абразивного износа при сухом трении, и как исходный материал при получении ковкого чугуна
Из отбеленного чугуна	Для отливок, работающих на износ аналогично белому чугуну. Отбеленный слой расположен лишь на рабочей поверхности отливки

188. Примерный состав, свойства и назначение отливок из

Чугун	Примерный химический состав, %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
				Не более			
СЧ 00	3,0—3,5	1,8—2,4	0,6—1,0	0,6	0,15	0,15	0,5
СЧ 12-28	3,3—3,6	2,2—2,5	0,6—1,0	0,4	0,15	0,15	0,5
СЧ 15-32	3,2—3,5	2,0—2,4	0,7—1,1	0,4	0,15	0,15	0,5
СЧ 18-36	3,1—3,4	1,7—2,1	0,8—1,2	0,3	0,15	0,3	0,5
СЧ 21-40	3,0—3,3	1,3—1,7	0,8—1,2	0,3	0,15	0,3	0,5
СЧ 24-44	2,9—3,2	1,2—1,6	0,8—1,2	0,2	0,15	0,3	0,5
СЧ 28-48	2,8—3,1	1,1—1,5	0,8—1,2	0,2	0,12	0,3	0,5
СЧ 32-52	2,7—3,0	1,1—1,5	0,8—1,2	0,2	0,12	0,3	0,5
СЧ 36-56	2,6—2,9	1,1—1,5 1,3—1,8	1,0—1,4 0,8—1,2	0,2	0,12	0,3 0,5	0,5
СЧ 40-60	2,5—2,8	1,1—1,3 1,3—1,8	1,0—1,4 0,8—1,2	0,02	0,02	0,3 0,5	0,5
СЧ 44-64	2,5—2,7	2,5—2,9	0,2—0,4	0,02	0,02	0,3 0,3	0,5

* Нормы по $\sigma_{сж}$ в ГОСТ не установлены эти нормы приблизительны.

серого чугуна с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412—70)

Характеристика механических свойств *					Примечание
σ_B , кгс/мм ²	σ_H , кгс/мм ²	f 600/300, мм	$\sigma_{сж}$, кгс/мм ²	HB	
—	—	—	—	—	Неответственное литье. Требования к механическим свойствам не обусловлены
12	28	6/2	50	143—229	Малоответственное литье с толщиной стенок до 15 мм, неответственное литье с массивными стенками
15	32	8/2,5	56	163—229	Малоответственное литье с толщиной стенок 10—30 мм. Невысокие требования к износостойкости
18	36	8/2,5	70	170—229	Ответственное литье с толщиной стенок 10—20 мм
21	40	9/3	75	170—241	Ответственное литье с толщиной стенок 10—30 мм; менее ответственное литье при большей толщине стенок
24	44	9/3	85	170—241	Ответственное литье с толщиной стенок 20—40 мм
28	48	9/3	100	170—241	Ответственное сложное литье с толщиной стенок 20—60 мм
32	52	9/3	110	187—255	Ответственное высоконагруженное литье с толщиной стенок 20—100 мм
36	56	9/3	120	197—269	Наиболее ответственное тяжело нагруженное литье с массивными стенками
40	60	10/3,5	130	207—269	
44	64	10/3,5	140	229—289	

189. Рекомендуемые предел прочности и твердость некоторых марок серого чугуна при различной толщине стенки отливок

Чугун	Предел прочности при растяжении и изгибе (кгс/мм ²) и твердость <i>HB</i> при толщине стенок отливок, мм								
	10	20	30	40	50	60	70	80	100
СЧ 15-32	$\frac{22-52}{207-250}$	$\frac{19-46}{190-217}$	$\frac{15-32}{163-229}$	$\frac{14-32}{146-190}$	$\frac{12-28}{-}$	$\frac{11-26}{130-180}$	$\frac{10-23}{120-170}$	$\frac{9-22}{110-160}$	$\frac{7-20}{-}$
СЧ 18-36	$\frac{26-55}{207-248}$	$\frac{23-49}{194-228}$	$\frac{18-36}{191-212}$	$\frac{16-35}{183-188}$	$\frac{14-35}{-}$	$\frac{13-28}{156-183}$	$\frac{12-26}{-}$	$\frac{11-24}{-}$	$\frac{9-22}{-}$
СЧ 21-40	$\frac{28-59}{255}$	$\frac{25-32}{234}$	$\frac{21-40}{207-235}$	$\frac{19-39}{197-212}$	$\frac{17-35}{-}$	$\frac{16-33}{176-207}$	$\frac{15-30}{-}$	$\frac{13-28}{-}$	$\frac{11-24}{-}$
СЧ 24-44	$\frac{32-61}{269}$	$\frac{28-55}{248}$	$\frac{24-44}{241}$	$\frac{22-44}{197-228}$	$\frac{20-40}{-}$	$\frac{19-37}{-}$	$\frac{18-34}{-}$	$\frac{17-32}{-}$	$\frac{15-30}{-}$
СЧ 28-48	×	$\frac{32-58}{269}$	$\frac{28-48}{269}$	$\frac{27-48}{248}$	$\frac{24-44}{-}$	$\frac{23-41}{-}$	$\frac{21-39}{-}$	$\frac{20-37}{-}$	$\frac{18-33}{-}$
СЧ 32-52	×	$\frac{34-60}{-}$	$\frac{32-52}{-}$	$\frac{30-52}{-}$	$\frac{28-48}{-}$	$\frac{26-46}{-}$	$\frac{24-43}{-}$	$\frac{24-41}{-}$	$\frac{20-38}{-}$
СЧ 36-56	×	×	$\frac{36-56}{-}$	$\frac{32-54}{269}$	$\frac{29-50}{-}$	$\frac{28-47}{-}$	$\frac{26-44}{-}$	$\frac{24-42}{-}$	$\frac{20-38}{-}$

Примечания: 1. «X» означает, что чугун отбелен. 2. Цифры в графах механических характеристик означают: над чертой первое число — σ_B , кгс/мм², второе число — σ_H , кгс/мм²; под чертой — *HB*.

разработки новых марок со специальными физическими и химическими свойствами.

Обычно чугуны подразделяют на белые и серые.

Белые чугуны характеризуются наличием углерода преимущественно в связанной форме в виде цементита (Fe_3C), серые чугуны — наличием углерода преимущественно в виде графитовых включений различного размера и формы.

Белые чугуны отличаются высокой твердостью, хрупкостью и очень плохо обрабатываются резанием.

У серых чугунов хорошие технологические и прочностные свойства, и они чаще всего применяются как конструкционный материал. К серым чугунам относят также модифицированные и высокопрочные чугуны. Серые чугуны по химическому составу разделяют на обычные и легированные.

Виды чугунных отливок и области их применения приведены в табл. 187.

Свойства чугуна определяются структурой основной металлической массы, формой, количеством и расположением графитовых включений. Классификация структур чугунных отливок перлитно-ферритного класса по перлиту, графиту и фосфидной эвтектике регламентирована ГОСТ 3443—57.

Механические свойства

Механические свойства различных марок чугуна с пластинчатым графитом, их состав и назначение приведены в табл. 188.

С увеличением толщины (сечения) отливок их прочность снижается. Показатели прочностных свойств при различных сечениях приведены в табл. 189.

Химический состав отливок из серого чугуна машиностроительного производства, получаемых в металлических формах, приведен в табл. 190.

Марки высокопрочных чугунов, их механические характеристики и химический состав приведены в табл. 191 и 192.

Марки отливок из ковкого чугуна, их механические характеристики и химический состав приведены в табл. 193.

Жаростойкость и жаропрочность

Чугунные отливки, работающие при повышенных температурах, особенно при повторно-переменном их воздействии, подвержены окислению, росту, у них могут ухудшаться физико-механические свойства.

Если образующаяся при этом окалина представляет собой плотную пассивирующую пленку, не подвергающуюся растрескиванию, то последняя изолирует металл от газовой среды и предохраняет его от дальнейшей коррозии. Такая пленка, обеспечивающая жаростойкость чугуна, образуется при его легировании хромом, кремнием, алюминием.

В условиях высоких температур кроме обычной коррозии (окисления) наблюдается еще рост чугуна — необратимое увеличение объема, возрастающее с повышением температуры и продолжительности ее воздействия.

190. Примерный химический состав (%) чугуновых отливок для машиностроения, получаемых в металлических формах

Чугун	Толщина стенки отливки, мм	C	Si	Mn	S	P
					Не более	
СЧ 12-28	8—50 50—100	3,2—3,6 3,2—3,6	2,5—3,0 2,2—2,5	0,3—0,6 0,3—0,6	0,1 0,12	0,5 0,5
СЧ 15-32	8—50 50—100	3,2—3,6 3,2—3,6	2,4—2,8 2,0—2,4	0,3—0,6 0,3—0,6	0,1 0,12	0,4 0,3
СЧ 18-36	12—40 40—100	3,2—3,5 3,2—3,5	2,2—2,5 3,2—3,5	0,5—0,8 0,5—0,8	0,1 0,1	0,3 0,3
СЧ 21-40	15—40 40—100	3,1—3,4 3,1—3,4	2,0—2,1 1,7—2,1	0,6—0,9 0,6—0,9	0,1 0,1	0,3 0,3
СЧ 24-44	15—50 50—100	3,0—3,3 2,0—3,3	2,0—2,1 1,6—1,9	0,7—1,0 0,7—1,0	0,1 0,1	0,2 0,2
Примечание. Толщина стенки отливки (из числа непосредственно соприкасающихся с кокилем) принимается минимальной с учетом припуска на механическую обработку.						

191. Характеристики механических свойств отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ГОСТ 7293—70)

Чугун	σ_B , кгс/мм ²	σ_T , кгс/мм ²	δ_5 , %	a_H , кгс·м/см ²	HB
	Не менее				
ВЧ 38-17	38	24	17	6,0	140—170
ВЧ 42-12	42	28	12	4,0	140—200
ВЧ 45-5	45	33	5	3,0	160—220
ВЧ 50-2	50	38	2	2,0	180—260
ВЧ 60-2	60	40	2	2,0	200—280
ВЧ 70-3	70	40	3	3,0	229—275
ВЧ 80-3	80	50	3	2,0	220—300
ВЧ 100-4	100	70	4	3,0	302—369
ВЧ 120-4	120	90	4	3,0	302—369

192. Химический состав (%) отливок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (до модифицирования)

Чугун	C				Si	
	Толщина стенки отливки, мм					
	до 30	более 30 до 50	более 50 до 100	более 100	до 10	более 10 до 30
ВЧ 38-17	3,3—3,6	3,3—3,6	3,0—3,3	2,7—3,2	2,4—2,7	1,9—2,2
ВЧ 42-12	3,3—3,6	3,3—3,6	3,0—3,3	2,7—3,2	2,4—2,7	1,9—2,2
ВЧ 45-5	3,3—3,6	3,3—3,6	3,0—3,3	2,7—3,2	2,4—2,7	1,9—2,2
ВЧ 50-2	3,3—3,6	3,3—3,6	3,0—3,3	2,7—3,2	2,4—2,7	1,9—2,2
ВЧ 60-2	3,3—3,6	3,3—3,6	3,0—3,3	2,7—3,2	2,4—2,8	2,4—2,8
ВЧ 70-3	—	—	3,2—3,6	—	—	—
ВЧ 80-3	3,2—3,6	3,2—3,6	—	—	2,6—2,9	2,6—2,8
ВЧ 100-4	3,2—3,6	—	—	—	3,4—3,8	3,4—3,8
ВЧ 120-4	3,2—3,6	—	—	—	3,4—3,8	3,4—3,8

Чугун	Si			Mn	P	S	Легиру- ющие элементы
	Толщина стенки отливки, мм				Не более		
	более 30 до 50	более 50 до 100	более 100				
ВЧ 38-17	1,6—1,9	1,3—1,7	0,8—1,5	0,5—0,6	0,1	0,1	—
ВЧ 42-12	1,6—1,9	1,3—1,7	0,5—1,5	0,5—0,6	0,1	0,1	—
ВЧ 45-5	1,6—1,9	1,3—1,7	0,5—1,5	0,5—0,6	0,1	0,1	—
ВЧ 50-2	1,6—1,9	1,3—1,7	0,8—1,5	0,5—0,8	0,15	0,14	—
ВЧ 60-2	2,2—2,6	2,2—2,6	—	0,4—0,7	0,12	0,12	—
ВЧ 70-3	—	2,6—2,9	—	0,6—0,7	0,1	0,12	Cr 0,1
ВЧ 80-3	2,6—2,9	—	—	0,6—0,9	До 0,1	0,01	Cr 0,1, Cu 0,25—0,4
ВЧ 100-4	—	—	—	0,6—0,9	До 0,1	0,01	Cr 0,1
ВЧ 120-4	—	—	—	0,6—0,9	До 0,1	0,01	Cr 0,1, Ni 0,2—0,8

Чугун	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	HB не более	Примерный химический состав, %					
	не менее			C	Si	Mn	P	S	Cr
							Не более		
КЧ 30-6	30	6	163	2,7—3,1	0,7—1,1	0,3—0,6	0,18	0,12	0,08
КЧ 33-8	33	8	163	2,5—2,9	0,8—1,2	0,3—0,6			0,08
КЧ 35-10	35	10	163	2,4—2,8	0,9—1,4	0,3—0,5			0,06
КЧ 37-12	37	12	163	2,2—2,5	1,0—1,5	0,3—0,5			0,06
КЧ 45-6	45	6*	241	2,3—3,1	0,7—1,5	0,3—1,0	0,18	0,12	0,2
КЧ 50-4	50	4	241						
КЧ 56-4	56	4	269						
КЧ 60-3	60	3	269						
КЧ 63-2	63	2	269						

* С согласия заказчика допускается до 3%.

Чугун	Марка	Химический состав, %							механических свойств при 20° С		
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	σ_B , кгс/мм ²	σ_H , кгс/мм ²	HB
Хромистый	ЖЧХ-0,8	3,0—3,9	1,5—2,5	≤1,0	≤0,3	≤0,12	0,5—1,0	—	18	36	207—286
	ЖЧХ-1,5	3,0—3,9	1,7—2,7	≤1,0	≤0,3	0,12	1,1—1,9	—	15	32	207—286
	ЖЧХ-2,5	3,0—3,9	2,8—3,8	≤1,0	≤0,3	≤0,12	2,0—2,7	—	—	32	228—364
	ЖЧХ-30	2,4—3,0	1,0—2,0	≤0,7	≤0,1	≤0,08	28—32	—	30	50	370—550
Кремнистый с пластинчатым графитом	ЖЧС-5,5	2,4—3,2	5,0—6,0	0,5—1,2	≤0,3	≤0,12	0,5—0,9	—	10	24	140—255
Кремнистый с шаровидным графитом	ЖЧСШ-5,5	2,5—3,5	5,0—6,0	≤0,7	≤0,2	≤0,03	≤0,2	—	22	—	228—321
Алюминиевый с пластинчатым графитом	ЖЧЮ-22	1,6—2,5	1,0—2,0	0,4—0,8	≤0,2	≤0,08	—	19—25	9	22	140—286
Алюминиевый с шаровидным графитом	ЖЧЮШ-22	1,6—2,5	1,0—2,0	0,4—0,8	≤0,2	≤0,05	—	19—25	25	35	241—375

Рост чугуна — результат окисления железа и его примесей по всему объему отливки вследствие проникновения газов в толщу чугуна. Так как окислы располагаются главным образом по границам графитовых включений, то на ростоустойчивость чугуна в значительной степени влияет характер выделений графита.

Уменьшение количества и размеров графитовых включений повышает сопротивление чугуна росту.

Химический состав, механические свойства и примерное назначение жаростойкого чугуна разных марок см. ГОСТ 7769—63.

В табл. 194 и 195 приведены некоторые данные, характеризующие жаростойкие чугуны.

195. Показатели некоторых свойств жаростойкого чугуна

Чугун	Предельная температура эксплуатации в воздушной среде (не более), °C	σ_b , кгс/мм ² (кратковременные испытания)		Показатель окалинообразования, г (м ² ч)		Показатель роста, %	
		при 500° C	при 900° C	при 500° C	при 900° C	при 500° C	при 900° C
ЖЧХ-0,8	550	20	3	0,2	15,0	0,05	1,5
ЖЧХ-1,5	600	20	3	0,2	15,0		1,0
ЖЧХ-2,5	650	17	3	0,15	15,0		0,75
ЖЧХ-30	1000	40	15	—	0,2	—	—
ЖЧС-5,5	800	12	2	—	10,0		0,5
ЖЧСЦ-5,5	900	45	4	—	0,2		0,2
ЖЧЮ-22	1000	10	4	—	0,1 при 1100° C		0,05 при 1100° C
ЖЧЮШ-22	1100	25	14	—	0,05 при 1100° C		—

Жаропрочность чугуна — свойство, аналогичное жаростойкости, является функцией химического состава, структуры металлической массы, формы и размеров графитовых включений.

Химический состав, прочностные свойства и назначение жаропрочного чугуна, предназначенного для эксплуатации при температурах до 600° C, см. ГОСТ 11849—66.

Сведения об отливках из жаропрочного чугуна приведены в табл. 196, 197, 198.

Наименование	Чугун	Химический состав, %							Характеристика механических свойств при 20° С		
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	σ_B , кгс/мм²	δ , %	HB
					Не более						
					Не менее						
Жаропрочный	ЧН19Х3Ш	2,5—3,0	1,8—2,5	1,0—1,6	0,05	0,03	2,5—3,5	17—20	40	5	120—255
Высоколегированный	ЧН11Г7Х2Ш	2,5—3,0	1,8—2,5	5,0—8,0	0,05	0,03	1,0—2,5	10—12	40	4	120—255

Примечание. В обозначениях марок чугуна буква Ч означает чугун, остальные буквы — легирующие элементы; Ш указывает, что графит имеет шаровидную форму. Цифра за буквой указывает содержание соответствующего легирующего элемента.

197. Примерные области применения жаропрочных чугунов

Чугун	Назначение и условия эксплуатации	Характерные детали
ЧН19Х3Ш ЧН11Г7Х2Ш	Для деталей, работающих под нагрузкой при повышенных температурах (до 600° С), а также для деталей с высокой коррозионной и эрозийной стойкостью в щелочах, слабых растворах кислот, серных кислотах любой концентрации до 50° С, в морской воде, в среде перегретого водяного пара	Выпускные коллекторы, клапанные направляющие, корпуса турбонагревателей и газовых турбин, головки поршней, корпуса насосов, вентили и немагнитные детали, вставки гильз цилиндров, седла и направляющие втулки клапанов, выпускные коллекторы двигателей внутреннего сгорания, клиновые задвижки в нефтеперерабатывающей промышленности, химической промышленности, арматуростроении

198. Характеристики свойств жаропрочного чугуна при 600° С

Чугун	Длительная прочность		Скорость ползучести, %/ч (не более) при напряжении 4 кгс/мм ²	Кратковременные испытания				E, кгс/мм ²
	Напряжение, кгс/мм ²	Время до разрушения образца, ч		σ _в , кгс/мм ²	σ _т , кгс/мм ²	δ, %	α _н , кгс·м/см ²	
				не менее				
ЧН19Х3Ш	12	1000	1,0·10 ⁻⁴	25	18	2	2,0	11 000
ЧН11Г7Х2Ш	12	1000	1,8·10 ⁻⁴	30	18	10	2,0	12 000

Химические свойства

Антикоррозионные свойства. Коррозионная стойкость чугуна определяется его химическим составом и структурой.

Легирование, модифицирование, сфероидизация графитовых включений способствуют повышению коррозионной стойкости чугуна. Коррозия характеризуется потерей массы в г/м²·ч или уменьшением толщины в мм/год. Зависимость между этими показателями коррозии следующая: 1 г/м²·ч = 1,22 мм/год.

Химическая стойкость определяется по десятибалльной системе (табл. 199).

Данные о скорости коррозии чугунов в различных средах приведены в табл. 200.

Состав и свойства коррозионностойких чугунов см. ГОСТ 11849—66. Данные о коррозионностойких чугунах приведены в табл. 201, 202.

199. Десятибалльная система
для оценки химической стойкости чугуна

Балл	0	1	2	3	4
Характеристика	Совершенно стойкие	Весьма стойкие		Стойкие	
Коррозия, мм/год	< 0,001	0,001—0,005	0,005—0,01	0,01—0,05	0,05—0,1
Балл	5	6	7	8	9
Характеристика	Пониженно-стойкие		Малостойкие		Нестойкие
Коррозия, мм/год	0,1—0,5	0,5—1,0	5,0—10,0		10,0

200. Скорость коррозии чугуна в некоторых средах

Чугун	Среда	Показатели коррозии	
		г/м ² ·ч	мм/год
Серый Кремнистый Хромоникелевый	Вода водопроводная ($t = 20^{\circ}\text{C}$)	0,3 0,005 0,024	0,34 0,005 0,026
Серый Кремнистый Хромоникелевый	Морская вода	0,06 < 0,1 0,01	0,07 0,1 0,012
Серый Кремнистый Хромоникелевый	Азотная кислота (5=67%) То же Азотная кислота (1%, $t = 20^{\circ}\text{C}$)	Повышенные < 0,01 0,01 2,91 3,41	
Серый Никелевый	Соляная кислота концентрированная	23,0 8,0	28,0 9,6
Серый Никелевый	Серная кислота концентрированная	0,5 0,05	0,6 0,06
Серый Никелевый	Керосин	0,01 0,01	0,012 0,012

Чугун		Марка	Химический состав, %										Характеристика механических свойств при 20° С			
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	σ_B , кгс/мм ²	σ_H , кгс/мм ²	δ , %	HB
						не более										
Коррозионностойкий	Низколегированный	ЧНХТ	2,7— 3,4	1,4— 2,0	1,0— 1,6	0,5	0,15	0,2— 0,4	0,3— 0,7	—	—	0,05— 0,12	24	44	—	201— 286
		ЧН1ХМД	2,8— 3,2	1,6— 2,0	0,9— 1,2	0,15	0,12	0,2— 0,6	0,7— 1,5	0,3— 0,6	0,2— 0,5	—	30	—	—	201— 286
		ЧН1МШ	3,2— 3,8	2,4— 2,8	0,8— 1,2	0,1	0,03	0,1 не более	0,8— 1,4	0,3— 0,6	—	—	50	—	1,5	183— 286
	Высоколегированный	ЧН15Д7Х2	2,5— 3,0	1,5— 3,0	0,5— 1,2	0,3	0,1	1,5— 3,0	14—17	—	6,0— 8,0	—	18	36	1,5	120— 197
		ЧН15Д3ХШ	2,5— 3,0	2,0— 2,5	1,3— 1,8	0,1	0,03	0,2— 0,6	14—17	—	3,0— 3,5	—	35	—	4	120— 255

П р и м е ч а н и е В марках чугуна буква Ч означает чугун, остальные буквы — легирующие элементы Ш указывает, что графит имеет шаровидную форму Цифры за каждой буквой указывают содержание легирующего элемента.

202. Примерные области применения коррозионностойкого чугуна

Чугун	Назначения и условия эксплуатации	Характерные детали
ЧНХТ	Для деталей поршневых двигателей внутреннего сгорания, газомоторных компрессоров и деталей машин целлюлозно-бумажного производства, работающих в условиях повышенного износа, газовых сред и водных растворов	Маслоты для поршневых компрессионных и маслосъемных колец, седла и направляющие втулки клапанов дизелей и газомоторных компрессоров. Детали сглаживающих прессов и гарнитура размольных мельниц бумагоделательных машин
ЧН1ХМД	Для деталей поршневых машин, двигателей внутреннего сгорания и компрессоров, работающих в условиях повышенного износа и газовой коррозии (продукты сгорания топлива, технический кислород и т. д.)	Блоки и головки цилиндров, выхлопные патрубки двигателей внутреннего сгорания, паровых машин и турбин. Поршни и гильзы цилиндров паровых машин и крупных тепловозных и судовых дизелей, детали кислородных и газовых компрессоров
ЧН1МШ	Для деталей, указанных для предыдущих марок, но с повышенными механическими свойствами и термостойкостью при температуре эксплуатации до 500° С	Крышки и днища цилиндров дизелей, головки поршней, маслоты для поршневых колец
ЧН15Д7Х2 ЧН15Д3ХШ	Для деталей с высокой коррозионной и эрозивной стойкостью в щелочах, слабых растворах кислот, серных кислотах любой концентрации до 50° С, в морской воде, в среде перегретых водяных паров (чугуны имеют высокий коэффициент термического расширения, немагнитны при низком содержании хрома)	Вставки гильз цилиндров, головки поршней, седла и направляющие втулки клапанов, выхлопные коллекторы двигателей внутреннего сгорания. Насосы, вентили, клиновые задвижки в нефтеперерабатывающей и химической промышленности, а также арматуростроении. Немагнитные литые детали

Физические свойства

Антифрикционные свойства. Хорошая износостойкость серого чугуна способствует его использованию в качестве заменителя цветных металлов в узлах трения.

Основными условиями применения антифрикционного чугуна в узлах трения являются качественная смазка, увеличение зазоров по сравнению с цветными сплавами на 15—30%.

Применение антифрикционного чугуна не рекомендуется при ударных нагрузках и недопустимости искрения.

Составы антифрикционных чугунов и их свойства см. ГОСТ 1585—70.

В табл. 203 и 204 оговорены условия применения и состав антифрикционного чугуна.

Плотность. Из-за наличия в чугуне пор его плотность (см. табл. 205) может быть и несколько меньше, а также может колебаться в пределах 10%.

203. Назначение и условия применения антифрикционных чугунов

Чугун	Условия применения			Основная характеристика и назначение
	Удельное давление P , кгс/см ²	Окружная скорость v , м/с (не более)	Pv , кгс·м/см ² ·с (не более)	
АЧС-1	25,0 90,0	5,0 0,2	100,0 18,0	Перлитный серый чугун с пластинчатым графитом, легированный хромом и медью. Предназначен для работы в паре с термически обработанным (закаленным или нормализованным) валом
АЧС-2	90,0 1,0	0,2 3,0	18,0 3,0	Перлитный серый чугун с пластинчатым графитом, легированный хромом, никелем, титаном и медью. Предназначен для работы в паре с термически обработанным (закаленным или нормализованным) валом
АЧС-3	60,0	0,75	45,0	Перлитно ферритный серый чугун с пластинчатым графитом, легированный титаном и медью. Предназначен для работы в паре с «сырым» (в состоянии поставки) и термически обработанным валом
АЧС-4	До 150	5,0	400	Перлитный серый чугун с пластинчатым графитом, легированный сурьмой. Предназначен для работы в паре с термически обработанным (закаленным или нормализованным) валом
АЧС-5	200,0 300,0	1,0 0,42	200,0 125,0	Аустенитный серый чугун с пластинчатым графитом, легированный марганцем и алюминием. Предназначен для работы в особо нагруженных узлах трения в паре с термически обработанным (закаленным или нормализованным) валом
АЧС-6	До 90	4,0	90,0	Перлитный пористый серый чугун с пластинчатым графитом, легированный свинцом и фосфором. Предназначен для работы в узлах трения с температурой до 300° С в паре с валом без термической обработки
АЧВ-1	10,0 200,0	8,0 1,0	80,0 200,0	Перлитный высокопрочный чугун с шаровидным графитом, предназначенный для работы в узлах трения с повышенными окружными скоростями в паре с термически обработанным (закаленным или нормализованным) валом
АЧВ-2	5,0 120,0	5,0 1,0	25,0 120,0	Перлитно-ферритный высокопрочный чугун с шаровидным графитом, предназначенный для работы в узлах трения с повышенными окружными скоростями в паре с «сырым» (в состоянии поставки) валом

Продолжение табл. 203

Чугун	Условия применения			Основная характеристика и назначение
	Удельное давление P , кгс/см ²	Окружная скорость v , м/с (не более)	pv , кгс м/см ² с (не более)	
АЧК-1	200,0	2,0	200,0	Перлитный ковкий чугун с хлопьевидным графитом, легированный медью, предназначенный для работы в паре с термически обработанным валом
АЧК-2	5,0 120,0	5,0 1,0	25,0 120,0	Ферритно-перлитный и перлитно-ферритный ковкий чугун с хлопьевидным графитом, предназначенный для работы в паре с сырым валом
Примечания: 1 В таблице приняты следующие обозначения чугуна: АЧ — антифрикционный, С — серый, В — высокопрочный, К — ковкий 2 Приводимые для некоторых марок чугуна предельные значения для p и v указывают допустимые сочетания значений каждого из этих показателей				

Плотность жидкого чугуна при температуре его плавления равна $7,0 + 0,1$ г/см³ и понижается при увеличении содержания примесей и повышении температуры.

В обычных серых чугунах при повышении прочности обычно наблюдается повышение плотности:

σ_B , кгс/мм ²	14	17	20	23
d , г/см ²	6,8—7,1	7,0—7,2	7,2—7,3	7,25—7,4
σ_B , кгс/мм ²	28	32		38
d , г/см ²	7,3—7,4	7,3—7,4		7,4—7,6

Плотность (г/см³) некоторых типов специальных легированных чугунов следующая:

ЖЧС-5,5	6,9—7,2
ЖЧЮ-22; ЖЧЮШ-22 (чугаль)	5,6—6,0
ЖЧХ-30	7,3—7,6
ЧН15Д7Х2 (ниррезист)	7,4—7,6

Основные физические свойства чугунов приведены в табл. 205.

Коэффициент теплового расширения чугуна зависит главным образом от его структуры. С повышением температуры этот коэффициент увеличивается. При охлаждении в процессе перехода аустенита в перлит происходит увеличение объема чугуна. При 100%-ном содержании перлита объем увеличивается до $0,0004$ см³/г. При выделении графита объем увеличивается на $0,0025$ см³/г, или на 2% на каждый процент выделившегося графита.

Приближенно можно принять, что при затвердевании белого чугуна происходит уменьшение объема на 1,8% ($\beta_3 = -0,018$), а при

Чугун	C	Si	Mn	P	S (не более)	Cr	Ni	Ti	Cu	Sb	Pb	Al	Mg
АЧС-1	3,2—3,6	1,3—2,0	0,6—1,2	0,15—0,3	0,12	0,2—0,4	—	—	1,5—2,0	—	—	—	—
АЧС-2	3,2—3,8	1,4—2,2	0,4—0,7	0,15—0,4	0,12	0,2—0,4	0,2—0,4	0,03—0,1	0,3—0,5	—	—	—	—
АЧС-3	3,2—3,8	1,7—2,6	0,4—0,7	0,15—0,4	0,12	≤0,3	≤0,3	0,03—0,1	—	—	—	—	—
АЧС-4	3,0—3,5	1,4—2,2	0,6—0,8	≤0,3	0,12—0,2	—	—	—	—	0,25—0,4	—	—	—
АЧС-5	3,5—6,0	2,5—3,5	7,5—12,5 *	≤0,1	0,05	—	—	—	—	—	—	0,4—0,8	—
АЧС-6	2,2—2,8	3,0—4,0	0,2—0,4	0,5—1,0	0,12	—	—	—	—	—	0,5—1,0	—	—
АЧВ-1	2,8—3,5	1,8—2,7	0,5—1,2	≤0,2	0,03	—	—	—	≤0,7	—	—	—	≥0,03
АЧВ-2	2,8—3,5	2,2—2,7	0,5—0,8	≤0,2	0,03	—	—	—	—	—	—	—	≥0,03
АЧК-1	2,3—3,0	0,5—1,0	0,6—1,2	≤0,2	0,08	—	—	—	—	—	—	—	—
АЧК-2	2,3—3,0	0,8—1,3	0,3—0,6	≤0,15	0,12	—	—	—	1,0—1,5	—	—	—	—

Примечание. Содержание Mn в чугуне АЧС-5 обуславливается толщиной стенки и составляет при толщине стенки: до 10 мм — 7,5—8,5%; 10—20 мм — 8,5—9,5%; 20—30 мм — 9,5—10,5%; 30—40 мм — 10,5—11,5%; 40—60 мм — 11,5—12,5%.

Чугун	Плотность, г/см ³	Коэффициент линейного рас- ширения α при температуре до 100° С	Теплоемкость с, кал/(г·°С)	Коэффициент теплопровод- ности λ , кал/см с·град	Электросо- противление ρ , мкОм·см	Максимальная магнитная проницаемость μ , Гс/Э
Белый	7,4—7,7	$(7-11) \cdot 10^{-6}$	0,13—0,14	0,07—0,1	50—80	200—250
Серый	6,8—7,4	$(10-12) \cdot 10^{-6}$	0,12—0,13	0,12—0,15	45—120	250—600
Ковкий	7,2—7,4	$(10-12) \cdot 10^{-6}$	0,12—0,13	0,12—0,17	30—55	600—1800
Высокопрочный . . .	7,1—7,4	$(10-12) \cdot 10^{-6}$	0,12—0,13	0,08—0,4	50—65	400—1400
Высоколегирован ный	5,5—7,5	$(8-30) \cdot 10^{-6}$	—	0,04—0,09	140—220	1—200

206. Коэффициент вязкости чугуна $\eta \cdot 10^2$, дин·с/см²

Температура, °C	Содержание углерода					
	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
<i>Чугун застывает белым</i>						
1250	—	—	—	—	2,9	2,1
1300	—	—	—	2,8	2,4	1,8
1350	—	2,9	2,6	2,4	2,0	1,6
1400	2,5	2,4	2,3	2,0	1,8	1,5
<i>Чугун застывает серым</i>						
1280	4,3	4,1	4,0	3,9	3,7	3,5
1300	4,2	4,1	4,0	3,8	3,7	3,5
1350	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,4
1400	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4	3,3

кристаллизации серого чугуна объем увеличивается на 0,9% ($\beta_s = +0,009$).

Коэффициент объемного теплового расширения жидкого чугуна изменяется в пределах от 0,0001 до 0,0003 1/°C; $\beta_{ж} = 0,00016$ 1/°C.

Коэффициенты теплового расширения $\alpha_{100} \cdot 10^6$ на 1/град для некоторых типов специальных чугунов следующие.

ЖЧС-5,5	12—14
ЖЧЮ 22	16—20
ЖЧХ-30	9—10
ЧН15Д7Х2	17—19

Теплоемкость чугуна при температурах, превышающих фазовые превращения в твердом состоянии, и до температур плавления может быть принята равной 0,18 кал/г·°C, а выше точки плавления — 0,23 кал/г·°C. Тепловой эффект при затвердевании равен 55 ± 5 кал/г.

Теплопроводность типового чугуна приведена в табл. 205. Теплопроводность жидкого чугуна равна приблизительно 0,04 кал/(см·°C).

Динамическая вязкость при температуре ликвидус составляет для белого чугуна 0,03 дин·с/см² и для серого чугуна 0,04 (дин·с/см²). При повышении температуры начала затвердевания вязкость увеличивается (см. табл. 206).

Поверхностное натяжение жидкого чугуна составляет 900 ± 100 дин/см², увеличивается с повышением температуры и резко изменяется при наличии неметаллических включений.

Характеристики электрических и магнитных свойств типовых чугунов приведены в табл. 207, 208

Остаточная индукция для белого и серого чугуна равна 5000 ± 1000 Гс.

Чугун может применяться как ферромагнитный (магнитно-мягкий) или при изменении состава как парамагнитный (немагнитный) материал.

Материал	$H_c, \text{Э}$	$\mu_{\text{max}}, \text{Гс/Э}$	$B_q, \text{Гс}$	Среднее значение магнитной индукции B , (Гс) при H , А/см				$4J/d_{\text{max}}, \text{Гс}$	$W_h, \text{эрг/см}^3 \text{ за 1 цикл}$
				12,5	25	50	100		
Сталь литая 0,1—0,2% С	1,5—5	800—2400	6 500—10 500	—	14 000	16 000	17 500	20 000	—
Белый чугун	13—16	180—200	5 000—5 500	—	—	—	—	13 000	—
Серый чугун:									
ферритный . . .	2,5—3	600—1500	3 000—5 500	7 500	8 500	9 600	11 200	18 000	7 000—15 000
перлитный . . .	7—13	200—450	4 000—7 000	—	6 000	8 000	10 000	17 500	30 000
Ковкий чугун черно-сердечный									
ферритный . . .	1,5—2,5	1500—2300	5 500—7 000	11 000	12 500	13 500	14 000	18 000	4 500—8 000
перлитный . . .	5—11	300—800	6 000—7 500	10 000	11 500	12 000	12 500	17 500	10 000—25 000
Высокопрочный чугун.									
ферритный . . .	1,5—2,5	1600—2400	3 000—6 000	12 700	14 300	15 800	—	19 000	4 000—7000
перлитный . . .	5—11	300—600	5 000—8 000	8 200	11 800	14 200	—	18 500	9 000—22 000

В качестве магнитно-твердого материала чугун не применяется из-за малой коэрцитивной силы.

Чугун как магнитно-мягкий материал уступает стали, но имеет и ряд преимуществ по сравнению с ней: его магнитные свойства меньше зависят от напряжений, меньше влияние температуры и сотрясений на его магнитные свойства; чугуном отливкам можно легче придать выгодную для магнитных свойств конфигурацию.

Общая характеристика магнитных свойств различных чугунов приведена в табл. 207.

Большой практический интерес представляет применение немагнитных (парамагнитных) чугунов для изготовления таких деталей, как крышки масляных выключателей, концевые коробки трансформаторов, стойки для магнитов и др., когда необходимо свести к минимуму потери мощности.

Основные свойства специальных немагнитных чугунов приведены в табл. 208.

Технологические свойства

Усадку разделяют на линейную и объемную. Линейная усадка

$$y = \frac{L_m - L_o}{L_o} \cdot 100\%,$$

где L_m — размер модели; L_o — размер отливки.

Коэффициенты линейной усадки отливок из различных чугунов приведены в табл. 209.

Коэффициент усадки в значительной степени зависит от процессов графитизации, являющихся функцией химического состава чугуна и температуры.

Для приближенного определения коэффициента линейной усадки чугуна в зависимости от его состава можно применить формулу

$$y = 1,8 + 0,2(C - 2,5 - P) + 0,03Mn - 1,2(Si + 2C_{гр}).$$

Коэффициент объемной усадки чугуна в 3 раза больше коэффициента линейной усадки.

Жидкотекучесть чугуна характеризует заполнение литейной формы и зависит главным образом от химического состава и температуры заливки.

Такие элементы как С, Si, P и Cu повышают жидкотекучесть доэвтектического чугуна, а S и Cr понижают ее. Влияние Mn и Ni на жидкотекучесть незначительно.

Наилучшей жидкотекучестью обладает чугун эвтектического состава, когда химический состав

$$C + \frac{1}{3} Si + \frac{1}{3} P = 4,3\%.$$

С повышением температуры жидкотекучесть чугуна повышается.

Отливки сложной конфигурации и с тонкими стенками требуют повышенной жидкотекучести:

Толщина стенки отливки, мм	До 6	6—15	16—25	Более 25
Требуемая жидкотекучесть, мм	500—700	400—500	300—400	200—300

208. Характеристики основных свойств немагнитных чугунов

Чугуны	Химический состав, %										σ_B , кгс/мм ²	НВ	Электросопротивление ρ , мкОм·см	Максимальная магнитная проницаемость μ , макс.	Гс/Э
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	Al						

Чугуны с пластинчатым графитом

Левые (нереист)	2,5—2,7—3,5	1,5—2,5—2,0—3,2	0,5—1,5—5—10	До 0,1 До 0,07	До 0,3 До 0,07	14—22 10—5	До 2	До 8,5	—	15—30 14—20 220	130—190 140—220	130—170 130—150	1,03—3,0 1,03—2,5		
Левые; ин-Си	2,9—3,8	1,5—3,2	7—12	До 0,07	До 0,07	—	—	До 5	До 0,6	14—17	230—280	130—160	1,1—3,0		
Лев-Си-Ал	2,8—3,7	3,5—4,5	7—16	До 0,07	До 0,07	—	—	1,5—3,5	2—4,5	14—23	150—220	150—200	1,1—3,0		
Лев-Ал-Си	3,0—3,6	4,0—5,0	7—15	До 0,07	До 0,07	—	—	—	1—5	9—20	170—300	160—200	1,1—3,0		
Левые; ин-Си	1,2—2,0	1,3—2,0	0,6—0,8	До 0,03	До 0,4	—	—	—	20—24	11—17	170—200	150—240	1,005—1,005		
Левые; ин-Си	1,2—1,4	До 0,5	До 0,5	До 0,03	До 0,4	—	—	До 3	28—30	9—14	300—350	150—240	1,005—1,008		

Чугуны с шаровидным графитом

Левые (нереист)	До 3	2—3,2	0,5—1,5	—	До 0,2	16—24	До 0,5	До 4	—	32—45	130—180	100—110	1,02—1,1		
Левые; ин-Си	До 3	2—3,2	5—8	—	До 0,2	7—12	—	—	—	30—40	140—200	100—110	1,02—1,1		
Левые; ин-Си	1,6—2,5	1—1,5	0,4—0,6	—	До 0,2	—	—	—	19—25	32—37	300—350	130—140	1,005—1,008		
Левые; ин-Си	1,2—1,4	До 0,5	До 0,5	—	До 0,1	—	—	—	28—30	20	350—450	130—140	1,005—1,008		

Чугуны

209. Линейная усадка

Чугун	Характер отливки	Коэффициент усадки (%) при размерах отливки (мм)			
		До 500	500—1000	1000—2000	более 2000
Серый обычный	Со свободной усадкой С затрудненной усадкой	1,0 0,9	0,9 0,8	0,8 0,7	0,7 0,6
Серый высокопрочный	Со свободной усадкой С затрудненной усадкой	1,3 1,2	1,2 1,1	1,1 0,9	0,9 0,7
Белый	Со свободной усадкой С затрудненной усадкой	1,6 1,5	1,4 1,3	1,3 1,1	1,1 0,9
Примечание. Данные относятся к сырым формам. Если принимают сухие формы, то коэффициент усадки на 10—20% меньше табличного.					

Обрабатываемость чугуна зависит от многих факторов и в первую очередь от химического состава, структуры, физико-механических свойств.

С этой точки зрения положительное влияние на обрабатываемость оказывает увеличение содержания графита, дисперсности и равномерности распределения структурных составляющих.

Легированные элементы, как правило, создают равномерные, дисперсные структурные составляющие, и поэтому при одинаковой твердости обрабатываемость легированных чугунов подчас выше, чем у обычных.

Во всех случаях необходимо учитывать отрицательное влияние литейной корки на обрабатываемость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адашкин А. М., Геллер Ю. А., Кремнев Л. С. Влияние углерода в быстрорежущих сталях. — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1970, № 1, с. 52—56
2. Алексеев М. Ф. Структура и свойства теплоустойчивых конструкционных и нержавеющих сталей М., Оборонгиз, 1962. 216 с.
3. Бабаков А. А., Приданцев М. В. Коррозионно-стойкие стали и сплавы. М., «Металлургия», 1971. 319 с.
4. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. М., «Машиностроение», 1968. 195 с.
5. Борздыка А. М., Цейтлин В. З. Термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов М., «Машиностроение», 1964. 248 с.
6. Бримен В. П., Паварас А. Э. Особенности термической обработки стали Х12М. — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1968, № 8, с. 26—30.
7. Влияние способа переплава на качество мартенситно-старееющей высокопрочной стали. — «Сталь», 1973, № 8, с. 725 Авт.: Б. С. Ломберг, А. А. Покровский, В. В. Топилин, О. К. Ревякина
8. Габриэлян Д. И. Прецизионные сплавы. М., «Металлургия», 1972. 104 с.
9. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. М., «Металлургия», 1975. 588 с.

10. Геллер Ю. А., Голубева Е. С. Разгаростойкость штамповых сталей. — «Известия вузов Черная металлургия», 1964, № 9, с 148—153.
11. Геллер Ю. А., Гордезиани А. Г., Кремнев Л. С. Об оптимальном составе вольфрамомолибденовой быстрорежущей стали. — «Известия вузов Черная металлургия», 1972, № 7, с 131—135.
12. Геллер Ю. А., Моисеев В. Ф., Арутюнян С. Б. Пути уменьшения деформации инструментов при термической обработке. — «Металловедение и термическая обработка металлов», 1974, № 1, с 4—9.
13. Геллер Ю. А., Павлова Л. П. Об оптимальном режиме отпуска быстрорежущих сталей. — «Металловедение и термическая обработка», 1967, № 4, с. 43—46.
14. Гиршович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М. — Л., «Машиностроение», 1966 562 с.
15. Горбацевич Ю. А., Смольников Е. А., Маркина В. А. Ступенчатая закалка быстрорежущих сталей. — «Станки и инструмент», 1973, № 6, с. 31—33.
16. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 1. М., «Металлургия», 1966.
17. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 2. М., «Металлургия», 1966.
18. Гуляев А. П. Термическая обработка стали. М., Машгиз, 1960 496 с.
19. Дубинин Г. Н. Диффузионное хромирование сплавов М., «Машиностроение», 1964 451 с.
20. Козловский И. С. Химико-термическая обработка шестерен. М., «Машиностроение», 1970 232 с.
21. Кремнев Л. С., Геллер Ю. А., Сагадеева Т. Г. Штамповая сталь высокой теплоустойчивости. — «Сталь», 1970, № 12, с. 1118—1121.
22. Ланская К. А. Жаропрочные стали. М., «Металлургия», 1969. 246 с.
23. Лахтин Ю. М. Химико-термическая обработка стали. М., Машгиз, 1959. 110 с.
24. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение М., «Машиностроение», 1972. 511 с.
25. Леви Л. И., Кантеник С. К. Литейные сплавы. М., «Высшая школа», 1967. 435 с.
26. Леви Л. И., Мариенбах Л. М. Основы теории металлургических процессов и технология плавки литейных сплавов М., «Машиностроение», 1970. 495 с.
27. Лившиц Б. Г. Металлография. М., «Металлургия», 1971, с. 244—252.
28. Ляхович Л. С., Ворошин Л. Г. Борирование стали. М., «Металлургия», 1967 119 с.
29. Марочник стали и сплавов М., изд. НИИМАШ, 1971. 482 с.
30. Материалы в машиностроении Справочник в 5-ти т. Т. 2. Под ред. И. В. Кудрявцева. М., «Машиностроение», 1967, с. 9—23.
31. Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М., «Машиностроение», 1965. 491 с.
32. Многокомпонентные диффузионные покрытия. Под ред. Л. С. Ляховича. [Сборник статей] Минск, «Наука и техника», 1974. 286 с.
33. Мовчан Б. А., Тихоновский А. П., Куратов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. Киев, «Наукова думка», 1973, с. 198—223.
34. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов М., «Металлургия», 1974. 400 с.
35. Подшипники качения. Справочное пособие. Под ред. Н. А. Спицина и А. И. Спирищевского. М., Машгиз, 1961, с 345, 347, 413.
36. Потак Я. М. Высокопрочные стали. М., «Металлургия», 1972.
37. Постоянные магниты. Справочник. Под ред. Ю. М. Пятиня. М., «Энергия», 1971 363 с.
38. Прецизионные сплавы. Справочник. Под ред. Б. В. Молотилова М., «Металлургия», 1974. 447 с.
39. Производство стали и сплавов в вакуумных печах. М., «Металлургия», 1972, с. 161—185. Авт.: Г. Н. Окороков, А. П. Шалимов, В. М. Антипов и др.
40. Рахштадт А. Г. Пружинные стали и сплавы. М., «Металлургия», 1971, с. 278—289.
41. Раузин Я. Р. Термическая обработка хромистой стали, М., Машгиз, 1959, с. 53, 84, 104.
42. Специальные стали и сплавы. Справочник под ред. Ф. Ф. Химушина. Т. 3. М., «Машиностроение», 1968, с. 9—82.
43. Справочник машиностроителя. Под ред. Э. А. Сатяла Т. 6. М., «Машиностроение», 1964, 540 с.
44. Справочник металлста. Под ред. С. С. Чернавского Т. 2, гл. I. М., «Машиностроение», 1969, 1027 с.

45. Справочник по металлическим материалам турбомостостроения. Под ред. П. Б. Михайлова-Михеева. М.—Л., «Машиностроение», 1961. 838 с.
46. Стали с пониженным содержанием никеля. Справочник. Под ред. М. В. Приданцева и Г. Л. Лившица. М., Металлургиздат, 1961. 200 с.
47. Твердые сплавы в машиностроении. Справочное пособие. М., Машгиз, 1955. 383 с. Авт.: В. С. Раковский, Ф. Ф. Смирнов, Л. А. Рождественский, И. И. Крюков.
48. Третьяков В. И. Металлокерамические твердые сплавы. Гос. изд. литературы по черной и цветной металлургии. М., 1962. 592 с.
49. Фарнасов Г. А., Фридман А. Г., Каринский В. Н. Плазменная плавка. М., «Металлургия», 1968. 155 с.
50. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. Изд. 2-е. М., «Металлургия», 1969.
51. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали. М., «Металлургия», 1967. 798 с.
52. Чапурова П. Н., Чернявский К. С. Структура спеченных твердых сплавов. М., «Металлургия», 1975. 198 с.
53. Чуйко Н. М., Мошквич Е. И., Перевазко А. Г. и др. Трансформаторная сталь. М., «Металлургия», 1970. 264 с.
54. Шубин Р. П., Приходько В. П. Технология и оборудование термического цеха. М., «Машиностроение», 1974. 280 с.

Глава 3

ЦВЕТНЫЕ И ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

ПРИПОИ И ПОДШИПНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Припой

Припоем называется металл или сплав, применяемый для соединения деталей пайкой. Температура плавления у припоев должна быть ниже, чем у паемых материалов.

В зависимости от температуры плавления припои делят на мягкие (с температурой плавления ниже 400°C) и твердые (с температурой плавления выше 400°C).

Основа большинства мягких припоев — олово и свинец. Известны низкотемпературные припои на основе висмута, индия и других легкоплавких металлов с температурой плавления $47\text{—}170^{\circ}\text{C}$. Чистое олово часто используют в качестве припоя и для облуживания металлических поверхностей. Это объясняется хорошей смачивающей способностью, высокой пластичностью, нетоксичностью и достаточной коррозионной стойкостью олова во многих средах.

В табл. 1 приведены стандартные марки олова.

Характеристики физико-механических свойств олова

Плотность, г/см^3	7,3
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	231,9
Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	2270
Коэффициент линейного расширения α ($20\text{—}100^{\circ}\text{C}$)	$23 \cdot 10^{-6}$
Удельная теплоемкость, $\text{кал/г} \cdot ^{\circ}\text{C}$	0,0534
Скрытая теплота плавления, кал/г	14,5
Скрытая теплота испарения, кал/г	570
Поверхностное натяжение при 232°C , дин/см	531
Теплопроводность, $\text{кал/см} \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C}$	0,157
Удельное электрическое сопротивление, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	0,115
То же, в жидком состоянии	0,45
Температурный коэффициент электросопротивления α ($0\text{—}100^{\circ}\text{C}$), $\text{мкОм} \cdot \text{см} \cdot ^{\circ}\text{C}$	0,00447
Модуль нормальной упругости, кгс/мм^2	4200
Модуль сдвига, кгс/мм^2	1680
Временное сопротивление разрыву, кгс/мм^2	1,6—1,8
Предел текучести, кгс/мм^2	1,0
Сопротивление срезу, кгс/мм^2	2,0
Ударная вязкость (с надрезом), $\text{кгс} \cdot \text{м/см}^2$	2—3
Твердость по Бринеллю, кгс/мм^2	4,5—6,5
Относительное удлинение, %	55—60

Примечание Механические свойства приведены для литого состояния.

Оловянно-свинцовые припои. Оловянно-свинцовые сплавы ввиду низкой температуры плавления, высокой пластичности, хорошей смачиваемости металлических поверхностей широко используются в качестве припоев.

Олово	Sn (не менее)	Примеси (не более)								Сумма определяемых примесей
		As	Fe	Cu	Pb	Bi	Sb	S	Другие	
ОВЧ-000	99,999	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	—	Zn — $3 \cdot 10^{-5}$; Ga — $5 \cdot 10^{-5}$ Al — $3 \cdot 10^{-4}$; Ag — $5 \cdot 10^{-5}$ Au — $1 \cdot 10^{-5}$; Co — $1 \cdot 10^{-5}$ Ni — $1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
О1 п. ч.	99,915	0,01	0,009	0,01	0,025	0,01	0,015	0,01	—	0,085
О1	99,90	0,01	0,009	0,01	0,04	0,015	0,015	0,01	—	0,10
О2	99,565	0,015	0,02	0,03	0,25	0,05	0,05	0,02	—	0,435
О3	98,40	0,05	0,05	0,10	1,0	0,06	0,30	0,04	—	1,60
О4	96,35	0,05	0,05	0,10	3,0	0,10	0,30	0,05	—	3,65

Примечания: 1. Примерное назначение олова различных марок: ОВЧ-000 — для полупроводниковой техники; О1 п. ч. — для лужения консервной жести; О1 — для лужения жести, изготовления припоя ПОС 90; О2 — для изготовления баббита В83, припоя ПОС 61, фольги, лужения кухонной утвари и котлов для варки пищи, накладного олова; О3 — для изготовления ПОС 40 и солей; О4 — для изготовления остальных баббитов, припоев и малооловянистых сплавов.

2. В помещениях, где хранится олово, температура должна быть не ниже 12° С.

Температура плавления и свойства припоев зависят от их состава (рис. 1, 2, 3).

На свойства припоев оказывает влияние присутствие других элементов. Сурьма — упрочняющая добавка, однако она ухудшает сма-

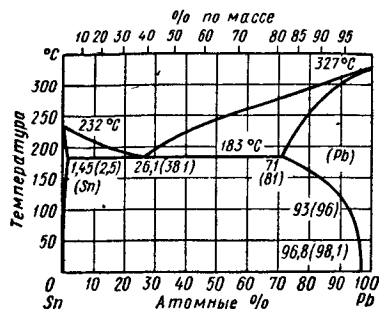


Рис. 1. Диаграмма состояния системы олово—свинец

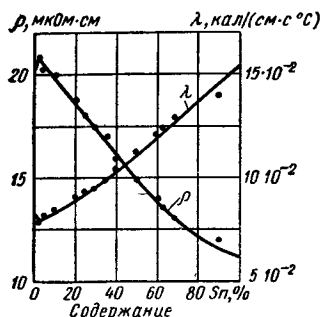


Рис. 2. Зависимость характеристик физических свойств сплавов системы олово—свинец от состава

чивающую способность припоев и при содержании свыше 1% снижает их пластичность и ударную вязкость. Мышьяк, начиная с 0,05%, заметно снижает пластичность и ударную вязкость припоев, ухудшает качество паяного соединения. Примеси цинка, кадмия и алюминия,

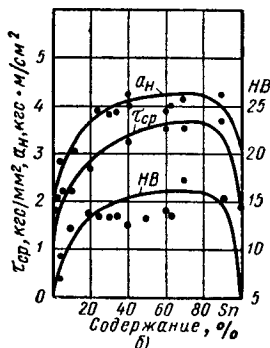
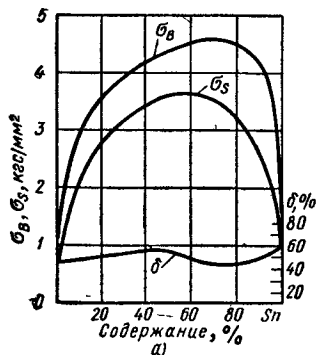


Рис. 3. Зависимость характеристик свойств сплавов системы олово—свинец от состава:

а — при статическом растяжении; б — при испытании на срез, ударную вязкость и твердость

легко окисляясь, ухудшают качество паяного шва. Присутствие их резко снижает коррозионную стойкость припоев в слабокислых и слабощелочных агрессивных средах.

Состав, свойства и назначение оловянно-свинцовых припоев приведены в табл. 2, 3. Пластичность и вязкость оловянно-свинцовых

Припой	Химический состав **, %		Температура плавления, °С		Плотность, г/см³	Удельное электрическое сопротивление, Ом мм²/м	Теплопроводность, кал (см с.°С)	Примерное назначение
	Sn	легирующие элементы	Соли-дус	Ликвидус				
Бессурьмянистые								
ПОС 90	89—91	—	183	220	7,6	0,120	0,143	Лужение и пайка внутренних швов пищевой посуды и медицинской аппаратуры
ПОС 61	60—62	—	183	190	8,5	0,139	0,120	Лужение и пайка электро- и радиоаппаратуры, печатных схем, точных приборов с высокогерметичными швами, где недопустим перегрев
ПОС 40	39—41	—	183	238	9,3	0,159	0,100	Лужение и пайка электроаппаратуры, деталей из оцинкованного железа с герметичными швами
ПОС 10	9—10	—	268	299	10,8	0,200	0,084	Лужение и пайка контактных поверхностей электрических аппаратов, приборов, реле, заливка и лужение контрольных пробок топок паровозов
ПОС 61М	60—62	Cu 1,5—2,0	183	192	8,5	0,143	0,117	Лужение и пайка медной проволоки в кабельной промышленности, электроприборостроении и ювелирной технике
ПОСК 50-18	49—51	Cd 17—19	145	145	8,8	0,133	0,130	Пайка деталей, чувствительных к перегреву, металлизированной керамики, ступенчатая пайка
Малосурьмянистые *								
ПОССу 61-0,5	60—62	—	183	189	8,5	0,140	0,120	Лужение и пайка электроаппаратуры, обмоток электрических машин, оцинкованных радиодеталей при жестких требованиях к температуре
ПОССу 50-0,5	49—51	—	183	216	8,9	0,149	0,112	Лужение и пайка авиационных радиаторов, пайка пищевой посуды с последующим лужением пищевым оловом
ПОССу 40-0,5	39—41	—	183	235	9,3	0,169	0,100	Лужение и пайка белой жести, обмоток электрических машин, пайка

ПОССу 30-0,5	29—31	—	183	255	9,7	0,179	0,090	делий неотвественного назначения, тонколистовой упаковки Лужение и пайка листового цинка, радиаторов Лужение и пайка радиаторов Лужение и пайка трубок теплообменников, электроламп
ПОССу 25-0,5	24—26	—	183	266	10,0	0,182	0,090	
ПОССу 18-0,5	17—18	—	183	277	10,2	0,198	0,084	
Сурьмянистые								
ПОСу 95-5	94—96	Sb 4,0—5,0	234	240	7,3	0,145	0,115	Пайка трубопроводов, работающих при повышенных температурах, пайка в электропромышленности Лужение и пайка холодильных установок тонколистовой упаковки Припой широкого назначения Пайка свинцовых труб, абразивная пайка Лужение и пайка в холодильном аппаратостроении, электроламповом производстве, абразивная пайка
ПОССу 40-2	39—41	1,5—2,0	185	229	9,2	0,172	0,100	
ПОССу 35-2	34—36	—	185	243	9,4	0,179	0,090	
ПОССу 30-2	29—31	—	185	250	9,6	0,182	0,090	Лужение и пайка в автомобильном производстве
ПОССу 25 2	24—26	—	185	260	9,8	0,185	0,090	
ПОССу 18 2	17—18	—	186	270	10,1	0,206	0,081	
ПОССу 15-2	14—15	—	184	275	10,3	0,208	0,080	Пайка в автомобилестроении
ПОССу 10-2	9—10	—	268	285	10,7	0,208	0,080	
ПОССу 8-3	7—8	2,0—3,0	240	290	10,5	0,207	0,081	
ПОССу 5-1	4—5	0,5—1,0	275	308	11,2	0,200	0,084	Лужение и пайка деталей, работающих при повышенных температурах Пайка белой жести, лужение и пайка деталей с закатанными и клепаными швами из латуни и меди, шпатлевка кузовов автомобилей
ПОССу 4-6	3—4	5,0—6,0	244	270	10,7	0,208	0,080	

* В группе малосурьмянистых припоев содержание Sb — 0,2—0,5%.

** Pb — остальное

Примечание В припой ПОСу 95 5 допускается примесь Pb не более 0,07%.

8. Характеристики механических свойств оловянно-свинцовых припоев

Припой	σ_B , кгс/мм	δ , %	a_H , кгс/мм ²	НВ	$\tau_{ср}$, кгс/мм ²
ПОС 90	4,9	40	4,2	15,4	3,7
ПОС 61	4,3	46	3,9	14,0	3,5
ПОС 40	3,8	52	4,0	12,5	3,4
ПОС 10	3,2	44	3,2	12,5	2,3
ПОС 61М	4,5	40	1,1	14,9	3,5
ПОСК 50-18	4,0	40	4,9	14,0	4,0
ПОССу 61-0,5	4,5	42	3,7	13,5	3,5
ПОССу 50-0,5	3,8	55	4,4	13,2	3,5
ПОССу 40-0,5	4,0	50	4,0	13,0	3,5
ПОССу 35-0,5	3,8	47	3,9	13,3	—
ПОССу 30-0,5	3,6	45	3,9	13,2	—
ПОССу 25-0,5	3,6	45	3,9	13,6	—
ПОССу 18-0,5	3,6	45	3,6	—	2,6
ПОСу 95-5	4,0	46	5,5	18,0	3,7
ПОССу 40-2	4,3	48	2,8	14,2	4,0
ПОССу 35-2	4,0	40	2,6	—	—
ПОССу 30-2	4,0	40	2,5	—	—
ПОССу 25-2	3,8	35	2,4	—	—
ПОССу 18-2	3,6	35	1,9	—	3,0
ПОССу 15-2	3,6	35	1,9	12,0	—
ПОССу 10-2	3,5	30	1,9	—	—
ПОССу 8-3	4,0	43	1,7	12,8	3,0
ПОССу 5-1	3,3	40	2,8	10,7	2,8
ПОССу 4-6	6,5	15	0,8	17,3	4,3

припоев, богатых оловом, заметно снижаются при низких температурах (рис. 4).

Серебряные припои отличаются хорошим сочетанием физико-механических свойств — относительно невысокими температурами плавления, повышенными электро- и теплопроводностью, высокими прочностью и пластичностью. Они хорошо смачивают металлические поверхности и заполняют зазоры, обеспечивая прочность, коррозионную стойкость паяных соединений, пригодность для эксплуатации в условиях ударных и вибрационных нагрузок. Эти припои широко используют для пайки черных и цветных металлов и их сплавов за исключением алюминия и магния.

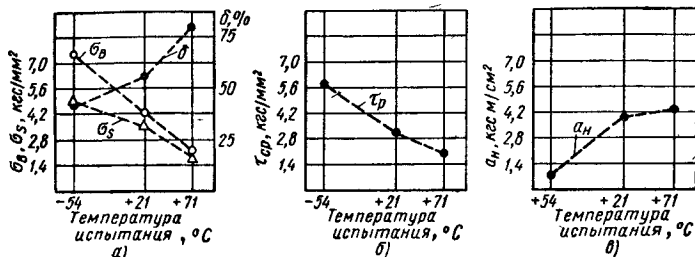


Рис 4. Зависимость характеристик механических свойств припоя ПОС 63 от температуры:

$$a - \sigma_{\text{в}}, \sigma_{\text{с}}, \delta = f(T); \quad б - \tau_{\text{ср}} = f(T); \quad в - \alpha_{\text{н}} = f(T)$$

Состав и свойства стандартных серебряных припоев приведены в табл. 4.

Припои на медной и медно-никелевой основах. Медь и ее сплавы применяют в качестве припоев для пайки углеродистых и легированных сталей, никеля и его сплавов.

При использовании меди в качестве припоя необходимо брать марки, не содержащие кислорода или содержащие его в минимальном количестве (М00, М0, М06, М1Р, М2Р по ГОСТ 859—66*), и пайку проводить в восстановительной или защитной газовой среде.

В окислительной среде кислород диффундирует в медь с образованием эвтектики $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$, что может привести к появлению кристаллизационных трещин и последующему водородному охрупчиванию в процессе отжига паяного изделия в водородосодержащей атмосфере.

Латунные припои склонны к поглощению водорода, что снижает качество паяного шва. Поэтому пайку рекомендуется проводить в окислительной атмосфере, не допуская перегрева. При этом также снижается испарение цинка, что способствует повышению плотности паяного шва. Малые добавки кремния (до 0,2%) заметно уменьшают испарение цинка и пористость паяного шва.

Двойные медно-цинковые припои из-за повышенной хрупкости имеют ограниченное применение. Пластичные припои Л63, Л68 (ГОСТ 15527—70) используют для пайки соединений из меди и стали, работающих на удар и знакопеременную нагрузку.

Более прочные многокомпонентные припои используются для пайки твердосплавного инструмента (табл. 5, 6).

4. Химический состав (%) и свойства серебряных припоев (ГОСТ 8190—56**)

Припой	Ag	Cu	Zn	P	Cd	Другие леги- рующие эле- менты	Температура плавления, °C		Плотность, г/см ³	Удельное электро- сопротивление, Ом·мм ² /м	Теплопро- водность, ккал/(см·с·°C)
							Соли- дус	Лик- видус			
ПСр 72	72±0,5	28 ^{+0,5} _{-0,7}	—	—	—	—	779	779	9,9	0,022	0,78
ПСр 50	50±0,5	50 ^{+0,5} _{-0,7}	—	—	—	—	779	850	9,3	0,025	0,69
ПСр 70	70±0,5	26±0,5	4,0±1,0	—	—	—	730	755	9,8	0,042	0,41
ПСр 65	65±0,5	20±0,5	15 ^{+1,0} _{-1,5}	—	—	—	693	718	—	—	—
ПСр 45	45±0,5	30±0,5	25 ^{+1,5} _{-2,0}	—	—	—	660	725	9,1	0,097	0,18
ПСр 25	25±0,3	40±1,0	35,0 ^{+1,5} _{-2,0}	—	—	—	745	775	8,7	0,069	0,25
ПСр 12М	12±0,3	52±1,0	36,0 ^{+1,5} _{-2,0}	—	—	—	780	825	8,5	0,076	0,22
ПСр 10	10±0,3	53±1,0	37,0 ^{+1,5} _{-2,0}	—	—	—	815	850	8,45	0,065	0,27
ПСр 71	71±0,5	28 ^{+0,7} _{-1,0}	—	1,0±0,2	—	—	750	795	9,8	0,04	0,43
ПСр 25ф	25±0,5	70±1,0	—	5,0±0,5	—	—	650	710	8,5	0,18	0,09

Продолжение табл. 4

Припой	Ag	Cu	Zn	Г	Cd	Другие легирующие элементы	Температура плавления, °C		Плотность, г/см³	Удельное электросопротивление, Ом мм²/м	Теплопроводность, кал/(см·с·°C)
							Сплав	Линк-дуга			
ПСр 15	15±0,5	80,2±1,0	—	4,8 ^{+0,2} _{-0,3}	—	—	635	810	8,3	0,22	0,08
ПСр 50 Ка	50±0,5	16,0±1,0	16,0±2,0	—	18,0±1,0	—	635	650	9,3	0,072	0,24
ПСр 44	44±1,0	27,0±1,0	16,0±2,0	—	8,0±1,0	Ni 2,0±0,5, Mn 3,0±0,5	650	800	8,9	0,19	0,09
ПСр 40	40±1,0	16,7 ^{+0,7} _{-0,3}	17,0 ^{+0,8} _{-0,4}	—	26,0 ^{+0,5} _{-1,0}	—	595	605	8,4	0,10	0,17
ПСр 37,5	37,5±0,5	48,8±1,0	5,5±0,5	—	—	Ni 0,3±0,2, Mn 8,2±0,3	725	810	8,9	0,31	0,05
ПСр 62	62±0,5	28±1,0	—	—	—	Sn 10,0±1,5	660	700	9,7	0,22	0,08
ПСр 3Ка	3,0±0,5	—	1,0±0,5	—	96,0±1,0	—	300	325	8,7	0,078	0,22
ПСр 3	3,0±0,3	Pb 97,0±1,0	—	—	—	—	300	305	11,3	0,20	0,08
ПСр 2,5	2,5±0,3	Pb 92,0±1,0	—	—	—	Sn 5,5±0,5	295	305	11,0	0,22	0,08
ПСр 2	2,0±0,3	Pb 63,0±1,5	—	—	5,0±0,5	Sn 30,0±1,0	225	235	9,6	0,17	0,10
ПСр 1,5	1,5±0,8	Pb 83,5±1,5	—	—	—	Sn 15,0±1,0	265	270	10,4	0,20	0,08

5. Химический состав (%) многокомпонентных припоев

Припой	Cu	Ni	Mn	Si	Fe	B	Co	Sn	Al	Zn	Примечание
ЛОК 62-0,5-0,4	60—63	—	—	0,3— 0,4	—	—	—	0,4— 0,6	—	Осталь- ное	Полосы по ТУ 48-21-299—73
ЛОК 59-1-0,3	58—60	—	—	0,2— 0,4	—	—	—	0,7— 1,1	—	То же	
ЛНМп 68-4-2	67—69	3,5— 4,5	1,5— 2,5	0,2— 0,3	—	—	—	—	—	»	
ЛНМп 49-9-0,2-0,2	48—50	8—10	0,1— 0,2	0,1— 0,2	0,1— 0,2	—	0,1— 0,2	—	—	»	
ЛМпЖ 57-1,5-0,75	56—58	—	1—2	0,1— 0,2	0,5— 1,0	0,07— 0,15	—	—	—	»	Полосы по ТУ 48-08-476—71
ЛНМп 60-9-5	59—61	8—10	4—6	—	—	0,03— 0,1	—	—	—	»	
БрАНМп 0,6-4-2	93,7	3,5	1,5—2	0,2	—	—	—	—	0,6	—	
БрКоМц 3-10	Осталь- ное	—	9—11	—	—	—	2,5— 3,5	—	Р 0,01— 0,03	—	Полосы по ТУ 48-21-297—73

Припой	Температура плавления, °С		Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м	Теплопроводность, кал/(см·с·°С)	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	Сопротивление срезу, кгс/мм ²	a_H , кгс·м/см ²	Растекаемость *	Назначение
	Солнц	Ликвидус								
ЛНМц 68-4-2	910	930	—	—	39	37	21	14	2,3	Для пайки средненагруженного металлорежущего инструмента
ЛНКомц 49-9-0,2—0,2	883	917	0,18	0,10	52	35	29	9	1,5	Для пайки бурового инструмента и штампов
ЛНМц 60-9-5	949	995	0,30	0,06	35	40	29	11	2,5	Для пайки сильнонагруженного металлорежущего инструмента
ЛМцЖ-57-1,5-0,75	865	873	0,11	0,16	46	25	21	5	2,2	Для пайки средненагруженного металлорежущего инструмента, армированного сплавами группы ТК и малокобальтовыми
БрАНМц 0,6-4-2	1050	1090	—	—	26	39	24	12	1,8	Для пайки сильнонагруженного металлорежущего инструмента
БрКомц 3-10	965	1024	0,37	0,05	43	32	23	17	2,1	Для пайки инструмента с высоким нагревом режущей кромки

* По твердому сплаву ВК8 по сравнению с растекаемостью латуни Л63.

7. Химический состав * (%) и характеристики свойств медно-никелевых припоев

Припой	Ni	Cr	Mn	Si	Fe	Li	Другие легирующие элементы	Плотность, г/см ³	Коэффициент линей- ного расширения $\alpha \cdot 10^6$ (20—100°С)	Темлопроводность, кал/(см·с·°С)	Температура плав- ки, °С
ВПр 1	27—30	—	—	1,5—2,0	1,5	—	В 0,1—0,3	8,68	17,1	0,077	1200
ВПр 2	5—6	—	22—26	—	0,8—1,2	0,15—0,25	—	8,13	19,0	0,031	1000
ВПр 4 **	28—30	—	28—30	0,8—1,2	1,0—1,5	0,15—0,30	В 0,15—0,25	8,03	18,8	0,026	1020
КП	19—20	—	—	4,5—5	5—6	—	—	—	—	—	1000
ГПФ	10—14	—	4,0—5,0	1,0—1,8	12—14	—	—	—	—	—	1280
ПЖ45 (81)	32	3	2,5	2	2,5	—	—	—	—	—	955
ПФК	14—5	—	5—6	3—4	5—7	—	Zn 6—8	—	—	—	—
ГФК	9	—	Al 2	—	—	—	Zn 3	—	—	—	—

* Остальное — Cu

** Припой содержит также 0,01—0,2% К, 0,05—0,15% Na, 0,1—0,2% Р.

В табл. 7 приведены состав и характеристики свойств медно-никелевых припоев для пайки коррозионностойких, жаропрочных и быстроразрушающихся сталей.

Подшипниковые материалы

В качестве подшипниковых материалов наибольшее распространение получили сплавы на оловянной и свинцовой основе (баббиты), медно-свинцовые сплавы, а также сплавы на алюминиевой и цинковой основах.

Оловянные и свинцовые баббиты. К этой группе подшипниковых сплавов относятся оловянные сплавы с сурьмой и медью (Б88 и Б83), свинцовые сплавы с оловом и сурьмой, содержащие добавки никеля, теллура, кадмия и мышьяка (Б16, Б6 и др.), а также свинцовые сплавы с кальцием и натрием — кальциевые баббиты (табл. 8, 9).

Баббиты отличаются хорошей прирабатываемостью к валу, особенно оловянные. У последних к тому же лучшая теплопроводность и высокая коррозионная стойкость.

Оловянные баббиты широко применяют в подшипниках турбин, крупных судовых дизелей, электрических машин и других уникальных установок. Свинцовые баббиты применяют в менее ответственных случаях. На железнодорожном транспорте большое распространение получили кальциевые баббиты (буксовые подшипники вагонов, подшипники коленчатого вала тепловозных дизелей). Однако так как баббиты сравнительно мягкие сплавы, значительно разупрочняющиеся с повышением температуры (табл. 10, рис. 5), то усталостная прочность их невысока, что практически исключает их применение в тяжело нагруженных и скоростных подшипниках современных двигателей.

Из-за малой прочности все баббиты могут успешно работать только в подшипниках, имеющих прочный стальной, чугунный или бронзовый корпус. Как правило, тонкостенные подшипниковые вкладыши автомобильных двигателей изготавливают штамповкой из биметаллической ленты, полученной на линии непрерывной заливки. Подшипники большого диаметра обычно заливают индивидуально стационарным или центробежным способом, а также литьем под давлением.

Усталостная прочность баббитового слоя при работе в подшипнике в значительной степени зависит от его толщины. Обычно толщина слоя t в подшипнике составляет:

для оловянного баббита	0,25 + 0,005d
для свинцового »	0,5 + 0,01d

где d — диаметр подшипника, мм

Масляные зазоры составляют от диаметра вала (%): 0,05—0,12 для оловянных баббитов и 0,08—0,15 для свинцовых баббитов (большие зазоры применяют в подшипниках с более высокими нагрузками).

Алюминиевые подшипниковые сплавы. Состав, условия применения и свойства антифрикционных сплавов на алюминиевой основе приведены в табл. 11, 12, 13.

Антифрикционные свойства алюминиево-оловянных сплавов повышаются с увеличением содержания олова. Однако в литых сплавах

8. Химический состав (%) оловянных и свинцовых баббитов (ГОСТ 1320—74)

Баббит	Sn	Sb	Cu	Cd	Ni	As	Pb
Б88	Остальное	7,30—7,80	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	—	—	—	Остальное
БН	9,0—11,0	13,0—15,0	1,5—2,0	0,10—0,70	0,10—0,50	0,5—0,9	»
БС6	5,5—6,5	5,5—6,5	0,1—0,3	—	—	—	»

Примечания: 1. По требованию потребителя в баббите Б88 допускается замена компонентов Cd и Ni на Sn и увеличение примеси Pb до 0,35%.

2. По требованию потребителя в баббите Б83 содержание примеси Pb может быть увеличено до 0,5%.

3. По требованию потребителя в баббите Б83С содержание Pb может быть увеличено до 3,0%.

9. Химический состав (%) кальциевых баббитов (ГОСТ 1209—73)

Баббит	Основные компоненты						Примеси (не более)				
	Ca	Na	Sn	Mg	Al	Pb	Bi	Sb	Cu	Mg	Прочие
БКА	0,95—1,15	0,7—0,9	—	—	0,5—0,20	Остальное	0,1	0,25	—	0,02	0,3
БК2	0,30—0,55	0,20—0,40	1,5—2,1	0,06—0,11	—	»	0,2	0,2	0,15	—	0,3
БК2Ш	0,65—0,90	0,70—0,90	1,5—2,10	0,11—0,16	—	»	0,2	0,2	0,15	—	0,3

Примечания: 1. По согласованию сторон баббиты БКА изготавливают с содержанием алюминия менее 0,05%.

2. Баббиты БК2Ш применяют в качестве шихтового материала при изготовлении сплава для заливки подшипников.

Характеристика	Б88 *	Б83	Б83С	Б16	БН	БС6	БКА	БК2
Температура начала плавления, °С	241	240	240	240	240	247	320	—
Температура конца плавления, °С	298	370	370	410	400	280	440	—
Плотность, г/см ³	7,3	7,38	7,40	9,29	9,55	9,8	10,5	—
Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С	23,2	23,0	23,0	24,0	—	—	36	—
Теплопроводность, кал/(см·с·°С) . . .	0,092	0,080	0,08	0,06	—	—	0,05	—
Линейная усадка, %	0,65	0,65	—	0,55	0,65	—	0,75	—
Модуль упругости E , кгс/мм ² . . .	5700	4800—6000	—	—	—	2580	2200	—
Твердость $HВ$, кгс/мм ²	20—25	25—32	25—30	25—30	25—30	16—17	32	20—29
Ударная вязкость (образцы без над- реза), a_H , кгс·м/см ²	1,2	0,6	0,6	0,14	0,3—0,4	—	0,8	1,2
Временное сопротивление разрыву σ_B , кгс/мм ²	6—8	8,0—11,0	8,0—10	7,8	7,0	6,4—6,8	9,3	10—12
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, кгс/мм ² . . .	5—6	5—9	5—9	—	6,0	—	—	—
Относительное удлинение δ , % . . .	10—12	6,0—12,0	5,0±10	0,2	1—2	12—20	8,1	2,5
Относительное сужение ψ , % . . .	13,6	—	—	—	—	—	—	—
Коэффициент трения со смазкой . . .	—	0,005	0,005	0,006	0,006	—	—	0,004
Коэффициент трения без смазки . . .	—	0,28	0,25	—	0,27	—	—	0,44

* Баббит без Ni и Cd

П р и м е ч а н и е Данные приведены для литья в кокиль.

содержание олова не может превышать 10—12%, так как образующаяся грубая сетка оловянной составляющей резко снижает свойства сплава при повышенной температуре (рис. 6), что отрицательно влияет на износостойкость и усталостную прочность сплава при работе в подшипнике. При применении прокатанных и отожженных сплавов, у которых оловянная составляющая располагается в виде отдельных

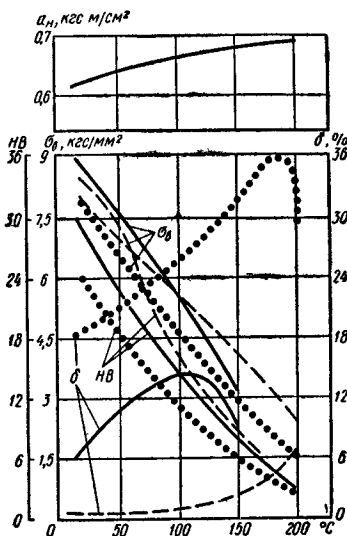


Рис. 5. Изменение характеристик механических свойств баббитов в интервале температур 20—200° С:

● B88 (без Ni и Cd) — B83; — — — B16

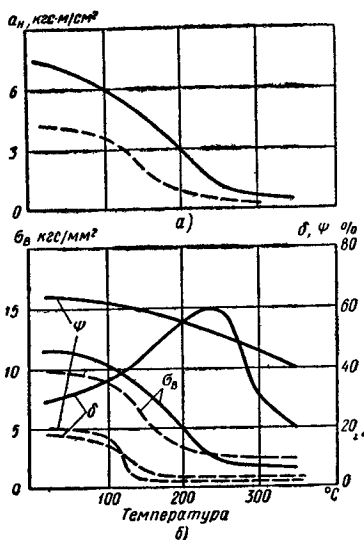


Рис. 6. Изменение характеристик механических свойств сплава АО20-1 в интервале температур 20—350° С:

— — — литой сплав; — — — обработанный сплав

компактных включений, появляется возможность увеличить содержание олова и получить сплавы с наилучшими антифрикционными свойствами.

Алюминиево-сурьмянистый сплав АСМ применяют только в прокатанном и отожженном состоянии. Промышленность выпускает биметаллические полосы сплава АСМ — малоуглеродистую сталь толщиной от 2,2 до 6,2 мм (ТУ 48-21-83—72), а также биметаллы с алюминиево-оловянными сплавами, в основном со сплавом АО 20-1 (ТУ 48-21-6—74) толщиной от 1,5 до 8,65 мм.

Для уменьшения времени приработки подшипниковых узлов и уменьшения износа пары в процессе приработки внутреннюю поверхность вкладыша следует обрабатывать до чистоты не ниже 8-го класса (ГОСТ 2789—73).

11. Химический состав (%) антифрикционных сплавов на алюминиевой основе

Сплав	Sn	Mg	Sb	Cu	Ni	Si	Fe	Al
АОЗ-1 *	2,0—4,0	—	—	0,8—1,2	0,3—0,5	1,7—2,1	—	Остальное
АО9-2 *	8,0—10,0	—	—	2,0—2,5	0,8—1,2	0,3—0,7	—	»
АО9-2Б *	8,5—10,0	—	—	1,5—2,0	—	—	0,02—0,10	»
АО9-1 *	8,0—10,0	—	—	0,8—1,2	—	—	—	»
АО20-1 *	17,0—23,0	—	—	0,7—1,2	—	—	До 0,12	»
АН 2,5 *	—	—	—	—	2,7—3,3	—	—	»
АСМ *	—	0,3—0,7	3,5—6,5	—	—	—	—	»
АО 6-1 **	5,5—7,0	—	—	0,7—1,3	0,7—1,3	До 0,3	До 0,20	»
Алькусин **	—	—	—	7,5—9,5	—	1,5—2,5	—	»

* Сплав, вошедший в ГОСТ 14113—69.

** Сплав, не вошедший в ГОСТ 14113—69

12. Характеристики физических и механических свойств алюминиевых антифрикционных сплавов

Характеристика	Сплав (его состояние)										
	АО3-1 (литье в кокиль)	АО9-2 (литье в кокиль)	АО9-2Б (литье в кокиль)	АО9-1 (прокатанный и отожженный)	АО20-1 (прокатанный и отожженный)	АН2,5		АСМ (прокатанный и отожженный)	АО6 1		Алькусин (литье в кокиль)
						(литье в кокиль)	(прокатанный и отожженный)		(литье в кокиль)	(прокатанный и отожженный)	
Температура начала плавления °С	228	226	226	228	228	620	—	—	224	—	458
Температура конца плавления, °С	655	650	650	650	630	650	—	—	649	—	658
Плотность, г/см³	2,8	3,0	3,0	3,0	3,2	2,8	—	2,83	2,88	—	2,86
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С	—	—	—	—	23,0	22,6	—	—	23,4	—	22,0
Теплопроводность, кал/(см·с·°С)	—	—	—	—	0,38	0,3	—	—	0,43	—	0,40
Модуль упругости E , кгс/мм²	—	—	—	—	—	6600	—	—	7240	—	—
Твердость HV , кгс/мм²	40—45	50—60	50	29—35	28—33	32—40	30—35	22—26	45	40—48	65—80
Временное сопротивление разрыву σ_B , кгс/мм²	11	13,0—17,0	13—15	10,5—12,5	10—12	11,5—14,0	11,5—15,0	8,5—9,5	16,0	12,0—13,6	12—16

Продолжение табл. 12

Характеристика	Сплав (его состояние)										
	АОЗ-1 (литье в кокиль)	АОЗ-2 (литье в кокиль)	АО9-2В (литье в ко-киль)	АО9-1 (про-катанный и отожженный)	АО20-1 (про-катанный и отожженный)	АН2,5		АСМ (про-катанный и отожженный)	АО6-1		Алькунин (литье в ко-киль)
						(литье в кокиль)	(прока-танный и отожжен-ный)		(литье в кокиль)	(прока-танный и отожжен-ный)	
Предел текучести при растяжении $\sigma_{0.2}$, кгс/мм ²	—	7,8—10,5	—	7—8	6,5—7,7	4,3—6,5	7,2—9,1	3,2—4,6	8,0	4,6—5,4	—
Относительное удли-нение δ , %	2,0	2,3—6,3	7—10	30—35	29—35	16—24	29—31	30—38	12	20—25	0,5—1,2
Относительное суже-ние ψ , %	—	—	—	70—75	58,5—72	27,5—33,5	58,0—62,5	45—52	—	—	0,5—1,5
Ударная вязкость a_H , кгс·м/см ²	—	—	—	7,5—8,5	6—7,5	2,8—3,2	4,8—5,8	3,0—3,3	—	—	0,3—0,4
Коэффициент трения со смазкой	—	—	—	—	0,011	0,013	—	—	—	—	0,005
Коэффициент трения без смазки	—	—	—	—	0,18	0,30	—	—	—	—	—

Сплав	Примерное назначение *	Характеристики работы подшипника (не более)		
		Нагрузка на подшипник, кгс/см ²	Окружная скорость, м/с	Температура масла, °С
АО 3-1, АО 9-2	Для отливки монометаллических вкладышей и втулок тол- щиной не менее 10 мм	200 250	15 15	100 100
АО9-2Б	Для получения биметаллических подшипников со стальным корпусом методом литья	300	20	120
АО9-1 АО20-1	Для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей	300	20	120
АН-2,5	Для отливки вкладышей и получения прокаткой мономе- таллической и биметаллической ленты с последующей штамповкой вкладышей	200	15	100
АСМ	Для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей	200	15	100
АО6-1	Для отливки монометаллических вкладышей и втулок Для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей	200 300	15 20	120 120
Алькусин	Для отливки монометаллических вкладышей и втулок, ра- ботающих в условиях спокойной нагрузки и хорошей смазки	100	5	100

* При работе в тяжелонагруженных скоростных подшипниках на рабочую поверхность антифрикционного сплава наносят покрытие мягкого металла (чистое олово, сплав из Pb и 10% Sn и т. д.) толщиной 0,02—0,03 мм. Для изделий из сплава марки АО20-1 наличие покрытия необязательно.

МЕДЬ, НИКЕЛЬ И ИХ СПЛАВЫ

Медь

Медь отличается высокими электропроводностью, теплопроводностью, пластичностью, температурой плавления, коррозионной стойкостью, отличной обрабатываемостью давлением в холодном и горячем состоянии, хорошими литейными свойствами и удовлетворительной обрабатываемостью резанием. Благодаря этим ценным качествам медь используют в электротехнике, различных отраслях машиностроения, радиоэлектронике и приборостроении.

Согласно ГОСТ 859—66* промышленность выпускает медь десяти марок (табл. 14) в виде катодов, вайербасов, слитков и полуфабрикатов (листов, полос, лент, прутков, труб, проволоки, поковок). Из этих полуфабрикатов готовят обработкой давлением и резанием всевозможные детали. Медь является хорошим материалом для фасонных отливок.

Медь также широко применяют для защитных коррозионностойких покрытий. Для электролиза чаще используют медные аноды из специальной меди АМФ.

Характеристики основных физико-механических
и физико-химических свойств, температуры литья
и горячей обработки меди

Атомный номер	29
Относительная атомная масса	63,54
Решетка	Кубическая гранцентри- рованная
	($a = 3,6080 \text{ \AA}$)
Плотность, г/см ³	8,94
Температура плавления, °C	1083
Скрытая теплота плавления, кал/г	50,6
Температура кипения, °C	2595
Скрытая теплота испарения, кал/г	1290
Теплопроводность, кал/(см·с·°C), при:	
20° C	0,941
100° C	0,900
700° C	0,840
Удельная теплоемкость, кал/(г·°C), при:	
20° C	0,092
600° C	0,103
1000° C	0,112
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°C, при:	
0—100° C	16,7
25—300° C	17,7
0—600° C	18,6
0—900° C	19,3
Отражательная способность, %, при $\lambda = 5500 \text{ \AA}$	61
Излучательная способность, % ($\lambda = 6650 \text{ \AA}$), при:	
930° C	9,6
1080° C	11,7
1100° C	15,0
Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м, при:	
20° C	0,0178
500° C	0,053
Электропроводность, м/(Ом·мм ²), при 20° C	57
Температурный коэффициент электросопротивления, 1/°C, при 20° C	$3,93 \cdot 10^{-3}$
Мощность излучаемой энергии, Вт/см ² , при:	
27° C	0,05
227° C	0,11
1227° C	4,26
Работа выхода, эВ	4,46

Сжатие объема при затвердевании, %	4,05—4,2
Вязкость при 1145° С, г/(см·с)	0,0341
Поверхностное натяжение, дин/см	1178
Нормальный потенциал по отношению к водородному электроду, В	+0,34
Предел прочности, кгс/мм ² :	
мягкой меди	20—25
твердой меди	40—49
Относительное удлинение, %:	
мягкой меди	60
твердой меди	6
Твердость по Бринеллю, кгс/мм ² :	
мягкой меди	45
твердой меди	110
Предел текучести, кгс/мм ² :	
мягкой меди	9—15
твердой меди	30—45
Ударная вязкость, кгс·м/см ²	10—18
Сопротивление сжатию, кгс/мм ²	55—65
Предел прочности на срез, кгс/мм ² :	
мягкой меди	15
твердой меди	21
Предел ползучести кгс/мм ² , при:	
20° С	7
200° С	5
400° С	1,4
Модуль сдвига, кгс/мм ²	4240
Модуль упругости, кгс/мм ² :	
мягкой меди	11 700—12 600
твердой меди	12 200—13 500
Температура рекристаллизации, °С	180—300
Температура горячей деформации, °С	1 050—750
Температура литья, °С	1 150—1 250
Линейная усадка, %	2,1
Травитель после отжига на воздухе	10%-ная серная кислота

На рис. 7, 8, 9 приведены зависимости свойств меди от температуры испытания и состояния металла.

Электропроводность (теплопроводность) меди зависит от содержания примесей (рис. 10).

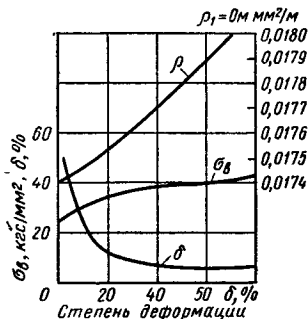


Рис. 7. Зависимость характеристик механических свойств и удельного сопротивления меди марки М1 от степени деформации

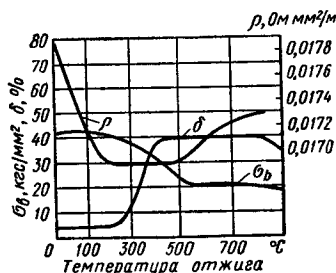


Рис. 8. Зависимость характеристик механических свойств и удельного сопротивления меди марки М1 от температуры отжига (продолжительность отжига 1 ч)

Марка	Cu (не менее)	Примеси (не более)												
		Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O ₂	Zn	P	Ag	Всего
M00	99,99	0,0005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	—	0,001	0,001	—	0,01
M0	99,95	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,02	0,004	0,002	0,003	0,05
M06	99,97	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002	0,004	0,002	0,004	0,001	0,003	0,002	0,003	0,03
M1	99,90	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,05	0,005	—	0,003	0,1
M1p	99,90	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,01	0,005	0,04	0,003	0,1
M2	99,70	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2	0,01	0,05	0,01	0,07	—	—	—	0,3
M2p	99,70	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2	0,01	0,05	0,01	0,01	—	0,04	—	0,3
M3	99,50	0,003	0,05	0,01	0,05	0,2	0,05	0,05	0,01	0,08	—	—	—	0,5
M3p	99,50	0,003	0,05	0,05	0,05	0,2	0,03	0,05	0,01	0,01	—	0,04	—	0,5
M4	99,0	0,005	0,2	0,2	0,1	—	0,3	—	0,02	0,15	—	—	—	1,0
АМФ	Осталь- ное	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	0,05	0,005	0,03— 0,16	0,003	0,1

Примечания 1. Марки и состав меди даны по ГОСТ 859—66*.

2. Медь марки АМФ предназначена только для изготовления анодов по ГОСТ 767—70. Фосфор в этой меди является легирующей добавкой для улучшения растворения анодов при электролизе.

При плавлении меди в ней может раствориться некоторое количество кислорода в виде закиси меди. Примеси кислорода несколько снижают электропроводность и пластичность меди в горячем и холодном состоянии, а также могут привести к «водородной болезни».

В изделиях, содержащих закись меди, при нагреве в водороде образуются трещины и пузыри, из-за чего резко снижаются их прочность и пластичность. «Водородная болезнь» возникает вследствие того, что при нагреве водород быстро диффундирует в медь, и, соединяясь с кислородом, образует пары воды. Эти пары из-за незначительной скорости диффузии создают высокое давление, что и приводит к образованию

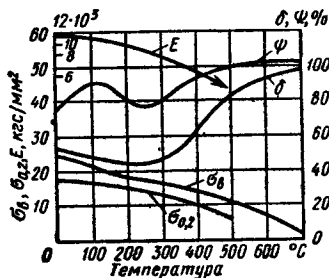


Рис. 9. Зависимость характеристик механических свойств меди, раскисленной фосфором, от температуры испытания

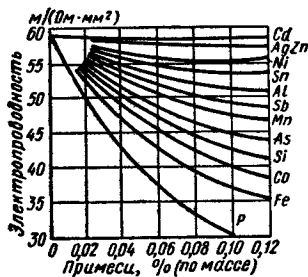


Рис. 10. Влияние примесей на электропроводность меди

упомянутых дефектов в меди. Для предохранения от окисления медь плавят или под слоем древесного угля, или с использованием защитных газов, или в вакууме.

В ряде случаев производят дополнительное раскисление жидкой меди. Один из наиболее эффективных и употребляемых раскислителей — фосфор (0,01—0,05%).

Расплавленную медь также предохраняют от насыщения серой, примеси которой ухудшают ее механические свойства.

Высокая теплопроводность и электропроводность меди затрудняют ее электросварку (точечную или роликовую), особенно в виде массивных изделий. Тонкие медные детали и полуфабрикаты можно сваривать электродами из вольфрама и молибдена. Предварительное лужение соединяемых поверхностей облегчает сварку. Легче осуществить сварку встык, но для этого необходимы трансформаторы большой мощности. Детали толщиной более 2 мм можно сваривать нейтральным ацетиленокислородным пламенем, при этом необходимо предохранять их от окисления и загрязнения. Наиболее надежный способ соединения медных изделий — пайка твердыми и мягкими припоями.

Медь отлично штампуются, но при этом необходимо помнить, что в отожженном состоянии она отличается значительной анизотропией механических свойств, вызывающей образование фестонов при глубокой вытяжке. Для уменьшения фестонов листовую (ленточную) медь следует готовить по особому технологическому процессу. Чистовая обработка резанием мягкой меди ввиду ее большой вязкости затруд-

нена. Для деталей, изготавливаемых резанием, рекомендуется применять нагартованную (твердую) медь. Химический состав меди см. ГОСТ 13938.0—68; 13938.12—68; 13938.13—69.

Склонность к «водородной болезни» (ГОСТ 15471—70) определяют путем отжига образцов в виде пластин в водороде при 825—875° С (40 мин), последующего визуального осмотра и испытания на перегиб. Испытание проволоки на растяжение см. ГОСТ 10446—63, а на перегиб — ГОСТ 1579—63. Механические свойства плоского проката в условиях растяжения см. ГОСТ 1497—73, ГОСТ 11701—66, а на изгиб — ГОСТ 14019—68.

Основное количество меди (табл. 15 и 16) используют для приготовления сплавов. В технической литературе медные сплавы разделяют на три группы: латуни, бронзы и медно-никелевые сплавы.

15. Плоский прокат из меди

Полуфабрикаты	Состояние	ГОСТ	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
Листы	Горячекатаные	495—70	3—25	600—3000	1000—6000
»	Холоднокатаные		0,4—120	400—2000	600—2000
Полосы	Холоднокатаные	495—70	0,4—2,2	40—600	500—2000
Ленты	»	1173—70*	0,05—20	10—600	—
Фольга	Холоднокатаная	5638—75	0,015—0,05	20—150	—
Аноды	Горячекатаные	767—70	2—10	75—1000	300—2000
	Холоднокатаные		5—15	75—1000	300—2000

Полуфабрикаты из меди поставляют в мягком (отожженном), полутвердом (обжатие 10—30%) и твердом (обжатие более 35%) состоянии.

Латуни

Латуни — двойные и многокомпонентные медные сплавы, в которых основной легирующий компонент — цинк.

По сравнению с медью латуни обладают более высокими прочностью, коррозионной стойкостью, литейными свойствами и температурой рекристаллизации. Это наиболее дешевые медные сплавы. Латуни широко применяют в машиностроении и многих отраслях промышленности.

Двойные (простые) латуни, содержащие 88—97% Cu, называют томпаком, а содержащие 79—86% Cu — полутомпаком. По структуре выделяют α -латуни, ($\alpha + \beta$)-латуни и β -латуни, причем α - и ($\alpha + \beta$)-латуни пластичны в холодном и горячем состоянии, β -латуни только при высоких температурах. На рис. 11 показана зависимость свойств медно-цинковых сплавов от состава.

Медно-цинковые сплавы, легированные одним или несколькими элементами, называют специальными латунями. Наименование таких латуней дается по легирующим элементам, например, латунь, содержащую свинец, называют свинцовой. Простые латуни маркируют буквой Л, за которой пишут содержание меди в %. В специальных латунях после буквы Л пишут заглавную букву дополнительных легирующих элементов и через тире после содержания меди указывают

16. Круглый прокат из меди

Полуфабрикат	Состояние	ГОСТ	Диаметр наружный, мм	Диаметр внутренний, мм	Длина, мм	Остальные размеры, мм
Прутки	Тянутые		3—50		1000—5000	
»	Горячекатаные	1535—71	32—100		1000—5000	
»	Прессованные		20—150		1000—5000	
»	Тянутые	16130—72	6—8		1000—5000	
Трубы	Тянутые		3—300		1500—6000	
	Холоднокатаные	617—72	3—300		1500—6000	
	Прессованные		30—280		1000—6000	
Трубки капиллярные	Тянутые	2624—67*	2—2,1	0,8—0,85		
Трубки тонкостенные повышенной прочности	Тянутые	11383—65	1,5—2,8			Толщина стенки
Трубки радиаторные круглые и профильные	Тянутые	529—41*				0,15—0,7
Проволока крешерная	Тянута	4752—55*	3—10			
Проволока прямоугольного сечения	Тянута	434—71*				Толщина 0,8—6,0
Проволока сварочная	Тянута		1,2—8,0			Ширина
	Горячекатаная	16130—72	1,2—8,0			2,0—3,5
Проволока круглая	Тянута	2112—72*	0,09—10,0			

содержание вводимых элементов в процентах. В зависимости от способа обработки латуни подразделяют на деформированные и литейные. Последние могут изготавливаться из вторичного сырья (вторичные литейные латуни). Из деформированных латуней изготавливают листы, ленты, полосы, прутки, трубы, проволоку и поковки; из литейных — фасонные отливки.

Основные легирующие элементы в специальных латунях — алюминий, железо, кремний, марганец, мышьяк, никель, олово, свинец. Алюминий, а также никель и олово повышают прочность, коррозионную стойкость латуни на воздухе, в морской атмосфере и морской воде, а также улучшает антифрикционные свойства. Железо измельчает зерно, повышает температуру рекристаллизации и твердость латуни. Кремний повышает прочность, коррозионную стойкость, антифрикционные свойства, а марганец — жаростойкость латуни. Мышьяк предохраняет латунь от обесцинкования в агрессивных пресных водах при комнатной и повышенных температурах. Добавки никеля, мышьяка и железа к алюминиевым латуням повышают их стойкость к щелочам и разбавленным кислотам. Свинец, практически не растворимый в медной основе, располагается в виде дисперсных частиц в объеме зерен и по их границам. Свинец — своеобразная смазка, уменьшающая износ инструмента при обработке резанием латуни. Мелкая, легко отделяющаяся стружка, образующаяся при механической обработке, позволяет получать поверхность обрабатываемых изделий высокой чистоты.

Обрабатываемость резанием медных сплавов оценивается в процентах по отношению к обрабатываемости латуни марки ЛС 63-3, которая принимается за 100%.

Латуни, за исключением свинцовосодержащих, легко поддаются обработке давлением в горячем и холодном состоянии. Все они хорошо паяются твердыми и мягкими припоями и легче свариваются, чем медь. Следует иметь в виду, что латуни, содержащие более 15% цинка в холоднодеформированном состоянии, в том числе и после обработки резанием, склонны к самопроизвольному коррозионному растрескиванию при хранении, особенно во влажной атмосфере, содержащей сернистые газы или аммиак. Для предохранения от растрескивания латунные полуфабрикаты и изделия подвергают низкотемпературному отжигу (250—300° С), при котором уменьшаются остаточные напряжения, но не снижается их прочность. Латуни, за исключением марки ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5, упрочняют деформационным наклепом. Латунь последней марки — единственный дисперсионно-твердеющий сплав, упрочняемый в результате закалки и старения.

Плоский прокат выпускают в мягком (отожженном), полутвердом (обжатие 10—30%), твердом (обжатие 30—50%) и особотвердом (обжатие более 60%) состоянии. В табл. 17—19 приведены марки и назначе-

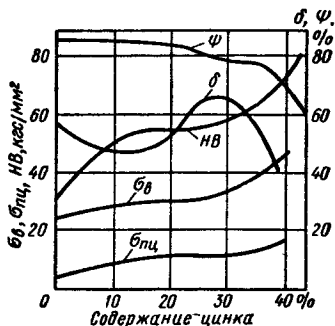


Рис. 11. Зависимость характеристик механических свойств медно-цинковых сплавов от содержания цинка (исходный материал — образцы, деформированные на 40%)

17. Химический состав и назначение деформируемых простых латуней по ГОСТ 15527—70

Латунь	Основные компоненты, %		Примеси (не более), %						Примерное назначение
	Cu	Zn	Pb	Fe	Sb	Bi	P	Всего	
Л96	95,0—97,0	Остальное	0,03	0,10	0,005	0,002	0,01	0,2	Для радиаторных и капиллярных трубок
Л90	88,0—91,0	»	0,03	0,10	0,005	0,002	0,01	0,2	Для змеевиков, сильфонов, деталей теплотехнической и химической аппаратуры. Для деталей машин и приборов
Л85	84,0—86,0	»	0,03	0,10	0,005	0,002	0,01	0,3	
Л80	79,0—81,0	»	0,03	0,10	0,005	0,002	0,01	0,3	
Л70	69,0—72,0	»	0,03	0,07	0,002	0,002	0,005	0,2	Для гильз химической аппаратуры
Л68	67,0—70,0	»	0,03	0,10	0,005	0,002	0,01	0,3	Для изделий, изготавливаемых штамповкой
Л63	62,0—65,0	»	0,07	0,2	0,005	0,002	0,01	0,5	Для гаек, болтов, деталей автомобилей, конденсаторных труб
Л60	59,0—62,0	»	0,30	0,2	0,01	0,003	0,01	1,0	Для толстостенных патрубков, шайб, деталей машин

Примечания: 1. В латуни Л70 кроме перечисленных примесей должно быть не более 0,005% As, 0,005% Sn и 0,002% S.
2. В диамагнитных латунях содержание Fe должно быть не более 0,03%.

ЛА77-2	76,0— 79,0	—	—	—	1,75— 2,50	—	—	—	—	Для конденсаторных труб морских судов
ЛАЖ60-1-1	58,0— 61,0	—	0,75— 1,50	0,1— 0,6	0,75— 1,50	—	—	—	—	Для деталей мор- ских судов
ЛАН59-3-2	57,0— 60,0	—	—	—	2,50— 3,50	—	—	2,0— 3,0	—	Для деталей мор- ских судов и электро- машин. В химическом машиностроении
ЛЖМц59-1-1	57,0— 60,0	—	0,6— 1,2	0,5— 0,8	0,1—0,4	0,3— 0,7	—	—	—	Для деталей мор- ских судов, самолетов, вкладышей подшип- ников
ЛН65-5	64,0— 67,0	—	—	—	—	—	—	5,0— 6,5	—	Для манометриче- ских трубок и conden- саторных труб морских судов
ЛМц58-2	57,0— 59,0	—	—	1,0— 2,0	—	—	—	—	—	Для гаек, болтов, арматуры и других де- талей машин
ЛМцА57-3-1	55,0— 58,5	—	—	2,5— 3,5	0,5—1,5	—	—	—	—	Для деталей мор- ских и речных судов
ЛО90-1	88,0— 91,0	—	—	—	—	0,25— 0,75	—	—	—	Для конденсаторных труб, теплотехниче- ской аппаратуры
ЛО70-1	69,0— 71,0	—	—	—	—	1,0— 1,5	—	—	—	То же
ЛО62-1	61,0— 63,0	—	—	—	—	0,7— 1,1	—	—	—	»
ЛО60-1	59,0— 61,0	—	—	—	—	1,0— 1,5	—	—	—	»

Латунь	Cu	Pb	Fe	Mn	Al	Sn	Si	Ni	As	Примерное назначение
ЛС63-3	62,0— 65,0	2,4— 3,0	—	—	—	—	—	—	—	Для деталей часов; штулок
ЛС74-3	72,0— 75,0	2,4— 3,0	—	—	—	—	—	—	—	То же
ЛО64-2	63,0— 66,0	1,5— 2,0	—	—	—	—	—	—	—	Для полиграфиче- ских матриц
ЛО60-1	59,0— 61,0	0,6— 1,0	—	—	—	—	—	—	—	Для гаек, болтов, шестеренок, зубчатых колес, штулок
ЛО59-1	57,0— 60,0	0,8— 1,9	—	—	—	—	—	—	—	То же
ЛС59-1В	57,0— 61,0	0,8— 1,9	—	—	—	—	—	—	—	»
ЛЖС58-1-1	56,0— 58,0	0,7— 1,3	0,7— 1,3	—	—	—	—	—	—	Для деталей, произ- водимых механической обработкой
ЛК80-3	79,0— 81,0	—	—	—	—	—	2,5— 4,0	—	—	Для коррозионно- стойких деталей машин
ЛМш68-0,05	67,0— 70,0	—	—	—	—	—	—	—	0,025— 0,06	Для конденсаторных труб
ЛАМш77-2-0,05	76,0— 79,0	—	—	—	1,75— 2,5	—	—	—	0,025— 0,06	Для конденсаторных труб морских судов
ЛОМш70-1-0,05	69,0— 71,0	—	—	—	—	1,0— 1,5	—	—	0,025— 0,06	Для конденсаторных труб
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5	73,0— 76,0	—	—	0,3— 0,7	1,6—2,2	—	0,3— 0,7	2,0— 3,0	—	Для пружин, манометрических трубок

* Zn — остальное.

Сплавы	Cu	Al	Fe	Mn	Si	Sn	Pb	Ni	Примерное назначение
ЛК80 3Л	78—81	—	—	—	3,0—4,5	—	—	—	Для деталей арматуры, работающих при температуре до 250° С, а также в морской среде Для литых подшипников и втулок неответственного назначения
ЛКС80 3-3	77—81	—	—	—	2,5—4,5	—	2,5—4,5	—	
ЛАЖМц66 6 3-2	64—68	4—7	2,0—4,0	1,5—3,0	—	—	—	—	Для гаек нажимных винтов, массивных червячных винтов
ЛА67-2,5	66—68	2—3	—	—	—	—	—	—	Для коррозионностойких деталей
ЛАЖ60-1-1Л	58—61	0,8—1,5	0,8—1,5	0,1—0,6	—	0,2—0,7	—	—	Для арматуры втулок и подшипников
ЛМцНЖА60-2-1-1-1	58—62	0,5—1,0	0,5—1,1	1,5—2,5	—	—	—	0,5—1,5	Для деталей арматуры, не имеющих притираемых поверхностей
ЛС59-1ЛД	58—61	—	—	—	—	—	0,8—2,0	—	Для литья под давлением, а также других видов литья
ЛС59-1Л	57—61	—	—	—	—	—	0,8—2,0	—	Для фасонного литья арматуры, втулок, сепараторов, шариковых и роликовых подшипников
ЛМцОС58 2 2-2	57—60	—	—	1,5—2,5	—	1,5—2,5	0,5—2,5	—	Для шестерен
ЛМцС58 2 2	57—60	—	—	1,5—2,5	—	—	1,5—2,5	—	Для подшипников, втулок и других антифрикционных деталей
ЛМц58-2Л	57—60	—	—	1,0—2,0	—	—	—	—	Для упорных и опорных подшипников
ЛМцЖ55-3-1	53—58	—	0,5—1,5	3,4	—	—	—	—	Для деталей ответственного назначения, работающих при температурах до 300° С
ЛВОС	60—75	—	—	—	—	0,5—2,0	1—3	—	Для штуцеров гидросистемы автомобилей

* Zn — оцинкованное

20. Характеристики основных свойств двойных (простых) деформируемых латуней и температуры их обработки

Плотность, г/см ³		Температура плавления, °C		Теплопроводность, кал/(см с °C)		Коэффициент линейного расширения α 10 ⁻⁶		$\frac{\rho_{\text{ж.м.м}^2}}{\text{м}}$		σ_B , кгс/мм ²		δ , %		H_B , кгс/мм ²		E , кгс/мм ²		Температура горячей обработки, °C		Температура отжига, °C		Обрабатываемость резанием, %*	
										Твердая	Мягкая	Твердая	Мягкая	Твердая	Мягкая	Твердая	Мягкая						
3,85	1070	0,58	17,0	0,043	42—48	22—26	1—3	45—55	130—145	50—60	11 400	—	—	700—850	450—600	20							
3,78	1045	0,43	17,1	0,045	44—52	24—28	2—4	45—55	130—145	50—60	10 500	—	—	700—850	450—600	20							
3,75	1025	0,36	18,7	0,047	53—58	26—30	2—5	45—55	135—145	52—62	10 500	—	—	700—850	500—650	30							
3,66	1000	0,34	18,8	0,060	61—68	30—35	2—5	45—55	140—150	55—65	11 200	10 600	30	700—850	500—650	30							
3,61	950	0,29	18,9	0,069	63—70	30—35	3—6	50—60	145—155	55—65	11 500	—	—	700—850	550—650	30							
3,60	938	0,27	19,0	0,072	66—74	30—35	3—5	50—60	145—155	55—65	11 500	11 000	30	700—850	550—650	30							
3,44	906	0,26	20,5	0,074	68—75	38—45	2—4	40—50	160—165	58—68	11 600	—	—	750—880	550—650	35							
3,4	904	0,25	20,7	0,075	65—75	37—42	2—4	40—50	155—165	60—70	11 800	—	—	750—880	550—650	35							

* Данные в % по отношению к обрабатываемости латуни ЛС63-3.

Латуны	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °C	Теплопроводность, (кал/см·с·°C)	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$	ρ , Ом·мм ² /м	E , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	
							Твердая	Мягкая
ЛА77-2	8,6	1000	0,27	18,3	0,075	10 200	55—65	35—45
ЛАЖ60-1-1	8,2	904	0,18	21,6	0,09	10 500	70—75	40—45
ЛАН59-3-3	8,4	956	0,20	19,0	0,078	10 800	65—75	45—55
ЛЖМц59-1-1	8,5	890	0,24	22,0	0,093	10 600	68—75	42—48
ЛН 65-5	8,6	960	0,14	18,2	0,140	11 200	68—75	38—45
ЛМц58-2	8,4	880	0,17	21,2	0,108	10 500	68—75	38—45
ЛМцА57-3-1	8,1	870	0,16	20,1	0,121	10 400	70—75	40—50
ЛО90-1	8,75	1015	0,30	18,4	0,054	10 500	48—56	25—31
ЛО70-1	8,6	935	0,28	19,7	0,072	10 500	68—75	32—38
ЛО62-1	8,5	906	0,26	19,3	0,078	10 500	68—75	38—43
ЛО60-1	8,5	900	—	21,4	0,078	10 500	54—62	36—40
ЛС63-3	8,5	905	0,28	20,5	0,069	9 800	55—65	30—40
ЛС74-3	8,7	965	0,29	17,5	0,068	10 500	60—70	30—40
ЛС64-2	8,5	910	0,28	20,3	0,070	10 500	58—67	32—38
ЛС60-1	8,5	900	0,25	20,8	0,065	10 500	60—70	30—40
ЛС59-1	8,5	900	0,25	20,6	0,066	10 500	60—70	30—40
ЛС59-1В	8,5	900	0,25	20,6	0,066	10 500	60—70	30—40
ЛЖС58-1-1	8,4	895	0,26	20,4	0,07	10 600	65—75	35—45
ЛК80-3	8,2	890	0,21	17,0	0,20	10 400	58—65	28—34
ЛМш68-0,5	8,6	937	0,27	19,1	0,075	10 100	68—75	32—37
ЛАМш77-2-0,05	8,7	985	0,32	19,2	0,068	10 200	50—60	25—35
ЛОМш70-1-0,05	8,6	949	0,28	19,0	0,71	10 400	62—70	32—38
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5	8,6	1000	0,30 *	18,3	0,105 *	11 500	85—95	50—60

* Закаленная и состаренная при 450° С.

Латунь	δ, %		НВ, кгс/мм²		Температура горячей обработки, °С	Температура отжига, °С	Обрабатываемость резанием, %
	Твердая	Мягкая	Твердая	Мягкая			
ЛА77-2	7—11	45—52	150—160	45—55	720—770	600—650	30
ЛАЖ60-1-1	7—10	45—55	165—175	45—55	600—800	600—650	25
ЛАН59-3-3	7—11	40—50	175—185	110—120	700—750	600—650	15
ЛЖМц59-1-1	5—10	45—55	155—165	85—95	650—750	600—650	25
ЛН 65-5	3—6	60—65	160—170	55—65	750—87С	600—650	30
ЛМц58-2	5—10	38—45	170—180	80—90	650—750	600—650	22
ЛМцА57-3-1	4—8	40—50	175—185	85—95	650—750	600—650	
						600—700	
ЛО90-1	3—6	42—50	140—150	53—61	700—800	550—650	30
ЛО70-1	3—5	55—65	145—155	55—65	650—750	550—650	40
ЛО62-1	5—10	38—44	140—150	75—85	700—780	550—650	40
ЛО60-1	3—5	38—44	145—155	72—82	700—780	550—650	40
ЛС63-3	3—6	40—50	135—145	45—55	—	600—650	100
ЛС74-3	2—5	40—55	130—140	40—50	—	600—650	80
ЛС64-2	4—6	55—65	140—150	50—60	—	620—670	90
ЛС60-1	4—6	45—55	150—160	60—70	—	600—650	75
ЛС59-1	4—6	40—50	150—160	70—80	780—820	600—650	80
ЛС59-1В	4—6	40—50	150—160	70—80	640—780	600—650	80
ЛЖС58-1-1	2—5	35—45	160—170	75—85	—	600—650	70
ЛК80-3	3—5	53—60	170—190	95—105	30	750—850	500—600
ЛМш68-0 5	3—5	50—60	145—155	52—60	30	700—850	550—650
ЛАМш77-2-0,05	3—5	40—55	160—170	60—70	25	600—700	
ЛОМш70-1-0,05	2—4	50—60	140—150	50—58	30	700—850	550—650
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5	6,0—10,0	45—55	290—300 **	—	20	800—850 ***	

* После закалки и старения при 450° С.

** После деформации с обжатием 50% и старения при 350° С.

*** Термическая обработка латуни марки ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5: температура закалки 780° С, старение при 500° С, закалка, деформация 10% и старение при 450° С; то же, но после деформации на 50% старение при 350° С.

Примечание. Обрабатываемость резанием дана в % по отношению к обрабатываемости латуни ЛС63-3.

Характеристика	ЛК80-3Л	ЛКС80-3-3	ЛАЖМц66-6-3-2	ЛА67-2,5	ЛАЖ60-1-1Л	ЛМцНЖА60-2-1-1-1	ЛС59-1Л	ЛМцОС58-2-2-2	ЛМцС58-2-2	ЛМцЖ55-3-1	ЛВОС
Плотность, г/см ³	8,5	8,6	8,5	8,5	8,5	8,4	8,5	8,5	8,6	8,3	8,6
Температура плавления, °С	900	900	900	995	904	916	885	890	885	870	920
Теплопроводность, кал/(см·с·°С)	0,2	0,2	0,12	0,27	0,27	—	0,26	0,26	0,11	0,24	0,27
ρ , Ом·мм ² /м	0,2	0,2	—	0,08	0,09	—	0,068	0,12	0,11	0,12	0,09
$\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ²											
литые в земляные формы	25—35	25—30	55—65	28—34	34—44	—	—	30—40	30—40	40—55	25—30
литые в кокиль	30—50	30—40	60—70	35—45	40—48	38—46	35—40	30—35	35—45	55—65	—
центробежное литье	30—50	35—40	65—75	—	—	—	20	—	—	—	—
$\sigma_{\text{т}}$, кг/мм ² (литые в земляные формы)	12—20	14	39—35	15—18	25	18—20	15—18	23—29	22—28	17—24	—
Относительное удлинение δ , %	14—20	12—18	6—10	12—18	20—25	15—20	35—45	6—10	5—10	—	20—25
НВ, кгс/мм ²	100—110	90—100	150—170	85—95	85—95	105—115	80—90	90—100	85—95	100—110	70—80
Литейная усадка, %	1,7	1,7	1,8	1,25	1,7	1,7	2,2	1,8	2,0	1,6	1,8
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}/1^\circ \text{C}$	17,0	17,0	19,8	—	21,6	—	20,1	—	—	22	—
Коэффициент трения в паре со сталью	0,01	0,009	—	—	—	—	0,013	—	—	—	—
со смазкой	0,19	0,15	—	—	—	—	0,17	—	—	—	—
Обработываемость резанием *, %	30	50	25	30	30	20	80	35	60	25	60

* Данные в % по отношению к обрабатываемости латуни ЛС63 3

23. Плоский прокат из латуни

Полу- фабрикат	Состояние	ГОСТ	Латунь	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
Листы	Холодно- катаные	931—70	Л68, ЛМц58-2, ЛС59-1, Л90, Л63	0,4—12	600—2000	600—1200
»	Горяче- катаные	931—70	Л63, ЛО62-1, ЛС59-1	5—25	600—1000	600—1410
Полосы	Горяче- катаные и холодно- катаные	931—70	Л68, ЛМц58-2, ЛС59-1, Л90, Л63	0,4—10	400—500	Не менее 1500
»		4442—72	ЛО62-1, Л85, Л80 ЛС63-3	1,5—8,0	20—90	Не менее 1500
Ленты	Холодно- катаные	4442—72	ЛС63-3	0,1—8,0	10—150	
»	То же	2208—70	Л68, ЛМц58-2, Л63, Л80 Л90, Л85 ЛС59-1	0,05—2,0	10—60	

24. Круглый прокат из латуни

Полуфабри- кат	Состоя- ние	ГОСТ	Латунь	Диаметр наруж- ный, мм	Диаметр внутрен- ный, мм	Тол- щина стенки, мм
Трубы	Тянутые прессованные	494—69	Л63, Л68 ЛО70-1, Л63, ЛЖМц59-1	3—100		
Трубки радиаторные	Тянутые	529—41*	Л96	21— 195		
Трубки капиллярные	Тянутые	2624—67*	Л96	4—8		
Трубки тон- костенные	Тянутые	11383—65	Л96, Л68	1,2— 2,5	0,35— 0,50	
То же	Тянутые	5685—51	Л63 Л80	1,5— 28,0		0,15— 0,7
Прутки круглые, квадратные и шести- гранные	Прессованные тянутые	2060—73	Л63, ЛС59-1, ЛС63-3, ЛО62-1, ЛМц58-2, ЛЖМц59-1-1, ЛЖМц59-1-1, ЛЖМц59-1-1, ЛЖМц59-1-1, ЛЖС58-1-1	3—160		0,07— 0,6
Проволока	Тяннутая	16130—72	ЛО60-1	0,8— 10,0		
»		12920—67	Л63	0,8— 10,0		

ние стандартных деформируемых и литейных латуней. Основные сведения о свойствах, режимах литья и обработки латуней даны в табл. 20—22.

В машиностроении применяют круглый и плоский прокат из латуней (табл. 23, 24).

Бронзы

Бронзами называют двойные и многокомпонентные медные сплавы, в которых основными легирующими элементами являются различные металлы, кроме цинка. Медноникелевые сплавы выделены в отдельную группу материалов. Название бронзе дают по легирующим элементам (например, сплав меди с алюминием называют алюминиевой бронзой). Маркируют бронзы буквами Бр, за которой следуют заглавные буквы легирующих элементов и через дефис цифры — их процентное содержание.

Различают две группы бронз: оловянные, в которых преобладающим легирующим элементом является олово, и безоловянные (специальные).

По технологическому признаку бронзы делят на деформируемые и литейные. Первые легко поддаются штамповке, ковке, рифлению и другим видам обработки давлением, используемым при изготовлении изделий. Литейные бронзы предназначены для фасонных отливок. Бронзы по сравнению с латунью обладают более высокими прочностью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. Они весьма стойки на воздухе, в морской воде, растворах большинства органических кислот, углекислых растворах.

В качестве легирующих элементов в бронзах используют олово, алюминий, никель, марганец, железо, кремний, свинец, фосфор, бериллий, хром, цирконий и другие элементы. Бронзы, в которых легирующие элементы входят в твердый раствор, упрочняют деформационным наклепом. Последующим низкотемпературным отжигом (250—300° С) могут быть повышены их упругие свойства. Бронзы, содержащие бериллий, хром, цирконий и некоторые другие элементы с переменной их растворимостью в α -твердом растворе, упрочняют дисперсионным твердением. К этому классу относится также бронза марки БрАЖН10-4-4 (см. табл. 25).

Из перечисленных элементов олово, алюминий, никель и кремний главным образом повышают прочность, упругие свойства и коррозионную стойкость бронз, а в сочетании с другими элементами (свинцом, фосфором, цинком) также и антифрикционные свойства. Железо

25. Химический состав (%) и назначение оловянных деформируемых бронз (ГОСТ 5017—74)

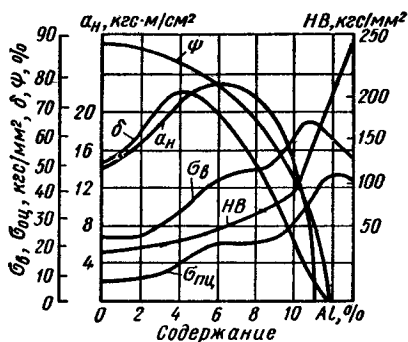
Бронза	Sn	P	Zn	Ni	Pb	Примерное назначение
БрОФ8,0-0,3	7,5—8,5	0,25—0,35	—	0,10—0,20	—	Для сеток бумагоделательных машин
БрОФ7-0,2	7,0—8,0	0,10—0,25	—	—	—	Для шестерен, зубчатых колес, втулок и прокладок высоконагруженных машин
БрОФ6,5-0,4	6,0—7,0	0,26—0,40	—	0,10—0,20	—	Для пружины, деталей машин, сеток бумагоделательных машин
БрОФ6,5-0,15	6,0—7,0	0,10—0,25	—	—	—	Для пружин, втулок, вкладышей подшипников
БрОФ4-0,25	3,5—4,0	0,20—0,30	—	—	—	Для трубок манометров
БрОЦ4-3	3,5—4,0	—	2,7—3,3	—	—	Для токоведущих пружин, контактов штепсельных разъемов, деталей химических аппаратов
БрОЦС4-4-2,5	3,0—5,0	—	3,0—5,0	—	1,5—3,5	Для втулок и прокладок автомобилей и тракторов
БрОЦС4-4-4	3,0—5,0	—	3,0—5,0	—	3,5—4,5	То же

* Cu — остальное.

и никель сильно измельчают зерно и повышают температуру рекристаллизации бронз. Марганец и кремний повышают их жаростойкость. Бериллий, хром и цирконий, особенно после закалки и старения, повышают прочностные свойства сплавов, одновременно незначительно снижая их электропроводность. Эти элементы существенно повышают жаропрочность бронз. Большинство бронз (за исключением алюминиевых) хорошо поддаются сварке и пайке твердыми и мягкими припоями.

Безоловянные бронзы по своим свойствам не уступают, а по некоторым превосходят оловянные бронзы, и поэтому их широко применяют в машиностроении и других отраслях промышленности. Бронзы

Рис. 12. Зависимость характеристик механических свойств деформированных алюминиевых бронз от состава



используют для изготовления арматуры, всевозможных шестерен, подшипников, втулок, баков, резервуаров и других ответственных деталей и узлов машин и аппаратов.

Свойства бронз определяются содержанием в них легирующих элементов. На рис. 12 приведены графики зависимости характеристик составов алюминиевых бронз от их состава.

Составы, назначение деформируемых оловянных бронз приведены в табл. 25, безоловянных в табл. 26, а литейных в табл. 27, 28.

Характеристики основных свойств, температуры литья, горячей обработки и термообработки приведены в табл. 29, 30. Как видно из приведенных данных, бериллиевая бронза в обогащенном состоянии — наиболее прочный сплав на медной основе. По своей твердости и упругим свойствам при обычной температуре она превосходит высококачественные стали. Особое положение занимают хромо- и кадмий-содержащие бронзы, которые являются наиболее высокоэлектропроводными и теплопроводными из стандартных бронз.

В машиностроении используют плоский и круглый прокат из бронз (табл. 31 и 32).

Плоский прокат поставляют в мягком (отожженном или закаленном), полутвердом (обжатие 10—30%), твердом (обжатие 30—50%) и особо твердом (обжатие более 60%) состоянии.

Бронза	Al	Be	Fe	Mn	Ni	Si	Ti	Примерное назначение
БрА5	4—6	—	—	—	—	—	—	Для пружин, мембран силь- фонов
БрА7	6—8	—	—	—	—	—	—	
БрАМц9-2	8—10	—	—	1,5—2,5	—	—	—	Для шестерен, втулок
БрАМц10-2	9—11	—	—	1,5—2,5	—	—	—	Для червячных винтов, ше- стерен втулок
БрАЖ9-4	8—10	—	2—4	—	—	—	—	Для шестерен, седл клапа- нов, гаек нажимных винтов
БрАЖМц10-3-1,5	9—11	—	2—4	1—2	—	—	—	Для втулок, шестерен, под- шипников
БрАЖН10-4-4	9,5—11	—	3,5—5,5	—	3,5—5,5	—	—	Для направляющих втулок, клапанов, шестерен и других деталей ответственного назна- чения
БрВ2	—	1,8—2,1	—	—	0,2—0,5	—	—	Для пружин и упругих эле- ментов
БрВНТ1,7	—	1,60—1,85	—	—	0,2—0,4	—	0,1—0,25	То же
БрВНТ1,9	—	1,85—2,10	—	—	0,2—0,4	—	0,10—0,25	Для пружин и других упругих элементов
БрКН1-3	—	—	—	0,1—0,4	2,4—3,4	0,6—1,1	—	Для антифрикционных дета- лей, баков, резервуаров
БрКМц3-1	—	—	—	1—1,5	2,75—3,5	—	—	Для пружин, втулок, вкла- дышей подшипников
БрМц5	—	—	—	4,5—5,5	—	—	—	Для топок котлов
БрКд1 *	—	—	—	—	—	—	—	Для коллекторов и троллей- ных проводов
БрХ0,7 **	—	—	—	—	—	—	—	Для сварочных электродов, дисков электродов, электро- технических контактов, жаро- прочных обмоток и деталей

* Химический состав по ГОСТ 4134—75, Cd — 0,9—1,2%

** Химический состав по ТУ 48-21-163—72, Cr — 0,4—1%.

ГОСТ	Марка	Химический состав (основные элементы), %					Вид литья	σ _в , кгс/мм ²			δ, %	НВ, мм ²	Область применения
		Pb	Zn	Sn	Ni	Cu		не менее					
613—65	Бр.ОЦСНЗ-7-5-1	3,0—6,0	6,0—9,5	2,5—4,0	0,5—2,0	Остальное	В кокиль	21	5	60	Арматура, работающая в морской и пресной воде, маслах, в водяном паре, под давлением до 25 кгс/см ² ; антифрикционные детали		
							В землю	18	8	60			
613—65	Бр.ОЦСЗ-12-5	3,0—6,0	6,0—15,0	2,0—3,5	—	То же	В кокиль	21	5	60	Арматура, работающая в пресной воде, в водяном паре под давлением до 25 кгс/см ² ; антифрикционные детали		
							В землю	18	8	60			
613—65	Бр.ОЦС5-5-5	4,0—6,0	4,0—6,0	4,0—6,0	—	»	В кокиль	18	4	60	Антифрикционные детали		
							В землю	15	6	60			
613—65	Бр.ОЦС4-4-17	14,0—20,0	2,0—6,0	3,5—5,0	—	»	В кокиль	—	—	—			
							В землю	15	5	60			
613—65	Бр.ОЦСЗ,5-7-5	3,0—6,0	6,0—9,5	3,0—4,5	—	»	В кокиль	18	4	60			
							В землю	15	6	60			
493—54	Бр.С30	27—33	—	—			В кокиль	3	5	14	Сальники		
493—54**	БрСН60-2,5	57—63	—	—	6,6—1,0		То же	6	4	25	Вкладыши подшипников и другие антифрикционные детали		

28. Литейные безоловянные бронзы (ГОСТ 493—54**)

Бронза	Химический состав * (основные компоненты), %						Виды отливок	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	HB
	Al	Fe	Mn	Ni	Pb	Cu				
БрАМц9 2л	8—10	—	1,5—2,5	—	—	Осталь- ное	В кокиль	35—45	18—22	70—90
БрАМц10 2	9—11	—	1,5—2,5	—	—	То же	В кокиль и землю	45—55	10—14	100—120
БрАЖ9-4Л	8—10	2—4	—	—	—	»	В кокиль В землю	35—45 45—55	8—12 10—14	90—110 90—110
БрАЖМц10 3-1,5	9—11	2—4	1—2	—	—	»	В кокиль	45—55	10—14	110—130
БрАЖС7-1,5-1,5	6—8	3,5—5,5	—	—	1—1,5	»	В землю	25—35	15—20	80—100
БрАЖН10 4-4Л	9,5—11	3,5—5,5	—	3,5—5,5	—	»	В кокиль	55—65	3—8	160—180
БрАЖН11 6 6	10,5—11,5	5—6,5	—	5—6,5	—	»	То же	55—65	1—3	240—260
БрС30	—	—	—	—	27—33	»	»	≥ 6	≥ 4	≥ 25
БрСН60-2,5	—	—	—	2,25—2,75	57—63	»	»	≥ 3	≥ 5	≥ 14

* Cu — остальное

29. Оловянистые деформируемые бронзы в температуры их обработки

Ровна	Плотность, г/см ³	Температура начала плавления, °С	ρ , (Ом·мм ²)/м	Теплопроводность, кал/(см·с·°С)	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°С	E , кгс/мм ²	σ_{B1} , кгс/мм ²	δ , %	HV	Температура горячей обработки, °С	Температура отжига, °С
8-0,3	8,6	880	0,175	0,098	17,0	11 800	$\frac{40-50}{100-120}$	$\frac{55-65}{1-2}$	$\frac{90-100}{180-240}$	—	600—650
7-0,2	8,6	900	0,17	0,1	17,0	11 500	$\frac{38-45}{90-110}$	$\frac{55-65}{1-2}$	$\frac{85-95}{175-230}$	—	600—650
6,5-0,4	8,7	995	0,16	0,17	17,1	11 200	$\frac{30-45}{70-80}$	$\frac{60-70}{7-10}$	$\frac{70-90}{170-220}$	700—800	600—650
6,5-0,15	8,8										
4-0,25	8,9	1060	0,09	0,2	17,6	10 000	$\frac{30-38}{50-70}$	$\frac{40-58}{6-10}$	$\frac{55-70}{160-170}$	700—800	600—650
4-3	8,8	1045	0,09	0,2	18,0	12 400	$\frac{30-40}{50-60}$	$\frac{35-45}{3-6}$	$\frac{50-70}{150-170}$	700—800	550—650
С4-4-2,5	8,9	1018	0,09	0,2	18,2	7 500	$\frac{30-35}{55-65}$	$\frac{35-45}{2-4}$	$\frac{50-70}{150-170}$	—	550—650
С4-4-4	9,1	1015	0,09	—	18,1	7 200	$\frac{32-36}{50-60}$	$\frac{30-40}{1-2}$			

Примечание. В числителе данные для мягкого (отожженного), в знаменателе — для твердого состояния.

30. Деформируемые безоловянные бронзы

Бронза	Плотность, г/см ³	Температура на- чала плавления, °С	ρ , Ом мм ² /м	Темперовод- ность, (см °С)	Коэффициент ли- нейного распы- рения $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°С	E , кгс/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кгс/мм ²	δ , %	НВ	Температура го- рячей обработ- ки, °С	Температура от- жига, °С
БрА5	8,2	1060	0,10	0,25	15,6	12 000	$\frac{36-44}{70-80}$	$\frac{60-70}{4-6}$	$\frac{55-65}{190-210}$	750—850	600—700
БрА7	7,8	1040	0,11	0,19	17,8	12 000	$\frac{44-50}{95-103}$	$\frac{65-75}{2-4}$	$\frac{65-75}{200-220}$	750—850	600—700
БрАМц9-2	7,6	1060	0,11	0,17	17,0	9 200	$\frac{40-50}{60-80}$	$\frac{20-40}{4-5}$	$\frac{110-130}{160-180}$	750—850	650—750
БрАЖ9-4	7,5	1040	0,12	0,14	16,2	11 600	$\frac{40-50}{50-70}$	$\frac{35-45}{4-6}$	$\frac{100-120}{160-200}$	—	—
БрЖМц10-3-1,5	7,5	1045	0,19	0,14	16,1	10 000	$\frac{40-50}{60-70}$	$\frac{20-30}{9-12}$	$\frac{125-140}{160-200}$	750—850	650—750
БрАЖН10-4-4	7,5	1084	0,19	0,18	17,1	11 500	$\frac{45-55}{75-83}$	$\frac{35-45}{9-15}$	$\frac{130-150}{180-220}$	800—900	700—750
БрБ2	8,2	955	0,07	0,20	16,6	13 100 *	$\frac{40-60^{**}}{60-95}$	$\frac{40-50}{2-4}$	$\frac{130-150}{350^{**}}$	750—800	$\frac{530-650}{790^{**}}$ 320 **
БрБНТ1,9	8,3	860	0,09	0,24	16,5	13 000 *	$\frac{40-60^{**}}{60-90}$	$\frac{30-50}{1-3}$	$\frac{120-140}{340^{**}}$	700—800	$\frac{530-650}{780^{**}}$ 320 **

Бронза	Плотность,	Температура чала плавления °C	ρ , Ом·мм ² /м	Теплопровод- ность, кал/(см·с·°C)	Коэффициент нейного рас- тения $\alpha \cdot 10^{-6}$ 1/°C	E , кгс/мм ²	$\sigma_{в}$, кгс/мм ²	δ , %	HB	Температура рачей обра- ки, °C	Температура жнга, °C
БрБНТ 1,7	8,2	865	0,09	0,23	17,0	12 800 **	$\frac{40-50}{60-90}$		$\frac{80-120}{150-240 **}$	650—700	780 ** 300 **
БрМц5	8,6	1047	0,20	0,26	20,4	10 500	$\frac{30-36}{50-60}$	$\frac{35-45}{150-170}$	$\frac{70-90}{150-170}$	750—850	800 ** 300 **
БрКМц3-1	8,4	—	0,25	0,11	18,0	11 500	$\frac{35-40}{65-75}$	$\frac{50-60}{6-8}$	$\frac{70-90}{150-170}$	750—850	700—750
БрКН 1-3	8,8	1084	0,05	—	18,0	—	$\frac{40-45}{50-60}$	$\frac{25-30}{6-8}$	$\frac{80-100}{150-200}$	800—910	840 ** 450 **
БрКд 1	8,9	1076	0,02	0,82	—	—	$\frac{26-34}{50-60}$	$\frac{35-45}{1,5-3,0}$	$\frac{50-70}{95-115}$	750—800	950—1000
БрХ0,7	8,9	1084	0,02	0,80	—	13 800 **	$\frac{22-25}{45-50}$	$\frac{25-35}{4,6}$	$\frac{50-70}{130-140}$	850—950	1000 ** 450 **

*¹ В числителе данные для мягкого состояния, а знаменателе — для твердого состояния.

*² Значения после закалки с 790° С и старения при 320° С.

*³ Температура закалки.

*⁴ Значения после закалки с 1000° С, деформации и старения при 450° С.

*⁵ Температура старения.

31. Плоский прокат из бронзы

Полу- фабри- кат	Состоя- ние	Бронза	ГОСТ	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
По- лосы	Горя- чека- танные	БрАМц9-2	1595—71	1,0—22,0	50—300	1000— 1500
		БрОФ6,5-1,5	1761—70*	1,0—10,0	40—300	400— 2500
		БрОЦ4-3	4748—70*	1,0—10,0	40—300	400— 1600
		БрКМц3-1	1789—70	0,15—6,0	40—300	200— 1500
	Холод- нока- танные	БрБ2	15885—70	1,58—3,0	50—200	≥1 500
БрОЦС4-4-2,5		1048—70*	0,1—2,0	10—300	≥10 000	
БрА7		4748—70*	0,05—2,0	10—300	≥2 000	
БрКМц3-1		1789—70*	0,02—6,0	10—300	≥2 000	
БрБ2						
БрБНТ1,9						
БрБНТ1,7		15885—70	1,0—3,0	10—200	≥5 000	
БрОЦС4-4-2,5	1595—71	0,4—1,0	10—300	≥4 000		
БрАМц9-2						

32. Круглый прокат из бронзы

Полуфабрикат	Состояние	Бронза	ГОСТ	Наружный диаметр, мм	Длина, мм
Трубы	Прессованные	БрАЖМц10-3-1,5 БрАЖН10-4-4	1208—73	42—300 *	500—4000
Прутки круглого, квадратного и шестигранного сечения То же » Прутки круглого и квадратного сечения Проволока	Тянутые **	БрАМц9-2 БрАЖ9-4 БрАЖМц10-3-1,5 БрАЖН10-4-4	1628—72	5—160	500—5000
		БрКМц3-1 БрКН1-3 БрОЦ4-3 БрБ2	6511—60 15835—70 10025—62	5—120 5—100 6—110	1000—4000 700—4000 700—5000
		БрОФ6,5-1,5 БрОФ7-0,2			
	—	БрОЦ4-3	5221—72	0,1—12,0	
	Тянущая	БрКМц3-1	5222—72	0,1—10,0	
»	То же	БрБ2	15834—70	0,06—12,0	

* Толщина стенки 5—50 мм

** Круглого сечения прессованные и тянутые.

Медно-никелевые сплавы

Медные сплавы, в которых основным легирующим элементом является никель, называют медно-никелевыми сплавами.

Отличительной особенностью этой группы сплавов является их высокая коррозионная стойкость и особые электрические свойства, зависящие, как и прочность, от содержания никеля (рис. 13).

По назначению медно-никелевые сплавы можно разделить на конструкционные и электротехнические. К первой группе относятся высокопрочные и коррозионностойкие сплавы типа мельхиор, нейзильбер и куньяль. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляют алюминий, марганец, цинк и железо. К медно-никелевым сплавам можно отнести также твердый припой марки МНЖКТ 5-1-0,2-0,2. Введение алюминия в медно-никелевые сплавы делает их дисперсно-твердеющими (сплавы куньяль) и повышает коррозионную стойкость.

Цинк сообщает медно-никелевым сплавам серебристый цвет и снижает их стоимость. Добавки железа и марганца к конструкционным медно-никелевым сплавам увеличивают их стойкость против ударной коррозии. Мельхиор и нейзильбер хорошо деформируются.

В группу электротехнических входят сплавы типа ТП и ТБ, а также копель, константан и манганин, обладающие повышенным электросопротивлением и определенными термоэлектрическими свойствами. Из сплавов ТП и ТБ изготовляют компенсационные провода для термомпар. Копель и константан могут быть использованы для термопар и реостатов. Константан, обладающий низким температурным коэффициентом электросопротивления (ТКС) и повышенной тензочувствительностью, применяют для тензорезисторов. Манганин, имеющий почти нулевой стабильный ТКС и малую Т-ЭДС в паре с медью, используют для изготовления прецизионных резисторов.

Добавки марганца и железа в электротехнические сплавы существенно меняют их электросопротивление и ТКС.

Медно-никелевые сплавы хорошо свариваются и паяются (кроме тех, в которых содержится алюминий) твердыми и мягкими припоями.

Состав, физические и некоторые технологические свойства медно-никелевых сплавов приведены в табл. 33—35.

В машиностроении применяют плоский и круглый прокат из медно-никелевых сплавов (табл. 36 и 37).

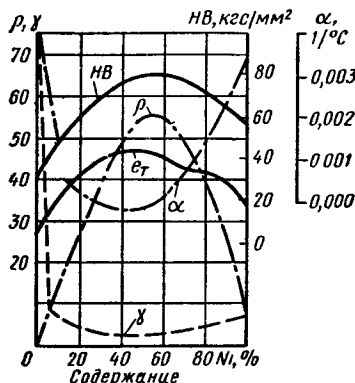


Рис. 13. Зависимость характеристик свойств медно-никелевых сплавов от химического состава

Сплав	Марка	Ni	Mn	Fe	Другие легирую- щие элементы	Cu	Назначение
Мель- хиор	МНЖМц30-0,8-1	29,0—33,0	0,5—1,0	0,5—1,0	.	Осталь- ное	Для конденсаторных труб и труб термостатов
То же	МН 19	18,0—20,0	—	—			Для деталей машин, ме- дицинского инструмента, сеток, деталей точной меха- ники, бытовой посуды, хи- мической аппаратуры
Нейзиль- бер	МНЦ15-20	13,5—16,5	—	—	18,0— 22,0		Для деталей приборов, электромашин и радиоаппа- ратуры, медицинского ин- струмента, арматуры и по- суды
Нейзиль- бер свин- цовистый	МНЦС16-29-1,8	15,0—16,5	—	—	Pb 1,6—2,0; Zn остальное	51,0— 55,0	Для деталей часов и при- боров
Куниаль А	МНА13-3	12,0—15,0	—	—	Al 2,3—3,0	Осталь- ное	Для деталей машин по- вышенной прочности
Куниаль Б	МНА6-1,5	5,5—6,5	—	—	Al 1,2—1,8		Для пружин и других изделий электротехниче- ской промышленности
ТП	МН 0,6	0,57—0,63	—	—			Для компенсационных проводов платино-платино- родневых термопар

Сплав	Марка	Ni	Mn	Fe	Другие легиру- ющие элементы	Cu	Назначение
ТВ	МН 16	15,3—16,3	—	—			Для компенсационных проводов к термопаре платина—золото
Копель	МНМц43-0,5	42,5—44,0	0,1—1,0	—			Для термопар и компенсационных проводов, для точных электросопротивлений
Кон- стантан	МНМц40-1,5	39,0—41,0	1,0—2,0	—			Для реостатов, термопар, нагревательных приборов с рабочей температурой до 500° С, для тензорезисторов
Манган- ин	МНМц3-12	2,5—3,5	11,5—13,5	—		Осталь- ное	Для электротехнических измерительных приборов и сопротивлений
То же	МНМцАЖ3-12-0,3-0,3	2,5—3,5	11,5—13,5	0,2—0,5	Al 0,2—0,4		Для катушек точных электросопротивлений
Сплав	МНЖКТ5-1-0,2-0,2	5,5—6,5	0,3—0,8	1,0—1,4	Ti 0,1—0,3, Si 0,15—0,3		В качестве твердого припоя для сварки, наплавки и пайки
»	МНЖ5-1	5,0—6,5	0,3—0,8	1,0—1,4			Для компенсационных труб и сварных конструкций в судостроении

34. Медно-никелевые сплавы

Сплав	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °C	Коэффициент линейного расширения α 10 ⁻⁶ , 1/°C	ρ, Ом·мм ² /м	Температурный коэффициент электрического сопротивления (при 20° C), 1/°C	Температура проводимости, кал/(см с · °C)	E, кгс/мм ²	σ _B , кгс/мм ²	δ, %	Температура горячей обработки, °C	Температура отжига, °C
МНЖМц30-0,8	8,9	1230	16	0,42	0,0012	0,089	14 500	35—45 55—65	40—50 3—5	850—960	750—810
МН19	8,9	1190	16	0,287	0,0003	0,092	14 000	30—40 50—60	35—40 3—5	900—1030	600—780
МНЦ15-20	8,7	1080	16,6	0,26	0,0002	0,085	14 000	40—45 60—72	40—50 2—3	800—970	700—750
МНЦС16-29-1,8	8,8	1120	—	—	—	—	12 700	35—45 60—70	40—45 2—4	—	700—750
МНН13-3	8,5	1120	—	—	—	—	—	38—47 90—95	10—15 2—4	900—1000	900 *; 500 **
МНН16-1,5	8,7	1145	—	—	—	—	—	36—45 65—75	30—40 4—6	800—900	900 *, 500 **
МНО6	8,96	1084	—	0,031	0,0031	0,65	12 000	24—30 38—45	32—40 3—6	800—930	500—600

Сплав	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °С	Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	ρ , Ом·мм ² /м	Температурный коэффициент электросопротивления (при 20°С) 1/°С	Теплопроводность, кал/(см с·°С)	E , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	Температура горячей обработки, °С	Температура отжига, °С
МН 16	9,02	1170	15,3	0,223	0,0027	—	8 000	$\frac{30-38}{50-60}$	$\frac{25-35}{4-6}$	950—1030	700—780
МНЖ5-1	8,7	1120	16,4	0,07	0,0015	0,31	—	$\frac{22-26}{40-50}$	$\frac{50-60}{5-10}$	900—1000	600—650
МНМц43-0,5	8,9	1290	14,0	0,49	0,00014	0,058	12 000	$\frac{38-46}{60-70}$	$\frac{35-42}{3-4}$	1000—1150	800—850
МНМц40-1,5	8,9	1260	14,4	0,48	0,00002	0,05	16 600	$\frac{38-48}{62-72}$	$\frac{25-30}{2-3}$	1000—1150	800—850
МНМц3-12	8,4	1010	16,0	0,435	0,00003	0,052	12 650	$\frac{40-55}{80-90}$	$\frac{30-35}{2-4}$	750—850	700—750

* Температура закалки.

** Температура отпуска.

Примечание. В числителе данные для мягкого состояния, в знаменателе — для твердого состояния

35. Электрические и термоэлектрические свойства константана (МНМц40-1,5) и копеля (МНМц43-0,5)

Температура, °С	Удельное электросопротивление при 20° С, Ом·мм ² /м		Температурный коэффициент электросопротивления $\alpha \cdot 10^{-3}$, 1/°С		Термоэлектродвижущая сила в паре с платиной при температуре холодного спая 0° С, мВ	
	Константан	Копель	Константан	Копель	Константан	Копель
0	0,483	0,504	—	—	0	0
100	0,482	0,497	20,6	120,0	-3,4	+4,0
200	0,483	0,491	20,7	110,0	-7,2	+8,5
300	0,485	0,486	41,4	60,0	-11,3	+13,6
400	0,488	0,483	72,0	1,0	-15,5	+18,6
500	0,497	0,483	112,5	40,0	-19,9	+23,8
600	0,503	0,485	182,0	60,0	-24,5	+27,7
700	0,509	0,488	129,0	80,0	-29,1	+34,6
800	0,515	0,492	137,5	—	-33,7	+40,2

36. Плоский прокат из медно-никелевых сплавов

Полуфабрикат	Состояние	Сплав	ГОСТ	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
Полосы	Горячекатаные	МН19	5063—73	0,5—10,0	40—500	400—2 000
	Холоднокатаные	МНЖМц30-1-1 МНЦ15-20				
Ленты	То же	МН19 МНЦ15-20	5187—70*	0,1—2,0	6—300	≥5 000
»	»	МН19	1018—54	0,28—0,50	18—20	≥1 500
»	»	МНМц40-1,5	5189—75	0,1—2,0	6—300	≥10 000

37. Круглый прокат из медно-никелевых сплавов

Полуфабрикат	Состояние	Сплав	ГОСТ	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина, мм
Трубы	Тянутые	МНЖМц30-1-1	10092—75	10—35	0,8—4,0	500—6000
»	»			6—260	1—10	500—5000
»	Прессованные	МНЖ5-1	17217—71	115—275	5—60	
Проволока	Тянутая	МНЦ15-20	5220—71	0,2—5,0		
То же	То же	МНМц40-1,5	5307—69	0,02—5,0		
»	»	МНМц3-12	10155—62	0,02—6,0		
»	»	МНМцАЖ3-12-0,3-0,3 МН0,6	1791—67	0,2—2,5		

Никель

Никель — прочный, высокопластичный, ферромагнитный металл, отличающийся высокой коррозионной стойкостью, повышенной температурой плавления, низкой упругостью пара и высокой каталитической способностью. Эти ценные свойства никеля обуславливают его широкое применение в машиностроении, электротехнике, приборостроении, медицинской аппаратуре и других отраслях техники.

Никель применяют в качестве антикоррозионных и декоративных покрытий, а также для фасонных отливок. Значительную часть никеля используют для изготовления сплавов и легирования сталей. Промышленность выпускает 6 марок металлургического (катодного) никеля, 4 марки полуфабрикатного никеля общего назначения и 3 марки анодного никеля (табл. 38). Металлургический никель поставляют в виде катодов, гранул, слитков, ронделей и порошков. Из полуфабрикатного никеля готовят листы, полосы, ленты, прутки, проволоку и трубы.

Анодный никель изготавливают двух видов: непассивирующийся — марки НПАН и обычный — марок НПА-1 и НПА-2. Преимущество непассивирующихся анодов — то, что они равномерно растворяются при электролизе без образования шлама.

Характеристики основных физико-механических свойств,
температуры литья и обработки никеля

Кристаллическая решетка	Кубическая гранцентри- рованная ($a = 3,517 \text{ \AA}$)
Атомный номер	28
Атомная масса	58,69
Атомный радиус, $\text{\AA}$	2,49
Плотность, г/см^3	8,9
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	1455
Температура кипения, $^{\circ}\text{C}$	2990
Скрытая теплота плавления, кал/г	73,8
Скрытая теплота испарения, кал/г	1450
Электродный потенциал, В	0,231
Упругость пара, мм рт. ст., при:	
1175 $^{\circ}\text{C}$	$1 \cdot 10^{-8}$
1371 $^{\circ}\text{C}$	$1 \cdot 10^{-8}$
1510 $^{\circ}\text{C}$	$1 \cdot 10^{-2}$
1679 $^{\circ}\text{C}$	$1 \cdot 10^{-1}$
2730 $^{\circ}\text{C}$	760
Удельная теплоемкость, $\text{кал/(г} \cdot ^{\circ}\text{C)}$, при:	
20 $^{\circ}\text{C}$	0,105
100 $^{\circ}\text{C}$	0,112
300 $^{\circ}\text{C}$	0,137
800 $^{\circ}\text{C}$	0,148
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, $1/^{\circ}\text{C}$, при	
25—100 $^{\circ}\text{C}$	13,3
25—300 $^{\circ}\text{C}$	14,4
25—600 $^{\circ}\text{C}$	15,5
25—900 $^{\circ}\text{C}$	16,3
Теплопроводность, $\text{кал/(см} \cdot \text{с)}$ (никель высокой чистоты), при:	
20 $^{\circ}\text{C}$	0,22
100 $^{\circ}\text{C}$	0,198
200 $^{\circ}\text{C}$	0,176
300 $^{\circ}\text{C}$	0,153
400 $^{\circ}\text{C}$	0,142
500 $^{\circ}\text{C}$	0,149

Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м:	
Ni ≥ 99,95%	0,06844
Ni ≥ 99,4%	
твёрдый никель	0,09
мягкий никель	0,087
Температурный коэффициент электросопротивления α·10 ⁻² , 1/°C, при температурах 0—100° C:	
Ni ≥ 99,94%	6,7
Ni ≥ 99,4%	
мягкий никель	4,6
твёрдый никель	4,7
Мощность теплового излучения, Вт/см ² , при:	
740° C	1,0
830° C	1,5
900° C	2,0
1000° C	3,0
1100° C	4,6
Поверхностное натяжение, дин/см, при 1455° C	1350
Магнитострикция (никель поликристаллический)	—32—10°
Точка Кюри, °C, при Ni > 99,94%	360—380
Начальная магнитная проницаемость, Гс/Э, для никеля высокой чистоты:	
твёрдого	15
полутвёрдого	20—300
очень мягкого	500—600
Козрцитивная сила, Э:	
Ni > 99,94%	2,73
Ni > 99,4%	3,4
Намагниченность насыщения (при 20° C), Гс	6100
Удельная электронная эмиссия, А/см ² , при:	
730° C	2·10 ⁻¹⁰
1230° C	2·10 ⁻⁶
НВ, кгс/мм ² :	
после обжатия на:	
70%	220
25%	180
12%	150
в горячекатаном состоянии	90—120
литого никеля	100—150
после отжига при 800° C	80—90
Предел прочности на растяжение, кгс/мм ² , при:	
17° C	45
—196° C	63
—253° C	79
Относительное удлинение, %, при:	
17° C	35
—196° C	46
—253° C	48
Относительное сужение, %, при:	
17° C	77
—196° C	89
—253° C	69
Длительная прочность, кгс/мм ² , при:	
700° C	1,0
800° C	0,4—0,5
Модуль Юнга, кгс/мм ² , при 20° C	18 000—22 700
Модуль сдвига, кгс/мм ² , при:	
27° C	7300
800° C	4940
Температура рекристаллизации, °C, после предварительной деформации 50—60%, при выдержке 10—30 мин:	
99,8% Ni	640
99,91% Ni	480
Ni + 0,3% Mg	620
Ni + 0,7% Mg	640
Температура отжига, °C	750—900
Температура литья, °C	1500—1575
Температура горячей деформации, °C	1250—800

Марка	Ni + Co (не менее)											Примерное назначение
		Co	C	Mg	Al	Si	P	S	Mn	Fe	Cu	
Никель металлургический (ГОСТ 849—70)												
Н-0	99,99	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	Для анодов, полу- фабрикатов и никеле- вых сплавов высокой чистоты
Н-1	99,93	0,10	0,01	0,001	—	0,002	0,001	0,001	—	0,01	0,015	
Н-1у	99,93	0,10	0,01	0,001	—	0,002	0,001	0,001	—	0,01	0,02	Для пластичных вы- соколегированных ни- келевых сплавов и ста- лей
Н-2	99,8	0,15	0,02	—	—	0,002	—	0,003	—	0,04	0,04	
Н-3	99,6	0,7	0,1	—	—	—	—	0,03	—	—	0,6	Для легирования стали, твердых сплавов
Н-4	97,6	0,7	0,15	—	—	—	—	0,04	—	—	1,0	
Никель полуфабрикатный (ГОСТ 492—73)												
НП1	99,9	—	0,01	0,01	—	0,03	0,001	0,001	0,002	0,04	0,015	Для изделий маши- ностроительной и при- боростроительной про- мышленности, хими- ческой аппаратуры
НП2	99,5	—	0,10	0,10	—	0,15	0,002	0,005	0,05	0,10	0,10	
НП3	99,3	—	0,15	0,10	—	0,15	—	0,015	0,20	0,15	0,15	Для деталей маши- ностроения неотве- ственного назначения
НП4	99,0	—	0,20	0,10	—	0,15	—	0,015	0,20	0,30	0,15	
Никель анодный (ГОСТ 492—73)												
НПАН *	99,4	—	—	—	—	0,03	—	0,002— 0,1	—	0,10	0,01— 0,10	В качестве непас- сивирующихся анодов для электролитиче- ских покрытий
НПА1	99,7	—	0,02	0,10	—	0,03	—	0,005	—	0,10	0,10	
НПА2	99,0	—	0,10	0,10	—	0,2	—	0,005	—	0,25	0,15	Для электролити- ческих покрытий

Марка	Ni + Co (не менее)	Примеси (не более)							Примерное назначение
		Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi	
Никель металлургический (ГОСТ 849—70)									
H-0	99,99	0,0005	0,0005	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	Для анодов, полу- фабрикатов и никеле- вых сплавов высокой чистоты
H-1	99,93	0,0008	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	
H-1у	99,93	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	Для пластичных вы- соколегированных ни- келевых сплавов и ста- лей
H-2	99,8	0,005	—	—	—	—	—	—	
H-3	99,6	—	—	—	—	—	—	—	Для легирования стали, твердых сплавов
H-4	97,6	—	—	—	—	—	—	—	
Никель полуфабрикатный (ГОСТ 492—73)									
НП1	99,9	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	Для изделий маши- ностроительной и при- боростроительной про- мышленности, хими- ческой аппаратуры
НП2	99,5	0,007	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	
НП3	99,3	—	—	—	—	—	—	—	Для деталей маши- ностроения неотвеч- ственного назначения
НП4	99,0	—	—	—	—	—	—	—	
Никель анодный (ГОСТ 492—73)									
НПАН *	99,4	—	—	—	—	—	—	—	В качестве непассивирующихся анодов для электролитиче- ских покрытий
НПА1	99,7	—	—	—	—	—	—	—	
НПА2	99,0	—	—	—	—	—	—	—	Для электролити- ческих покрытий

* Легирующая добавка — 0,03—0,3% O₂

* Легирующая добавка — 0,03—0,3% O₂

Характеристики механических, электрических и термоэлектрических свойств никеля приведены в табл. 39, 40.

39. Характеристики механических свойств никеля при комнатной и низких температурах

Характеристика	Температура, °С		
	+17	—196	—253
Предел прочности при растяжении, кгс/мм ²	45	63	79
Относительное удлинение, %	35	46	48
Относительное сужение, %	77	89	69

40. Характеристики электрических и термоэлектрических свойств никеля

Температура, °С	Удельное электро-сопротивление при 20° С, Ом мм ² /м	Температурный коэффициент электро-сопротивления, 1/°С	Т-ЭДС в паре с платиной при температуре холодного спая (0° С), мВ
0	0,082	—	0
100	0,120	0,00463	—1,85
200	0,175	0,00458	—3,43
300	0,258	0,00322	—4,86
400	0,330	0,00279	—5,77
500	0,370	0,00121	—6,50
600	0,405	0,00095	—7,30
700	0,440	0,00087	—8,30
800	0,473	0,00075	—9,65
900	0,510	—	—
1000	0,550	—	—

Примечание. Химический состав, %: 99,35 Ni, 0,13 Cu, 0,28 Fe, 0,17 Si, 0,20 Co; 0,04 C

На рис. 14—22 показано, как механические и технологические свойства никеля зависят от его чистоты. Вредное влияние на прочность, пластичность и обрабатываемость давлением в горячем состоянии никеля оказывают нерастворимые примеси, такие, как сера (особенно), смут, сурьма, цинк и свинец. Сера обычно находится в никеле в виде сульфида Ni_3S_2 , образующего с ним эвтектику с температурой плавления 625° С. Эта эвтектика, располагаясь по границам зерен, вызывает рыхлость никеля. Наличие в никеле высокой чистоты даже 0,02% S может привести к резкой потере пластичности никеля после нагрева при температуре 600—800° С. Сера может попасть в никель как во время плавления, так и при нагреве заготовок перед горячей обработкой в серосодержащей среде. При нагреве в мазутных печах нельзя пользоваться топливом, содержащим более 0,5% серы.

Кислород, присутствующий в никеле в малых количествах в виде окиси никеля, не снижает механических свойств. Однако при нагреве

изделий из кислородосодержащего никеля в водороде или других восстановительных газах в них могут образоваться мелкие пузырьки и трещины. Для предохранения от окисления плавку никеля ведут

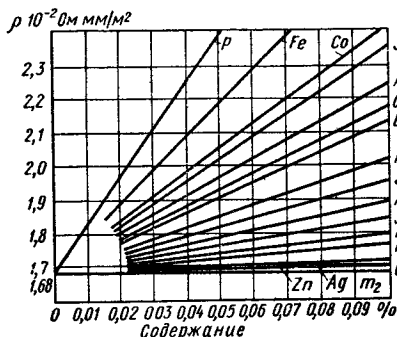


Рис. 14. Зависимость удельного электросопротивления никеля от содержания примесей

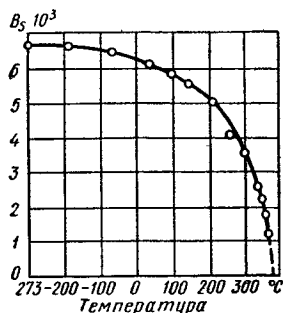


Рис. 15. Зависимость магнитной индукции никеля от температуры

под защитным флюсом (чаще всего стекла) или в вакууме. Во время переплавки никеля его раскисляют и десульфuriруют. Наиболее распространенные раскислители — углерод (0,03—0,1%), марганец (0,05—0,2%) и кремний (0,03—0,15%).

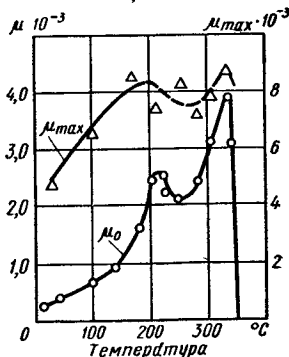


Рис. 16. Зависимость начальной максимальной магнитной проницаемости никеля от температуры

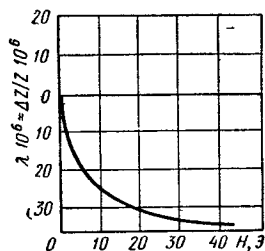


Рис. 17. Зависимость магнитострикции никеля от напряженности магнитного поля

Наилучший десульфуратор — магний (0,05—0,1%). Он не только образует с серой тугоплавкое соединение, но и является раскислителем.

Никель хорошо поддается любым видам сварки. Он легко паяется твердыми и мягкими припоями.

Коррозионная стойкость никеля при комнатной температуре на воздухе, в пресной и морской воде, а также водных растворах ряда солей весьма велика. Она обусловлена защитным действием тонкой,

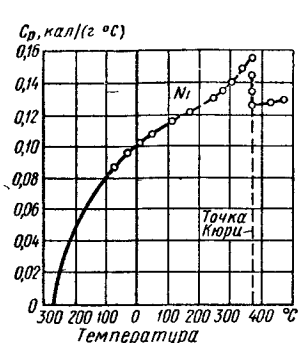


Рис. 18. Зависимость теплоемкости никеля от температуры испытания

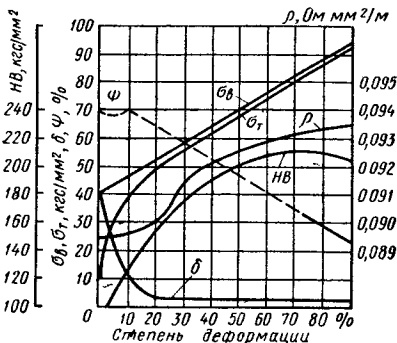


Рис. 19. Зависимость характеристик механических свойств и электросопротивления никеля марки НП2 от степени деформации

плотной окисной пленки, образующейся на никеле. В атмосфере закрытых помещений стойкость никеля выше стойкости серебра, меди и латуни. Никель прекрасно сопротивляется коррозии щелочей, в том числе

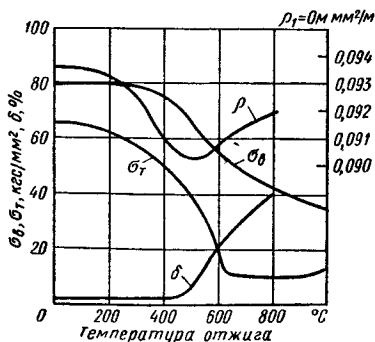


Рис. 20. Зависимость характеристик механических свойств и электросопротивления никеля НП2 от температуры отжига

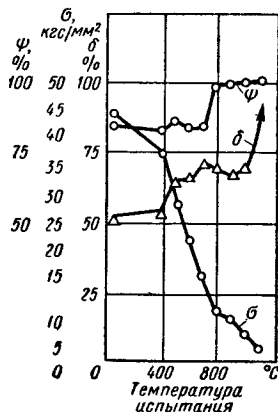


Рис. 21. Зависимость характеристик механических свойств никеля НП2 от температуры испытания

в едком натре, едком кали любой концентрации. Он удовлетворительно стоек при комнатной температуре против действия растворов солей соляной, угольной, серной, азотной и уксусной кислот, разбавленных

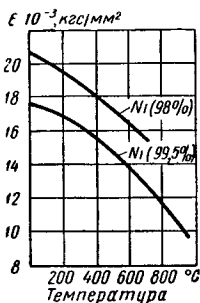


Рис. 22. Зависимость модуля упругости никеля с температуры испытания

органических кислот и других органических соединений, образующихся при производстве пищевых продуктов. Сухие газы — галогены, окислы азота, сернистый газ и аммиак — при комнатной температуре не действуют на никель. При умеренных температурах (до 300° С) никель не взаимодействует с ртутью и не образует амальгам. Зависимости электрических, магнитных и механических свойств и теплоемкости никеля от температуры и состояния материала представлены на рис. 14—22.

Химический анализ никеля производят в соответствии с ГОСТ 13047.1—67, 13047.18—67* и 6012—67.

В машиностроении применяют плоский и круглый прокат из никеля (табл. 41, 42.)

41. Плоский прокат из никеля

Полу- фабри- кат	Состояние	Марка	ГОСТ	Тол- щина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
Листы	Горяче- катаные, холодно- катаные	НП2, НП3, НП4	6235—73	5—20	500—710	500— 2 000
Полосы	То же	НП2, НП3, НП4	6235—73	1—20	100—400	400— 2 000
Ленты	Холодно- катаные	НП1, НП2, НП3	2170—73	0,05— 2,0	10—300	3 000
Аноды	Горяче- катаные	НП4, НК0,2 НПА1, НПА2, НПАН	2132—58	4—12	10—250	400— 1 500

42. Круглый прокат из никеля

Полу- фабри- кат	Состояние	Марка	ГОСТ	Тол- щина, мм	Диа- метр, мм	Длина, мм	Другие раз- меры, мм
Трубы	Тянутые	НП1, НП2	13548—68*	0,40— 5,40	0,05— 0,20	≥400	—
Прутки	Тянутые, горяче- катаные	НП2, НП3	13083—67	5—60		1000— 4000	—
Проволока	Тянутая	НП2, НП3, НП4	2179—59	0,03— 12,0			
Аноды оваль- ные	Горяче- катаные	НПАН	2132—58			400— 1200	Овал 35×85

Никелевые сплавы

Стандартные никелевые сплавы можно условно разделить на четыре группы: низколегированные для электротехнических целей, термоэлектродные (хромель, алюмель), коррозионностойкие (монель-металл) и жаростойкие (нихром и ферронихром). Легирующие элементы в этих четырех группах—алюминий, кремний, марганец, хром, медь и железо.

К жаростойким сплавам относятся нихром и ферронихромы.

Алюминий значительно изменяет термоэлектрические свойства никеля, повышает его электросопротивление, жаростойкость и существенно понижает температуру магнитного превращения никеля. Кремний главным образом повышает жаростойкость никеля. Марганец увеличивает его электросопротивление и жаростойкость, особенно в серосодержащей атмосфере. Хром в сильной степени повышает жаростойкость и жаропрочность никеля, увеличивает электросопротивление и снижает ТКС никеля. Медь повышает коррозионную стойкость и прочность никеля. Сплавы никеля с медью превосходят по коррозионной стойкости никель и медь. Сплав никеля с 30% меди монель отличается наиболее высокой устойчивостью на воздухе, в пресной и морской воде и многих агрессивных средах. Железо снижает температурный коэффициент линейного расширения никеля. Им можно частично заменить никель в жаростойких сплавах.

Следует помнить, что никелевые сплавы при высоких температурах не стойки в серосодержащей атмосфере. При нагреве во время горячей и термической обработки нельзя пользоваться мазутом и другим топливом, содержащим более 0,5% серы.

Никелевые сплавы хорошо свариваются. Сведения о составе, температурах литья, горячей и термообработке и свойствах приведены в табл. 43, 44, 45.

Термоэлектродвижущая сила в мВ (средние значения) термопар хромель-алюмель и хромель-копель при различных температурах холодного спая:

Температура испытания, °С	Хромель- алюмель	Хромель-ко- пель
-50	-1 86	-3 11
0	0	0
100	4,10	6,95
200	8,13	14,65
300	12,21	22,90
400	16,39	31,43
500	20,64	40,15
600	24,90	49,0
700	29,14	57,75
800	33,31	66,40
900	37,36	
1000	41,31	
1100	45,14	
1200	48,85	

Зависимость характеристик свойств нихрома Х20Н80 и ферронихрома Х15Н60 от температуры приведена в табл. 46.

В машиностроении применяют стандартные полуфабрикаты из никелевых сплавов плоский прокат (табл. 47) и круглый прокат.

Круглый прокат поставляют в виде прутков тянутых и горячекатаных из сплава НК0,2 (ГОСТ 13083—67) диаметром 5—60 мм и длиной 1000—4000 мм, остальные сплавы—в виде проволоки диаметром 0,1—5 мм.

43. Химический состав (%) и назначение никелевых сплавов

Наименование	Марка	Al	Fe	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Примерное назначение
Никель кремнистый *	НК 0,2	—	—	0,15	—	—	—	Не менее 99,4	Для свечей двигателей внутреннего сгорания, деталей электро-технических устройств и приборов
Никель марганцевый *	НМц2,5	—	—	—	2,3—3,3	—	—	Остальное	Для свечей двигателей внутреннего сгорания, деталей радиоламп и др.*
Никель марганцевый *	НМц 5	—	—	—	4,6—5,4	—	—		
Алюмель *	НМцАК2-2-1	1,6—2,4	—	0,85—1,5	1,8—2,7	—	—		Для термопар
Хромель Т *	НХ 9,5	—	—	—	—	9—10	—		То же
Хромель К *	НХ 9,0	—	—	—	—	8,5—10,0	—		Для компенсационных проводов термопар
Монель *	НМЖМц28-2,5-1,5	—	2—3	—	1,2—1,8	—	27—29	Остальное	Для деталей, работающих в агрессивных средах
Нихром **	X20H80	—	—	0,4—1,5	—	20—23	—		Для нагревательных элементов и деталей высокого омического сопротивления
Нихром **	X20H80H	—	—	1—1,5	—	20—23	—		
Ферро-нихром **	X15H60	—	Остальное	0,4—1,5	—	15—18	—	55—61	Для нагревательных элементов
Ферро-нихром **	X15H60H	—	То же	1,0—1,5	—	15—18	—	55—61	То же

* По ГОСТ 492—73

** По ГОСТ 1276С—67*

Примечание В состав алюминия входит 0,6—1,2% Со.

44. Основные (типичные) физико-механические свойства и температуры обработки никелевых сплавов

Сплав	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °C	ρ , Ом мм ² /м	Температурный коэффициент электросопротивления, 1/°C	Теплопроводность, кал/(см·с °C)	Коэффициент линейного расширения при 20–100° C α 10 ⁻⁶ , 1/°C	E, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	Температура горячей обработки, °C	Температура отжига, °C
0,2	8,9	1454	0,09	0,0051	0,140	13,6	21 700	40–50 75–90	40–50 3–5	1150–850	750–850
2,5	8,9	1440	0,14	0,0042	0,127	13,4	21 000	45–50 90–100	35–50 2–4	1200–900	800–900
5	8,8	1410	0,20	0,0036	0,115	13,7	21 000	50–55 95–105	40–45 3–5	1200–900	800–900
AK2-2-1	8,5	1440	0,32	0,0026	0,06	13,5	18 200	50–60 100–110	35–50 2–5	1250–1000	900–950
9,5	8,7	1435	0,65	0,00048	—	12,8	—	60–70 100–110	35–50 2–5	1200–1000	800–900
ЖМц28-2,5-1,5	8,8	1350	0,43	0,006	0,06	14,0	18 200	50–60 70–85	30–50 3–5	1170–920	870–950
N80	8,4	1400	1,08	0,00022	—	17,6	21 790	60–70 110–125	40–50 2–3	1250–1000	870–1040
N60	8,4	1390	1,1	0,00013	0,033	16,0	21 800	60–70 115–125	26–32 0,5–1,0	1100–1000	750–850

Примечание В числителе данные для легкого состояния после отжига, в знаменателе — для твердого состояния после холодной деформации.

45. Зависимость электрических и термоэлектрических свойств хромеля НХ9,5 и алюминия НМцАК2-1 от температуры

Температура, °С	Удельное электро-сопротивление, Ом мм ² /м		Температурный коэффициент электро-сопротивления $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°С		Термоэлектродвижущая сила (мВ) в паре с платиной при температуре холодного спая 0°С	
	Хромель	Алюмель	Хромель	Алюмель	Хромель	Алюмель
0	0,612	0,25	—	—	0	0
100	0,642	—	467	400	+3,0	-1,20
200	0,672	—	411	—	+6,2	-1,98
300	0,700	—	357	—	+9,55	-2,68
400	0,725	—	276	—	+12,95	-3,46
500	0,745	—	228	—	+16,30	-4,31
600	0,762	—	236	—	+19,70	-5,17
700	0,780	—	230	—	+23,05	-6,03
800	0,798	—	228	—	+26,25	-6,93
900	0,817	—	220	—	+29,45	-7,78
1000	0,835	—	—	—	+32,5	-8,63

46. Зависимость характеристик электрических и термоэлектрических свойств нихрома Х20Н80 и ферронихрома Х15Н60 от температуры

Температура, °С	Удельное электро-сопротивление при 20°С, Ом мм ² /м		Температурный коэффициент электро-сопротивления $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°С		Термоэлектродвижущая сила в паре с платиной при температуре холодного спая 0°С, мВ	
	Ферро-нихром	Нихром	Ферро-нихром	Нихром	Ферро-нихром	Нихром
20	1,120	1,08	—	—	—	—
100	1,135	1,09	134,0	80,0	+1,15	1,15
200	1,149	1,10	123,0	100,0	+2,60	—
300	1,163	1,12	122,0	110,0	+4,33	—
400	1,176	1,13	112,0	110,0	+6,20	—
500	1,181	1,14	42,5	100,0	+8,23	—
600	1,181	1,13	0	80,0	+10,48	—
700	1,184	1,13	25,4	60,0	+12,93	—
800	1,192	1,14	67,5	60,0	+15,54	—
900	1,207	1,15	126,0	70,0	+18,28	18,2
1000	1,234	1,16	224,0	70,0	+21,20	—

47. Плоский прокат из никелевых сплавов (холоднокатаный)

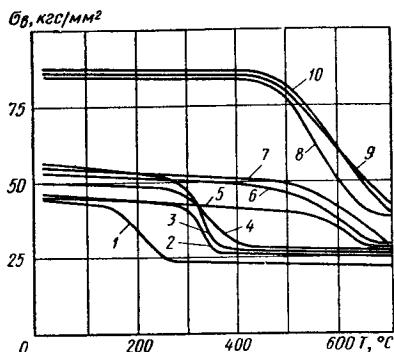
Полу-фабрикат	Марка	ГОСТ	Основные размеры, мм		
			Толщина	Ширина	Длина
Плоский прокат Полосы Ленты	НМЖМц28-2,5-1,5 НМЖМц28-2,5-1,5 НК 0,2, НК 0,4	5063—73 5187—70* 2170—73	0,5—10,0 0,1—2,0 0,05—1,5	40—500 6—300 10—300	400—2000 ≥5000 ≥2500

ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ МЕДИ

Сплавы этой группы находят широкое применение в различных областях машиностроения и электротехники. Их используют в качестве электродов для контактной точечной, шовной и рельефной сварки, токопроводящих губок установок стыковой сварки, проводников электрического тока, электрических контактов, коллекторных пластин, конструкционного материала различного типа теплообменников и др. Однако независимо от назначения сплавов они характеризуются общими принципами определения состава, многих параметров технологии изготовления полуфабрикатов, режимов термической обработки.

Рис. 23. Влияние температуры отжига (1 ч) на предел прочности меди и медных сплавов (испытания проволоки $\varnothing 1$ мм):

1 — Cu, 2 — Cu—Ag (0,09% Ag),
3 — МК, 4 — Cu—Mg (0,1% Mg),
5 — Cu—Zr (0,2% Zr), 6 — БрХ;
7 — БрХЦр, 8 — МКБ, 9 — БрНБТ,
10 — БрНХК



Сплавы этой группы по составу, а следовательно, по методам упрочнения разделяют на две группы: сплавы, упрочняемые деформацией, и дисперсионно-твердеющие сплавы. К сплавам первой группы относятся сплавы систем Cu—Ag, Cu—Cd, Cu—Mg и некоторые другие. Однако только первые из них находят широкое применение в изделиях, которые подвергаются нагреву до температур более 200° С в процессе изготовления или эксплуатации изделий. Сплавы второй группы наиболее широко используют в промышленности, так как они существенно превосходят по свойствам сплавы первой группы.

Состав и области применения основных сплавов приведены в табл. 48. Все указанные сплавы выплавляют в печах различного типа (открытых, вакуумных, вакуумно-компрессионных). Режимы обработки полуфабрикатов из них приведены в табл. 49. В табл. 49 и 50 приведены характеристики основных физических и механических свойств сплавов после оптимального режима обработки каждого сплава (для сплава медь—кадмий — холодная деформация с обжатием на 50%, для дисперсионно-твердеющих сплавов — закалка на пересыщенный твердый раствор, холодная пластическая деформация с обжатием 40—60% и старение). Применение для сплавов последнего типа только закалки и старения снижает уровень механических свойств. На рис. 23, 24, 25 показаны зависимости предела прочности σ_b от температуры отжига, изменения модулей нормальной упругости и коэффициентов линейного расширения всей группы сплавов от температуры, влияния степени деформации на механические свойства. В табл. 50 и на рис. 23 показано, что свойства сплавов существенно зависят от их состава. Однако некоторые свойства определяются основой — медью и сравнительно слабо

43. Химический состав * (%) и основное назначение жаропрочных медных сплавов

Сплав	Cd	Zr	Cr	Co	Be	Ni	Ti	Si	Основное назначение
МК	0,9— 1,2	—	—	—	—	—	—	—	Для электродов контактной точечной и шовной сварки легких сплавов коллекторов электродвигателей
МЦр0,3 БрЦр0,2	—	0,2—0,5 0,1—0,3	—	—	—	—	—	—	Для коллекторов высоконагруженных и высокоскоростных двигателей, различных деталей радиотехники
БрХ	—	—	0,4—1,0	—	—	—	—	—	Как конструкционный материал для различных теплообменников, для электродов контактной сварки углеродистой стали
БрХЦр	—	0,03— 0,08	0,4—1,0	—	—	—	—	—	Для электродов контактной точечной и шовной сварки углеродистой стали
МКБ2,5-0,5	—	—	—	2,3— 2,7	0,4—0,7	—	—	—	Для электродов рельефной сварки и сварки толстолистовых изделий из углеродистой стали
БрНВТ	—	—	—	—	0,2—0,4	1,4—1,6	0,05— 0,15	—	Для деталей машин стыковой сварки, электродов для сварки нержавеющей стали и жаропрочных сплавов
БрНХК2,5-0,7-0,6	—	—	0,5—1,0	—	—	2,0—2,8	—	0,5— 0,9	Для формирующих и электродных колец трубосварочных станов

* Cu — остальное.

Примечание. Содержание примесей строго лимитируется только в малолегированных сплавах, где они могут особенно ощутимо повлиять на тепло- и электропроводность. Например, в сплаве БрХЦр допускается (не более): Pb — 0,003%; Sn — 0,01%; Zn — 0,01%; Ni — 0,03%; As — 0,01%; Bi — 0,002% сумма примесей — 0,1%. В сплавах БрНВТ, БрНХК сумма примесей ограничивается 0,7%.

Основные режимы обработки, типы выпускаемых полуфабрикатов, контролируемые свойства

Сплавы

МК	БрХ	Сu—Zr	БрХЦр	МКВ	БрНВТ	БрНХК
900—650	950—700	900—700	900—700	950—750	950—800	950—750
500	650	700	700	700	750	750
—	980—1000	940—960	940—960	970—990	960—980	980—1000
—	440—460	440—460	450—470	465—485	470—490	450—470
Прутки, коллекторные полосы	Прутки, полосы, плиты, коллекторные полосы, трубы	Полосы, коллекторные полосы, лента	Прутки, полосы, плиты	Прутки, полосы, плиты	Плиты, литые цилиндрические заготовки	Плиты
Гарантируемый уровень контролируемых свойств						
80—110 **	100—120 **	100—115 **	100—130 **	180	170	170
75—82 **	80	89—95 **	80	45	45	40

* В зависимости от массы изделия.

** В зависимости от типа полуфабриката.

50. Характеристики физических и механических свойств жаропрочных сплавов на медной основе

Характеристика	Cu	MK	Cu-Zr	BrX	BrXЦр	MKB	BrHBT	BrHXK
Твердость <i>HV</i> , кгс/мм ² (при 20° С), после								
холодной деформации на 50%	100	120	115	115	110	140	150	150
отжига	45	50	60	60	65	80	80	80
холодной закалки, деформации и старения								
закалки и старения	—	—	120	125	140	230	240	240
			80	100	110	180	180	200
Электропроводность, % к электропроводности меди М0 (20° С)	100	75	90	80	85	50	45	50
Плотность, г/см ³ (20° С)	8,94	8,92	8,93	8,92	8,92	8,78	8,83	8,85
Теплопроводность, кал/(см·с·°С)	0,93	0,71	0,82	0,75	0,78	0,47	0,42	0,45
Температура начала разупрочнения, °С	150	300	550	450	500	500	500	500
Предел прочности σ_B в (кгс/мм ²) при температуре, °С								
20	25	42	40	45	50	78	85	80
300	15	31	32	37	39	63	69	65
400	11	22	30	33	35	55	60	58
500	8	14	25	28	30	42	50	47
600	5	8	20	18	25	23	25	27
Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ (кгс/мм ²) при температуре, °С:								
20	16	40	37	42	45	76	84	78
300	10	28	31	36	37	62	68	63
400	7	19	29	32	34	54	59	57
500	5	11	24	27	29	41	50	46
600	2	5	19	17	24	20	24	26
Относительное сужение ψ (%) при температуре, °С:								
20	90	81	69	69	84	22	10	52
300	37	74	68	37	82	13	8	45
400	43	82	68	27	82	11	5	34
500	86	95	70	20	82	21	3	14
600	100	96	72	32	81	76	10	33
Удельное электросопротивление ρ (мкОм·см) при температуре, °С:								
20	1,72	2,31	1,93	2,13	2,04	3,46	3,92	3,50
200	2,98	3,42	3,20	3,28	3,23	4,66	5,10	4,70
300	3,62	4,17	3,87	3,92	3,82	5,36	6,07	5,46
400	4,24	4,87	4,54	4,58	4,52	6,14	6,52	6,18
500	5,07	5,60	5,34	5,27	5,34	7,05	7,65	7,22
600	5,84	6,56	6,12	6,07	6,02	8,25	8,72	8,64
Кратковременная (30 с) горячая твердость <i>HV</i> , кгс/мм ² .								
400	35	94	95	97	112	170	190	180
500	19	31	65	76	102	112	125	120
600	12	15	40	51	73	65	80	87

Продолжение табл. 50

Характеристика	Cu	МК	Cu-Zr	BrX	BrXCp	МКБ	BrНБТ	BrНХК
Длительная (1 ч) горячая твердость HV (кгс/мм ²) при температуре, °С:								
400	25	56	77	75	91	120	130	125
500	10	17	55	45	62	88	95	95
600	7	9	32	33	36	40	50	55
Ударная вязкость a_H (кгс·м/см ²) при температуре, °С:								
20	17	16	20	22	24	3	3	9
300	14	17	21	21	22	4	3	9
400	14	17	22	20	22	4	2	8
500	13	15	18	17	18	4	1	11
600	8	13	16	15	16	6	2	12

Примечания 1. Образцы для механических испытаний изготавливались из прутков $\varnothing 12-16$ мм.
2. Свойства приведены после обработки по оптимальному для каждого сплава режиму.

зависят от изменения состава, например, температурные коэффициенты удельного электросопротивления, теплопроводности, линейного расширения (рис. 24, а), теплоемкости и модуля упругости (рис. 24, б). Также мало зависят от состава коррозионная стойкость, жаростойкость и, наконец, характерное для данной группы сплавов

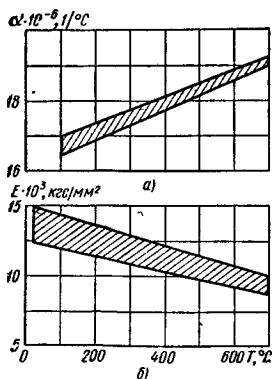


Рис. 24. Зависимость коэффициентов линейного расширения (а) и модулей упругости (б) меди и жаропрочных медных сплавов от температуры испытаний

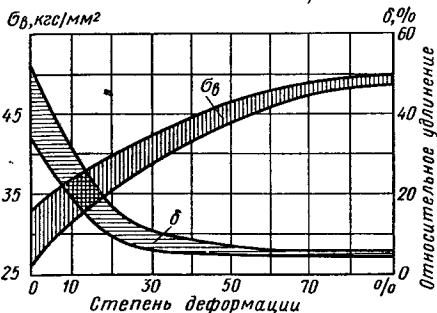


Рис. 25. Влияние степени пластической деформации на механические свойства меди и жаропрочных сплавов меди

повышение механических свойств меди при криогенных температурах. В отличие от меди жаропрочные сплавы меди не подвержены водородной болезни. Поэтому термическую обработку и пайку этих сплавов можно проводить в среде водорода.

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ *

Алюминий

Алюминий — химический элемент третьей группы периодической системы Д. И. Менделеева (табл. 51)

51. Химический состав (%) алюминия первичного
(ГОСТ 11069—74)

Марка	Al (не менее)	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Всего
Особой чистоты							
A999	99,999	—	—	—	—	—	0,001
Высокой чистоты							
A995	99,995	0,0015	0,0015	0,001	0,001	0,001	0,005
A99	99,99	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,010
A97	99,97	0,015	0,015	0,005	0,004	0,002	0,03
A95	99,95	0,030	0,030	0,010	0,005	0,002	0,05
Технической чистоты							
A85	99,85	0,08	0,06	0,01	0,02	0,01	0,15
A8	99,80	0,12	0,10	0,01	0,04	0,02	0,20
A7	99,70	0,16	0,16	0,01	0,05	0,02	0,30
A6	99,60	0,25	0,20	0,01	0,06	0,03	0,40
A5	99,50	0,30	0,30	0,02	0,06	0,03	0,50
A0	99,00	0,50	0,50	0,02	0,08	0,03	1,00
A	99,00	0,80	0,50	0,03	0,08	0,03	1,00
AE	99,50	0,35 *	0,12	0,02	0,05	0,01 **	0,50

* Железа — не менее 0,18%

** Сумма Ti + V + Mn + Cr

Алюминий технической чистоты, применяемый для изготовления полуфабрикатов и изделий путем деформации, входит в ГОСТ 4784—65* (табл. 52).

52. Химический состав (%) алюминия технического деформируемого

Марка	Al (не менее)	Примеси (не более)								Сумма допус- тимых приме- сей (не более)
		Fe	Si	Cu	Mn	Zn	Ti	Mg	Прочие	
AD00	99,70	0,16	0,16	0,015	0,02	0,08	0,05	0,03	0,015	0,30
AD0	99,50	0,30	0,30	0,02	0,025	0,1	0,1	0,05	0,02	0,50
AD1	99,30	0,30	0,30	0,05	0,025	0,1	0,15	0,05	0,02	0,70
AD	98,80	0,50	0,50	0,1	0,1	0,1	0,15	0,1	0,05	1,20

* В таблицах, где особо не оговорено, характеристики приведены по нижнему пределу

Деформируемые алюминиевые сплавы

Коррозионностойкие свариваемые сплавы на основе систем Al—Mn и Al—Mg

Сплавы на основе этих систем не упрочняются термической обработкой.

1. Сплавы AMц на основе системы Al—Mn (табл. 53)

53. Характеристики механических свойств сплава AMц

Полуфабрикат	Состояние материала	σ_B , кгс/мм ²	δ , %
Листы толщиной, мм. 0,5—0,7 0,8—3,0 3,1—10,0 0,5—3,5 3,6—10,0 0,6—0,8 0,9—1,2 1,3—10,0	Отожженные	9,0—15,0	18
		9,0—15,0	22
		9,0—15,0	20
	Полунагартованные	$\geq 15,0$	5
		$\geq 15,0$	6
	Нагартованные	$\geq 19,0$	2
		$\geq 19,0$	3
		$\geq 19,0$	4
Прутки до 300 мм	Без термической обработки	10,0—19,0	20
Трубы прессованные всех размеров	Отожженные	10,0—17,0	—
Трубы катаные и тянутые	Отожженные	9,0—14,0	—
	Нагартованные	$\geq 14,0$	—
Профили прессованные	Без термической обработки	$\geq 17,0$	16

Химический состав сплава AMц (%): 1,0—1,6 Mn; примеси (не более): 0,7 Fe; 0,6 Si; 0,2 Cu; 0,2 Ti; 0,1 Zn; 0,05 Mg; остальное Al.

Сплав AMц деформируется в горячем и холодном состоянии. Для снятия нагартовки или повышения пластичности применяют отжиг при 350—410° С.

Коррозионная стойкость сплава (и сварного шва) высокая, почти такая же, как у чистого алюминия. Сплав хорошо сваривается всеми видами сварки. Обрабатываемость резанием неудовлетворительная.

Сплав AMц применяют для изготовления сварных баков, бензо- и маслосборников, радиаторов автомашин и тракторов, посуды.

2. Сплавы на основе системы Al—Mg — магналии (табл. 54).

Сплавы AMg1, AMg2, AMg3, AMg4 хорошо деформируются в горячем и холодном состоянии. Сплавы с содержанием Mg > 5% (AMg5, AMg6) деформируются плохо — быстро нагартовываются и требуют большого количества отжигов.

54. Химический состав (%) сплавов на основе системы

Сплав	Основные компоненты				Примеси (не более)						
	Mg	Mn	Ti	Другие	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Прочие	
										Каждая	Сумма
AMr1	0,5—1,8	—	—	—	0,05	0,05	0,01	—	—	0,03	0,07
AMr2	1,8—2,8	0,2—0,6	—	—	0,4	0,4	0,1	0,2	0,1	0,05	0,1
AMr3	3,2—3,8	0,3—0,6	—	Si 0,5—0,8	0,5	—	0,1	0,2	0,1	0,05	0,1
AMr4	3,8—4,8	0,5—0,8	0,02—0,1	Cr 0,05—0,25	0,4	0,4	0,05	0,2	—	0,05	0,1
AMr5	4,8—5,8	0,5—0,8	0,02—0,1	—	0,5	0,5	0,1	0,2	—	0,05	0,1
AMr5П	4,7—5,7	0,2—0,6	—	—	0,4	0,4	0,2	—	—	0,05	0,1
AMr6	5,8—6,8	0,5—0,8	0,02—0,1	—	0,4	0,4	0,1	0,2	—	0,05	0,1

Примечания: 1 В сплавах AMr2 и AMr5П сумма Fe + Si ≤ 0,6%

2 В сплавы AMr4, AMr5, AMr6 вводят 0,0002—0,005% Be

Характеристики механических свойств полуфабрикатов из сплавов на основе системы Al—Mg приведены в табл. 55—58.

55. Характеристики механических свойств листов

Сплав	Толщина листов, мм	Состояние	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	
			кгс/мм ²			
			Не менее			
AMg2	0,5—1,0 1,1—1060	Отожженные	17 17	— —	16 18	
	0,5—1,0 1,1—10,0		Полунагартованные	24 24	— —	4 6
	0,5—1,0 1,1—10,0	Нагартованные		27 27	— —	3 4
	AMg3		0,8—4,5 4,6—10,0	Отожженные	20 19	10 8
		0,5—5,0 5,1—10,0	Полунагартованные		24 22	20 18
		AMg5		0,8—4,5 4,6—10,0	Отожженные	28 28
AMg6			0,8—10,0 1,5—10,0	Отожженные Нагартованные		32 38

56. Характеристики механических свойств прессованных прутков (Ø до 300 мм)

Сплав	Состояние прутков	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		кгс/мм ²		
		Не менее		
AMg2	Горячепрессованные	18	—	13
AMg3	Горячепрессованные или отожженные	18	8	13
AMg4	Горячепрессованные	25	13	10
AMg5	Отожженные	27	12	15
AMg6	Отожженные	32	16	15

Типичные характеристики механических свойств проволоки из лава AMg5П: $\sigma_B = 27$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2} = 15$ кгс/мм²; $\tau_{cp} = 19$ кгс/мм², = 23%.

Сплавы на основе системы Al—Mg отличаются высокой общей коррозионной стойкостью, не склонны к коррозионному растрескиванию

57. Характеристики механических свойств прессованных профилей

Сплав	Состояние профилей	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		кгс/мм ²		
		Не менее		
AMr2	Горячепрессованные	23	—	12
AMr3		18	8	12
AMr5	Горячепрессованные или отожженные	26	13	15
AMr6		32	16	15

и межкристаллитной коррозии (особенно в отожженном состоянии). Коррозионная стойкость сварных швов такая же, как и основного материала. Коррозионная стойкость сплава AMg6 сильно зависит от технологии изготовления полуфабрикатов, главным образом от температуры отжига. Улучшение коррозионной стойкости возможно путем применения отжига при температурах 265—285° С. Такой отжиг наиболее эффективен для нагартованного материала. Удовлетворительная коррозионная стойкость может быть получена после окончательного отжига при температуре 310—335° С.

Для дополнительной защиты деталей от коррозии следует анодировать их и наносить лакокрасочные покрытия. Заклепки из сплава AMg5П ставят только анодированными.

Сплавы хорошо свариваются аргонодуговой, контактной точечной и роликовой сваркой. В качестве присадочного материала применяют проволоку основного сплава (для сплава AMg2 — проволоку AMg3). Прочность сварных соединений равна 0,9—1,0 σ_b основного материала; пластичность сварных швов высокая.

Обрабатываемость резанием улучшается с увеличением степени легирования сплавов: сплавы AMg1 и AMg2 плохо обрабатываются резанием в отожженном состоянии и удовлетворительно в нагартованном; сплавы AMg3 и AMg4 обрабатываются резанием удовлетворительно, а сплавы AMg5, AMg5П и AMg6 хорошо.

Сплавы широко применяют в промышленности для изготовления сварных мало- и средненагруженных конструкций (в строительстве, судостроении, транспортном машиностроении и авиации); сварных емкостей, масло- и бензопроводов, штампованных изделий, посуды, бытовых предметов и т. п.

Коррозионностойкие сплавы на основе системы Al—Mg—Si

Химический состав сплавов приведен в табл. 59.

Сплавы упрочняются термической обработкой по следующим режимам:

закалка (нагрев при $t = 515 \div 525^\circ \text{С}$, охлаждение в холодной воде), естественное старение при комнатной температуре примерно в течение 10 сут.;

закалка, искусственное старение при температуре 160—170° С в течение 10—12 ч.

59. Химический состав (%) сплавов на основе системы $Al-Mg-Si$

Сплав	Основные компоненты					Примеси (не более)				
	Mg	Si	Cu	Mn	Cr	Fe	Cu	Mn	Zn	Т ₁
АВ	0,45—0,90	0,5—1,2	0,1—0,5	или Cr 0,15—0,35	—	0,5	—	—	0,2	0,15
АД31	0,4—0,9	0,3—0,7	—	—	—	0,5	0,1	0,1	0,2	0,15
АД33	0,8—1,2	0,4—0,8	0,15—0,40	—	0,15—0,35	0,7	—	0,15	0,25	0,15
АД35	0,8—1,4	0,8—1,2	—	0,5—0,9	—	0,5	0,1	—	0,2	0,15
										0,05
										0,05
										0,05
										0,1

60. Характеристики механических свойств прессованных профилей

Сплав	Состояние профилей	Толщина полки профиля, мм	σ_B		$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
			кгс/мм ²		Не менее	
АВ	Закаленные и естественно состаренные	Все размеры	18	—	—	14
	Закаленные и искусственно состаренные		30	23	10	
АД31	Закаленные и естественно состаренные	Все размеры	14	7	—	13
	Закаленные и искусственно состаренные		20	15	8	
АД33	Закаленные и естественно состаренные	≤ 10	18	11	—	15
	Закаленные и искусственно состаренные		26	23	—	6
				27	23	—

61. Характеристики механических свойств прутков ($\varnothing$ до 300 мм)

Сплав	Состояние прутков	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
		кгс/мм ²		
		Не менее		
АВ	Закаленные и естественно со-старенные	18	—	14
	Закаленные и искусственно состаренные	30	—	12
АД31	Закаленные и естественно со-старенные	14	7	13
	Закаленные и искусственно состаренные	20	15	8
АД33	Закаленные и естественно со-старенные	18	11	15
	Закаленные и искусственно состаренные	27	23	10
АД35 *	Закаленные и естественно со-старенные	27	20	13—15
	Закаленные и искусственно состаренные	33	28	8

* Для АД35 указаны типичные характеристики механических свойств

* Для АД35 указаны типичные характеристики механических свойств

62. Характеристики механических свойств поковок и штамповок (в закаленном и искусственно состаренном состоянии)

Сплав	Вид изделия	Масса, кг	Вдоль волокна			Поперек волокна, по ширине			НВ
			σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	
			кгс/мм ²			кгс/мм ²			
			Не менее						
АД33	Штамповки	≤30	27	20	8	—	—	—	80
		> 30—425	25	19	6	—	—	—	80
АВ	Штамповки	До 200	30	22	12	27	—	4	85
	Поковки	До 1500	28	—	10	—	—	—	85

Отжиг полуфабрикатов производят при температурах 350—370° С (АД35, АВ), 350—400° С (АД31), 380—420° С (АД33). Затем следует охлаждение в печи со скоростью 30°/ч до $t = 250^\circ \text{С}$, дальнейшее охлаждение на воздухе.

Сплавы АД31, АД33, АД35 деформируются в основном в горячем состоянии, сплав АВ — в горячем и холодном состоянии.

Характеристики механических свойств полуфабрикатов из сплавов на основе системы Al—Mg—Si приведены в табл. 60—62.

Сплавы этой группы отличаются высокой общей коррозионной стойкостью и не склонны к коррозии под напряжением. В закаленном и искусственно-состаренном состоянии сплав АВ склонен к межкристаллитной коррозии. Коррозионная стойкость сварных швов аналогична стойкости основных материалов.

Сплавы удовлетворительно свариваются точечной, роликовой, а также аргодуговой сваркой с применением присадочной проволоки св. АК5. Прочность сварных соединений равна 0,6—0,7 σ_b основного материала. Последующие закалка и старение повышают прочность до 0,9—0,95 σ_b основного материала.

Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии неудовлетворительная, в термически обработанном состоянии — удовлетворительная.

Сплавы широко применяют в промышленности для изготовления деталей невысокой и средней прочности, в легкой, автомобильной промышленности, для отделки кабин и салонов самолетов и вертолетов, в гражданском строительстве, в судостроении.

Конструкционные сплавы на основе системы Al—Cu—Mg

Конструкционные сплавы Д1, Д16, Д19, ВД17 см. табл. 63.

Сплавы упрочняют термической обработкой (табл. 64). Характеристики механических свойств полуфабрикатов из конструкционных сплавов типа дуралюмин приведены в табл. 65—68.

Плакированные листы отличаются высокой коррозионной стойкостью, прессованные изделия, штамповки и поковки — пониженной стойкостью. Прессованные изделия из сплавов Д1 и Д16 в закаленном и естественно состаренном состоянии при эксплуатационных нагревах выше 100° С склонны к межкристаллитной коррозии, искусственное старение повышает сопротивление коррозии. Неплакированные детали из дуралюминов следует подвергать анодированию и защищать лакокрасочными покрытиями.

Сплавы хорошо свариваются точечной сваркой и не свариваются плавлением из-за высокой склонности к трещинообразованию.

Все дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием (в закаленном и состаренном состоянии) и химическим фрезерованием (размерным травлением). Обрабатываемость резанием в отожженном состоянии плохая.

Дуралюмин широко применяют во всех областях народного хозяйства, особенно в авиации. Сплав Д16 в виде листов и прессованных полуфабрикатов — основной материал для силовых элементов конструкции самолетов (детали каркаса, обшивка, шпангоуты, нервюры, лонжероны, тяги управления) и других нагруженных конструкций.

63. Химический состав (%) конструкционных сплавов типа дуралюмин

Сплав	Основные компоненты			Примеси (не более)						
	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Ni	Zn	Ti	Прочие	
									Каждая	Сумма
Д1	3,8—4,8	0,4—0,8	0,4—0,8	0,7	0,7	0,1	0,3	0,1	0,05	0,1
Д16	3,8—4,9	1,2—1,8	0,3—0,9	0,5	0,5	0,1	0,3	0,1	0,05	0,1
ВД17	2,6—3,2	2,0—2,4	0,45—0,7	0,3	0,3	—	0,1	0,1	0,05	0,1
Д19 *	3,8—4,3	1,7—2,3	0,5—1,0	0,5	0,5	—	0,1	0,1	0,05	0,1

* В сплаве Д19 содержится 0,0002—0,005% Be.

64. Режимы термической обработки конструкционных сплавов типа дуралюмин

Сплав	Температура нагрева под закалку, °C	Старение	
		Температура, °C	Время, ч
Д1	495—510	20	≥96
Д16	495—505 (листы)	20	≥96
		188—193	11—13
	485—503 (прессованные изделия)	20	≥96
		185—195	6—8
Д19	500—510 (листы)	20	120—240
		185—195	12—14
	495—505 (прессованные изделия)	20	120—240
		185—195	8—10
ВД17	495—505	165—175	15—17

65. Характеристики механических свойств плакированных листов (поперек прокатки)

Сплав	Состояние листов	Толщина листов, мм	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
			кгс/мм ²		
Д1	Отожженные	0,5—1,9 2,0—10,0	≤ 23 ≤ 24	— —	12 12
	Закаленные и естественно состаренные	0,5—1,9 2,0—10,0	37 38	19 20	15 15
Д16	Отожженные	0,5—1,9 2,0—10,0	≤ 23 ≤ 24	— —	10 10
	Закаленные и естественно состаренные	0,5—1,9 2,0—6,0 6,1—10,0	41,5 43,5 43,5	27,5 28 28	13 11 10
	Нагартованные после закалки и естественно состаренные	1,5—1,9 2,0—7,5	43,5 46,5	34 35	10 8
	Закаленные и искусственно состаренные	0,5—0,7 0,8—1,9 2,0—6,0	40,0 43,5 45,5	35 38 39	5 5 5
	Нагартованные после закалки и искусственно состаренные	1,5—1,9 2,0—6,0	46 49	43 46	3 4
Д19	Отожженные	0,5—1,9 2,0—10,0	≤ 23 ≤ 24	— —	10 10
	Закаленные и естественно состаренные	0,5—1,9 2,0—6,0 6,1—10,0	40,5 42,5 42,5	26,5 27 27	13 11 10
	Нагартованные после закалки и естественного старения	1,5—1,9 2,0—7,5	43,5 46,5	34 35	10 8

66. Характеристики механических свойств прессованных профилей

Сплав	Состояние профилей	Толщина полки профиля, мм	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %
			кгс/мм ²		
Д1	Отожженные	Все размеры	≤ 25	—	12
	Закаленные и естественно состаренные	≤ 10	36	22	12
		10,1—20	38	23	12
> 20		41	25	10	
Д16	Отожженные	Все размеры	≤ 25	—	12
	Закаленные и естественно состаренные	≤ 2	41	31	10
		2,1—5,0	42	32	10
		5,1—10,0	43	33	10
		10,1—20,0	44	34	10
		20,1—30,0	45	34	10
		30,1—40,0	46	34	10
		> 40	49	36	10
Д19	Отожженные	Все размеры	≤ 25	—	12
	Закаленные и естественно состаренные	≤ 5	40	30	10
		5,1—10,0	42	30	10
		10,1—20,0	43	31	10
		20,1—40,0	45	32	10

67 Характеристики механических свойств труб
в закаленном и естественно состаренном состоянии

Сплав	Способ изготовления труб	Размеры, мм		σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	
		Толщина стенки	Диаметр				
				кгс/мм ²			
Не менее							
Д1	Прессованные	≤5		34	—	10	
		≥5	≤120	36	20	12	
			>120	38	22	10	
	Катаные и тянутые	≤1,0	≤22	38	20	13	
		1,5—5,0		38	20	14	
		До 1,0	23—50	40	23	12	
		1,5—5,0		40	23	13	
		>5	>50	40	23	11	
	Д16	Прессованные	≤5		37	—	9
			≥5	≤120	40	26	12
				>120	43	28	10
Катаные и тянутые		≤1,0	≤22	42	26	13	
		1,5—5,0		42	26	14	
		≥5	23—50	43	29	12	
			50	43	29	10	

Сплав	Состояние материала	Вид изделия	Масса, кг	Вдоль волокна			Поперек волокна					НВ
				σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	По ширине		По толщине			
							σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	σ_B	$\delta, \%$	
				кгс/мм ²		кгс/мм ²		кгс/мм				
				не менее								
Д1	Закаленные и естественно состаренные	Штамповки	≤200	38	20	12	36	18	6	33	5	95
		Поковки	≤700	36	—	10	34	—	5	32	4	95
ВД17	Закаленные и искусственно состаренные	Штамповки	≤30	38	26	10	—	—	—	—	—	—
		Поковки	200	40	26	10	—	—	—	—	—	—

69. Химический состав (%) сплавов Д20, Д21

Сплав	Основные компоненты				Примеси (не более)						
	Cu	Mn	Mg	Ti	Fe	Si	Zn	Mg	Zr	Прочие	
										Каж-дая	Сумма
Д20	6,0—7,0	0,4—0,8	0,25—0,45	0,1—0,2	0,3	0,3	0,1	0,05	0,2	0,05	0,1
1210 (Д21)	6,0—7,0	0,4—0,8		0,1—0,2	0,3	0,3	0,1	—	—	0,05	0,1

70. Режимы термической обработки сплавов Д20 и Д21

Сплав	Температура нагрева под закалку, °С	Старение	
		Температура, °С	Время, ч
Д20	530—540	165—175 200—220	16—10 12—8
Д21	520—530	170—180	17—15

71. Характеристики механических свойств полуфабрикатов из сплава Д20

Полуфабрикат	Состояние	σ_B	$\sigma_{0.2}$	δ , %
		кгс/мм ²		
Листы плакированные всех толщин	Отожженные	≤24	—	15
	Закаленные и естественно состаренные	28	—	12
	Закаленные и искусствен- но состаренные	38	28	8
Профили прессованные всех размеров	Закаленные и естественно состаренные	28	—	12
	Закаленные и искусствен- но состаренные	35	24	8
Прутки прессованные	Закаленные и искусствен- но состаренные	36	24	8

72. Характеристики механических свойств штамповок и поковок массой до 100 кг из сплавов Д20 и Д21 в закаленном и искусственно состаренном состоянии

Сплав	Вид изделия	Вдоль волокна			Поперек волокна				НВ		
		σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	по ширине		по толщине				
					σ_B^* кгс/мм ²	$\delta, \%$	σ_B^* кгс/мм ²	$\delta, \%$			
		кгс/мм ²									
		не менее									
Д20	Штамповки и поковки	38	26	10	37	4	36	4	100		
Д21	Штамповки	40	27	7	38	4	38	4			
	Поковки	40	26	6	38	3	38	3			

Сплав Д19 применяют для тех же деталей, что и сплав Д16, работающих в условиях эксплуатационных нагревов до температуры 200—250° С, а также для изготовления заклепок. Сплав Д1 используют для штамповки лопастей воздушных винтов, а также различных узлов крепления. Сплав ВД17 применяют для изготовления лопаток компрессора двигателей.

Жаропрочные сплавы на основе системы Al—Cu—Mn

Химический состав сплавов и режимы их термической обработки приведены в табл. 69 и 70, характеристики механических свойств полуфабрикатов — в табл. 71, 72.

Сплавы упрочняются закалкой и искусственным старением и практически не упрочняются при естественном старении. Низкотемпературное старение сплава Д20 ($t = 165 \div 175^\circ \text{C}$) применяют для получения высоких механических свойств полуфабрикатов при комнатной температуре, а для обеспечения высокой жаропрочности применяют старение при повышенных температурах (200—220° С). Для предотвращения поводок и коробления закалку тонкостенных сложных по конфигурации деталей рекомендуют проводить в кипящей воде. Отжиг производят при температуре 350—370° С, охлаждение — на воздухе.

Сплавы Д20 и Д21 характеризуются высокими технологическими свойствами при обработке давлением (ковке, штамповке, прокатке и прессовании).

Сплавы отличаются низкой коррозионной стойкостью. Стойкость плакированных листов из сплава Д20 ниже, чем листов из сплава Д16. Изделия следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Сплав Д20 удовлетворительно сваривается точечной, роликовой и аргонодуговой сваркой с присадкой проволоки из сплава Д20.

Обрабатываемость резанием сплавов удовлетворительная.

Сплавы применяют для изготовления изделий, длительно работающих при повышенных температурах, например деталей двигателей, а также для силовых элементов различных конструкций. Сплав Д20 применяют также для изготовления сварных изделий, емкостей, баллонов и других, работающих при комнатной температуре или кратковременно при повышенных температурах.

Жаропрочные ковочные сплавы на основе системы Al—Cu—Mg—Ni—Fe

Химический состав сплавов см. табл. 73, режимы термической обработки — табл. 74.

Для уменьшения коробления и поводок закалку деталей сложной конфигурации можно производить в кипящей воде.

Сплавы АК4, АК4—1 хорошо деформируются в горячем состоянии. Характеристики механических свойств полуфабрикатов из сплавов приведены в табл. 75, 76.

Сплавы отличаются невысокой коррозионной стойкостью, склонны к коррозионному растрескиванию. Детали следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Сплавы удовлетворительно свариваются точечной и роликовой сваркой, хорошо обрабатываются резанием.

73. Химический состав (%) ковочных жаропрочных сплавов

Сплав	Основные компоненты						Примеси (не более)				
	Cu	Mg	Ni	Fe	Si	Ti	Mn	Zn	Ti	Прочие	
										Каждая	Сумма
АК 4	1,9—2,5	1,4—1,8	0,8—1,3	0,8—1,3	0,5—1,2	—	0,2	0,3	0,1	0,05	0,1
АК4-1 *	1,9—2,5	1,4—1,8	0,8—1,3	0,8—1,3	0,35	0,02—0,1	0,2	0,3	—	0,05	0,1

* В сплаве АК4-1, применяемом для изготовления листов, плит и прессованных профилей, содержание Si должно быть в пределах 0,15—0,25%

74. Режимы термической обработки ковочных жаропрочных сплавов (температура нагрева под закалку 525—535° С)

Сплав	Вид полуфабриката	Режимы старения	
		Температура, °С	Время, ч
АК4	Прессованные	165—180	10—16
	Штамповки, поковки	165—180 190—200	10—16 8—12
АК4-1	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

Сплав	Вид изделия	Масса, кг	Вдоль волокна			δ, %	Поперек волокна					
			σ _В	σ _{0.2}	По ширине			По толщине		НВ		
			кгс/мм²		σ _В		σ _{0.2}	δ, %	σ _В		δ, %	
					кгс/мм²		кгс/мм²					
			Не менее									
АК4	Штамповки	≤100	38	28	5	37	27	4	36	3	100	
	Поковки	≤700	37	27	4	36	26	3	35	3	100	
АК4-1	Штамповки	≤100 100—200	40 38	28 27	6 5	38 38	27 26	4 4	38 37	4 4	109 109	
	Поковки	≤700	38	27	5	38	26	4	37	4	109	
	Штамповки малых крыльчаток и др	—	40	—	5	40	—	5	40	5	117	
	Штамповки больших крыльчаток и др : перо, диск ступица	— —	39 38	— —	5 4	39 38	— —	5 4	39 38	5 4	109 109	

76. Пределы длительной прочности и ползучести (за 100 ч) прессованных полуфабрикатов из сплавов АК4 и АК4-1

Сплав	200° С		250° С		300° С	
	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$	σ_{100}	$\sigma_{0,2/100}$
АК4	20	15	7,5	6,5	4,0	3,5
АК4-1	18	—	9,0	6,5	4,5	2,5

77. Химический состав (%) сплавов АК6 и АК8

Сплав	Основные компоненты				Примеси (не более)					
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Ni	Zn	Ti	Прочие	
									Каждая	Сумма
АК6	1,8—2,6	0,4—0,8	0,4—0,8	0,7—1,2	0,7	0,1	0,3	0,1	0,05	0,1
АК8	3,9—4,8	0,4—0,8	0,4—1,0	0,6—1,2	0,7	0,1	0,3	0,1	0,05	0,1

Жаропрочные ковочные сплавы применяют для изготовления деталей двигателей, работающих при повышенных температурах. Сплав АК4-1 применяют в качестве конструкционного материала (в виде листов, профилей, штамповок) в машиностроении и самолетостроении.

Ковочные сплавы на основе системы Al—Cu—Si—Mg—Mn (АК6, АК8)

Для уменьшения коробления и поволоков закалку тонкостенных деталей сложной формы производят в воде при температуре 80—90° С. Сплавы (табл. 77—80) хорошо деформируются в горячем состоянии.

78. Режимы термической обработки сплавов АК6 и АК8

Сплав	Полуфабрикат	Температура нагрева под закалку, °С	Режимы старения	
			Температура, °С	Время, ч
АК6	Всех видов	505—525	150—165	6—15
АК8	Покówki, штамповки	495—505	150—165	4—15
	Листы, профили		165—175	10—12

Сплав АК8 применяют также для изготовления листов. Типичные характеристики механических свойств листов (поперек прокатки): $\sigma_B = 46$ кгс/мм², $\sigma_{0,2} = 38$ кгс/мм², $\delta = 14\%$.

Сплавы АК6 и АК8 склонны к коррозии под напряжением и чувствительны к межкристаллитной коррозии. Детали следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Все сплавы удовлетворительно свариваются точечной и роликовой сваркой, а сплав АК8 — аргонодуговой с присадочной проволокой из сплава АК5. Прочность сварных соединений составляет 0,6—0,7 σ_B основного материала.

Сплавы хорошо обрабатываются резанием.

Сплавы широко применяют в промышленности (строительстве, транспортном машиностроении, авиации) для изготовления штампованных и кованых деталей сложной формы, а также для нагруженных деталей типа рам, фитингов и др.

Конструкционные высокопрочные сплавы на основе системы Al—Zn—Mg—Cu

Химический состав сплавов приведен в табл. 81.

Сплавы обладают высокой прочностью (σ_B и $\sigma_{0,2}$) и пониженной пластичностью. Чувствительны к надрезам, склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением.

Максимальные значения прочности (σ_B и $\sigma_{0,2}$) полуфабрикатов из сплавов на основе системы Al—Zn—Mg—Cu достигаются при темпера-

79 Характеристики механических свойств поковок и штампов из сплавов АК6 и АК8

Сплав	Полуфабри- кат	Состояние материала	Масса, кг	Вдоль волокна			Поперек волокна					
				σ_B кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$	δ , %	по ширине		по толщине			
							σ_B кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$	δ , %	δ , %		
Не менее												
АК6	Штамповки	Закаленные и искусствен- но состаренные	≤350 ≤1500	39 37	28 —	10 8	37 35	25 —	7 6	5 4	100 95	
	Поковки	Закаленные и естественно состаренные	До 200	33	16	16	—	—	—	—	—	
АК8	Штамповки	Закаленные и естественно состаренные	≤200	39	25	11	37	24	8	35	6	110
	Поковки		≤750	39	25	10	37	—	8	33	4	110
			750—2000	38	24	8	36	—	7	33	4	110
	Штамповки	Закаленные и искусствен но состаренные	≤30	44	32	10	40	—	6	36	4	120
			30—200	42	30	8	40	—	6	66	3	110
	Поковки		≤30	42	—	8	36	—	4	34	3	120
		30—2000	39	—	6	36	—	4	34	2	110	

Сплав	Диаметр прутка, мм	σ_B , кгс/мм ²	δ , %
АК6	≤100	38	10
	≤300	36	12
АК8	≤150	46	10
	≤300	44	8

81. Химический состав (%) сплавов на основе системы Al—Zn—Mg—Cu

Сплав	Основные компоненты						Примеси (не более)					
	Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Другие	Fe	Si	Mn	Ti	Прочие	
											Каждая	Сумма
В93	6,3—7,3	1,6—2,2	0,8—1,2	—	—	Fe 0,2—0,45	—	0,2	0,1	0,1	0,05	0,1
В94	5,9—6,8	1,2—1,6	1,8—2,4	—	—	Ti 0,02—0,08	0,2	0,2	0,1	0,05	0,05	0,1
В95	5,0—7,0	1,8—2,8	1,4—2,0	0,2—0,6	0,1—0,25	—	0,5	0,5	—	0,05	0,05	0,1
В96	7,6—8,6	2,5—3,2	2,2—2,8	0,2—0,5	0,1—0,25	—	0,5	0,3	—	0,05	0,05	0,1
В96ц	8,0—9,0	2,3—3,0	2,0—2,6	—	—	Zr 0,1—0,2	0,4	0,3	0,1	0,03	0,05	0,1

82. Характеристики механических свойств полуфабрикатов из сплава В95

Полуфабрикат	Состояние материала	σ_B	$\sigma_{0.2}$	$\delta, \%$
		кгс/мм ²		
		Не менее		
Листы плакированные толщиной, мм *. 0,5—10,0	Отожженные	25	—	10
0,5—1,9	Закаленные и искусственно состаренные	49	41	7
2,0—6,0		50	42	7
6,1—10,0		50	42	6
1,2—6,0	Закаленные и искусственно состаренные, особо прочные **	53	46	6
6,1—10,0		53	46	5
Профили с толщиной стенки, мм: ≤10 ≥10	Закаленные и искусственно состаренные	50	45	6
		52	47	6
Прутки прессованные диаметром, мм ≤22		50	40	7
23—100		54	43	6
≤300		50	43	5
Трубы прессованные с толщиной стенки мм. 5—20		50	38	7
≥20		52	41	5

* Свойства в поперечном направлении.

** Механические свойства особо прочных листов обеспечиваются путем ограничения содержания магния и цинка в сплаве и отбором листов серийно поставляемой продукции.

турах закалки 460—475° С с последующим искусственным старением. Режимы старения: сплава В93 — ступенчатый (120° С — 3 ч + 165° С — 4 ч); сплава В94 — ступенчатый (100° С — 3 ч + 165° С — 3 ч); сплава В95 — плакированные листы — 120° С 24 ч; сплавов В95 — неплакированные полуфабрикаты, В96, В96ц — 135—145° С в течение 16 ч или ступенчатый (120° С — 3 ч + 160° С — 3 ч).

Характеристики механических свойств полуфабрикатов из сплавов на основе системы Al—Zn—Mg—Cu приведены в табл. 82, 83.

Сплавы на основе системы Al—Zn—Mg—Cu в закаленном и искусственно состаренном состоянии отличаются удовлетворительной общей коррозионной стойкостью, однако склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением (в особенности сплавы В96 и В96ц). Коррозионная стойкость естественно состаренных сплавов неудовлетворительная. Детали из этих сплавов следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Сплав В95 хорошо сваривается точечной сваркой; сплавы В96 и В96ц удовлетворительно свариваются аргонодуговой сваркой. Пластичность сварного шва пониженная.

Все сплавы на основе системы Al—Zn—Mg—Cu хорошо обрабатываются резанием.

Сплавы В93, В95, В96, В96ц применяют для изготовления нагруженных силовых деталей и конструкций в различных отраслях техники. Сплав В94 применяют для изготовления заклепок и заклепочной проволоки, в закаленном и искусственно состаренном состоянии $\tau_{ср} \geq 29$ кгс/мм².

При длительной эксплуатации рабочие температуры изделий из сплавов на основе системы Al—Zn—Mg—Cu не должны превышать 100° С.

Литейные алюминиевые сплавы *

Сплавы на основе системы Al—Si

Сплавы на основе системы Al—Si (табл. 84—86) отличаются высокими литейными свойствами и герметичностью отливок. Их применяют для получения отливок всеми способами литья. При изготовлении отливок литьем в песчаные формы и по выплавляемым моделям сплавы рекомендуется модифицировать. Заливку форм крупногабаритных толстостенных отливок следует производить в автоклавах (для кристаллизации отливок под давлением 5—6 кгс/см²) для повышения плотности литья.

У всех сплавов удовлетворительная коррозионная стойкость. Детали можно защищать анодированием и лакокрасочными покрытиями. Обрабатываемость резанием (за исключением сплава АЛ2) удовлетворительная.

Заварку дефектов отливок и сварку с деформированными материалами можно производить аргонодуговой и газовой сваркой.

Сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9 широко применяют для литья мало- и средненагруженных приборных, агрегатных деталей, деталей двигателей, для производства бытовых изделий (посуды, электроприборов и др.). Высокогерметичный сплав ВАЛ5 применяют для литья корпусных

* Режимы термической обработки см. ОСТ 190088—73.

88. Характеристики механических свойств штамповок и поковок из сплавов В93, В95, В96ц в закаленном и искусственно состаренном состоянии

Сплав	Вид изделия	Масса, кг	Вдоль волокна			Поперек волокна					НВ
			σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	по ширине		по толщине			
						σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	σ_B	$\delta, \%$	
			кгс/мм ²	кгс/мм ²	кгс/мм ²	кгс/мм ²	кгс/мм ²				
			Не менее								
В93	Штамповки	≤30	49	44	6	49	44	3,5	48	3	125
		>30—1000	48	44	6	48	44	3,5	48	2	
	Поковки	≤2500	48	44	6	48	43	3,5	48	2	
В95	Штамповки	≤30	52	44	6	46	—	4	42	3	
		>30—200	52	44	6	46	—	4	42	2	
	Поковки	≤1000	50	42	6	45	—	3	40	2	
В96ц	Штамповки	≤30	63	58	5	56	50	3	—	—	170
	Поковки	≤50	60	55	4	55	—	2	—	—	

Сплав	Основные компоненты					Примеси (не более)								
	Si	Mg	Mn	Ti	Be	Fe			Mn	Cu	Zn	Сумма учиты- ваемых примесей для отливок		
						З, В	К	Д				З, В	К	Д
АЛ2	10—13	До 0,1	—	—	—	0,8	1,0	1,5	0,5	0,6	0,3	2,2	2,3	2,8
АЛ4	8—10,5	0,17—0,3	0,2—0,5	До 0,15	До 0,1	0,6	0,9	1,0	—	0,3	0,3	1,2	1,5	1,6
АЛ9	6—8	0,2—0,4	—	До 0,15	До 0,1	0,6	1,0	1,5	0,5	0,2	0,3	1,2	1,6	2,1
ВАЛ5	6,5—8,5	0,35—0,55	—	0,1—0,3	0,15—0,4	—	0,6	—	0,1	0,3	0,3	—	0,6	
Примечание. Здесь и далее следующие обозначения: З — литье в песчаные формы; В — по выплавляемым моделям; К — литье в кокиль; Д — литье под давлением.														

85. Термическая обработка сплавов на основе системы Al — Si

Сплав	Режим термической обработки	Закалка *		Старение	
		Температура нагрева, °C	Время выдержки, ч	Температура нагрева, °C	Время выдержки, ч
АЛ2	T2	—	—	300±10	2—4
АЛ4	T1	—	—	175±5	5—17
	T6	535±5	2—6	175±5	10—15
АЛ9 **	T2	—	—	300±10	2—4
	T4	535±5	2—6	—	—
	T5			150±5	1—3
	T6			200±5	2—5
	T7			225±5	3—5
	T8			250±5	3—5
ВАЛ5	T5	535±5	10—16	75±5	6

* Здесь и далее для алюминиевых сплавов закалка в воде с $t = 20 \div 100^\circ \text{C}$.

** Для сплава АЛ9 (режимы T6, T7, T8) закалка в воде с $t = 80 \div 100^\circ \text{C}$.

86. Характеристики механических свойств сплавов на основе системы Al — Si

Сплав	Способ литья	Вид термической обработки	$\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ²	δ , %	НВ
АЛ2	ЗМ, ВМ * К Д	—	15 16 16	4 2 1	50
	ЗМ, ВМ К Д	T2	14 15 15	4 3 2	
АЛ4	К, Д	T1	20	1,5	60
	ЗМ, ВМ К	T6	23 24	3 3	70 70
АЛ9	Все способы	T2	14	2	45
	З, В К	T4 *	18 19	4 4	50
	З, В К	T5	20 21	2 2	60
	ЗМ, ВМ	T6	23	1	70
	ЗМ, ВМ	T7	20	2	60
	ЗМ, ВМ	T8	16	3	55
ВАЛ5	З	T4	26	4	70
	З	T5	30	2	85
	К		34	4	90

* Буква М — означает, что сплав применяют в модифицированном состоянии.

деталей, работающих под высоким внутренним давлением жидкостей или газов, а также как конструкционный материал в машиностроении.

Детали из сплавов на основе системы Al—Si могут длительно работать при температурах не выше 150—200° С.

Сплавы на основе системы Al—Si—Cu

По литейным свойствам сплавы (табл. 87—89) уступают сплавам на основе системы Al—Si, однако их применяют для получения отливок практически всеми способами литья. Сплавы с высоким содержанием кремния (АЛ32, АЛ4М, В124) при литье в песчаные формы следует модифицировать.

Коррозионная стойкость сплавов пониженная, детали следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Заварку дефектов производят аргонодуговой и газовой сваркой. Сплавы удовлетворительно обрабатываются резанием.

Сплавы АЛ3 и АЛ5 отличаются повышенной жаропрочностью, детали из них могут длительно работать при температурах до 270° С. Рабочие температуры деталей из сплавов АЛ32, АЛ4М, В124 не должны превышать 250° С.

Сплавы применяют для литья деталей агрегатов и двигателей.

Сплавы на основе системы Al—Mg

Сплавы (табл. 90—92) применяются только в закаленном состоянии (режим Т4). Для уменьшения внутренних напряжений закалку отливок проводят в кипящей воде или в масле.

Сплавы отличаются удовлетворительными литейными свойствами. Плавку следует проводить под флюсом или добавлять в шихту лигатуру Al—Be.

У сплавов на основе системы Al—Mg высокая коррозионная стойкость. Следует учитывать, что сплавы с высоким содержанием магния (АЛ8, АЛ27, АЛ27-1) в закаленном состоянии склонны к естественному старению, что может привести к возникновению в отливках высоких внутренних напряжений. Содержание магния в нагруженных отливках из этих сплавов не должно превышать 10%. Детали следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями.

Сплавы хорошо обрабатываются резанием и полируются. Дефекты в отливках подвергаются заварке аргонодуговой сваркой; применение газовой сварки не рекомендуется.

Сплавы на основе системы Al—Mg отличаются низкой жаропрочностью. Рабочие температуры деталей из этих сплавов не должны превышать 100° С.

Сплавы широко применяют в судостроении, транспортном машиностроении, строительстве для изготовления деталей, от которых требуется повышенная коррозионная стойкость в морской воде и атмосфере.

Сплавы на основе системы Al—Cu

Сплавы (табл. 93—95) отличаются пониженными литейными свойствами, герметичностью и коррозионной стойкостью. Детали следует защищать анодированием и лакокрасочными покрытиями.

Возможна заварка дефектов аргонодуговой сваркой. Сплавы хорошо обрабатываются резанием.

87. Химический состав (%) сплавов на основе системы Al — Si — Cu

Сплав	Основные компоненты						Примеси (не более)							
	Si	Cu	Mg	Mn	Ti	В	Fe			Zn	Zr	Сумма учиты- ваемых примесей для отливок		
							З, В	К	Д			З, В	К	Д
АЛЗ	4,5—5,5	1,5—3,0	0,35—0,6	0,6—0,9	—	—	0,6	1,2	1,5	0,3	Zr + 0,5 Ce	1,2	1,8	2,0
АЛ5	4,5—5,5	1,0—1,5	0,35—0,6	До 0,5	До 0,15	—	0,6	1,0	1,5	0,3	—	1,1	1,4	1,8
АЛ32	7,8—8,5	1,0—1,5	0,3—0,5	0,3—0,5	0,1—0,3	—	0,7	0,8	0,9	0,3	—	1,0	1,1	1,2
АЛ4М	8,5—10,5	1,3—2,5	0,3—0,6	—	0,1—0,3	0,01—0,1	0,12	0,25	—	—	0,3	0,6		
В124	8,0—11,0	3,0—4,0	0,15—0,35	0,1—0,3	0,1—0,3	0,01—0,1	0,3	—	—	—	—	0,3		

88. Термическая обработка сплавов на основе системы Al—Si—Cu

Сплав	Режим термической обработки	Закалка		Старение	
		Температура нагрева, °C	Время выдержки, ч	Температура нагрева, °C	Время выдержки, ч
АЛЗ	T1	—	—	175±5	3—5
	T2			300±10	2—4
	T5	515±5 и 525±5	2—4 2—4	175±5	3—5
		515±5	3—6		
	T7	515±5	3—6	230±10	3—5
	T8			330±5	3—5
АЛ5	T1	—	—	180±5	5—10
	T5	525±5	3—5	175±5	5—10
	T6			200±5	3—5
	T7	515±5 и 525±5	3—5 1—3	230±5	3—5
		525±5	3—5		
АЛ4М	T6	515±5 и 525±5	4 8	160±5	8—15
В124	T6	490±5 и 515±5	4 10	160±5	24

89. Характеристики механических свойств сплавов на основе системы Al—Si—Cu

Сплав	Способ литья	Режим термической обработки	$\sigma_{\text{в}}'$ кгс/мм ²	δ , %	НВ
			не менее		
АЛЗ	З, В К Д	— — —	14 17 16	0,5 0,5 0,5	65
	З, В, К	T2	15	1	65
	З, В К	T5	22 25	0,5 0,5	75
	З, В, К	T7	21	1	70
		T8	18	2	65
	АЛ5	З, В, К	T1	16	0,5
З, В		T5	20	0,5	70
		T6	23	0,5	
З, В, К		T7	18	1	65
АЛ32		К	—	19	1
	Д	—	27	3	70
	З К	T6	25 27	2 2	60 70
АЛ4М	З К	T5	30 35	2 3	90
В124	З В К	T6	34 40 40	0,5 2,0 2,0	110 110 120

Сплав	Основные компоненты				Примеси (не болсе)							Сумма учитываемых примесей		
	Mg	Ti	Be	Zr	Fe			Si	Mn	Cu	Zn	З, В	К	Д
					З, В	К	Д							
АЛ8	9,5—11,5	≤0,07	≤0,07	≤0,2	0,3	0,3	—	0,3	0,1	0,3	0,1	1,3	1,3	—
АЛ23	6,0—7,0	0,05—0,15	0,02—0,1	0,05—0,2	0,2	0,2	—	0,2	0,1	0,15	0,1	0,6	0,6	—
АЛ23-1	6,0—7,0	0,05—0,15	0,02—0,1	0,05—0,2	0,05	0,05	—	0,05	0,1	0,05	0,05	0,2	0,2	—
АЛ27	9,5—11,5	0,05—0,15	0,05—0,15	0,05—0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,15	0,1	0,6	0,6	0,6
АЛ27-1	9,5—11,5	0,05—0,15	0,05—0,15	0,05—0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05	0,2	0,2	0,2	0,2

91. Режимы закалки сплавов на основе системы $Al-Mg$

Сплав	Режим закалки		
	Температура нагрева, °C	Время выдержки, ч	Охлаждающая среда и ее температура, °C
АЛ8	430 ± 5	12—20	Масло 40—50
АЛ23, АЛ23-1 АЛ27, АЛ27-1	435 ± 5	10	Вода 80—100

92. Характеристики механических свойств сплавов на основе системы $Al-Mg$

Сплав	Способ литья	Состояние сплава	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ
			не менее		
АЛ8	З, В, К	Закаленное	29	9	60
АЛ23	З К, Д	Литое	19 22	4 6	60
	З, К	Закаленное	23	6	
АЛ23-1	З К, Д	Литое	20 24	5 10	60
	З, К	Закаленное	25	10	
АЛ27	З, К, Д		32	12	75
АЛ27-1	З, К, Д		35	15	75

Сплав	Cu	Mn	Ti	Fe		Si	Mg	Zn	Mn	Ni	Zr	Сумма учитываемых примесей	
				З, В	К							З, В	К
АЛ7	4—5	—	До 0,2	1,0	1,0	1,2 *	0,03	0,2	0,1	—	—	2,2	2,2
АЛ19	4,5—5,3	0,6—1,0	0,15—0,35	0,2	—	0,3	0,05	0,2	—	0,1	0,2	1,0	0,8

* При литье в кокиль допускается содержание Si до 3%.

94. Режимы термической обработки сплавов АЛ7 и АЛ19

Сплав	Режимы термической обработки				
	Обозначение	Закалка		Старение	
		Температура нагрева, °С	Время выдержки, ч	Температура нагрева, °С	Время выдержки, ч
АЛ7 *	T4	515±5	10—15	—	—
	T5			150±5	2—4
АЛ19	T4	530±5 и	5—9	—	—
		545±5	5—9		
		545±5	10—12		
	T5	530±5 и	5—9	175±5	3—5
		545±5	5—9		
		545±5	10—12		
	T7	530±5 и	5—9	250±5	3—10
		545±3	5—9		

* Для сплава АЛ7 закалка в воде с $t = 80 \pm 100^\circ \text{C}$.

95. Характеристики механических свойств сплавов АЛ7 и АЛ19

Сплав	Способ литья	Режим термической обработки	$\sigma_{\text{в}}$, кгс/мм ²	δ , %	НВ
АЛ7	З, В К	Т4	20 21	6 6	60 60
	З, В К	Т5	22 23	3 3	70 70
АЛ19	З, В	Т4	30	8	70
	З, В	Т5	34	4	90

Сплав АЛ7 применяют для литья мало- и средненагруженных деталей, работающих при температурах до 250°С.

Сплав АЛ19 жаропрочный, его широко применяют для силовых деталей и клепаных конструкций, работающих как при комнатной, так и повышенных температурах (до 300°С) в различных отраслях техники: в авиации, машиностроении, приборостроении и др.

Сплавы на основе сложных систем

В эту группу входят жаропрочные литейные алюминиевые сплавы (табл. 96—98).

В табл. 99 приведены значения прочности при повышенных температурах широко применяемых литейных алюминиевых жаропрочных сплавов.

Сплавы АЛ1, АЛ21, ВАЛ1 отличаются удовлетворительными литейными свойствами. Коррозионная стойкость сплавов пониженная; детали следует анодировать и защищать лакокрасочными покрытиями. Заварку дефектов производят аргонодуговой или газовой сваркой. Сплавы хорошо обрабатываются резанием.

Сплавы АЛ1 и АЛ21 применяют для литья деталей двигателей (поршни, головки цилиндров и др.), длительно работающих при температурах до 300°С. Сплав ВАЛ1 применяют для литья нагруженных деталей, работающих при температурах до 350°С.

ЦИНК И ЕГО СПЛАВЫ

У цинка (табл. 100) гексагональная структура. Этим объясняется резкая анизотропия его свойств. Прочностные свойства в поперечном (к прокатке) направлении значительно выше, чем в продольном. При комнатной температуре цинк в литом состоянии малопластичен, а при 100—150°С становится пластичным и может быть подвергнут обработке давлением — прокатке, прессованию, штамповке и глубокой вытяжке.

Чистый цинк рекристаллизуется в процессе обработки давлением и не нуждается в смягчающем отжиге. Технологичность цинка в процессе обработки давлением зависит от его чистоты. Отрицательное влия-

Сплав	Cu	Ni	Mn	Mg	Cr	Ce	Zr	Fe		Si	Zn	Mg	Сумма учитываемых примесей	
								З, В	К				З, В	К
АЛ1	3,75—4,5	1,75—2,25	—	1,25—1,75	—	—	—	0,8	0,8	0,7	0,3	—	1,5	1,5
АЛ21	4,6—6,0	2,6—3,6	0,15—0,25	0,8—1,3	0,1—0,2	—	—	0,6	0,6	0,5	0,3	—	1,0	1,0
ВАЛ1	5,5—6,2	0,8—1,2	0,6—1,0	—	—	0,15—0,3	0,05—0,2	0,3	0,3	0,3	—	0,05	0,6	0,6

97. Режимы термической обработки жаропрочных сплавов

Сплав	Режим	Закалка		Старение	
		Температура нагрева, °С	Время выдержки, ч	Температура нагрева, °С	Время выдержки, ч
АЛ1	T5	515±5	2—5	175±5	3—5
	T7			230±10	2—4
АЛ21 *	T2	—	—	300±10	5—10
	T7	500±5 и 525±5	2 2—5	300±10	3—10
ВАЛ1	T4	535±5 и 545±5	7—9 7—9	—	—
		545±5	10—12		
		535±5 и 545±5	7—9 7—9		
	T5	545±5	10—12	175±5	3—6

* Для сплава АЛ21 закалка в воде с $t = 80 \div 100^\circ \text{C}$.

98. Характеристики механических свойств жаропрочных сплавов

Сплав	Способ литья	Режим термической обработки	Механические свойства, не менее		
			σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ
АЛ1	З, В, К	T5 T7	21 18	0,5 1	95 80
АЛ21	З, В	T2 T7	18 21	1 1	65 75
ВАЛ1	З, К	T4 T5	23 26	2,5 1,5	80 85

99. Типичные значения прочности литейных сплавов при повышенных температурах

Сплав	Режим термиче- ской обработки	Механические свойства при температурах, °С						300° С σ _{100 ч} , кгс/мм ²
		σ _в , кгс/мм ²			σ _{100 ч} , кгс/мм ²			
		200	250	300	200	250	300	
АЛ2	T2	15	13	8	7	4	2,8	1,2
АЛ4	T6	16	14	10	8	5	2,8	1,3
АЛ5	T6	17	15	10	9	5,5	3,5	2,4
АЛ8	T4	22	14	9	8	4	1,5	0,8
АЛ9	T5	15	12	9	8	4,5	2,6	1,0
АЛ19	T5	26	19	14	16	12	6,5	4,0
АЛ1	T5	18	16	14	13	7	5,5	3,7
АЛ21	T7	21	19	16	18	12	7,5	5,0
ВАЛ1	T5	25	20	16	18	15	10,0	6,0

100. Химический состав (%) цинка основных марок
ГОСТ 3640—75

Цинк	Zn (не менее)	Примеси (не более)					
		Pb	Fe	Cd	Cu	Sn	Всего
ЦВЧ	99,997	0,00001	0,00001	0,002	0,00001	0,00001	0,003
ЦВ	99,99	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001	0,010
Ц0	99,975	0,015	0,007	0,010	0,001	0,001	0,025
Ц1	99,95	0,02	0,015	0,014	0,002	0,001	0,050
Ц2	98,7	1,0	0,05	0,20	0,005	0,002	1,3
Ц3	97,5	2,0	0,10	0,20	0,05	0,005	2,5

ние на горячую обработку оказывает примесь олова, образующая с цинком эвтектику с температурой плавления 199° С, и особенно одно-временное присутствие олова и свинца, образующих с цинком тройную эвтектику с температурой плавления 150° С. Железо задерживает рекристаллизацию цинка.

**Характеристики физико-химических
и механических свойств цинка**

Плотность, г/см ³	7,13
Температура плавления, °С	419,4
Температура кипения, °С	907,0
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$:	
поликристаллического при 20—250° С	39,7
вдоль оси <i>a</i> при 0—100° С	15,0
вдоль оси <i>c</i> при 0—100° С	61,0
Удельная теплоемкость, кал/(г·°С), при 0° С	0,0915
Скрытая теплота плавления, кал/г	24,09
Скрытая теплота испарения, кал/г	425,6
Поверхностное натяжение, дин/см, при 450° С	755
Теплопроводность, кал/(см·с·°С), при 25° С	0,27
Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м:	
поликристаллического при 20° С	0,0591
вдоль оси <i>a</i>	0,0589
вдоль оси <i>c</i>	0,0616
Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м, в жидком состоянии при 419° С	0,353
Температурный коэффициент электросопротивления при 0—100° С	0,00419
Магнитная восприимчивость	—0,15·10 ⁻⁶
Модуль нормальной упругости, кгс/мм ²	9000
Модуль сдвига, кгс/мм ²	3800
Предел текучести, кгс/мм ² :	
литого	7,5
деформированного	8—10
Временное сопротивление разрыву, кгс/мм ² :	
литого	12—14
деформированного	12—17
отожженного	7—10
Относительное удлинение, %:	
литого	0,3—0,5
деформированного	40—50
отожженного	10—20
Ударная вязкость литого цинка, кгс·м/см ²	0,6—0,75
<i>HВ</i> , кгс/мм ² :	
литого	30—40
деформированного	35—45

Сплавы на основе цинка

Широкое распространение получили цинковые сплавы для литья под давлением, содержащие алюминий, медь и магний (табл. 101).

**Характеристики физико-механических свойств
цинковых сплавов для литья под давлением**

	ЦАМ 4-1	ЦА4
Плотность, г/см ³	6,7	6,6
Температура плавления, °С:		
солидус	386	387
ликвидус	380	381
Коэффициент линейного расширения α при 20—100° С, 1/°С	27,4·10 ⁻⁶	27,4·10 ⁻⁶
Удельная теплоемкость, кал/(г·°С)	0,10	0,10
Теплопроводность, кал/(см·с·°С)	0,26	0,27
Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м	0,0654	0,0637

101. Сплавы цинковые для литья под давлением в чушках

Сплав	Основные компоненты *			Примеси, % (не более)								σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ	Примерное назначение	Марки- ровка
	Al	Cu	Mg	Cu	Pb	Fe	Sn	Cd	Si	Сумма Pb + + Sn + + Cd	Все- го	Не менее				
ЦАМ4-1	3,9— 4,3	0,75— 1,25	0,03— 0,06	—	0,01	0,05	0,002	0,005	0,015	0,017	0,112	30	1,0	90	Для литья под давле- нием дета- лей средней прочности (корпуса карбюрато- ра, насоса и др.)	Полоса черного цвета
ЦА4	3,9— 4,3	—	0,03— 0,06	0,03	0,01	0,05	0,002	0,005	0,015	0,017	0,142	25	2,5	75	Для литья под давле- нием дета- лей с устой- чивыми размерами	Полоса зеленого цвета

* Zn — остальное.

* Zn — остальное.

Температурный коэффициент электросопротивления α при 0—100°С	0,00353	0,00377
Временное сопротивление разрыву, кгс/мм ² , . . .		
после:		
отливки	33	29
вылеживания в течение 10 лет	27	24
Относительное удлинение, % ($l_0 = 50$ мм), . . .		
после:		
отливки	4—7	6—8
вылеживания в течение 10 лет	10—13	12—16
Ударная вязкость, кгс·м/см ² , после:		
отливки	6,6	5,9
вылеживания в течение 10 лет	5,5	5,6
НВ, кгс/мм ²	80—100	70—90
Сопротивление срезу, кгс/мм ²	23—26	20—22
Предел усталости (на базе 10 ⁸ циклов)	4,7—5,7	3,5—4,5
Сопротивление сжатию, кгс/мм ²	55—60	38—42

В процессе естественного старения цинковых сплавов происходит уменьшение размеров отлитых изделий (на 0,07—0,09%). Две третьих усадки происходит в течение 4—5 недель, остальная — в течение многих лет. Для стабилизации размеров применяют термообработку — отжиг (3—6 ч при 100°С, или 5—10 ч при 85°С, или 10—20 ч при 70°С).

Сплавы могут подвергаться пайке и сварке. Однако эти процессы применяют главным образом для заделки дефектов, так как паяные швы имеют низкую прочность. Оловянно-свинцовыми припоями можно паять только предварительно никелированные сплавы. Флюс — подкисленный хлористый цинк. Лучшие результаты дает припой, содержащий 82,5% Cd, 17,5% Zn. В этом случае флюс не требуется.

Сварку ведут в восстановительном пламени. Электроды и изделие изготавливают из одного сплава.

Наиболее широко литейные цинковые сплавы используют в автомобильной промышленности для отливки корпусов карбюраторов, насосов, рам спидометров, решеток радиаторов, деталей гидравлического тормоза, различных декоративных деталей. Помимо этого сплавы применяют для отливки деталей стиральных машин, пылесосов, пишущих машинок, кассовых аппаратов, миксеров, корпусов электрических часов, различного кухонного оборудования и т. д.

Эти сплавы нельзя использовать в условиях повышенных и низких температур, так как уже при температуре 100°С прочность снижается на 30%, твердость — на 40%, а при температуре ниже 0°С они становятся хрупкими.

Для повышения коррозионной стойкости и для декоративных целей на цинковые изделия наносят различные защитные покрытия.

В зависимости от условий службы цинковых изделий применяют двух- или трехслойные защитные покрытия различных толщин. Как правило, в качестве покрытий используют медь, никель и хром.

Цинковые антифрикционные сплавы

Наибольшее распространение получили антифрикционные цинково-алюминиево-медные сплавы. Их применяют как в литом, так и в деформированном (прокатанном или прессованном) состоянии.

Отличаясь высокими антифрикционными свойствами и достаточной прочностью при комнатной температуре, эти сплавы служат хорошими

заменителями бронз при работе в узлах трения, температура которых не превышает 80—100° С. При более высоких температурах сплавы сильно размягчаются и намазываются на вал.

ГОСТ 7117—62 предусматривает две марки сплава — ЦАМ 9-1,5 и ЦАМ 10-5 (табл. 102, 103, 104).

У цинковых сплавов высокий коэффициент линейного расширения, что следует учитывать при установлении величины зазора в подшипнике.

Из цинковых антифрикционных сплавов в основном изготавливают литые монометаллические и биметаллические детали. Однако в настоящее время расширяется применение проката из сплава ЦАМ 10-5 (по ТУ 48-08-484—71).

При изготовлении литых деталей используют чушковые сплавы по ГОСТ 7117—62 либо приготавливают сплав из первичных материалов с использованием оборотов литейного производства и переплава. Плавку рекомендуется проводить под слоем древесного угля.

В качестве флюса принимают хлористый аммоний (ГОСТ 3773—72) в количестве 0,1—0,2% от массы плавки. Большее количество флюса добавляют при загрязненной шихте.

Металл нельзя перегревать выше 480° С, так как при более высокой температуре происходит сильное насыщение расплава газами. Температура литья цинковых антифрикционных сплавов — 440—470° С.

Монометаллические литые детали можно получать отливкой в землю, в кокиль, центробежным способом и литьем под давлением. При разработке технологии отливки изделий следует учитывать, что сплавы ЦАМ 9-1,5 и ЦАМ 10-5 склонны к образованию горячих трещин, поэтому следует избегать форм, создающих затрудненную усадку.

Изделия, отлитые в землю, отличаются от изделий, полученных кокильным литьем, большим количеством пор и более крупными размерами зерен. Наблюдается значительный разброс характеристики механических свойств. Поэтому литье в землю целесообразно применять только для деталей сложной конфигурации, которые трудно отлить в кокиль.

При центробежном литье (линейная скорость на периферии 6—8 м/с, скорость литья 2—2,5 кг/с) следует учитывать возможность получения в отливке зоны столбчатых кристаллов с пониженными механическими свойствами. С увеличением скорости структура становится мелкозернистой, но наблюдается заметная ликвация структурной составляющей сплава, богатой алюминием. Поэтому для получения ответственных деталей центробежное литье нужно применять с осторожностью.

Биметаллические литые детали, состоящие из цинкового антифрикционного сплава и стали, изготавливают путем заливки сплава на сталь через подсолй чистого цинка, наносимого способом горячего цинкования.

Для получения прочного соединения необходимо обезжирить и протравить стальную поверхность. После флюсования (температура флюса не должна превышать 150° С) стальное основание подогревают, оцинковывают (в цинковую ванну добавляют 0,5% алюминия; содержание железа в ванне не должно превышать 0,5%), устанавливают в форму и заливают сплавом.

Существенно повышается коэффициент использования металла при изготовлении деталей из проката. Сплав ЦАМ 9-1,5 хорошо обрабатывается в холодную, тогда как вырубку и штамповку сплава ЦАМ 10-5 лучше проводить при температуре 100—150° С, при которой этот сплав весьма пластичен. Биметаллический прокат с обоими сплавами обраба-

102. Химический состав (%) антифрикционных сплавов на цинковой основе (ГОСТ 7117—62)

Сплав	Основные компоненты					
	Al	Cu	Mg	Zn		
ЦАМ 10-5 ЦАМ 9-1,5	10,0—12,0 9,0—11,0	4,0—5,5 1,0—2,0	0,03—0,06 0,03—0,06	Остальное То же		
Сплав	Примеси (не более)					
	Pb	Fe	Sn	Cd	Si	Всего
ЦАМ 10-5 ЦАМ 9-1,5	0,03 0,03	0,15 0,15	0,01 0,01	0,02 0,02	0,10 0,10	0,35 0,35

Примечания: 1. Содержание алюминия в изделиях из сплава ЦАМ 10-5 должно быть не менее 9%, а в изделиях из сплава ЦАМ 9-1,5 не менее 8%.

2. Содержание железа в изделиях из сплавов ЦАМ 10-5 и ЦАМ 9-1,5 не должно превышать 0,20%.

103. Характеристики физических и механических свойств цинковых антифрикционных сплавов

Характеристика	Сплав ЦАМ 9-1,5		Сплав ЦАМ 10-5	
	Литье в кокиль	Деформи- рованный (вдоль прокатки)	Литье в кокиль	Деформи- рованный (вдоль прокатки)
Температура начала плавления, °C	378	—	378	—
Температура конца плавления, °C	410	—	395	—
Плотность, г/см ³	6,1	—	6,3	—
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/°C	27	—	27	—
Теплопроводность, кал/(см·с·°C)	0,24	—	0,24	—
Линейная усадка, %	1,2	—	1,0	—
Модуль упругости E, кгс/мм ²	9000	—	9000	—
НВ, кгс/мм ²	90—115	85—110	100—120	90—110
Ударная вязкость α_n , кгс·м/см ²	1,0—2,0	1,2—2,5	0,3—0,4	0,3—0,6
Временное сопротивление разрыву σ_B , кгс/мм ²	25—35	30—40	25—40	35—50
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	24—33	25—38	—	33—49
Относительное удлинение δ , %	2—6	5—15	0,5—4,0	4,0—10,0
Относительное сужение ψ , %	2—8	15—30	1,0—4,0	4,0—15,0
Коэффициент трения со смазкой	0,009	0,010	0,009	0,010
Коэффициент трения без смазки	0,36	0,34	0,35	0,31

104. Условия применения цинковых антифрикционных сплавов

Сплав	Состояние	Примерное назначение	Характеристики работы изделий (не более)		
			Удельная нагрузка, кгс/см ²	Скорость скольжения, м/с	Температура, °С
ЦАМ 9-1,5	Литой	Для отливки монометаллических вкладышей, втулок, ползунов и т. д.	100	8	80
		Для отливки биметаллических изделий со стальным корпусом	200	10	100
	Деформированный	Для получения биметаллических полос со сталью и высокопрочными алюминиевыми сплавами методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей	250	15	100
ЦАМ 10-5	Литой	Для отливки монометаллических вкладышей, втулок, ползунов и т. д.	100	8	80
	Деформированный	Для получения прокатанных полос, предназначенных для изготовления направляющих скольжения металлорежущих станков	20	5	80

тывается без осложнений в холодную. Усталостная прочность деформированных сплавов, особенно в биметалле, намного выше, чем литых сплавов. Поэтому изделия из них также могут работать в более тяжелых условиях.

При работе цинкового сплава в паре со стальным валом твердость последнего должна быть не ниже *НВ 300*. По возможности в конструкции монометаллических трущихся деталей следует избегать бортов, резких переходов и т. д., так как цинковые сплавы плохо сопротивляются усталостным разрушениям в условиях воздействия больших изгибающих усилий.

МАГНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Магний принадлежит к числу наиболее распространенных металлов. Благодаря малой плотности сплавы магния по характеристикам удельной прочности превосходят некоторые конструкционные стали, чугуны

и алюминиевые сплавы. Магниеые сплавы в горячем состоянии хорошо прессуются, куются, прокатываются и обрабатываются резанием. Некоторые магниевые сплавы отличаются хорошими демпфирующими свойствами.

Магниеые сплавы целесообразно применять в деталях, работающих на изгиб. Они немагнитны и не искрят при ударах и трении. Их используют в качестве конструкционного материала и материала со специальными физико-химическими свойствами. Магниеые сплавы легко свариваются, в особенности аргонодуговой сваркой. Многие магниевые сплавы упрочняются термической и термохимической обработкой.

В соответствии с ГОСТ 804—72 первичный магний выпускается трех марок — МГ90, МГ95 и МГ96 (магния не менее 99,90; 99,95 и 99,96% соответственно) в виде чушек массой $8,0 \pm 1,0$ кг.

Магний — химически активный металл. На воздухе окисляется с образованием на поверхности окисной пленки из MgO . Дистиллированная холодная вода на магний почти не действует. Кипящую воду магний разлагает энергично. В морской и минеральной воде магний разрушается. В водных растворах большинства минеральных кислот и солей магний растворяется. Он стоек в растворах плавиковой и хромовой кислот, соды, едких щелочей, а также в бензине, керосине и минеральных маслах. Поэтому он может быть использован для изготовления трубопроводов, баков, цистерн, для перевозки и хранения этих жидкостей.

Для предохранения магния от коррозии на его поверхность наносят тончайшие окисные пленки или лакокрасочные покрытия. Хорошие результаты дает покрытие эпоксидными пленками.

Характеристики физико-химических и механических свойств магния

Плотность, г/см ³	1,74
Температура плавления, °C	651
Температура кипения, °C	1107
Скрытая теплота плавления, кал/г	70
Удельная теплоемкость (при 20—100° C), кал/(г·°C)	0,246
Теплопроводность, кал/(см·с·°C)	0,376
Удельное электросопротивление (при 20° C), Ом·мм ² /м	0,047
Коэффициент линейного расширения при 25° C, 1/°C	$26 \cdot 10^{-6}$
Предел прочности, кгс/мм ² , в:	
литом состоянии	12,0
деформированном состоянии	20,0
Предел текучести, кгс/мм ² , в:	
литом состоянии	3,0
деформированном состоянии	9,0
Твердость HB, кгс/мм ² , в:	
литом состоянии	30,0
деформированном состоянии	36,0
Относительное удлинение, %, в:	
литом состоянии	8,0
деформированном состоянии	12,0

Модуль упругости, кгс/мм², в

литом состоянии	4200—4400
деформированном состоянии	4100—4300

Кроме чистого магния выпускают первичные магниевые сплавы (табл. 105) в чушках для производства фасонного литья и слитков, обрабатываемых давлением.

В табл. 106—118 приведены состав и свойства магниевых сплавов.

105. Химический состав * (%)
и маркировка первичных магниевых сплавов в чушках (ГОСТ 2581—71)

Сплав	Al	Zn	Mn	Zr	Nd	Количество полос и цвет на торце чушки
ММ2	—	—	1,5—2,2	—	—	Одна красная
ММ2ч	—	—	1,5—2,2	—	—	Две красные
МА3у	3,0—3,8	0,2—0,8	0,2—0,5	—	—	Одна синяя
МА5у1	3,8—5,0	0,8—1,5	0,2—0,8	—	—	Две коричневые
МА5у1ч	3,8—5,0	0,8—1,5	0,2—0,8	—	—	Три коричневые
МА6у3	5,6—6,8	2,2—3,0	0,2—0,5	—	—	Две синие
МА6у3ч	5,6—6,8	2,2—3,0	0,2—0,5	—	—	Три синие
МА8у	7,5—8,7	0,3—0,8	0,2—0,5	—	—	Одна зеленая
МА8уч	7,5—8,7	0,3—0,8	0,2—0,5	—	—	Три зеленые
МА8уон	7,5—8,7	0,3—0,8	0,2—0,5	—	—	Две зеленые
МА10у1	9,0—10,0	0,7—1,2	0,2—0,5	—	—	Одна черная
МУр1Н3	—	—	—	0,4— 1,1	2,6— 3,2	Одна коричневая
М85	Не более 12,0	Не более 5,0	Не более 1,0	—	—	Две черные

* Основа — Mg

Примечание Сплавы поставляют в виде чушек массой 8,0±1,0 кг

Сплав	Вид термической обработки *	Химический состав **, %					при 20 °С (типичные)			рабочие температуры, °С		Области применения
		Al	Mn	Zn	Zr	Другие легирующие элементы	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	Длительное	Кратковременно	
МЛ2	Л	—	1,0—2,0	—	—	—	10	8,0	4	150	200	Для деталей, от которых требуются повышенная коррозионная стойкость и герметичность (горловины, бензобаки, бензомасляная арматура и др.) Для деталей с высокой герметичностью (в арматуре корпусов насосов и др.) Для деталей двигателей и других агрегатов, работающих в условиях высокой коррозионной стойкости, статических и динамических нагрузок (корпуса приборов и инструментов, штурвалы и др.) Для нагруженных деталей, работающих в условиях морской атмосферы, а также деталей двигателей, приборов и др. (тормозные барабаны, кронштейны, штурвалы и др.) Для высоко- и средненагруженных деталей (детали приборов, аппаратуры, корпуса и др.) Для нагруженных деталей (реборды, барабаны колес и другие конструкции)
МЛ3	Л	2,5—3,5	0,15—0,5	0,5—1,5	—	—	18	5,5	8	До 150	До 150	
МЛ4	Т4	5,0—7,0	0,15—0,5	2,0—3,0	—	—	25	8,5	9	150	250	
МЛ5	Т4	7,5—9,0	0,15—0,5	0,2—0,8	—	—	25	9	9	150	250	
МЛ6	Т6	9,0—10,2	0,1—0,5	0,6—1,2	—	—	26	14	1	До 150	—	
МЛ8	Т6	—	—	5,5—6,6	0,7—1,1	Cd 0,2—0,8	27	17	4	150	200	

Сплав	Вид термической обработки *	Химический состав **, %					Свойства при 20 °С (типичные)			Предельные рабочие температуры, °С		Области применения
		Al	Mn	Zn	Zr	Другие легирующие элементы	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0.2}$, кгс/мм ²	δ , %	Длительное	Кратковременное	
МЛ9	T6	—	—	—	0,4—1,0	Jn 0,2—0,8 Nd 1,9—2,6	25	12	6	250—300	350—400	Для деталей двигателей, приборов и др.
МЛ10	T6	—	—	0,1—0,7	0,4—1,0	Nd 2,2—2,8	24	15	5	250	350	Для нагруженных деталей различных конструкций, двигателей, приборов и агрегатов, требующих высокой герметичности и высокой стабильности размеров
МЛ11	T6	—	—	0,2—0,7	0,4—1,0	ΣРЗМ 2,2—2,8	16	10	3	250	300	Для деталей двигателей, приборов, агрегатов, требующих повышенной герметичности и не испытывающих высоких нагрузок при комнатной температуре
МЛ12	T6	—	—	4,0—5,0	0,6—1,1	—	27	16	6	200	250	Для нагруженных деталей (реборды, барабаны колес и другие конструкции)
МЛ15	T1	—	—	4,0—5,0	0,7—1,1	La 0,6—1,2	22	15	4	200	300—350	Для нагруженных деталей двигателей, приборов, агрегатов, требующих герметичности

* Л — без термической обработки, остальные обозначения см. табл. 108.

** Основа — Mg.

Примечание. Сплавы МЛ4 и МЛ5 повышенной чистоты (сумма примесей 0,14%).

Температура испытания, °С

Вид термической обработки				100				180				200			
	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	$\sigma_{0,2/100}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	$\sigma_{0,2/100}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2/100}$, кгс/мм ²		
Л1	—	—	—	1,8	8,0	—	—	1,6	7	—	—	—	1,3		
Л1	16	5	10	3,9	14,5	4,5	11	3,5	10,5	4	12	—	2,5		
Т4	24	8	7	6,6	21	7,5	15	2,9	15	6,8	25	—	1,2		
Т4	23	8	10	7,0	18,5	6	12	2,5	15,5	5	15	5	0,8		
Т4	—	—	—	7,2	21	8,5	18	2,4	15	—	—	—	0,7		
Т6	—	—	—	—	—	—	—	—	20—22	13—14	5	—	9,5		
Т6	—	—	—	—	—	—	—	—	19	14	8	13	11		
Т6	—	—	—	—	—	—	—	—	14	8	6	11,5	6,5		
Т1	—	—	—	5,6	16	11	5	4	14	8,5	5	5	2,5		
Т1	—	—	—	—	14,5	10,5	5	6,5	12,5	8,5	13	6,5	4		

Сплав	Вид термической обработки	Температура испытания, °С												
		250					300				-70		-196	
		σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2/100}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	σ_B , кгс/мм ²	δ , %
МЛ2	Л	—	—	—	—	—	6	—	—	—	—	—	—	—
МЛ3	Л	—	—	—	—	—	6	3	10,5	—	—	—	—	—
МЛ4	Т4	7,5	—	26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
МЛ5	Т4	12	4	15	2,5	—	9,0	—	—	—	29	12	29	7
МЛ6	Т4	11	7	—	—	—	8	—	—	—	27	5	32	4,5
МЛ9	Т6	16—18	12	5	—	4,5	12	10	20	1,8	—	—	—	—
МЛ10	Т6	16,5	13	13	7	3,8	13,5	11	17	2,5	30	5	32	4
МЛ11	Т6	13	7,5	8,5	5,5	3	15,5	6	30	2,2	—	—	—	—
МЛ12	Т1	10	6	6	—	—	—	—	—	—	—	—	25	2,0
МЛ15	Т1	10	6,5	16	—	2	7,5	5,0	16	4,0	21	1	22	1

108. Режимы термической обработки литейных магниевых сплавов

Сплав	Вид термической обработки	Закалка			Старение	
		Температура, °C	Время выдержки, ч	Охлаждающая среда	Температура, °C	Время выдержки, ч
МЛ2	T2	—	—	—	340	2—3
МЛ3	T2	—	—	—	340	2—3
МЛ4	T4	380	8—16	Воздух	—	—
МЛ4п. ч.	T6	380	8—16	»	175	16
МЛ5	T4	415	8—32	»	—	—
МЛ5п. ч.	T6	415	8—32	»	175 или 200	16 или 8
МЛ50 н.	T4	410	8—16	»	—	—
	T4	360	3	»	—	—
		+410	21—29	—	—	—
МЛ6	T6 *	360	3	Вода при 90° C	190	4—8
МЛ10	T6	+410	21—29	Воздух	205	12—15
	T4	540	8—12	»	—	—
МЛ11	T6	570	4—6	»	200	16
	T1	570	4—6	»	300	4—6
МЛ12	T6	400	2	—	165 или 150	24 или 50
МЛ14	T1	+490	3	Воздух	315	16
МЛ15	T1	—	—	—	300	2—6

* Для получения повышенного удлинения.

Примечания: 1. Условные обозначения: T1 — старение из этого состояния; T2 — отжиг для снятия внутренних напряжений (охлаждение с печью); T4 — закалка; T6 — закалка и старение.
2. Температура нагрева должна выдерживаться в пределах $\pm 5^\circ \text{C}$.
3. Знак «+» указывает на ступенчатый нагрев.
4. Длительность выдержки указана без учета времени, необходимого для нагрева до заданной температуры закалки и старения.

109. Характеристика физических свойств литейных магниевых сплавов

Сплав	Коэффициент линейного расширения α 10^6 при 20—200° C, $1/^\circ \text{C}$	Коэффициент теплопроводности, кал/(см с °C)	Удельная электропроводность α 10^4 , Ом $^{-1}$ мм $^{-1} \cdot 10^{-4}$
МЛ2	27,2	0,32	14,5
МЛ3	27	0,25	11
МЛ4, МЛ4п. ч	27,6	0,190	8,2
МЛ5, МЛ5п. ч	28,1	0,185	7,5
МЛ50н	—	—	—
МЛ6	27,3	0,185	7,1
МЛ7-1	27,7	0,180	—
МЛ8	27,2	0,290	—
МЛ9	27,1	0,280	13,8
МЛ10	28,0	0,270	12,0
МЛ11	—	0,280	13,7
МЛ12	27,3	0,320	15,1
МЛ15	26,9	0,330	14,7

Примечание. Удельная теплоемкость сплавов 0,22—0,25 кал/(г·°C).

110. Характеристики технологических свойств литейных магниевых сплавов

Сплав	Температура литья, °С	Линейная усадка, %	Горячеломкость (по ширине кольца), мм	Жидкотекучесть (по длине прутка), мм
МЛ2	750—800	1,6—1,9	50	—
МЛ3	720—800	1,4—1,6	42,5	215
МЛ4, МЛ4п. ч	720—800	1,2—1,4	37,5	235
МЛ15, МЛ50. н и МЛ5 п. ч	720—800	1,1—1,3	30,0	290
МЛ6	720—800	1,1—1,2	27,5	335
МЛ7-1	720—780	1,2—1,3	37,5	250
МЛ10	720—800	1,2—1,5	30	250
МЛ11	720—800	1,2—1,5	—	—
МЛ12	730—800	1,3—1,4	30—32,5	280
МЛ15	720—800	1,3—1,6	27,5—30	320
МЛ14	720—800	1,3—1,4	—	—

111. Характеристики свариваемости литейных магниевых сплавов (аргонодуговая сварка)

Сплав	Вид термической обработки	Присадка	Условия заварки дефектов отливок (деталей)
МЛ5	—	Основной материал	Без подогрева и с подогревом в интервале 350—380° С в зависимости от жесткости детали ²
МЛ5п. ч.	Т6	То же	То же в интервале 380—430° С ⁴
МЛ10	Т6	»	С подогревом в интервале 380—430° С ²
МЛ11	Т1	Проволока СВ122 ¹	С подогревом (общий + местный) в интервале 400—430° С
МЛ12	Т6	Проволока СВ122 ¹	С созданием теплового барьера в зоне плавки ²
МЛ8		Основной материал	Без подогрева (сплавы склонны к образованию трещин в шве, зоне сплавления и околошовной зоне ⁴)
МЛ15			Без подогрева и с местным подогревом в интервале 380—470° С в зависимости от жесткости детали ²
МЛ12			
МЛ18			
МЛ15			
МЛ19			

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.

Сплав	100					150					200				
	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2/100}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2/100}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2/100}$, кгс/мм ²
MA1	18	15	15	—	—	14	11	18	—	2,5	18	8	25	—	1,5
MA2	21	11,5	30	10	—	16,5	—	45	5	—	11,5	—	60	2	—
MA2-1	22,5	11,5	19	13	7	19	9,5	30	8,5	2	13	7,5	35	3,5	—
MA5	22	13	22	—	—	17	10	30	—	—	12,5	7,0	38	—	—
MA8	18	10	26	14	—	15	7	30	12	6	132	6	32	7,5	3
MA11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	21	11	13	15	8
MA12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	17	12	10	11	7
MA14	26	—	20	—	—	21	—	28	—	—	15	—	50	2,5	—
MA15	21	15	16	—	—	19	14	25	10	3	16	9	30	—	—
BMC1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19	10	22	—	—

Сплав	Температура испытания, °С																		
	250					300				350				-70			-196		
	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2/100}$, кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_{100} , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %
МА1	9	5	60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	31	—	—	—	—
МА2	7,5	—	75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	29	13	40	—	2,5
МА2-1	9	4,5	45	—	—	7	4	50	—	—	—	—	—	—	—	9	38	31,5	2,6
МА5	8,5	5,5	45	—	—	7,0	3,5	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
МА8	11	5	34	3,5	—	7	—	62	—	—	—	—	—	26	8,5	—	—	—	—
МА11	18	9	15	9	3,5	14	8	19	1,5	10	6	47	—	—	—	—	—	—	—
МА12	14	10	16	—	—	10	8	20	—	6,5	6	—	30	—	—	—	—	—	—
МА14	10,5	—	58	—	—	7	—	62	—	—	—	—	—	41	—	8	47	—	2,5
МА15	11	5	45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	35	5	—	—	—
ВМС1	17	9	18	—	—	13	8	24	—	7,5	—	65	—	—	—	—	—	—	—

Сплав	термической обработки	Темпе- ратура, °С	Время выдерж- ки, ч	Охлаждающая среда	Темпе- ратура, °С	Время выдерж- ки, ч	Темпе- ратура, °С	Время выдерж- ки, ч
МА1	М	—	—	—	—	—	320—350	0,5
МА2-1	М	—	—	—	—	—	250—280	0,5
МА5	T4	410—425	6—2	Воздух	—	—	—	—
	T5	—	—	—	175—200	16—8	—	—
	T6	410—425	6—2	Воздух	175—200	16—2	—	—
МА8	М	—	—	—	—	—	320—350	0,5
МА11	T6	480—500	4	Струя холодного воздуха	175±5	24	—	—
	T8 *	480—500	4		175±5	24	—	—
МА12	T6	530	1	Вода	200	16	—	—
МА14	T5	—	—	—	170±5	10—24	—	—
МА15	М	—	—	—	—	—	260±20	0,5

* Между закалкой и старением — холодная деформация 3—10%.

Примечание Условные обозначения М — отжиг после деформации; Н — полунагартованное состояние (низкотемпературный отжиг после деформации), T4 — закалка после деформации; T5 — искусственное старение после деформации, T6 — закалка и искусственное старение после деформации, T8 — закалка с последующей нагартовкой и искусственное старение

Сплав	Химический состав *, %					
	Al	Mn	Zn	Zr	Nd	Ce
МА1		1,3—2,5		—	—	—
МА2	3,0—4,0	0,15— 0,5	0,2—0,8	—	—	—
МА2-1	3,8—5,0	0,2—0,6	0,6—1,5	—	—	—
МА5	7,8—9,2	0,15— 0,5	0,2—0,8	—	—	—
МА8	—	1,5—2,5		—		0,15— 0,35
МА11	—	1,5—2,5		—	2,5— 3,5	
МА12	—			0,3—0,8	2,5— 3,5	
МА14	—		5,0—6,0	0,3—0,9		
МА15	—		2,5—3,5	0,45— 0,9		
ВМС1	3,0—4,0		1,2—2,0	0,4—0,9		

* Основа — Mg.

Две главы

°С	Полу-фабрикат	Предельные рабочие температуры, °С		Области применения
		Длительно	Кратковременно	
0, %				
5—10		150	200	Для сварных деталей несложной конфигурации, деталей арматуры, бензо- и масляных систем, не несущих больших нагрузок
5—15	Всех видов	150	200	Для кованых и штампованных деталей сложной конфигурации для сварных конструкций
8—20		150	200	Для панелей, штамповок сложной конфигурации для сварных конструкций
8—14	Прессованные поковки, штамповки	150	200	Для нагруженных деталей
4—20	Всех видов	200	250	Для листов, плит, штамповок сложной конфигурации, для сварных конструкций
5—14	Прутки, штамповки листы	250	300	Для деталей, нагреваемых в процессе эксплуатации
9—12	Прутки, листы, плиты	250	300	То же
6—14	Профили, прутки	150	200	Для высоконагруженных деталей
5—14	Прутки, профили, листы	150	200	Для деталей сварных конструкций, требующих повышенного предела текучести при сжатии
3—10	Прутки, профили	150	200	Для деталей, от которых требуется повышенный предел текучести при сжатии

115. Характеристики физических свойств деформируемых магниевых сплавов

Сплав	Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ (при 20—200° C), г/°C	Коэффициент тепло- проводности, кал/(см·с·°C)	Удельная тепло- емкость, кал/(г·°C)	Удельное электро- сопротивле- ние ρ , Ом·мм ² ·м
MA1	26,5	0,30	0,24	0,061
MA2	26,0	0,23	0,27	0,120
MA2-1	26,3	0,23	0,26	0,120
MA5	26,0	0,18	0,27	0,130
MA8	24,9	0,32	0,25	0,051
MA11	27,5	0,26	—	0,062
MA12	—	—	—	—
MA14	26,0	0,28	0,25	0,056
MA15	26,8	0,27	0,24	0,065
BMC1 (порошок)	—	0,23	0,23	0,084

116. Характеристики технологических свойств деформируемых магниевых сплавов

Характеристика	MA1, MA8	MA2	MA2-1	MA5	MA14	MA15
Температура, °C:						
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 (ме- жду 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

117. Температура (°C) обработки давлением магниевых сплавов

Сплав	Прессование	Прокатка (листов)	Ковка и горячая штамповка	Листовая штам- повка
MA1	320—380	360—400	350—440	250—350
MA2	320—360	—	440—320	420—320
MA2-1	320—360	360—400	390—350	250—320
MA8	380—420	400—450	420—350	230—350
MA14	300—360	—	420—300	200—250
MA15	330—380	300—350	380—250	(профили) 200—300
MA11	410—430	390—440	460—350	350—400

118. Характеристики свариваемости деформируемых магниевых сплавов (аргонодуговая сварка)

Сплав	Присадка	Коэффициент прочности сварного соединения	Угол загиба шва Δ°	Коэффициент трещинообразования $K_{тр}$	Коррозионная стойкость сварного соединения	Примечание
МА1	Основной материал	0,86	70	≤ 15	Удов- летвори- тельная	Сплав сваривается хорошо, не склонен к образованию зон микрорыхлоты при сварке
МА8	Основной материал МА2-1	0,60 0,75	40 60	≤ 45 ≤ 35		Сплав сваривается удовлетворительно, склонен к образованию зон микрорыхлоты
МА2-1	Основной материал	0,80	65	≤ 30		То же
МА14	Проволока марки СВ122	—	—	≤ 70	Неудов- летвори- тельная	Сплав сваривается плохо, имеет большую склонность к образованию зон микрорыхлоты
МА15	Основной материал	0,82	60	≤ 35	Удов- летвори- тельная	Сплав сваривается удовлетворительно, несколько склонен к образованию зон микрорыхлоты
МА11-Т6	Проволока марки СВ27	0,76	—	≤ 60	Неудов- летвори- тельная	Сплав сваривается плохо, имеет большую склонность к образованию зон микрорыхлоты

Сверхлегкие магниевые сплавы

Характерными особенностями этих сплавов являются низкая плотность (1,4—1,6 г/см³), повышенная пластичность и обрабатываемость давлением при температурах значительно более низких, чем обычных магниевых сплавов, высокая удельная жесткость и высокий предел текучести при сжатии, отсутствие чувствительности к надрезу, незначительная анизотропия механических свойств, высокая теплоемкость, хорошие механические свойства при криогенных температурах. В табл. 119 приведены состав и свойства магниевых литевых сплавов.

119. Магниево-литиевые сплавы (горячепрессованные прутки)

Сплав	Химический состав, %						Плотность, г/см³	Область применения
	Li	Al	Zn	Cd	Mn	Ce		
ИМВ2	7—10	4—6	0,8—2,0	3—5	0,15—0,4	—	1,60	Для средненагруженных деталей, работающих при температурах до 100—125° С, и криогенных температурах, где требуются высокая жесткость и повышенная прочность при сжатии Для малонагруженных конструкций, работающих при нормальной и криогенных температурах, где требуются жесткость и повышенное сопротивление сжимающим нагрузкам
ВМД5 *	10—11	0,5—1,0	2—2,5	—	0,1—0,4	0,15—0,35	1,48	
Сплав	Характеристика механических свойств							
	σ_B , кгс/мм²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм²	$\sigma_{-0,2}$, кгс/мм²	δ , %	a_H , кгм/см²	E , кгс/мм²	σ_{100}^{60} , кгс/мм²	σ_{100}^{100} , кгс/мм²
ИМВ2	21—28	16—25	18—24	8—25	0,5—1,0	4600	10,0	5,5
ВМД5 *	16—22	12—18	13—18	15—40	2,5—4,0	4500	—	—

* Сплав с высокой пластичностью.

* Сплав с высокой пластичностью.

Магниеые сплавы со специальными физическими и химическими свойствами

Сплав с высокой звукопроводностью МА17 (табл. 120). Свойства го приведены далее:

коэффициент затухания ультразвука на продольных волнах (дБ/м) при частоте:

10 МГц	2—3
15 МГц	3—5
20 МГц	5—8

корость распространения (м/с) волн:

продольных	5760—5840
поперечных	3040—3150

температурный коэффициент задержки (1/°C) волн:

продольных	$(1,3—1,6) \cdot 10^{-4}$
поперечных	$(2,2—2,4) \cdot 10^{-4}$
лотность, г/см ³	1,75—1,76
дельное электросопротивление, мкОм·см	5,32—5,34
редел прочности при растяжении, кгс/мм ²	19—21
редел текучести, кгс/мм ²	11—14
носительное удлинение, %	12—14
вердость, НВ	40—52

Сплав с высокой демпфирующей способностью МЦИ (табл. 120) предназначен для отливки деталей, работающих в условиях воздействия вибрационных нагрузок. Демпфирующая способность сплава МЦИ несколько десятков раз выше, чем магниевых сплавов, используемых в качестве конструктивных сплавов. Использование сплава МЦИ в конструкциях, подвергающихся вибрациям, даст возможность уменьшить массу и увеличить надежность и срок службы изделий, также существенно снизить шум. Сплав хорошо сваривается аргодуговой сваркой, отлично обрабатывается резанием и отличается вольно хорошей коррозионной стойкостью.

Характеристики свойств сплава МЦИ

лотность, г/см ³	1,75
дельное электросопротивление, мкОм·см	5,9
модуль упругости, кгс/мм ²	4560
коэффициент Пуассона	0,28
коэффициент линейного расширения (0—100° C), 1/°C	24,8
коэффициент теплопроводности, кал/(см·с·°C)	0,30
редел прочности при растяжении, кгс/мм ²	17—18
редел текучести при растяжении, кгс/мм ²	6—7
носительное удлинение, %	15—30
редел прочности при сжатии, кгс/мм ²	28—30
редел текучести при сжатии, кгс/мм ²	6—7
редел прочности при изгибе, кгс/мм ²	42—45
редел текучести при изгибе, кгс/мм ²	9—10
арная вязкость, кгс·м/см ²	1,2—1,4

В табл. 120, 121 приведены состав и свойства протекторных сплавов для защиты от коррозии газонефтепроводов и других подземных сооружений.

Сплав	Химический состав *, %									Вид полуфабриката	Назначение
	Al	Zn	Mn	Ce	Zr	Cd	Y	Hg	Примеси (не более)		
МА17	—	—	0,2—0,7	0,7—1,5	—	—	—	—	—	Плиты катаные	Для изготовления звукопроводов ультразвуковых линий задержки
МА2-2 **	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 Si 0,03 Fe 0,15 Cu 0,01 Ni	Литье и прессованные прутки	Для защиты от коррозии газонефтепроводов и других подземных металлических сооружений
МЛ16п ч	7,5—9,0	2,0—3,0	0,15—0,50	0,06	0,005	0,01	0,001	—	—	То же	То же
МЛ16в ч	7,5—9,0	2,0—3,0	0,15—0,50	0,04	0,003	0,003	0,001	—	—	»	»
МЛ4в. ч	5,0—7,0	2,0—3,0	0,15—0,50	0,05	0,003	0,004	0,001	—	—	Литье	Протекторный сплав для защиты от коррозии морских судов
МЦИ	—	0,1—0,3	—	—	0,4—0,7	0,4—0,75	0,02—0,05	—	—	»	Для изготовления деталей, работающих в условиях вибрационных нагрузок

* Основа — Mg.

** Окончательный отжиг листов рекомендуется проводить при 200—230° С в течение 30 мин, затем охлаждение.

121. Электрохимические свойства протекторных сплавов

Сплав	Потенциал, мВ	Электрохимический эквивалент Г/(А·ч)	Токоотдача А·ч/кг	Коэффициент полезного использования, %
МЛ4	—1275	1,125	890	40
МЛ4п. ч.	—1225	0,75	1330	60
МЛ16	—1590	0,87	1154	52
МЛ16п. ч.	Свойства выше, чем у сплава МЛ16			

ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ

Титан

Титан имеет две полиморфные разновидности: α -Ti устойчив ниже

882,5° С, кристаллизуется в ГПУ-решетке типа А3 с периодами при 20° С: $a = 2,95111 \pm 0,00006$ Å; $c = 4,68433 \pm 0,0004$ Å; $c/a = 1,5873$.

β -Ti — устойчивый выше 882,5° С, имеет ОЦК-решетку типа А2 с периодом $a = 3,282 \pm 0,003$ Å при 25° С (получено экстраполяцией) или $a = 3,3065$ Å при 900° С.

Характеристики физических свойств

Плотность γ , г/см ³ :	
для α -Ti при 20° С	4,507 ± 0,0005
для β -Ti при 900° С	4,32
Температура плавления $t_{пл}$, °С	1655 ± 5
Температура кипения $t_{кип}$, °С	3227
Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_K , К	0,4
Скрытая теплота плавления $Q_{пл}$, ккал/моль	5,0
Скрытая теплота испарения $Q_{исп}$, ккал/моль	112,5
Скрытая теплота полиморфного превращения $Q_{пр}$ α -Ti → β -Ti, ккал/моль	0,678 ± 10%
Изменение энтропии ΔS при превращении α -Ti → β -Ti, кал/кг	0,587
Удельная теплоемкость при постоянном давлении c_p , кал/(г·°С) при t , °С:	
100	0,130
500	0,141
800	0,148
1100	0,164
Атомная теплоемкость при постоянном давлении, c_A , кал/(г·атом·°С)	6,05
Зависимость c_p , кал/(г·°С), от температуры при $t = 0 \div 440$ ° С	$c_p = 18,62 \times 10^{-3} + 2,38 \times 10^{-5} T - 9,05 \cdot 10^{-8} T^2$
Теплопроводность λ , кал/(см·с·°С), при t , °С:	
20	0,0371
100	0,0364
300	0,0346
500	0,0229
700	0,0305

Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/°C, от 20° C до t , °C:	
100	8,3
300	92
500	97,5
700	99,5
800	100,5
Удельное электросопротивление ρ , Ом·мм ² /м (при 20° C)	
для иодидного Ti	0,42
для магнетермического Ti	0,55
Температурный коэффициент удельного электросопротивле- ния α_ρ , 1/°C	
	$5,5 \cdot 10^{-3}$
Магнитная удельная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$, э. м. с., при t , °C:	
20	$3,2 \pm 0,4$
-80	1,25
Коэффициент сжимаемости $\alpha_{сж} \cdot 10^6$, см ³ /кгс	
	0,797
Модуль упругости Юнга E , кгс/мм ² , при t , °C:	
20	11 200—11 260
500	8000
Модуль сдвига G , кгс/мм ²	
	4100
Коэффициент Пуассона μ	
	0,32
Работа выхода электрона, эВ	
	3,95—4,09
Поперечное сечение захвата тепловых нейтронов s_n , барн/атом	
	5,8
Интегральная степень черноты ε :	
для α -Ti	0,459 (710—870° C)
для β -Ti	0,42 (1398,9° C)
Зависимость давления пара Ti от температуры (1500—1800 K):	
$\log p_{\text{атм}} = 7,782 - \frac{24275}{T} - 0,00023T$	

Получение и механические свойства. Титан получают следующими методами: иодидным (содержание Ti до 99,95%), магнетермическим (содержание Ti в губке 99,3—99,7%), натриетермическим, гидридно-кальциевым и электролитическим.

Состав и характеристики механических свойств различных марок титана, полученных разными методами, приведены в табл. 122 и 123.

Влияние степени холодной пластической деформации на механические свойства отожженного титана показано на рис. 26.

При нагревании нагартованного титана происходит рекристаллизация, причем рост зерен особенно интенсивен в области существования β -Ti. Критическая степень деформации технического титана равна примерно 4%. Влияние отжига на механические свойства нагартованного титана показано на рис. 27.

Изменение механических свойств титана при нагревании (рис. 28) показывает, что чистый титан не является жаропрочным материалом. Сверхпластичность титана проявляется в интервале температур 800—1000° C (при 800° C $\delta \approx 115\%$).

Характеристики механических свойств титана при низких температурах приведены в табл. 124.

Механические свойства титана дают возможность применять его в криогенной технике.

Предел выносливости отожженного титана $\sigma_{-1} = 16 \div 18$ кгс/мм²; усталостная прочность титана зависит от метода получения, типа термической обработки, обработки давлением, размера зерна (рис. 29).

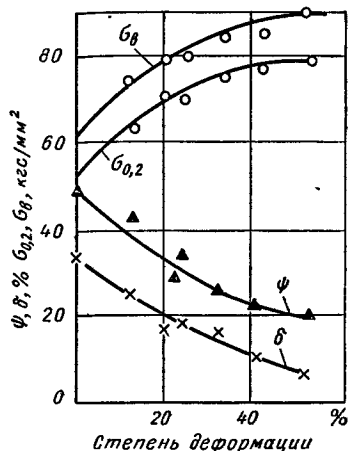


Рис. 26. Влияние степени деформации на механические свойства отожженного титана

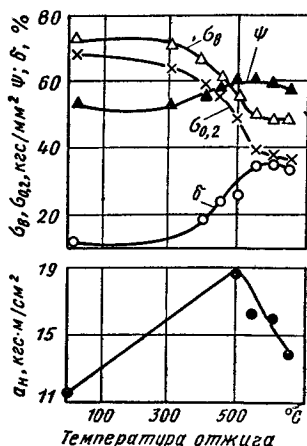


Рис. 27. Влияние температуры отжига на механические свойства нагартованного титана

Рис. 28. Влияние температуры на механические свойства технического (1) и иодидного (2) титана

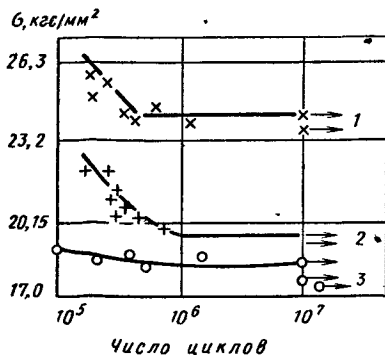
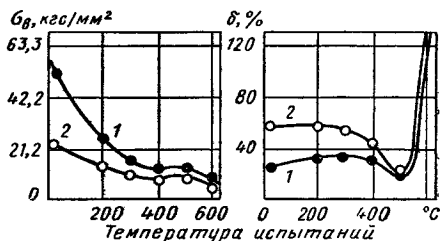


Рис. 29. Влияние величины зерен на на усталостную прочность отожженного титана:

1 — 1200 зерен на 1 мм²; 2 — 1000 зерен на 1 мм²; 3 — 80 зерен на 1 мм²

Марка	Способ получения	Полуфабрикат	Fe	Si	C	Cl	N	O	H	Прочие	HB **
—	Иодидный	Прутки	0,04	0,03	0,01	—	0,005	0,01	—	0,05Al	< 100
ТГ100 *1 ТГ105 *1 ТГ110 ТГ120 ТГ130 ТГ140 ТГ155 ТГ170 ТГ190	Магние-термический	Титановая губка	0,06 0,07 0,09 0,11 0,13 0,15 0,20 0,23 0,30	0,02 0,02 0,05 0,05 0,05 0,05 0,08 0,08 0,10	0,03 0,03 0,03 0,04 0,04 0,05 0,06 0,06 0,06	0,08 0,08 0,08 0,08 0,10 0,10 0,10 0,12 0,12	0,02 0,02 0,03 0,03 0,03 0,03 0,04 0,05 0,06	0,04 0,05 0,05 0,065 0,08 0,09 0,10 — —	— — — — — — — — —	0,05 Ni 0,05 Ni — — — — — — —	< 100 101—105 106—110 111—120 121—130 131—140 141—155 156—170 171—191
ВТ1-00 ** ВТ1-0 ** ВТ1-1		Листы, поковки, штамповки, прутки	0,20 0,20 0,25	0,08 0,10 0,12	0,05 0,07 0,08	— — —	0,04 0,04 0,05	0,10 0,12 0,15	0,008 0,010 0,012	0,10 0,30 0,30	116—149 131—163
—	Гидридно-кальциевый	То же	0,35	0,1	0,05	—	0,07	0,003	0,35	{ Ca 0,08 Cr 0,07	—
—	Электролитический	Порошок	0,01	0,03	0,01	—	0,04	0,04	—	—	—

1 ГОСТ 5.303—69.

** Для губки указана HB плавленного Ti

** ГОСТ 19807—74.

123. Характеристики механических свойств отожженного титана при 20° С

Способ получения	Марка	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	α_H , кгс·м/см ²
Иодидный	—	22—26	12—17	50—60	70—80	≥25
Магнито-термический	BT1-00	30—45	25—38	≥30	≥60	12—15
	BT1-0	40—55	30—42	≥30	≥60	10—12
	BT1-1	45—60	38—50	≥25	≥50	

124. Характеристики механических свойств титана BT1-0 при низких и сверхнизких температурах

t, °C	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	α_H , кгс·м/см ²
20	50	38	30	55	10
—196	97	75	20	48	8
—253	120	110	10	35	6
—269	121	87	35	58	1

формы образца, условий поверхностной обработки, температуры испытания (табл. 125) и других факторов. С повышением содержания примесей σ_{-1} увеличивается.

Коррозионная стойкость. На воздухе до 500° С Ti не окисляется, выше 500° С активно взаимодействует с O₂ и N₂, причем на поверхности изделий образуется твердый «альфированный» слой.

Из табл. 126 следует, что титан стоек в растворах HNO₃, NaOH и NaCl; он практически не разрушается в морской воде, однако менее стоек в растворах HCl и H₂SO₄.

125. Усталостная прочность титана при низких температурах

Температура испытания, °C	σ_{-1} , кгс/мм ²	σ_B , кгс/мм ²	σ_{-1}/σ_B
20	18,6	41,4	0,45
—60	24,2	47,3	0,51
—196	47,6	85,0	0,56

126. Коррозионная стойкость титана в водных растворах

Среда (растворимое вещество)	Концентрация, % (по массе)	Температура, °C	Скорость коррозии, мм/год
H ₂ SO ₄	10	35	50,0
HCl	10	35	42,0
NaOH	10	Кипения	0,84
NaCl	Насыщенный раствор	Кипения	0,5
HNO ₃	10	35	0,5
Морская вода	—	20	0,00003

Технологические свойства. Чистый титан хорошо обрабатывается давлением в горячем состоянии и удовлетворительно в холодном. Он легко прокатывается, куется, штампуется. Примеси С, О, Н и N резко снижают пластичность титана. Титан хорошо сваривается дуговой сваркой в аргоне или гелии. Получаемые сварные швы могут деформироваться в холодном состоянии. Обработка резанием затруднена из-за склонности к налипанию, низкой теплопроводности и плохих антифрикционных свойств титана.

Титановые сплавы

Взаимодействие элементов периодической системы с титаном показано на рис. 30.

IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA			IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIIIB
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
																H	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U												

а)

IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA			IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIIIB
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
																H	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U												

б)



Рис. 30. Взаимодействие α -Ti (а) и β -Ti (б) с другими элементами (по И. И. Корнелову): 1 — непрерывные твердые растворы; 2 — ограниченные твердые растворы; 3 — соединения; 4 — эвтектические структуры; 5 — не взаимодействуют; 6 — не изучены; штриховка в клетку — ограниченные твердые растворы и соединения

Легирующими элементами в промышленных титановых сплавах являются Al, Mo, V, Cr, Mn, Sn, Zr, Fe, Nb, Si, Cu, а примесями O, N, C и H. Соответствующие диаграммы состояния в областях, богатых Ti, могут быть классифицированы на 3 типа по характеру кристаллизации из жидкого состояния. В зависимости от особенностей превращения β -раствора при охлаждении в каждом типе могут быть выделены три вида (рис. 31).

По влиянию на стабильность α - и β -твердых растворов легирующие элементы разделяются на три группы:

1) α -стабилизаторы, — Al, O, N, C, B. Они расширяют α -область диаграммы состояния и стабилизируют α -фазу в условиях теплового и механического воздействия;

2) β -стабилизаторы — Mo, V, Cr, Nb, Fe, Mn. Они расширяют β -область диаграммы и стабилизируют β -фазу;

3) «нейтральные упрочнители» Zr, Sn. Они мало влияют на протяженность α - и β -областей.

Влияние легирующих элементов на механические свойства сплавов показано на рис. 32. Углерод, а особенно кислород и азот сильно упрочняют титан, сильно снижая его пластичность.

Химический состав важнейших отечественных деформируемых промышленных титановых сплавов приведен в табл. 127. К группе псевдо- α относятся сплавы, содержащие кроме основной α -фазы незначительные количества других фаз. Сплавы α и псевдо- α применяют в отожженном или нормализованном состоянии (табл. 128). Сплавы ($\alpha + \beta$) и β подвергают, кроме того, упрочняющей термической обработке (табл. 129).

Неполный (рекристаллизационный) отжиг применяют с целью снятия наклепа для холоднодеформированных полуфабрикатов, а также для устранения внутренних напряжений, возникших при механической обработке или сварке.

Полный отжиг проводят послековки и прокатки для снижения твердости, повышения пластичности и выравнивания состава, структуры и свойств по сечению изделий.

При термической обработке титановых сплавов в их структуре могут возникать метастабильные фазы α' , α'' и ω мартенситного типа, из них ω -фаза наряду с высокой твердостью отличается большой хрупкостью, поэтому присутствие ее в конструктивных титановых сплавах весьма нежелательно.

Характеристики физических свойств деформируемых титановых сплавов при 20° С зависят от их состава и обычно колеблются в следующих пределах:

Плотность γ , г/см ³	4,4—4,9
Модуль нормальной упругости E , кгс/мм ²	10 500—12 500
Модуль сдвига G , кгс/мм ²	4 200—4 700
Температурный коэффициент линейного расширения α_r , 1/°С	(80—100) 10 ⁻⁷
Теплопроводность λ , кал/(см·с·°С)	(1,7—2,4) 10 ⁻²
Удельное электросопротивление ρ , Ом·мм ² /м	0,8—1,8
Удельная теплоемкость c_p при 100° С, кал/(г·°С)	0,10—0,13
Интегральная степень черноты ε при 400° С	0,22—0,34

Характеристики механических свойств деформируемых титановых сплавов при комнатной температуре приведены в табл. 130—133, а по значению σ_{-1} — в табл. 136.

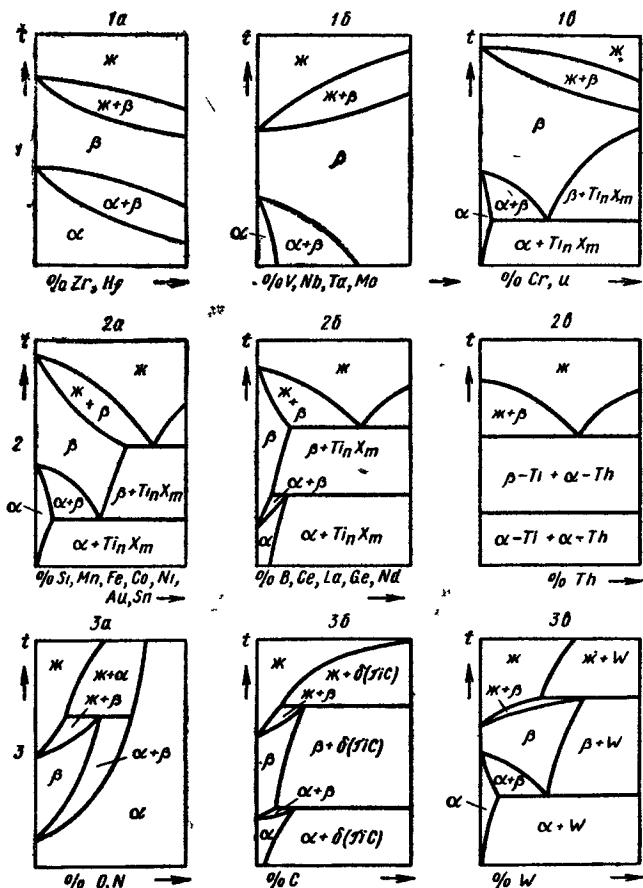


Рис. 31. Диаграммы состояния двойных сплавов на основе Ti по С. Г. Глазунову и В. Н. Момсееву:

(показаны области, богатые Ti):

1 — системы с непрерывными (β)-растворами; 1а — образование непрерывных α-растворов; 1б — распад β-раствора с образованием α-раствора; 1в — эвтектичный распад β-фазы; 2 — эвтектические системы; 2а — эвтектичный распад; 2б — перитектичное превращение; 2в — полиморфный переход; β-Ti → α-Ti; 3 — перитектические системы; 3а — образование α-фазы; 3б — перитектичное превращение; 3в — эвтектичное превращение

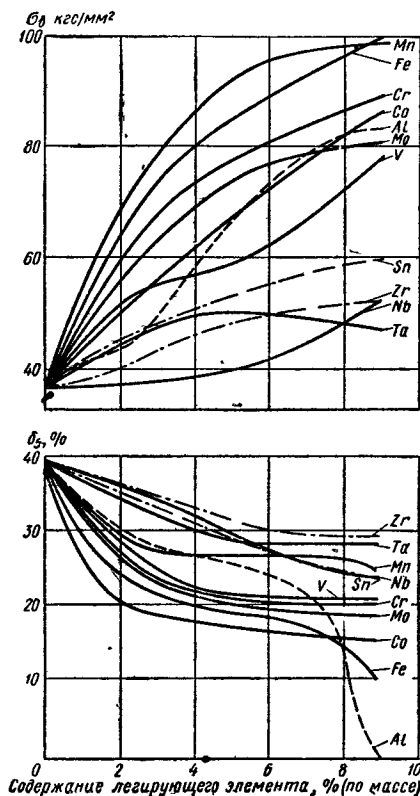


Рис. 32. Влияние легирующих элементов на механические свойства Ti-сплавов:

- | | | |
|-------|----------------------------------|--|
| — | β — стабилизаторы | } не образующие эвтектоидов
(Mo, V, Nb, Ta) |
| --- | α — стабилизатор (Al); | |
| -.-.- | нейтральные упрочнители (Zr, Sn) | эвтектоидообразующие
(Fe, Mn, Cr, Co); |

В табл. 134—137 приведены характеристики механических свойств деформируемых титановых сплавов в зависимости от температуры.

Коррозионная стойкость. К особо коррозионностойким относятся сплавы 4200 (Ti + 0,2% Pd), 4204 (Ti + 5% Ta), 4201 (Ti + 30 ÷ 33% Mo) и Ti + 20% Nb (для последних двух сплавов $\sigma_b = 80 \div 85$ кгс/мм²; $\sigma_{0,2} = 75 \div 77$ кгс/мм²; $\delta = 10 \div 15\%$). Эти сплавы очень стойкие в 5% HCl, 5% H₂SO₄, 100% CH₃COOH, 80% HCOOH. Они легко деформируются и хорошо свариваются аргондуговой сваркой, образуя пластичные и плотные сварные швы.

127. Содержание легирующих элементов (%) в промышленных деформируемых титановых сплавах

534

Цветные и тугоплавкие металлы и сплавы

Группа	Сплав	Al	Mn	V	Mo	Cr	Si	Другие	
α	BT5 *	4,3—6,2	—	—	—	—	—	—	
	BT5-1 *	4,3—6,0	—	—	—	—	—	2,0—3,0 Sn	
	48T2	2—3,3	—	—	—	—	—	—	
	480T3	3,3—4,3	—	—	—	—	—	0,005 B	
	48T7	1,8—2,5	—	—	—	—	—	2—3 Zr	
	3-11	2,5—3,5	—	—	—	—	—	10,5—12 Sn	
Псевдо- α	OT4 *	3,5—5,0	0,8—2,0	—	—	—	—	—	
	OT4-0 *	0,2—1,4	0,2—1,3	—	—	—	—	—	
	OT4-1 *	1,0—2,5	0,7—2,0	—	—	—	—	—	
	OT4-2	5,7—6,7	1,0—2,3	—	—	—	—	—	
	BT18	7,2—8,2	—	—	0,2—1,0	—	0,05—0,18	{ 0,5—1,5 Nb; 10—12 Zr	
	BT20 *	5,5—7,5	—	0,8—1,8	0,5—2,0	—	—		1,5—2,5 Zr
	AT2	—	—	—	0,8—1,8	—	—		2—3 Zr
	AT3	2,5—3,5	—	—	—	1,5 (Fe, Cr, Si)			
	AT6	5—6,5	—	—	—	1,5 (Fe, Cr, Si)			
	TC5	5	—	2	—	—	—	2 Zr; 3 Sn	

128. Температуры отжига (нормализации)
деформируемых α - и псевдо- α -сплавов

Сплав	Температура отжига, °C	
	Полный отжиг	Неполный отжиг
BT5	800—850 *	550—600
BT5-1	800—850 *	500—600
48T2	750—780	650—680 ***
480T3	830	650 ***
48T7	800—830	650—680 ***
OT4	740—760 *	545—585 *
OT4-0	690—710 *	480—520 *
OT4-1	640—660 **	520—560 **
OT4-2	840—861 *	600—650
BT20	700—800 **	600—650 **
AT2	600—650	520—560 **
AT3	800—850	545—585
AT6	900	650—700

* Прутки, поковки, штамповки, трубы, профили и детали из них.
 ** Листы и детали из них.
 *** После сварки

В табл. 138—140 приведены составы и характеристики механических свойств литейных титановых сплавов.

В табл. 141 дана примерная классификация титановых сплавов по основным технологическим и эксплуатационным характеристикам, пределу прочности и предельным рабочим температурам.

Хорошо свариваются чистый титан (BT1-00, BT1-0, BT1-1), а также титановые сплавы (BT5-1, BT6, BT6C, BT14, 48T2, 480T3, 48T7, 3-11, OT4-1, AT2, AT3).

Сплав	Неполный	Полный	Изотермический			Температура закали ⁴⁴ t_1 , °C	t_1 , °C	Время τ , ч
			t_1	t_2	Время выдержки (ч) при t_2			
BT3-1	530—620	800—850	870—920	600—650 * ¹	2	840—900	500—620	1—6
BT6	600—650	750—800	800—850	750 или 500	0,5	900—950	450—550	2—4
BT6C	600—650	750—800	800—850	750 или 500	0,5	880—930	450—500	2—4
BT8	530—620	—	920—950	570—600	1	920—940	500—600	1—6
BT9	530—620	—	950—980	530—580	6	920—940	500—600	1—6
BT14	550—650	740—760	790—810	640—660	0,5	870—910	480—560	8—16
BT16	—	770—790	770—790	500 **	—	800—820	540—570	6—10
BT22	550—650	720—780	650—750	350 **	—	690—760	500—560	8—16
ИРМ1	—	750—800	—	—	—	—	—	—
ИРМ2	—	800	—	—	—	—	—	—
ИРМ3	—	920	—	—	—	—	—	—
BT15	—	790—810	—	—	—	700—800	{ 450—500 550—570	15—25
ИВТ1	—	—	—	—	—	800		0,25
ТС6	—	—	—	—	—	700 **	550	15 * ¹
							480	10

*¹ Охлаждение на воздухе.

** Охлаждение: с t_1 до t_2 со скоростью 2—4° C/мин, далее — на воздухе.

*** Охлаждение с t_1 до t_2 с печью, далее — на воздухе.

**** Охлаждение в воде

***** После закали — деформация на 20—40%.

130. Характеристики механических свойств
при 20° С полуфабрикатов из промышленных α - и псевдо- α -титановых сплавов в отожженном состоянии

Сплав	Поковки, штамповки, прутки				Листы (1—2 мм)			Профили			HB
	σ_{B^*} кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	α_H^* кгс·м/см ²	σ_{B^*} кгс/мм ²	$\sigma_{0,2^*}$ кгс/мм ²	δ , %	σ_{B^*} кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	
BT5	75—90	10—14	25—40	3—6	—	—	—	70—95	8—16	30—50	229—321
BT5-1	80—95	10—15	25—40	4—8	75—90	—	>10 *	80—100	10	≥ 25 *	241—321
48T2	60—78	17—28	40—55	6—12	70—90	65—83	12—26	—	—	—	—
480T3	≥70	≥15	≥40	≥6	—	—	—	—	—	—	—
48T7	60—69	18—23	40—53	7—12,5	—	—	—	—	—	—	—
3-11	—	—	—	—	100—115	90—100	9—16	—	—	—	285—295
OT4	70—90	10—20	34—55	3,5—10	70—90	55—66	15—26	75—90	8	≥ 30 *	207—285
OT4-0	50—65	≥15 *	≥45 *	≥7 *	50—65	—	30—40	—	—	—	156—207
OT4-1	60—75	15—25	35—70	5—12	60—75	—	20—40	60—75	12	≥ 35 *	197—255
OT4-2	100—110	10—13	30—36	4—8	100—120	—	10—15	—	—	—	255—341
BT18	95—100	14—22	24—54	2—4,5	100—120	—	≥10	—	—	—	—
BT20	95—110	—	—	—	95—115	—	8—12	92—102	12—18	36—52	255—341
AT2	60—75	15—25	50—70	15—20	60—75	—	≥20	—	—	—	195—250
AT3	60—75	10—20	25—40	4—10	70—85	60—75	16—24	—	—	—	HV 300
AT6	100—110	10—15	25—40	4—7,5	—	—	—	—	—	—	—
TC5	—	—	—	—	95—110	—	≥8	—	—	—	—

* Гарантировано по ТУ

Сплав	Полу- фабрикат	После отжига						После закалки и старения				
		σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	σ_{-1} , кгс/мм ²	σ_H , кгс·м/см ²	HB	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	σ_H , кгс·м/см ²	HB
BT3-1	Штам- повка	104—118	14—20	45—60	40—50	3—4	269—363	115—120	10—12	32—48	—	302—415
BT6	То же	95—110	10—13	35—60	—	4—8	255—341	110—125 *	≥ 6 *	≥ 20 *	—	293—361
BT6C	»	85—100	≥ 12	≥ 25	—	5—8	241—321	≥ 110	≥ 8	—	—	—
BT8	»	105—125	10—18	32—55	40—50	3—5	330	≥ 120 *	≥ 6 *	≥ 20 *	—	—
BT9	»	110—130	8—14	25—45	≥ 54	2—5	—	≥ 120 *	≥ 6 *	≥ 20 *	—	—
BT14	»	85—90	10—15	35—62	—	5—9	255—341	115—130	6—15	17—42	≥ 5	302—388
BT14	Лист	90—107	8—10	—	—	—	—	120—140	6—10	—	≥ 3	—
BT16	Лист 1,2 мм	84—104	12—22	—	—	—	—	130—140	5—6	—	4—6	302—415
BT22	Пруток	110—125	10—17	20—65	—	—	285—363	140—155	5—6	35—50	≥ 3	341—444
BT23	Лист	110—120	10—13	—	—	5—7	255—270	145—160	4—6	—	5—7	300—420
ИРМ1	»	85—96	17—19	≥ 52	≥ 42	7—10	—	—	—	—	—	—
ИРМ2	» *	85—97	7—13	34—41	—	6,3—8,1	—	—	—	—	—	—
ИРМ3	»	80—85	14—16	46—56	—	10—13	—	—	—	—	—	—

* Свойства гарантированные по ТУ для катаных прутков диаметром 20—60 мм.

132. Характеристики механических свойств при 20° С
промышленных в-титановых сплавов после термической обработки

Сплав	Полу-фабрикат	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	a_H , кгс м/см ²	НВ
BT15	Лист	$\frac{90-105}{135-150}$	$\frac{85}{118}$	$\frac{10-25}{4-8}$	$\frac{6-7}{2,5}$	$\frac{-}{341-444}$
ИВТ1	Прутки	$\frac{-}{140-170}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{7-10}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{-}$
ТС6	Лист	$\frac{158-163,5}{-}$ *	$\frac{152-159,0}{-}$	$\frac{-}{5,5-6,0}$	$\frac{-}{-}$	$\frac{-}{341-444}$

* После закалки деформация на 20 или 40%

Примечание В числителе — данные после закалки, в знаменателе — после закалки и старения

133. Характеристики механических свойств сплавов типа СТ

Сплав	Характеристика механических свойств при 20° С				Кратковременная прочность (кгс/мм ²) при температуре, °С				Длительная прочность σ_{100} , кгс/мм ²		Максимальная температура эксплуатации, °С	
	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	a_H , кгс·м/см ²	600	700	800	900			длительной	кратковременной
СТ1	105—110	12—14	40—43	4—5	66	42	22	10	8	600	600	750
СТ4	130—140	4—8	8—12	1—2	120	85	45	30	12	800	800	850
СТ6	125—140	10—14	18—22	3—5	95	70	40	23	9	600	600	800

134. Кратковременная прочность деформируемых титановых сплавов и предельные температуры их эксплуатации

Сплав	200° С	300° С	400° С	500° С	600° С	700° С	800° С	Предельная температура эксплуатации, °С	
								длительной	кратковременной
BT5-1	$\frac{68}{20}$	$\frac{57}{17}$	$\frac{53}{15}$	$\frac{50}{20}$	$\frac{38}{26}$	$\frac{35^{*1}}{24}$	—	450	800—850
OT4-2	$\frac{80}{20}$	$\frac{74}{20}$	$\frac{70}{18}$	$\frac{65}{23}$	$\frac{48}{45}$	—	—	450—500	750—800
BT18	—	—	$\frac{90}{10}$	$\frac{88}{13}$	$\frac{77}{13}$	$\frac{65}{20}$	$\frac{38}{40}$	550	650—700
BT20	$\frac{78}{19}$	$\frac{73}{18}$	$\frac{70}{15}$	$\frac{65}{13}$	$\frac{47}{18}$	—	—	500	800
BT3-1**	$\frac{110}{6}$	$\frac{105}{6}$	$\frac{95}{6}$	$\frac{85}{8}$	$\frac{53}{17}$	—	—	400—450	—
BT8		$\frac{88}{12}$	$\frac{82}{12}$	$\frac{75}{12}$	$\frac{68}{18}$	$\frac{40}{40}$	$\frac{20}{80}$	500	—
BT9		$\frac{99}{14}$	$\frac{85}{14}$	$\frac{75}{14}$	$\frac{70}{16}$	$\frac{40}{30}$	$\frac{20}{80}$	550	650—700
BT14**	$\frac{105}{11}$	$\frac{100^{**}}{8}$	$\frac{90}{7}$	$\frac{84}{15}$	$\frac{38-43}{30-35}$	$\frac{15-18}{35-55}$	—	400	750
BT22	$\frac{128}{6}$	$\frac{120}{6}$	$\frac{115}{5}$	$\frac{100}{8}$	$\frac{60}{18}$	—	—	350—400	750—800
BT15**	$\frac{125}{7}$	$\frac{120}{6}$	$\frac{115}{5}$	$\frac{95}{8}$	$\frac{41}{44}$	$\frac{20}{104}$	—	150—250	750—800

*¹ При 650° С

** Данные для термически упрочненного сплава

** При 350° С.

Примечание. В числителе σ_B (кгс/мм²), в знаменателе — δ_5 (%).

135. Пределы длительной прочности и ползучести деформируемых титановых сплавов

Сплав	350° С	400° С	450° С	500° С	600° С	650° С
BT5-1	$\frac{54^{*1}}{38^{*2}}$	$\frac{39^{*1}}{—}$	—	$\frac{17^{*1}}{5^{*2}}$	—	—
OT4-2	$\frac{72}{56}$	$\frac{67}{42}$	$\frac{55}{—}$	$\frac{30}{11}$	—	—
BT18	—	—	—	$\frac{65-70}{37}$	$\frac{30-33}{10-12}$	$\frac{19}{7}$
BT20	$\frac{75}{55}$	—	—	$\frac{49}{17}$	$\frac{20^{*3}}{—}$	—
BT3-1 ^{*4}	—	$\frac{95}{60}$	$\frac{60^{*5}}{25}$	$\frac{36}{—}$	—	—
BT8	—	—	$\frac{70-75}{35-48}$	$\frac{50-55}{23-25}$	$\frac{38^{*3}}{8-10}$	—
BT9	$\frac{79-82}{59-62}$	$\frac{78-80}{—}$	$\frac{74-80}{50}$	$\frac{60-68}{35-40}$	$\frac{40^{*3}}{16}$	$\frac{23}{5,5}$
BT14 ^{*4}	$\frac{—}{53}$	$\frac{68}{35}$	$\frac{54}{—}$	—	—	—
BT22	$\frac{100}{62}$	$\frac{85}{32}$	—	—	—	—
BT15	$\frac{95}{53}$	$\frac{74}{—}$	—	$\frac{35}{—}$	—	—

*1 σ_{1000} *2 $\sigma_{0,2/1000}$

*3 При 550° С

*4 Для термически упрочненного сплава.

*5 σ_{500}

Примечание. В числителе σ_{100} (кгс/мм²), в знаменателе — $\sigma_{0,2/100}$ (кгс/мм²)

Сплав	При 20° С		При нагреве		Сплав	При 20° С		При нагреве		Сплав	При 20° С		При нагреве	
	σ_{-1} , кгс/мм ²	t , °C	σ_{-1} , кгс/мм ²			σ_{-1} , кгс/мм ²	t , °C	σ_{-1} , кгс/мм ²			σ_{-1} , кгс/мм ²	t , °C	σ_{-1} , кгс/мм ²	
BT5	45	—	—		OT4-2	38—41	400 500	34—39 28		BT8	50—53	500	40—44	
BT5 1	37—42	300 500	35—37 26—27		* BT18	46—56	600	40—43		BT19	54—57	500	42—44	
48T2	30—35	—	—		BT20	42	500	36		BT14 *	42—44	400	38	
48T7	38	350	27,3		AT3	40	250	40		BT16	—	300 500	33 21	
OT4	38—42	400	23—26		BT3-1	48—62	400 450	45—49 38		BT22	58	350	48	
OT4-0	30	400	22		BT6 *	55	400	44		ИРМ2	42—43	—	—	
OT4 1	36—37	400	20—21		BT6C	40—53	350	29—43		BT15	28	400	26	

* Термически упрочненный

137. Характеристики механических свойств деформируемых титановых сплавов при низких температурах

Сплав	σ_B (кгс/мм ²) при температуре, °C			δ (%) при температуре, °C			a_n (кгс м/см ²) при температуре, °C	
	-196	-253	-269	-196	-253	-269	-196	-253
BT5-1 *	120—135	135—160	171,0	15	8—10	9,3	4,0	3,0
48T7	104—112	—	—	17—32	—	—	3—4	—
OT4 *	143	156	—	13	16	—	5	4
OT4-1	108	139	—	19,4	17,5	—	—	—
AT2 *	110—130	130—145	150	25—30	10—18	10	10—18	8—15
BT3-1	165	206	202	6,5	7,5	3	2,5—4	—
BT6	164	182	—	17,8	3,5	—	3,9	4,0
BT6C *	131	158	—	7—10	3—6	—	4	2,5
BT14 *	165	—	—	10	—	—	1,8—2,5	—
ИРМ1 *	137	—	—	15	—	—	2,8	—
ИРМ2	141	—	—	10	—	—	2,5—2,9	—
BT15	204	—	—	3,6	—	—	—	—

*. Сплавы, рекомендуемые для криогенной техники.

Марка	Al	Cr	Mo	Fe	Другие	σ_B^* кгс/мм ²	δ_s , %	α_H^* кгс·м/см ²	σ_{-1}^* кгс/мм ²
						Не менее			
BT1Л	—	—	—	—	—	35	10	4	—
BT5Л	4,1—6,2	—	—	—	—	70	6	3	28
BTЛ1	5,0—5,5	—	—	—	0,8—1,2 Si	100	5	2	—
BT3-1Л	5,3—7,0	0,8—2,3	2,0—3,0	0,2—0,7	0,15—0,40 Si	95	4	2,5	22
BT6Л	5,0—6,5	—	—	—	3,5—4,5 V	85	5	2,5	20
BT9Л	5,6—7,0	—	2,8—3,8	—	$\frac{Zr}{0,8-2,0} ; \frac{Si}{0,2-0,35}$	95	4	2	18
BT14Л	4,3—6,3	—	2,5—3,8	—	0,9—1,9 V	90	5	2,5	27
BT20Л	5,5—7,5	—	0,5—2,0	—	$\frac{Zr}{1,5-2,5} ; \frac{V}{0,8-1,8}$	90	5	3	20
BT21Л	5,8—7,2	0,2—0,5	0,4—1,0	—	$\frac{Zr}{4-6} ; \frac{V}{0,8-1,5}$	100	4	2	20

* На базе $2 \cdot 10^7$ циклов

139. Характеристики механических свойств литейных титановых сплавов при кратковременных испытаниях и различных температурах, °С

Сплав	σ_B , кгс/мм ²				δ , %			
	-70	300	400	500	-70	300	400	500
BT5Л	85	40	35	30	6	8	10	13
BT3-1Л	110	—	73	63	3	—	9	10
BT6Л	—	55	50	—	—	9	9	—
BT9Л *	—	71	66	64	—	9	7	8
BT14Л	—	63	55	—	—	8	8	—
BT20Л	110	67	61	56	5	10	10	12
BT21Л	120	70	67	63	2	10	11	12

* При 800° С: $\sigma_B = 25$ кгс/мм²; $\delta = 5\%$.

140. Пределы длительной прочности и ползучести литейных титановых сплавов при различных температурах, °С

Сплав	300	400	500	550
BT5Л	$\frac{40}{—}$	$\frac{35}{28}$	—	—
BTЛ1	—	$\frac{63}{—}$	$\frac{43}{—}$	—
BT3-1Л	—	$\frac{72}{47}$	—	—
BT6Л	$\frac{53}{—}$	$\frac{47}{—}$	—	—
BT9Л	$\frac{65}{50}$	$\frac{62}{46}$	$\frac{50}{28}$	$\frac{35}{20}$
BT14Л	$\frac{60}{47}$	—	—	—
BT20Л *	—	—	$\frac{43}{16}$	—
BT21Л	—	$\frac{60}{43}$	$\frac{44}{18}$	—

* При 350° С: $\sigma_{100} = 60$ кгс/мм², $\sigma_{0,2/100} = 45$ кгс/мм².

Примечание. В числителе — σ_{100} (кгс/мм²), в знаменателе — $\sigma_{0,2/100}$ (кгс/мм²).

141. Классификация деформируемых титановых сплавов по параметрам, характеризующим области применения

Сплав	Основная характеристика	$\sigma_{в'}$ кгс/мм ²	Предельная рабочая температура °С
BT1-00, BT1-0, BT1-1, OT4-0, OT4-1, AT2	Пластичные низкой прочности	30—75	100—200
BT5, BT5-1, OT4, AT3	Пластичные средней прочности	70—90	200—300
OT4-2, BT20, AT6, BT6C, ИРМ-1, ИРМ-2, ИРМ-3, BT6	Конструкционные повышенной прочности	85—120	350—450
BT14, BT16, BT22, BT15, ИВТ1, ТС6, BT23	Высокопрочные	90—160	300—400
BT18, BT3-1, BT8, BT9, СТ1, СТ4, СТ6	Жаропрочные	> 190	600—700
BT5-1, OT4, AT2, BT6C, BT14, ИРМ-1	Сплавы для криогенной техники	> 60	—
4200, 4201, 4204	Высококоррозионно-стойкие	60—100	—

Применение титановых сплавов. В химической и бумажной промышленности: реакторы для агрессивных сред, выпарные аппараты, насосы, теплообменники, вентили, центрифуги, опреснительные установки. В пищевой промышленности: котлы, холодильники, резервуары для органических кислот и ряда пищевых сред. В авиационном строении: каркас и обшивка самолетов, топливные баки, компрессоры реактивных двигателей. В турбостроении: диски и лопатки турбин. В судостроении: обшивка корпусов судов, гребные винты, насосы. В нефтяном машиностроении: трубы, используемые при бурении, облицовка стальных эстакад. В электронной и вакуумной технике: газопоглотители, детали электронно-вакуумных приборов, конденсаторы, металло-керамические лампы. В медицинской промышленности: аппаратура для изготовления медикаментов, медицинские инструменты, внутренние протезы.

Титан и его сплавы применяют также в приборостроении, криогенной технике и т. п.

ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ

Тугоплавкие металлы служат основой для создания новых конструкционных материалов высокотемпературной техники. Особо перспективны жаропрочные сплавы на основе ниобия, тантала, молибдена и вольфрама.

Важнейшие физические характеристики этих металлов приведены в табл. 142

142. Важнейшие характеристики физических свойств ниобия, тантала, молибдена и вольфрама

Свойства	Nb	Ta	Mo	W
Атомный номер	41	73	42	74
Относительная атомная масса	92,91	180,95	95,95	183,92
Наименьшее межуатомное расстояние	2,85	2,85	2,72	2,74
Кристаллическая структура	ОЦК	ОЦК	ОЦК	ОЦК
Параметр решетки, Å	3,2941	3,3074	3,1474	3,1652
Плотность, г/см ³	8,57	16,8	10,2	19,4
Температура плавления, °C	2468	3000	2625	3410
Температура кипения, °C	5127	6100	4800	6700
Скрытая теплота плавления, ккал/моль	6,4	5,9	6,6	8,4
Теплота сублимации в точке плавления, ккал/моль	155	183,9	134,5	210
Удельная теплоемкость при 20 °C, ккал/(г·°C)	0,065	0,033	0,061	0,032
Теплопроводность, кал/(см·с·°C)	0,125	0,13	0,35	0,48
Коэффициент линейного расширения (0—1000° C) $\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°C	7,0	6,6	5,2	4,5
Удельное электрическое сопротивление при 20 °C, Ом·мм ² /м	0,145	0,131	0,57	0,65
Температурный коэффициент электро-сопротивления $\beta \cdot 10^{-3}$, 1/°C	3,0	3,82	4,79	4,80

* Ниобий

Получение и обработка. Компактный ниобий получают металлорежущим или металлургическим путем.

Фасонные отливки можно получать из литого металла также электродуговой или электронно-лучевой плавкой с гарнисацией.

Полуфабрикаты из слитков получают горячей деформацией, ковкой, прокаткой или прессованием. Ковку производят при 1000—1500° C (нелегированный металл) или при 1400—1700° C (сплавы). Прессование ведут при 1400—1550° C. При температуре выше 1500° C процесс прессования сопровождается сильным износом инструмента вследствие высокой активности ниобия и особенно его окисла (температура плавления $t_{пл} = 1450^\circ \text{C}$), который, затвердевая, при контакте с менее нагретым инструментом схватывается с поверхностью отка матрицы.

Повторные операции обработки давлением предварительно деформированного металла производят при более низких температурах (500—700° C) или в холодном состоянии. Между операциями слитки подвергают отжигу в вакуумных печах. Промежуточный отжиг наклепанного металла для восстановления пластичности ведут при температурах выше 1300° C. Температура окончательного отжига деформированных полуфабрикатов не должна превышать 1300° C.

Температура начала рекристаллизации ниобия дуговой плавки составляет около 1050—1075° C, а более чистого металла электронно-лучевой плавки после деформации на 75% — около 930—965° C.

При нагревании на воздухе ниобий активно поглощает газы и охрупчивается. Поглощение кислорода начинается около 200° C. При температуре выше 400° C металл быстро окисляется, а при 1350—1400° C окисел начинает испаряться. Растворенный кислород оказывает наи-

более вредное влияние на пластичность ниобия. Снижают пластичность (деформируемость) также азот, водород, углерод. Поэтому металл, предназначенный для производства полуфабрикатов в виде листов, труб и т. п., должен содержать не более 0,03% кислорода, а общее количество примесей внедрения не должно превышать 0,04—0,05%.

Для защиты ниобия от окисления в процессе нагрева под деформацию применяются установки с нейтральной атмосферой (аргон или гелий). Промежуточный отжиг деформированных полуфабрикатов проводят в вакуумных печах. Можно применять также покрытия жаростойкими эмалями, напыление металлами, дающими защитные окислы (хромом, алюминием), или оболочки из нержавеющей стали. Многократные и продолжительные нагревы в процессе обработки нежелательны, так как приводят к загрязнению металла на значительную глубину и охрупчиванию его с образованием трещин в поверхностном слое. Ниобий рафинируют от поглощенных газов нагреванием в вакууме не ниже $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. При нагреве до 700—900°С из металла выделяется водород, а при 1200—1400°С — азот. Для удаления кислорода необходим нагрев до 2000—2200°С.

Металл высокой чистоты очень пластичен и отличается незначительной склонностью к наклепу. Его можно деформировать в холодную с обжатиями 90% и выше без промежуточных отжигов. Высокая пластичность ниобия сохраняется и при низких температурах вплоть до -196°С.

При обработке ниобия резанием следует иметь в виду, что он подобно нержавеющей стали налипает на инструмент и для охлаждения последнего необходимы специальные жидкости или эмульсии.

Ниобий легко поддается практически всем видам сварки, за исключением ацетилено-водородной. Однако сварку следует вести в вакууме или инертной среде. Наиболее пластичный шов получается при электронно-лучевой сварке. Ниобий сваривается со сталью, никелевыми и кобальтовыми сплавами, титаном, возможна также сварка с вольфрамом и молибденом (преимущественно диффузионная).

Механические свойства. Механические свойства нелегированного ниобия в значительной мере зависят от его структуры, содержания примесей, вида обработки и т. п. Прочность ниобия, полученного дуговой плавкой, выше, а пластичность ниже, чем у ниобия электронно-лучевой плавки (рис. 33). Чистый ниобий не отличается высоким уровнем прочности при повышенных температурах (табл. 143).

Взаимодействие с различными средами. Ниобий коррозионностоек в неорганических и органических кислотах, в растворах солей и аммиака. Едкие щелочи КОН и NaOH растворяют ниобий.

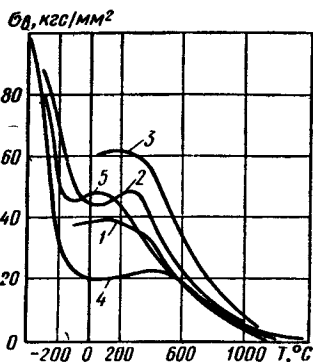


Рис. 33. Зависимость предела прочности при растяжении ниобия различной степени чистоты от температуры:

- 1 — Nb дуговой плавки, 2 — Nb электронно-лучевой плавки послековки в холодном состоянии; 3 — Nb дуговой плавки послековки в холодном состоянии; 4 — Nb высокой чистоты, рекристаллизованный; 5 — Nb дуговой плавки, рекристаллизованный

143. Характеристики свойств отечественных ниобиевых сплавов и нелегированного ниобия

Марка (состав сплава, % по массе)	Полу- фабрикат	Состояние (вид обработки)	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}},$ кгс/мм ²	$\delta, \%$	$\sigma_{\text{тис}},$ кгс/мм ²
Nb	Прутки	Электронно-лучевой рекристаллизованный Деформированный	20	34	30	—
			800	31	35	—
			1050	13	42	7
	Лист		20	56	5	—
ВН-2 (3,8—5,2 Мо; 0,05С)	Прутки	Деформированный	20	75	18—28	—
			1200	18—20	45—55	—
			1000	50	25	—
	Лист	Рекристаллизованный Деформированный	1100	40—45	35	—
			1100	31—35	20—25	9
			1500	8—10	35	—
ВН-2А (3,5—4,7 Мо; 0,5—0,9 Zr; 0,08С)	Лист	Деформированный	20	80—90	4—5	—
			1100	45	10	13
			1200	30	12	—
	Прутки	Рекристаллизованный	1500	10	17	—
			1100	26—30	22—26	—
			1200	24—26	26	—
ВН-3 (4—5,2 Мо; 0,8—2,0 Zr; 0,08—0,16С)	Прутки	Деформированный	20	75—80	16—20	—
			1100	45	21—24	16
			1200	25—29	26	—
			1500	12,5	40—43	—
ВН-4 (8,5—10,5 Мо; 1—2 Zr; 0,01— 0,05 La или Ce; 0,25—0,40 С)	Прутки	Рекристаллизованный	20	81	16	—
			1100	70	—	28
			1200	55	15	—
			1500	17	24	—
ВН-5А (5—7 Мо; 0,5— 0,9 Zr; 0,015— 0,04 La или Ce; 0,08—0,15 С)	Лист	Рекристаллизованный	20	58—61	25—29	—
			1100	33—35	12—14	14
			1500	10— 10,5	30—35	—
РН-6 (4,5—6 Мо; 4,5—6 W; 1—1,5 Zr)	Прутки	Рекристаллизованный	20	89	—	—
			1200	29	—	11
			1800	9,3	—	—

Продолжение табл. 143

Марка (состав сплава, % по массе)	Полу-фабрикат	Состояние (вид обработки)	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{кгс/мм}^2$	$\delta, \%$	$\sigma_{100}, \text{кгс/мм}^2$
МН-1	Прутки	Рекристаллизованный	20	67	18	
			1100	38	20	25
			1200	26	23	11
		Закаленный	20	76	17	
			1100	41	20	24
			1200	45	23	28
МН-2		Рекристаллизованный	20	105	4	
			1100	60	8	36
			1200	45	10	26

С расплавленными щелочными металлами Na, K, Li, Bi ниобий не взаимодействует до относительно высоких температур.

Сплавы. Характеристики свойств важнейших отечественных ниобиевых сплавов приведены в табл. 143.

Применение. Ниобий — один из основных компонентов при легировании жаропрочных сталей и сплавов. Сплавы ниобия применяют в химическом машиностроении, в радиоэлектронике вместо дорогого тантала (экраны, катоды мощных генераторных ламп, аноды некоторых типов ламп, трубки, сетки с максимальной рабочей температурой 2100°C и т. д.), в ядерных реакторах, в качестве материала оболочек тепловыделяющих элементов и емкостей для расплавленных металлов, в авиации (лопатки газовых турбин авиадвигателей). Относительно новая область применения ниобия — в качестве основы сверхпроводящих материалов, так как у ниобия максимальная среди металлов температура перехода в сверхпроводящее состояние ($8,9\text{ K}$). Так, у сплавов системы Nb—Zr критическое магнитное поле достигает 80 кГс , плотность критического тока $(4-6) \cdot 10^4\text{ А/см}^2$ и температура перехода в сверхпроводящее состояние 11 K . Высокими сверхпроводящими свойствами ($18,1\text{ K}$) отличается соединение Nb_3Sn , на базе которого уже созданы сверхпроводящие магниты на 100, 130 кгс и выше.

Тантал

Получение и обработка. Компактный тантал обычно получают из порошка. Порошок тантала прессуют на гидравлических прессах (при усилии до 3000 тс) в штабики массой 2,5—10 кг и спекают в высоком вакууме при температурах до 2600°C путем пропускания через них электрического тока, затем проковывают входную и подвергают вторичному спеканию, после чего путем холодной пластической деформации получают лист, фольгу или проволоку. Заготовки большой массы получают переплавлением спеченных штабиков в дуговых вакуумных или электронно-лучевых печах в слитки различной массы,

которые при необходимости подвергают холодной пластической деформации до нужного профиля.

Металлический тантал при нагревании интенсивно поглощает газы, являясь хорошим геттером. При этом уменьшаются его пластичность, магнитная восприимчивость, коррозионная стойкость, увеличиваются прочность, твердость, электросопротивление.

От поглощенных газов тантал очищают нагреванием в вакууме не ниже $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Водород выделяется при $800\text{--}1200^\circ\text{C}$, заметное выделение азота происходит выше $1800\text{--}2000^\circ\text{C}$ и достигает максимума при $2400\text{--}2450^\circ\text{C}$. Кислород начинает выделяться при $1350\text{--}1400^\circ\text{C}$ в виде CO , если в металле присутствует углерод, а также в виде окислов элементов—примесей. Интенсивное выделение этого элемента происходит при 1900°C . Эффективные методы очистки тантала от газов — спекание в вакууме, вакуумная дуговая и особенно электронно-лучевая плавка.

В связи с повышенной способностью поглощать газы все операции нагрева тантала проводят в высоком вакууме или атмосфере очищенных инертных газов — аргона или гелия.

При комнатной температуре тантал свободно куется и прокатывается в лист, а выплавленный электронно-лучевым методом металл еще более пластичен и при деформации допускает большие степени обжатия. Тантал отличается малой склонностью к наклепу, что дает возможность деформировать его со степенями обжатия $90\text{--}95\%$ без промежуточных отжигов. Высокая пластичность тантала сохраняется и при низких температурах (-200°C).

Горячую пластическую деформацию тантала не применяют, так как при нагреве металл окисляется, что вызывает необходимость удаления окисленного слоя механической обработкой и приводит к значительным потерям металла.

Тантал хорошо поддается многим видам сварки, кроме ацетиленоводородной. Однако сварку проводят в вакууме или инертной среде. Чаще всего применяют аргонодуговую сварку плавлением, а также сварку электронным лучом. Пластичность шва в первом случае получается несколько ниже пластичности основного металла, но тем не менее она достаточно высока. При электронно-лучевой сварке поглощение швом газов почти полностью устраняется. Тантал хорошо сваривается с нержавеющей сталью, никелевыми сплавами, медью, титаном, цирконием. Возможна также сварка с вольфрамом и молибденом.

Механические свойства. Механические свойства тантала в значительной мере зависят от чистоты и состояния, т. е. от способа получения и обработки.

Большее влияние на свойства оказывают примеси O, N, C, H. С увеличением их содержания повышаются твердость и прочность тантала, а пластичность понижается. Особенно ухудшает пластичность водород. С повышением содержания O до 4 атомных % твердость тантала увеличивается до HV 630, E — с 18 100 до 19 640 кгс/мм², а δ снижается с 39 до 4%.

Характеристики механических свойств при 20°C тантала, полученного различными методами, приведены в табл. 144.

При высоких температурах испытания (1500°C и выше) чистота тантала практически не влияет на его свойства.

Взаимодействие с различными средами. Тантал отличается наиболее высоким из всех тугоплавких металлов сопротивлением коррозии и по

144. Характеристики механических свойств тантала при 20° С

Способ получения (содержание примесей внедрения, %)	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %
Электронно-лучевая плавка (0,0016 O; 0,001 V; 0,00014 H и 0,003 C)	19—23	50	90
Порошковая металлургия (0,0056 O; 0,013 N; 0,02 C)	27—46	40	85
Холоднодеформированный прокатка	70—80	—	—
" влочение	126	—	—

химической стойкости близок к платине. Он почти не взаимодействует с органическими и минеральными кислотами, за исключением HF , смеси HF , HNO_3 и царской водки, а также солевыми растворами, не дающими сильной щелочной реакции. Заметная коррозия тантала наблюдается в расплавленных щелочах и концентрированных щелочных растворах. При коррозии тантала в щелочных растворах часто наблюдается охрупчивание металла вследствие абсорбции водорода. Танталу присуща высокая стойкость в среде ряда жидких металлов.

Углерод в тантале практически нерастворим и образует с ним карбиды Ta_4C и TaC .

Сплавы. Тантал допускает легирование другими металлами в значительных количествах без заметной потери пластичности. Однако легирование его для повышения жаропрочности возможно в основном вольфрамом и рением. Применяют и другие виды упрочнения, например, карбидное.

Тантал — дорогостоящий и дефицитный металл, и сплавов на его основе мало. В большинстве случаев в радиоэлектронике используется сплав Та—10W, у которого температура плавления 3050° С; плотность 17,8 г/см³; предел прочности при 20° С 74 кгс/мм²; при 1200° С 28 кгс/мм², при 1200° С за 100 ч 14 кгс/мм².

Главное достоинство сплавов на танталовой основе — сочетание высокой прочности при повышенных температурах (до 2000° С), высокой пластичности, хороших обрабатываемости и свариваемости.

Сплавы тантала значительно превосходят другие материалы на основе тугоплавких металлов по низкотемпературной пластичности, которая у достаточно чистого металла сохраняется повышенной вплоть до температуры жидкого гелия.

Применение. Нелегированный тантал широко применяют в электролитических конденсаторах, химической аппаратуре, в частности, коррозионноустойчивой аппаратуре для переработки ядерного горючего, в радиоэлектронной промышленности (геттеры, аноды и сетки генераторных ламп, катоды, экраны и другие конструкционные элементы ламп, работающие при температурах до 2200°C , пружины и т. п.).

В медицинской промышленности из тантала изготавливают хирургический инструмент и применяют его в восстановительной хирургии для замены поврежденных ребер, костей черепной коробки, в виде

нитей для шивания тканей человеческого тела, так как тантал хорошо с ними совмещается.

Тантал так же, как и ниобий, сверхпроводник, но температура перехода его в сверхпроводящее состояние ниже, чем у ниобия (4,4 К), и сверхпроводящие материалы на его основе почти не разрабатываются.

Молибден

Получение и обработка. В промышленных условиях компактный молибден получают методами порошковой металлургии, электродуговой вакуумной плавки, а также электронно-лучевой плавки.

При нагреве на воздухе выше 300° С молибден легко окисляется, поэтому нагрев перед деформацией необходимо проводить в восстановительной атмосфере (водород), вакууме или инертных средах (аргон, гелий).

Пластичность и деформируемость молибдена и его сплавов зависят от способа приготовления, чистоты и степени легирования сплава.

Выплавленные в электродуговых вакуумных печах слитки молибдена имеют крупнозернистую структуру, отличающуюся низкой пластичностью, что затрудняет горячую деформацию, поэтому их деформируют преимущественно прессованием на гидравлических прессах. При прессовании применяют стеклосмазки и используют обжатия до 85%, а в предварительно деформированном состоянии — до 95%. Такие деформации позволяют полностью разрушить грубую дендритную структуру слитков и получить в полуфабрикатах однородную мелкозернистую структуру. Перед прессованием слитки молибдена и его сплавов нагревают до 1300—1600° С в печах электросопротивления в вакууме или атмосфере водорода. В индукционных печах нагрев слитков ведут до 1800° С и выше.

Последующая горячая деформация проводится при более низких температурах (1000—1400° С). Прокатку тонких листов (до 1 мм) ведут с нагревом до 900—1200° С, а последующую прокатку можно проводить при 20° С. Сутунку для листовых прокатки получают прессованием. Термическую обработку сплавов ведут при 900—1200° С в зависимости от их состава. Изготовление труб и волочение проволоки проводят с нагревом до 350—600° С.

При обработке молибдена резанием необходимо применять острые углы резания и твердосплавный инструмент (из сплавов ВК6 или ВК8).

Механические свойства. Механические свойства молибдена зависят от его чистоты, технологии изготовления и условий испытания. Типичные значения характеристик механических свойств при разных температурах молибдена, полученного дуговой плавкой и методом порошковой металлургии, приведены в табл. 145.

При низких температурах молибден хрупок. Температурный порог хладноломкости зависит от степени чистоты металла, способа его изготовления, величины зерна, условий испытания. Молибден высокой чистоты после многократной зонной очистки в вакууме ($<0,0001\%$ Н; $<0,0001\%$ N; $<0,0001\%$ О и $0,0012\%$ С) пластичен при -190° С.

В техническом молибдене $T_{х.п}$ — температура хрупкого перехода определяется примесями внедрения, в основном содержанием кислорода и углерода. Например, выплавленный из особо чистого порошка молибден ($0,001—0,004\%$ С) имеет $T_{х.п} = -73^{\circ}$ С, а молибден дуговой плавки, приготовленный из обычной шихты, но раскисленный углеродом

Метод производства	Состояние	σ_B , кгс/мм ²				δ , %			
		20° C	1000° C	1500° C	1800° C	20° C	1000° C	1500° C	1800° C
ВДП (Mo + 0,01% C)	Литое	37	7,5	2,6	1,5	10	25	32	45
ВДП (Mo + 0,01% C)	Рекристаллизация (2000° C, 1 ч)	41	11,5	6,7	2,3	13	17	11	12
ВДП (раскисление В, Al, C)	Рекристаллизация (2100° C, 1 ч)	31	8,4	2,5	1,2	24	30	12,5	35
То же	Деформированный прутки, Ø 10 мм	97	40	6,2	3,6	11	8,5	27	26
ВДП	Рекристаллизованное . . .	—	24,6	—	—	—	41	—	—
То же	Деформированное	—	31,6	7,7	—	—	30	53	—
Порошковая металлургия	Деформированный прутки	75	20	—	—	30	19,5	—	—

(0,0003% H; 0,001—0,005% N; 0,002—0,003% O, 0,014—0,05% C), имеет $T_{х.п} = -25 \div +40^\circ \text{C}$. У нераскисленного технического молибдена $T_{х.п}$ выше комнатной температуры.

Легирование молибдена практически всеми элементами, кроме рения, способствует понижению пластичности. Исключение составляют лишь малые добавки элементов группы IVA, бора и некоторых редкоземельных металлов.

Взаимодействие с различными средами. Компактный молибден относительно стоек на воздухе. Средняя скорость коррозии прокатанного молибдена в атмосферных условиях составляет около 0,0002 мм/год.

Молибден стоек в кислотах HCl , H_2SO_4 , H_3PO_4 , не взаимодействует с холодными растворами щелочей NaOH и KOH , слабо растворяется в расплавленных щелочах на воздухе и быстро растворяется в присутствии расплавленных солей KNO_3 , KNO_2 , K_2CO_3 , KClO_3 и других окислителей.

Молибден относительно стоек в продуктах сгорания порохового топлива (безокислительных или малоокислительных), а также в некоторых расплавленных металлах K, Na, Li, Mg, Bi, однако при загрязнении этих металлов кислородом стойкость его снижается.

Микротравление молибдена для снятия насыщенного газами поверхностного слоя у молибденовых полуфабрикатов или подготовку их поверхности под сварку и пайку производят в растворах из смеси концентрированной азотной и ортофосфорной кислот при соотношении 1 : 1 (плотность реактива 1,37—1,38 г/см³), а также в расплавах щелочей.

Для химического травления микрошлифов молибдена и сплавов на его основе рекомендуется реактив состава: 1 ч по массе 10%-ного NaOH и 1 ч по массе 30%-ного $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$.

В случае работы в окислительных средах при высоких температурах жаропрочные молибденовые сплавы применяют только с защитными покрытиями.

Сплавы. Состав и свойства основных отечественных сплавов молибдена приведены в табл. 146. Для всех сплавов $T_{п.х}$ при ударном нагружении всегда выше комнатной температуры, а при статическом нагружении может быть и выше и ниже комнатной температуры в зависимости от структурного состояния. По порогу хладноломкости для всех сплавов деформированное состояние предпочтительнее, чем рекристаллизованное.

Применение. Около 3/4 всего получаемого молибдена идет на легирование стали, никелевых и других сплавов. Молибден увеличивает прокаливаемость и закаливаемость стали, уменьшает склонность к отпускной хрупкости и повышает жаропрочность никелевых, кобальтовых, хромовых, ниобиевых и других сплавов. Нелегированный молибден применяют в электроламповой и радиотехнической промышленности в виде проволоки и прутков. Из него изготавливают листовые аноды и сетки генераторных и усилительных ламп с рабочей температурой до 1700°C , керны катодов магнетронов, пружины катодов и т. п.

Так как у молибдена почти такой же коэффициент линейного расширения, как и у стекла, его применяют для электрических контактов, впаиваемых в стекло. Окисел молибдена не окрашивает стекло, и сам металл используют для электродов при варке оптического стекла. Из молибдена изготавливают нагревательные элементы печей сопротивления, работающие в вакууме или нейтральной среде (водород,

146. Свойства важнейших отечественных молибденовых сплавов

Сплав (состав, % по массе)	Температура рекристал- лизации, °С	Вид полу- фабриката	T, °С	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$ кгс/мм ²	σ_{100} кгс/мм ²
ЦМ-2А (0,07—0,3 Ti, 0,07—0,15 Zr, 0,004 C)	1300	Лист	20 1200 1300 1400	80 34		8,5—10 6,5 4,0
ВМ-1 (до 0,4 Ti, 0,08—0,25 Zr, 0,01 C, до 0,6 Nb)	1300	Лист Прутки	20 1200 1400 1500 1800	80/82 50/51 19 14/13,7 10	— 32 16 — —	8,5—10 — — — —
ВМ-2 (до 0,2 Ti, 0,25—0,40 Zr, 0,02 C, до 0,2 Nb)	1400	Прутки	20 1200 1400 1500 1800 2000	75 45 30 16 9 3	— 41 27 — — —	— 15,5 5,0 — — —
ЦМ-6 (0,1—0,2 Zr, 0,001—0,003 B)	1200— 1400	Прутки	20 1200 1300 1600 1800	77—85 35 12 9 5	— — — — —	— 13 4 — —
ЦМВ-30 (30 W; 0,01 C; добавки Zr, Ti, B, Al)	1400		20 1200 1500 1800	— — 16 6,3	— — — —	— 25 — 5
МР-47 ВП * (47 Re)	1400	Прутки	20 1500 1600 1800	178 15 10 6	— — — —	— — — —

* Сплав пластичен до —254° С.

Примечание. Испытания проводились в деформированном состоянии.

аммиак, инертные газы) до 1700° С. Молибден применяют также для изготовления инструмента в металлообрабатывающей промышленности (штампы для горячей штамповки, прошивные пуансоны, детали для литья под давлением).

Благодаря относительно невысокой плотности на базе молибдена могут быть созданы сплавы для лопаток и роторов газовых турбин ракетных двигателей *, что позволяет повысить рабочую температуру на 200—300° С для тепловых экранов космических аппаратов. Изделия, работающие на воздухе или в окислительной среде, необходимо защищать специальными покрытиями **.

Вольфрам

Получение. Компактный вольфрам в виде штабиков получают в основном из порошка прессованием с последующим спеканием в потоке водорода либо (реже) плавлением в дуговых или электронно-лучевых вакуумных печах. Спеченный вольфрам выпускают после деформации в виде прутка, листа и ленты.

У литого металла крупнозернистая структура, он хуже, чем спеченный, поддается механической обработке и обработке давлением. Обрабатываемость его можно значительно улучшить введением модификаторов при плавке. Изделия несложной формы изготавливают отливкой. Фасонные изделия получают гарнисажной плавкой с последующей разливкой центробежным способом в графитовые изложницы. Изделия небольших размеров из вольфрама получают напылением плазменной горелкой. Этим же способом наносят слой из вольфрама на другие металлы.

Максимальная чистота вольфрама отечественного производства — 99,95%. Технический вольфрам хрупок при 20° С. Температура перехода его в пластичное состояние зависит от чистоты и обработки металла, а также от условий испытания. Температурный порог хладноломкости деформированного металла (испытание на ударный изгиб) около 300—400° С, а рекристаллизованного — около 500° С. Это объясняется меньшей величиной зерна и соответственно меньшей удельной концентрацией примесей внедрения в деформированном металле, чем в рекристаллизованном (а также в литом). В связи с этим все технологические операции, сопровождающиеся уменьшением зерна (деформация, модифицирование), повышают пластичность вольфрама (и молибдена), а операции, приводящие к росту зерна (отжиг, литье, сварка), охрупчивают его. Существенно понизить порог хладноломкости вольфрама можно очисткой его от примесей. Так, после многократной зонной очистки электронным лучом вольфрам пластичен при 20° С ($\delta = 12 \div 15\%$).

Обработка *.** Деформируемость вольфрама определяется его чистотой. Пластическую деформацию производят только в горячем состоянии. Нагрев под деформацию во избежание окисления металла следует производить в вакууме или среде нейтральных газов. Обработку давле-

* Metal Progress, 1955, 68, № 2, с. 77.

** Борисенко А. И. Защита молибдена от высокотемпературной газовой коррозии. М., Изд-во АН СССР, 1960.

*** Металлы и сплавы для электровакуумных приборов. М., «Энергия», 1969, с. 598. Авт.: А. С. Гладков, В. М. Амосов, И. В. Копецкий, А. М. Левин.

нием слитков осуществляют горячим прессованием с последующей ковкой (ротационной), прокаткой, выдавливанием при температуре 1650—2300° С с высокими скоростями и большими обжатиями. Оптимальный температурный интервал нагрева слитков перед деформацией — 1700—1400° С. После разрушения грубой литой структуры пластичность металла повышается, и повторную обработку методом прессования можно проводить при более низких температурах, но не ниже 1200° С. Прессование литого вольфрама необходимо проводить со степенью деформации не ниже 70—75%. Для снятия наклепа в полупроизводствах в процессе пластической деформации необходимы промежуточные отжиги.

Рекристаллизация деформированного вольфрама протекает в интервале температур 1450—1600° С. При горячем прессовании для уменьшения контактного трения между слитком и инструментом, а также сохранения температуры слитка применяют стеклосмазки.

Нагретый до высоких температур вольфрам быстро охлаждается и теряет пластичность. Это обстоятельство требует, чтобы процесс обработки давлением протекал быстро. Температура конца деформации должна быть значительно выше (600—800° С) порога хрупкости вольфрама. Изделие из вольфрама необходимо устанавливать для обработки и вынимать из инструмента до того, как оно успеет охладиться ниже температуры порога хрупкости. Иначе наступит хрупкое разрушение.

Для механической обработки резанием вольфрам также необходимо подогревать до 400—500° С, так как при комнатной температуре он плохо поддается обработке. Листы из вольфрама обычно режут наждачными кругами или путем анодной резки (плиты).

Сварку и пайку вольфрама следует проводить также в вакууме или среде нейтральных газов. Желательна диффузионная сварка, а не сварка плавлением (например, электронно-лучевая). В последнем случае швы получаются хрупкими, и путем термической обработки повысить их пластичность не удастся.

Механические свойства. Характеристики типичных механических свойств технического вольфрама (чистотой 99,95%) в деформированном и рекристаллизованном состоянии представлены в табл. 147.

Прочность вольфрама при высоких температурах выше, чем у других металлов. До температур ~1500—1600° С кратковременная прочность деформированного металла выше, а пластические свойства ниже, чем у рекристаллизованного. При 2000° С предел прочности составляет 8, при 2200° С — 6, а при 2500° С — 3 кгс/мм². Длительная прочность рекристаллизованного металлокерамического вольфрама за 100 ч при 1500° С — 5 кгс/мм², а при 1650° С — 2,8 кгс/мм².

Взаимодействие с различными средами. Вольфрам отличается высокой коррозионной стойкостью в кислотах, щелочах и некоторых расплавленных металлах. Быстрое растворение вольфрама наблюдается в смеси HF и HNO₃ и щелочных растворах, содержащих окислители. Растворение в смеси HF и HNO₃ идет неравномерно, поэтому для полировки и травления эта смесь мало пригодна. Для этой цели чаще всего применяют смеси NaOH и K₂Fe(CN)₆ или NaOH и H₂O₂. При 20° С вольфрам имеет высокую химическую стойкость в воде и на воздухе.

С водородом вольфрам не взаимодействует даже при очень высоких температурах. Взаимодействие с азотом наблюдается также при температурах выше 2000° С.

147. Характеристики механических свойств вольфрама при 20 и 400° С *

Характеристики	Вид обработки	20° С	400° С
$HВ$, кгс/мм ²	Деформированный	415	—
	Рекристаллизованный	320	—
σ_B , кгс/мм ²	Деформированный	90	72—78
	Рекристаллизованный	50	30
δ_5 , %	Деформированный	0	12—15
	Рекристаллизованный	0	0—5
ψ , %	Деформированный	0	40—60
	Рекристаллизованный	0	0—5
E , кгс/мм ²		40 000	—

* Образцы $\varnothing$ 5 и рабочей длиной 25 мм

Сплавы. Легирование вольфрама, за исключением легирования рением, приводит к резкому падению пластичности. Поэтому для сплавов вольфрама применяют другие методы упрочнения, например, упрочнение дисперсными частицами окислов, карбидов и т. п.

В табл. 148 приведены значения предела прочности при высоких температурах основных сплавов вольфрама.

148. Предел прочности (кгс/мм²) вольфрамовых сплавов, получаемых методом порошковой металлургии, при различных температурах

Содержание добавок, % по массе	Полуфабрикат	1650° С	1900° С	2200° С	2400° С
W нелегированный	Прутки	10	6	3,4	—
50 Мо	Проволока	14	4,5	3,5	1,3
1 ThO ₂	Лист	26	19	9	—
2 ThO ₂	»	20	18	12	7,0
5 Re + 2 ThO ₂	»	25	—	—	—
0,4 TaC	Прутки	21	—	—	—

С повышением температуры прочность сплавов вольфрама понижается, оставаясь на достаточно высоком уровне только у сплавов, упрочненных карбидами и окислами. Основные недостатки высоколегируемых вольфрамовых сплавов — низкая технологичность и плохая свариваемость из-за повышенной склонности к образованию трещин при сварке и хрупкости сварных соединений.

Наибольшее применение в СССР и за рубежом нашли сплавы с рением, легирование которым в количестве 25—35% снижает температуру перехода вольфрама в хрупкое состояние, повышает пластичность при 20° С и улучшает технологические свойства. Промышленный отечественный сплав ВР-27ВП (W + 27 ± 3% Re) отличается повышенной по сравнению с нелегированным вольфрамом технологической пластич-

ностью, которая сохраняется вплоть до -100°C . Сплав хорошо сваривается дуговой сваркой в инертном газе и электронно-лучевой в вакууме. Шов получается пластичный. Предел прочности сплава при 1500°C — 30—35 кгс/мм², при 1800°C — 15 кгс/мм².

Сплавы вольфрама приготавливают методом порошковой металлургии и плавлением в электродуговых вакуумных печах.

При нагревании на воздухе выше 400°C все вольфрамовые сплавы сильно окисляются. Поэтому эксплуатацию и технологические операции (горячая деформация, сварка, пайка, термообработка и т. п.) следует производить в вакууме, водороде или инертной среде. В случае работы изделий в окислительной среде на их поверхность необходимо наносить специальные защитные покрытия.

Применение. В настоящее время промышленное применение находят преимущественно нелегированный вольфрам. Его широко применяют в электроламповой, радиотехнической и электровакуумной промышленности.

Вольфрам широко используют в металлургической промышленности при производстве твердых сплавов и легированных сталей, в химической промышленности и авиации в качестве материала для изделий, работающих до $2500\text{--}2700^{\circ}\text{C}$.

Литой металл применяют для изготовления вкладышей критического сечения сопел ракет, работающих на твердом топливе.

В ядерной энергетике из вольфрама делают тигли для хранения радиоактивных материалов и другие изделия.

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ОКИСЛЕНИЯ

Развитие многих отраслей современной техники в значительной степени зависит от решения проблемы защиты от окисления рабочих поверхностей ответственных деталей машин.

Проблема защиты от окислений приобрела особую остроту в связи с применением высокожаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлов — молибдена, вольфрама, ниобия, тантала для энергетической, авиационной, ракетной и космической техники.

Обладая необходимыми механическими свойствами при высоких температурах (более 1000°C) в вакууме, эти металлы катастрофически разрушаются в окислительной среде при нагреве выше 700°C .

Объемным легированием не удалось придать достаточную жаростойкость тугоплавким сплавам. Наиболее реальный путь решения проблемы защиты их от окисления — это разработка составов и способов получения защитных покрытий, т. е. поверхностное легирование несколькими элементами.

Иными словами химико-термическая обработка деталей машин из тугоплавких сплавов — необходимая технологическая операция, значительно повышающая их жаростойкость.

Защитные свойства покрытий обычно связывают с образованием на их поверхности плотных слоев из оксидов алюминия, хрома и кремния, а жаростойкость покрытий оценивают по интенсивности изменения массы образцов.

Этот метод оценки жаростойкости применим при испытании защитных покрытий на сплавах из тугоплавких металлов, которые весьма интенсивно окисляются при нарушении сплошности покрытий. Однако

для оценки жаростойкости сплавов на железной и никелевой основах требуются дополнительные металлографические, рентгенографические или микрорентгеноспектральные исследования, так как в процессе испытания на жаростойкость при высоких температурах наряду с образованием окалины происходит диффузионное рассасывание слоя защитного покрытия.

Повысить жаростойкость молибденового сплава ЦМ-2А можно дополнительным легированием силицидных покрытий бором.

В процессе окисления боридный подслои MoB перестраиваются в барьерный подслои Mo_5SiB_2 , препятствующий диффузионному рассасыванию дисилицида молибдена. Кроме того, бор способствует самозалечиванию поверхности дисилицидного слоя. Максимальный срок службы указанного покрытия в воздушной среде достигал при 1300°C 3000 ч и при 1500°C 1000 ч.

К промышленным методам поверхностного легирования следует отнести насыщение из порошковых смесей, из расплавов металлов или солей, из паровой фазы, из газовых смесей прямоточным и циркуляционным методом.

В ряде случаев жидкая фаза — источник диффундирующего элемента — активизируется электролизом, а газовая фаза — ионизацией в тлеющем разряде. Наиболее широкое применение в промышленности нашло диффузионное насыщение из порошковых смесей, содержащих кроме диффундирующего элемента хлористый или иодистый аммоний, который диссоциируя при нагреве, образует в муфеле хлориды или иодиды диффундирующего элемента. Образовавшиеся таким образом активные компоненты газовой смеси (кроме того, в муфеле образуются азот и водород) адсорбируются на насыщаемой поверхности, где в зависимости от температурных условий и химических свойств могут протекать реакции замещения, диспропорционирования или восстановления.

Насыщение из порошковых смесей производят обычно при температурах $950\text{--}1100^\circ\text{C}$ в стальных контейнерах, герметизацию которых осуществляют способами, указанными на рис. 34. Применение плавких затворов из натросиликатного стекла, плавящегося при $750\text{--}800^\circ\text{C}$, не препятствующего вытеснению воздуха в период нагрева контейнера с деталями и надежно изолирующего рабочее пространство от окружающей атмосферы во время основной стадии хромирования, позволило стабилизировать результаты хромирования и уменьшить окисление поверхности деталей в контейнерах. Примеры некоторых процессов химико-термической обработки в порошковых смесях приведены в табл. 149.

Применение алюминотермического способа силицирования, основанного на реакции $4\text{Al} + 3\text{SiO}_2 = 3\text{Si} + 2\text{Al}_2\text{O}_3$, протекающей в порошковой смеси кварцевого песка с алюминием, позволило получить на сталях беспористые диффузионные слои кремнистого феррита при сравнительно небольших изотермических выдержках. Для получения беспористых слоев при силицировании стали была также предложена порошковая смесь, состоящая из 19,5—20,3% кристаллического кремния, 61,0—61,7% закиси или окиси железа, 3,8—4,2% хлористого аммония и 13,8—15,7% окиси алюминия.

Исследования показали, что из порошковых смесей можно производить также одновременное диффузионное насыщение несколькими элементами.

Так, например, после алумоборирования никелевых сплавов в порошковой смеси, состоящей из 30—50% алюминия и бора, 45—65% окиси алюминия и 5% хлористого аммония, можно получить многокомпонентное покрытие более жаростойкое, чем алюминидное. При этом оптимальное соотношение $Al : B \approx 3 : 1$.

Алитирование металлов в ваннах с расплавленным алюминием давно привлекает внимание технологов, но такие недостатки, как малая стойкость стальных тиглей по отношению к расплаву, растворение

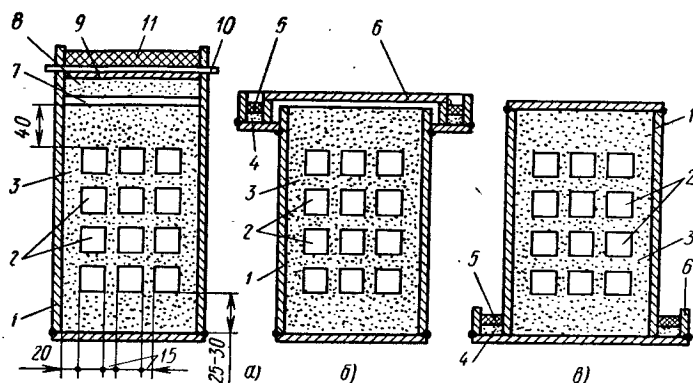


рис. 34. Схемы герметизации контейнеров для диффузионного насыщения из порошковых сред:

- с комбинированным уплотнением; 6 — с верхним плавким затвором;
- 8 — с нижним плавким затвором;
- стальной контейнер; 2 — насыщаемые детали; 3 — порошковая смесь;
- газовый уплотнитель; 5 — нитросиликатное стекло; 6 — стальная крышка;
- асбестовая прокладка; 8 — отработанный порошок или его смесь с углем;
- 9 — железная прокладка; 10 — шпилька; 11 — обмазка (глина)

металла деталей в алюминии, налипание его на поверхность и другие препятствуют промышленному применению этого метода.

Во избежание интенсивного растворения стальных деталей в алюминиевую ванну вводят 8—12% железа или 20—22% никеля. Кроме того, место стальных тиглей применяют магнезитовые или шамотные, а на поверхность расплава наносят слой флюса для защиты расплава от окисления, очистки поверхности детали от загрязнения и тонких окисных пленок, прогрева деталей в слое флюса и сокращения времени контакта с расплавом, применения электродного нагрева ванны, также очистки поверхности от налипшего расплава путем встряхивания или вращения детали. Составы применяющихся флюсов приведены табл. 150.

Рекомендуемая температура расплава для алитирования сталей обычно от 650 до 800°С.

Для формирования жаростойкого слоя после алитирования в ваннах детали подвергают диффузионному отжигу при 900—1100°С.

Применение простого способа подготовки поверхности металлов — окисления на воздухе при оптимальных температурах упрощает техно-

Вид диффузионного насыщения	Состав порошковой смеси, %	Насыщаемый металл или сплав	Режим диффузионного насыщения и толщина слоя			Литературный источник
			Температура выдержки, °C	Время выдержки, ч	Толщина диффузионного слоя, мм	
Аллитирование (алюминирование)	49 ферроалюминия (содержит 43 железа), 49 каолиновой глины, 2 хлористого аммония	Сталь 10 (0,13% C)	900	3	0,09	По данным В. И. Просвирина и И. Ф. Зудина
			900	6	0,10	
			975	3	0,12	
			975	6	0,17	
			1050	3	0,33	
			1050	6	0,38	
	99,5 ферроалюминия (содержит 43 железа), 0,5 хлористого аммония	Сталь 10 (0,13% C)	900	3	0,10	
			900	6	0,12	
			975	3	0,15	
			975	6	0,21	
			1050	3	0,44	
			1050	6	0,48	
	99 ферроалюминия ФАП (АМТУ 325-52), 1 хлористого аммония 1-го сорта (ГОСТ 2210—73)	ЖС6К	950	3	0,042	
			950	6	0,057	
			1000	3	0,060	
			1000	6	0,088	
			1050	3	0,087	
			1050	6	0,126	
Хромирование	50 феррохрома, 43 окиси алюминия, 7 хлористого аммония	У8	1100	6	0,04	По данным Г. Н. Дубинина
			1000	6	0,02	
		Сталь 40	1100	6	0,02	
			1000	6	0,01	

Вид диффузионного насыщения	Состав порошковой смеси, %	Насыщаемый металл или сплав	Способ диффузионного насыщения и толщина слоя			Литературный источник
			Температура выдержки, °С	Время выдержки, ч	Толщина диффузионного слоя, мм	
Хромирование	65 хрома, 30 окиси алюминия, 5 хлористого аммония	Сталь 10 Сталь 45 У10	1150 1150 1150	5 5 5	0,05 0,018 0,018	По данным Г. Н. Дубинина
	60—70 хрома, 29—39 окиси алюминия, 1 нитристого аммония	10Х18Н9Т	1100	10	0,1—0,12	По данным Ю. Н. Грибоедова, Б. И. Юнца
Силицирование	75 ферросилиция, 20 шамота, 5 хлористого аммония	Сталь 10	1100 1200	2 10	0,05 0,88— 0,90	По данным Л. С. Ляховича и др.
	Алюминотермическая смесь: 98 (2,5 алюминия, 97,5 огнеупорной глины), 2 фтористого натрия	Железо	1100	4	0,175 без пор	
		Сталь 45	1100	4	0,105 без пор	
		У8	1100	4	0,108 без пор	По данным Ю. Н. Тельнюка
	19,5—20,3 кристаллического кремния, 61,0—61,7 закиси или окиси железа, 3,8—4,2 хлористого аммония, остальное окись алюминия	Сталь 35	1120	2	0,20 без пор	
	60 кремния, 37 шамота, 3 хлористого аммония	Молибден	1100 1100	6 10	0,12 (MoSi ₂) 0,16 (MoSi ₂)	По данным А. П. Гуляева и др.

150. Химический состав (%) флюсов

NaCl	KCl	Na ₃ AlF ₆	AlF ₃	ZnCl ₂
40	40	10	10	—
35	47	12	6	—
35	35	10	—	20
44	56	—	—	—

логию алитирования в расплаве. Алитирование тугоплавких металлов можно производить при сравнительно низкой температуре (до 900° С) и малой выдержке (до 20 мин) без применения специальной защитной атмосферы.

Экспериментально установлено, что легирование расплава алюминия кремнием, молибденом, хромом и ниобием, а следовательно, и покрытия, повышает жаростойкость. Г. В. Земсков и П. Ф. Шуленок предложили двухпозиционную установку для алитирования металлов. Детали, загруженные в контейнер с сетчатым дном, помещают в тигель с расплавом. После изотермической выдержки контейнер с деталями передается на вторую позицию той же рабочей камеры печи, где избыточный расплав стекает на противень. Этот способ позволил получить ровные и сплошные покрытия. Несмотря на большое количество работ по диффузионному насыщению в расплавах солей, особенно по хромированию, этот метод ограниченно применяется в промышленности из-за его недостатков: накопления в ванне продуктов реакции и связанной с этим нестабильности работы, интенсивного испарения солей и разбедания металлических тиглей, сложности обработки крупных деталей и т. д.

Вакуумный метод диффузионного насыщения металлов основан на передаче диффундирующих элементов на насыщаемую поверхность через паровую фазу. Насыщение производится в вакуумных печах при высоких температурах (1150—1450° С) и давлении 10^{-3} — 10^{-5} мм рт. ст. При этом исключается химическое взаимодействие исходной среды с насыщаемой поверхностью, что уменьшает производительность процесса, которая может характеризоваться коэффициентом роста слоя (табл. 151).

151. Производительность методов силицирования молибдена при 1200° С

Характеристика метода	Коэффициент роста диффузионного слоя, см ² /с
Насыщение из паровой фазы кремния, температура которого 1200° С; вакуум 10^{-5} мм рт. ст.	$0,175 \cdot 10^{-8}$
Насыщение из газовой среды прямоточным методом; исходная среда HCl + Si	$0,61 \cdot 10^{-8}$
Насыщение из газовой среды циркуляционным методом; исходная среда HCl + Si	$1,39 \cdot 10^{-8}$

В результате вакуумного алитирования стали не удается получить достаточной концентрации алюминия на насыщаемой поверхности. После двухчасовой изотермической выдержки при 1500°C в смеси (50% алюминия + 50% окиси алюминия) концентрация алюминия на поверхности стали достигла только 3%, чего явно недостаточно для придания повышенной жаростойкости.

Вакуумный метод диффузионного хромирования сталей, позволяющий получать слой большой толщины, обладающей пластичностью, разработан институтом УКРНИСПЕЦСТАЛЬ. По этому методу на заготовках из низкоуглеродистой стали в вакуумных печах (например, ОКБ-554А) при 1400°C за 18 ч изотермической выдержки получали хромированный слой около 3 мм. Заготовки подвергали горячей и холодной прокатке. Производственные испытания показали высокую коррозионную стойкость листов хромированных низкоуглеродистых сталей, которые не уступают высоколегированным хромоникелевым сталям.

Большой практический интерес представляет диффузионное насыщение металлов и сплавов из химически активных газовых сред. В мировой практике широко применяют газовую цементацию и азотирование прямоточным методом, когда рабочая камера печных установок заполняется медленно протекающей газовой средой.

Многочисленные попытки осуществить диффузионную газовую металлизацию прямоточным методом в производственных условиях не дали положительных результатов. Один из существенных недостатков прямоточного метода — неравномерность диффузионных слоев в разных точках поверхности детали.

Недостатки прямоточного метода устраняются в разработанном в МВТУ им. Баумана и получившем промышленное применение циркуляционном методе диффузионного насыщения металлов и сплавов.

По сравнению с широко применяемым методом диффузионного насыщения из порошковых смесей циркуляционный метод имеет ряд преимуществ: более высокую химическую чистоту покрытия, безопасность, безвредность, большую производительность и экономичность технологического процесса. Для осуществления циркуляционного процесса требуется специальное оборудование, подобное применяемому для газовой цементации. В основе циркуляционного метода лежит явление переноса диффундирующего элемента в замкнутом рабочем пространстве установки при систематическом восстановлении газопереносчика в результате обратимых химических реакций. На протекание указанных реакций активно влияют насыщаемая поверхность и температурный перепад между диффундирующим элементом и насыщаемым металлом. В рабочей камере установки предусматривается раздельное расположение насыщаемых деталей и диффундирующего элемента, а реверсируемое движение газовой среды осуществляется вентилятором.

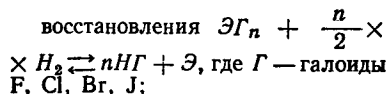
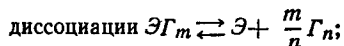
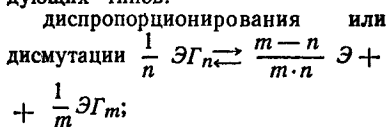
Циркуляционный метод позволяет производить одновременное насыщение поверхности детали несколькими элементами.

Принципиальная схема циркуляционной установки шахтного типа показана на рис. 35. В муфель 1 загружают садку деталей *D* и диффундирующий элемент *Э*, закрывают герметичной крышкой 2 и перекрывают вентиль патрубка 6, а через патрубок 5 удаляют воздух из муфеля : помощью форвакуумного насоса. Затем нагревается садка до опреде-

ленной температуры и через вентиль патрубка *б* заполняется рабочая камера исходной газовой средой (парами галондов или галогенидов).

Процесс диффузионного насыщения может осуществляться при $T_1 = T_2 = T_3$ в результате нарушения термодинамического равновесия в рабочей камере. Однако в конкретных вариантах диффузионного насыщения устанавливаются оптимальные температуры в тепловых зонах, которые способствуют протеканию соответствующей обратной реакции.

В рабочей камере (в муфеле) циркуляционной установки могут протекать обратимые реакции следующих типов:



Э — диффундирующий элемент; m, n — целые числа.

Принципиальные варианты циркуляционного метода диффузионного насыщения в зависимости от диффундирующего элемента и ведущей обратимой реакции даны в табл. 152, а в табл. 153 приведены

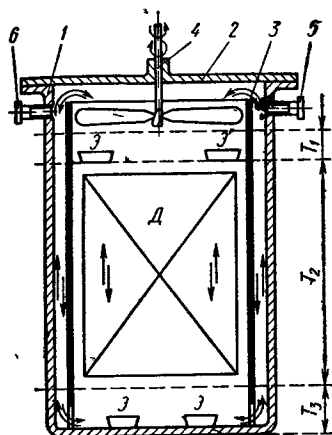


Рис. 35. Принципиальная схема циркуляционной установки:

1 — муфель; 2 — крышка, 3 — направляющий цилиндр, 4 — реверсивный вентилятор, 5, 6 — патрубки

примеры некоторых режимов насыщения этим методом.

Из графиков (рис. 36), поясняющих термодинамическое обоснование вариантов циркуляционного метода, видно, как изменением температуры относительно равновесной T_0 в рабочей камере установки можно влиять на ход и направление ведущей обратной реакции. Однако более подробные представления дают расчеты состава газовой среды.

Результаты расчета равновесного состава хлоридов кремния в зависимости от температуры смеси и суммарного давления показаны на рис. 37, где видно, что с повышением температуры в реальных для силицирования пределах в смеси возрастает количество субхлорида SiCl_2 , который при понижении температуры распадается с выделением кремния. Следовательно, в случае силицирования металлов, указанных в табл. 152, целесообразно в зоне расположения кремния иметь более высокую температуру, чем в зоне расположения деталей, силицируемых циркуляционным методом.

Из графика на рис. 37 также видно, что уменьшение суммарного давления в рабочей камере приводит к уменьшению равновесной температуры обратимой реакции $2\text{SiCl}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + \text{SiCl}_4$ и увеличению

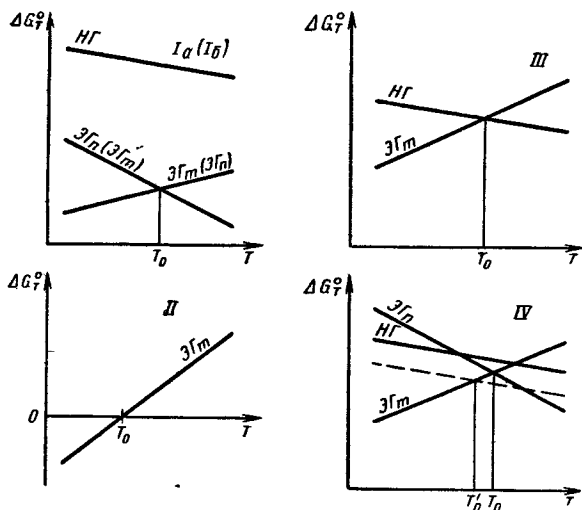


Рис. 36. Зависимость изменения свободной энергии от температуры для ведущих реакций (см. табл. 152)

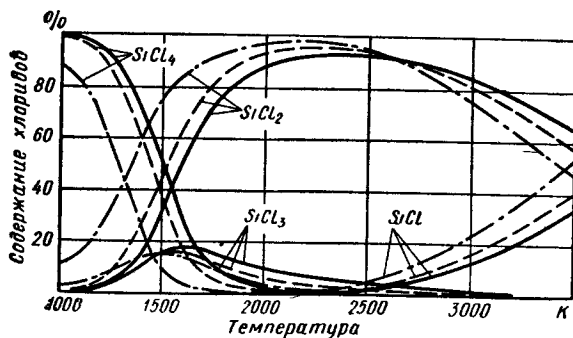


Рис. 37. Равновесные составы хлоридов кремния в зависимости от температуры и давления (расчетные данные):

— $\Sigma P = 1 \text{ кгс/см}^2$, --- $\Sigma P = 0,315 \text{ кгс/см}^2$, -.- $\Sigma P = 0,05 \text{ кгс/см}^2$, $\Sigma P = 0,01 \text{ кгс/см}^2$

152. Варианты циркуляционного метода диффузионного насыщения металлов

Вариант		Диффундирующий элемент	Ведущая обратимая реакция	Расчетная равновесная температура T_e , К	Насыщаемые металлы
1а	Алюминий	$3\text{AlCl} \rightleftharpoons 2\text{Al} + \text{AlCl}_3$		1638	$\text{Fe, Ni, Cu, Si, Mo, W, Nb}$
		$3\text{AlCl}_2 \rightleftharpoons \text{Al} + 2\text{AlCl}_3$		1193	
		$3\text{AlJ} \rightleftharpoons 2\text{Al} + \text{AlJ}_3$		1115	
		$4\text{SiCl}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + 3\text{SiCl}_4$		1800	
	Кремний	$2\text{SiCl}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + \text{SiCl}_4$		1608	Ni, Mo, W, Nb, Ta
		$2\text{SiJ}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + \text{SiJ}_4$		1758	
		$2\text{SiF} \rightleftharpoons \text{Si} + \text{SiF}_4$		725	
		$\text{BCl}_2 \rightleftharpoons \text{B} + 2\text{BCl}_3$		1973	
		$3\text{BF}_2 \rightleftharpoons \text{B} + 2\text{BF}_3$		1430	
		$2\text{BeCl} \rightleftharpoons \text{Be} + \text{BeCl}_2$		1880	
1б	Бериллий	$2\text{CO} \rightleftharpoons \text{C} + \text{CO}_2$		970	Fe, Ni, Co
	Титан	$2\text{TiJ}_2 \rightleftharpoons \text{Ti} + \text{TiJ}_4$		1250	Fe, Ni, Mo, W, Nb
		$4\text{TiCl}_2 \rightleftharpoons \text{Ti} + 3\text{TiCl}_4$		1210	
		$2\text{TiF}_2 \rightleftharpoons \text{Ti} + \text{TiF}_4$		1010	

Продолжение табл. 152

Вариант	Диффундирующий элемент	Ведущая обратная реакция	Расчетная равновесная температура T_0 , К	Насыщаемые металлы
II	Хром	$\text{CrJ}_2 \rightleftharpoons \text{Cr} + \text{J}_2$	1551	Fe *, Ni, Mo, W
	Ниобий	$2\text{NbJ}_2 \rightleftharpoons 2\text{Nb} + 5\text{J}_2$	1234	Ni, Mo, W
III	Хром	$2\text{CrF}_3 + 3\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{Cr} + 6\text{HF}$	1370	Fe, Ni, Mo, W
	Ванадий	$\text{VF}_3 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{V} + 2\text{HF}$	1340	Fe, Ni, Mo, W
	Ниобий	$2\text{NbCl}_3 + 5\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{Nb} + 10\text{HCl}$	1000	Ni, Mo, W
	Никель	$\text{NiCl}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{Ni} + 2\text{HCl}$	723	Mo, W
	Германий	$\text{GeCl}_4 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{Ge} + 4\text{HCl}$	800	Ge, Ni, Mo, W
IV	Кремний	$\text{SiCl}_4 + \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{SiCl}_2 + 2\text{HCl}$	1635	Ni, Mo, W, Nb, Ta
		$2\text{SiCl}_4 + \text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{SiCl}_2 + 2\text{HCl}$	1455	
		$4\text{SiCl}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + 3\text{SiCl}_4$	1800	
		$2\text{SiCl}_2 \rightleftharpoons \text{Si} + \text{SiCl}_4$	1608	
	Бор	$2\text{BCl}_2 + \text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{BCl} + 2\text{HCl}$	1793	Ni, Mo, W
		$3\text{BCl}_2 \rightleftharpoons \text{B} + 2\text{BCl}_3$	1973	

* При насыщении железа йод вводится в рабочую камеру при температуре железа выше 900° С.

Вид диффузионного насыщения	Характеристика исходной среды, скорость газового потока и суммарное рабочее давление	Насыщаемый металл или сплав	Режим насыщения и характеристика диффузионного слоя					
			Температура насыщаемого металла, °C	Время изотермической выдержки, ч	Температура в зоне диффузирующего элемента, °C	Привес, мг/см²	Толщина слоя, мкм	Фазовый состав слоя
Алимирование (алюминирование) по варианту 1а	Безводный хлористый алюминий ¹ , алюминий ² . Давление 1—1,05 кгс/см². Средняя скорость газового потока 103 м/мин. Критерий Рейнольдса потока рабочей газовой смеси — 4340	Никель Н1 (ГОСТ 849—70)	950	3	950	5,90	28	NiAl
			950	6	950	8,20	40	Ni ₃ Al (твердый раствор)
			1000	3	1000	9,40	45	Ni ₃ Al, NiAl
			1000	6	1000	13,60	62	Ni ₃ Al (твердый раствор)
		ЖС6К	1050	3	1050	7,10	34	NiAl
			1050	6	1050	9,60	49	Ni ₃ Al (твердый раствор)
			950	6	950	7,10	45	Твердый раствор на основе NiAl (31—36% Al) ³
			1000	6	1000	12,08	70	Твердый раствор на основе Ni ₃ Al (13—14% Al)
			1050	6	1050	9,40	58	Твердый раствор

Вид диффузионного насыщения	Характеристика исходной среды, скорость газового потока и суммарное рабочее давление	Насыщаемый металл или сплав	Режим насыщения и характеристика диффузионного слоя					
			Температура насыщаемого металла, °C	Время изотер- мической выдержки, ч	Температура в зоне диффун- дирующего элемента, °C	Привес, мг/см²	Толщина слоя, мкм	Фазовый состав слоя
Хромирование по варианту II	Йод ³ , хром ⁴ Давление 0,3 кгс/см² Средняя скорость газового пото- ка 27 м/мин	Железо Армко (0,04% C)	1050	3	850		84	Твердый раствор с максимальной концентрацией хрома 72% (по мас- се) на поверхности
			1050	6	850		115	
			1100	3	850		105	
			1100	6	850		150	
			1150	3	850		210	
			1150	6	850		300	
		Молибден МЧ (0,01% C)	1050	6	850	8,60	45	Твердый раствор с максимальной концентрацией хрома 70% (по массе) на поверх- ности с зоной упо- рядоченного твер- дого раствора
			1100	6	850	12,00		
			1150	6	850	20,00		
		10X18H9T (ГОСТ 5632—72)	1100	3	850		80	α-твердый раствор α + σ-фаза α + σ + γ-твердый раствор σ + γ Максимальная кон- центрация хрома 70% (по массе) на поверхности
			1100	6	850		128	
			1150	3	850		160	
			1150	6	850		280	

Вид диффузионного насыщения	Характеристика исходной среды, скорость газового потока и суммарное рабочее давление	Насыщаемый металл или сплав	Режим насыщения и характеристика диффузионного слоя					Фазовый состав слоя
			Температура насыщаемого металла, °C	Время изотер- мической выдержки, ч	Температура в зоне диффу- дирующего элемента, °C	Привес, мг/см ²	Толщина слоя, мкм	
Силицирование по варианту Ia	Тетрахлорид кремния ⁵ (0,2 кгс/см ²), аргон ⁶ , кремний ⁷ . Давление 1—1,03 кгс/см ² . Средняя скорость газовой потока 15 м/мин	Молибден МЧ	1125	3	1200	13,15	53	В основном MoSi ₂
			1125	5	1200	15,89	66	
			1125	7	1200	18,42	76	
Силицирование по варианту IV	Тетрахлорид кремния ⁵ (0,2 кгс/см ²), водород ⁸ (0,2 кгс/см ²), аргон ⁶ , кремний ⁷ . Давление 1—1,03 кгс/см ² . Средняя скорость газовой потока 15 м/мин	Молибден МЧ	1125	3	1200	14,40	60	В основном MoSi ₂
			1125	5	1200	17,30	72	

Вид диффузионного насыщения	Характеристика исходной среды, скорость газового потока и суммарное рабочее давление	Насыщаемый металл или сплав	Скорость насыщения и характеристика диффузионного слоя					
			Температура насыщаемого металла, °C	Время изотер- мической выдержки, ч	Температура в зоне диффу- дирующего элемента, °C	Привес, мг/см²	Толщина слоя, мкм	Фазовый состав слоя
Алюмобориро- вание	Безводный хлористый алюминий ¹ , алюми- ний ² , аморфный бор; отношение кажущихся поверхностей бора и алюминия 1 : 5. Давление 1—1,05 кгс/см². Средняя скорость газова- го потока 72 м/мин. Кри- терий Рейнольдса пото- ка рабочей газовой сме- си 3050	Никель Н1	950 950	3 5	1000 1000	11,08 13,20	105 130	В основном фаза Ni ₂ Al ₃ , легирован- ная бором

¹ Безводный хлористый алюминий² Алюминий А97 (ГОСТ 11070—74).³ Йод кристаллический ЧДА (ГОСТ 4159—64 *).⁴ Хром ХО (ГОСТ 5905—67-).⁵ Тетрахлорид кремния особой чистоты (общее количество примесей менее 10⁻⁵ %).⁶ Аргон технически чистый марки А.⁷ Кремний кристаллический Кр0 (ГОСТ 2169—69).⁸ Водород технически чистый (99,7% H₂).

количества SiCl_2 при тех же температурных условиях. Однако для соблюдения стабильности и большей безопасности процесса рекомендуется вести его при давлениях, близких к атмосферному. В этих условиях легче осуществлять герметизацию рабочей камеры.

На рост диффузионных слоев при прочих равных условиях существенно влияет скорость газового потока около насыщаемой поверхности.

Максимальная толщина диффузионного слоя образуется при скорости газового потока, соответствующей переходу ламинарного потока в турбулентный. Это подтверждается результатами, приведенными в табл. 154.

154. Влияние вида газового потока на эффективность адитирования *

Критерий Рейнольдса для смеси хлоридов алюминия	Расход алюминия, г	Δ_m , мг/см ²	
		NI	ЖС6К
1660	14,7	6,12	4,48
2090	24,2	7,72	5,02
3050	48,7	10,70	8,62
4340	40,7	8,20	7,01
6300	28,3	6,77	5,53

* Адитирование производилось в циркуляционной установке при 950° С в течение 6 ч.

Примечание. Δ_m — отношение приращения массы образца к площади его поверхности.

В последнее время для большей активизации реакционных процессов в газовой среде и адсорбции на насыщаемой поверхности начинают применять ионизационные процессы диффузионного насыщения. Наиболее разработан и нашел промышленное применение процесс ионизационного азотирования, или азотирование в тлеющем разряде, который осуществляется в контейнере, заполненном азотом или аммиаком, при давлении около 5—10 мм рт. ст.

Азотируемая деталь, являющаяся катодом, непрерывно бомбардируется ионами азота и разогревается до температуры азотирования ($500\text{--}550^\circ\text{C}$). Рабочее напряжение между анодом, которым может служить контейнер, и катодом поддерживается в пределах $600\text{--}800\text{ В}$. В результате достигается более высокое качество азотированного слоя; процесс азотирования идет интенсивно без применения печей и водорода. Применение тлеющего разряда позволяет устранить неравномерность диффузионных слоев, обычно получаемых на деталях сложных конфигураций при сохранении ламинарных газовых потоков в рабочей камере. Обеспечивается равномерный нагрев поверхности и одинаковый приток диффундирующего элемента.

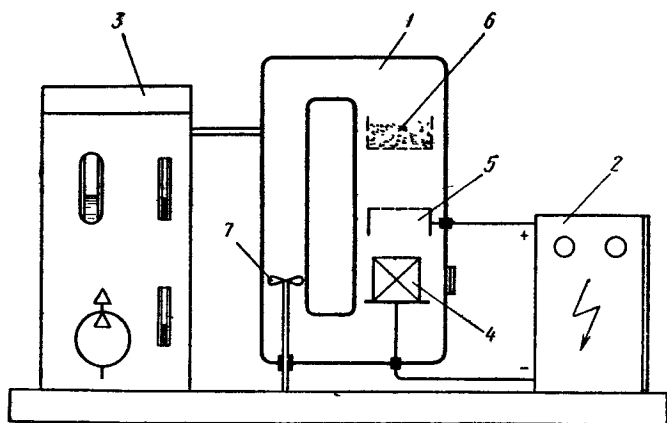


Рис. 38. Схема установки для силицирования молибдена в тлеющем разряде:

1 — реакция камера; 2 — блок электропитания; 3 — блок вспомогательных агрегатов (вакуумный насос, испаритель тетраэдрида кремния, вакуумметры и др.); 4 — силицируемая деталь — катод; 5 — анод; 6 — корзинка с кремнием; 7 — вентилятор

В установке, схема которой показана на рис. 38, осуществлено силицирование молибдена в тлеющем разряде циркуляционным методом. Благодаря применению тлеющего разряда и образованию слоя Mo_5Si_3 между молибденовой основой и слоем MoSi_2 получено покрытие более высокого качества, чем в циркуляционной установке с печным нагревом образцов (табл. 155).

В табл. 155 приведены некоторые защитные покрытия на металлах и сплавах и методы их получения.

Насыщаемый металл или сплав	Характеристика защитного покрытия		Жаростойкость в воздушной среде		Метод и режим насыщения	Литературный источник и примечание
	Состав диффузионного слоя	Толщина слоя, мм	Температура испытаний, °C	Время до разрушения, ч		
Молибден	MoSi_2 Mo_2Si_3	110—120 3	1700 —	50 —	Силицирование из порошковой смеси: 60% кремния + 37% шамота + 3% хлористого аммония. 1100° C, выдержка 8 ч	По данным А. П. Гуляева
Молибден	MoSi_2 Mo_2Si_3	340	1600	250	Силицирование из расплава: медь + 16,5% кремния (по массе) 1300° C, выдержка 2 ч	Из монографии Г. В. Самсонова и А. П. Эпика
Молибден с 0,5% титана	93 мг осажденного кремния и 8 мг осажденного бора	—	1200	2942	Боросилицирование прямоточным методом. 1. Борирование при 1100° C 1 ч. Исходная среда: трехфтористый бор (2 л/мин) и аргон 2 Силицирование при 1100° C 6 ч. Исходная среда: тетрахлорид кремния (2—4 л/мин) и аргон	

					нагреве молибдена до 1125° С, кремния до 1200° С, выдержка 8—9 ч Исходная среда: тетрагидрид кремния (0,2 кгс/см ²), водород (0,2 кгс/см ²), аргон, кремний Суммарное давление 1—1,03 кгс/см ² . Скорость потока 15 м/мин	
Молибден, МЧ	MoSi ₂ Mo ₅ Si ₃	100—120 40—45	1300 1500	450 150	Силицирование циркуляционным методом при нагреве в тлеющем разряде молибдена до 1300° С, кремния до 1100° С, выдержка 2—2,5 ч Исходная среда тетрагидрид кремния, кремний Рабочее давление 15—20 мм рт ст.	—
BM1	Алюминид молибдена, модифицированного кремнием и хромом	200—300 —	1350 1500	250 30	Насыщение из расплава: алюминий, кремний, молибден, хром; 830—850° С, выдержка 8 мин	Из монографии Г В. Самсонова и А П Эпика

Насыщаемый металл или сплав	Характеристика защитного покрытия		Жаростойкость в воздушной среде		Метод и режим насыщения	Литературный источник и примечание
	Состав диффузионного слоя	Толщина слоя, мм	Температура испытаний, °C	Время до разрушения, ч		
Вольфрам	WSi_3 W_5Si_3	~ 40	1815	10	Силицирование из порошковой смеси: кремний, 10% фтористого натрия, 5% хлористого аммония, 1065° C, 8 ч	Из монографии Г. В. Самсонова и А. П. Эпика
Ниобий и его сплавы	$NbSi_3$, легированный (~4% Ti)	38—76	982	5000	Насыщение из порошковой смеси: 67—75% кремния и титана в соотношении 1 : 1, 20—25% окиси алюминия, 5—9% трехфтористого алюминия, в токе аргона (~10 см³/мин), 930—1040° C, выдержка 16 ч. Окислительный отжиг: 980° C, 25 ч	

+10% Mo+10% Ti)		20° С	9; 10,9 11,4; 11,5	1. Силицирование: 60% кремния, 6—10% галогенного активатора, остальное окись алюминия, 1150° С, 16 ч. IIa) хромоалитирование: 35% хрома, 20% алюминия, 4% галогенного активатора, остальное окись алюминия, 1260° С, 16 ч. IIб) хромоборирование: 30% хрома, 30% ферробора, 4% галогенного активатора, остальное окись алюминия, 1200° С, 16 ч.	А II Эпика При испытаниях на жаростойкость образцы через каждый час охлаждали с 1425 до 20° С и снова нагревали
Д43 (Nb+ +10% W+1% Zr), Д36 (Nb+ +10% Ti+5% Zr), В66 (Nb+ +5% Mo+5% V+ +1% Zr)	Хромо-титано- кремниевое покрытие марки TRW	75—100	980 1120	150 150	Последовательное насыщение в порошках с добавкой фтористого калия. 1. Титанирование в вакууме 10^{-2} мм рт. ст в засыпке из титановой губки при 1040° С, 6 ч. 2. Хромотитанирование в смеси порошков хрома и титана (1 : 1) при 1260° С, 8 ч, давление 1,5 мм рт. ст. 3. Силицирование в порошке кремния при 1120° С, 4 ч, давление от 1,5 до 10^{-2} мм рт. ст.
Ta+30% Nb+ +7,5% V	50 ат % крем- ния и 50% ат бо- ра	100	1480	Более 115	Последовательное насыщение в порошках с добавкой фтористого натрия. 1. Борирование при 1205° С 4 ч. 2. Силицирование при 1315° С 6 ч

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтман М. Б., Лебедев А. А., Чухров М. В. Плавка и литье легких сплавов М., «Металлургия», 1969, с. 100—139
2. Бондарев Б. И. Плавка и литье магниевых сплавов М., «Металлургия», 1973, с. 10—26
3. Буше Н. А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава. М., «Транспорт», 1967. 224 с
4. Вульф Б. К. Термическая обработка титановых сплавов М., «Металлургия», 1967. 375 с.
5. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Конструкционные титановые сплавы. Под ред. А. Т. Туманова М., «Металлургия», 1974. 368 с.
6. Гуляев А. И., Моргунова Н. Н., Клыпин Б. А. Сплавы на основе тугоплавких металлов. — В кн.: Металловедение и термическая обработка металлов 1968, М., изд. ВИНТИ, 1970. 171 с
7. Дриц М. Е. Магниевые сплавы для работы при повышенных температурах. М., «Наука», 1964. 229 с.
8. Дриц М. Е., Сви́дерская З. А. Новое в области деформируемых магниевых сплавов — В кн.: Химия металлических сплавов. М., «Наука», 1973, с. 158—166
9. Дубинин Г. Н. Диффузионное хромирование сплавов. М., «Машиностроение», 1964. 450 с.
10. Захаров М. В., Захаров А. М. Жаропрочные сплавы. М., «Металлургия», 1972. 384 с.
11. Квурт О. С., Гнзбург Ф. Н. Новые специальные припои на основе олова — «Сварочное производство», 1970, № 7, с. 45—46
12. Кестнер О. Е. Цинк и его сплавы. В кн.: Справочник металлста. В 5-ти т. Т. 3. Кн. 1. М., Машгиз, 1958, с. 362—369.
13. Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. Механические свойства титана и его сплавов. М., «Металлургия», 1974. 543 с.
14. Копецкий С. В. Структура и свойства тугоплавких металлов. М., «Металлургия», 1974. 205 с.
15. Корнилов И. И. Состояние и перспективы применения титана и его сплавов в народном хозяйстве — В кн.: Новый конструкционный материал — титан М., «Наука», 1972, с. 6—14.
16. Корнилов И. И. Титан. М., «Наука», 1975. 308 с.
17. Корнилов И. И. Никель и его сплавы. М., Изд-во АН СССР, 1958, с. 23—41.
18. Лакедемонский А. В., Хряпин В. Е. Справочник паяльщика Изд. 3-е, М., Машгиз, 1967. 327 с.
19. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Пайка металлов. Изд. 2. М., Машгиз, 1967. 367 с.
20. Ляхович Л. С., Ворошнин Л. Г., Щербаков Э. Д. и др. Силицирование металлов и сплавов. Минск, «Наука и техника», 1972. 280 с.
21. Магницкий О. Н. Литейные свойства титановых сплавов. Под ред. Б. Б. Гуляева Л., «Машиностроение», 1968. 72 с.
22. Мальцев М. В. Термическая обработка тугоплавких редких металлов и их сплавов. М., «Металлургия», 1974. 350 с.
23. Мальцев М. В., Байков А. И., Соловьев В. Я. Технология производства ниобия и его сплавов. М., «Металлургия», 1966. 390 с.
24. Минкевич А. Н. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Изд. 2-е, перераб. М., «Машиностроение», 1965. 490 с.
25. Подшипники из алюминиевых сплавов М., «Транспорт», 1974, 242 с. Авт.: Н. А. Буше, А. С. Гуляев, В. А. Двоскина, К. М. Раков
26. Прокошкин Д. А., Васильева Е. В. Сплавы ниобия. М., «Наука», 1964. 330 с.
27. Розенберг В. М., Николаев А. К. Об особенностях медных малолегированных тепло- и электропроводных сплавов. — «Цветные металлы», 1972, № 8, с. 65—70
28. Рохлин Л. Л. Акустические свойства легких сплавов. М., «Наука», 1974, с. 51—72, 119—126.
29. Рудницкий Н. М. Материалы автотракторных подшипников скольжения. М., «Машиностроение», 1965. 162 с.
30. Савицкий Е. М., Бурканов Г. С. Металловедение тугоплавких металлов и сплавов. «Наука», 1967. 322 с.

31. Самсонов Г. В., Элик А. П. Тугоплавкие покрытия. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Металлургия», 1973. 400 с.
32. Сверхлегкие конструкционные сплавы. М., «Наука», 1972, с. 5—8; 51—88; 136—140. Авт.: М. Е. Дриц, З. А. Сви́дeрская, Ф. М. Елкин, В. Ф. Трохова.
33. Смирятин А. П., Смирятин Н. А. и Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. М., «Металлургиздат», 1974, с. 92—280.
34. Сплавы молибдена. М., «Металлургия», 1975. 340 с., Авт.: Н. Н. Моргунова, Б. А. Клыпин, В. А. Бояршинов и др.
35. Тимонова М. А. Коррозия и защита магниевых сплавов. М., «Машиностроение», 1964, с. 45—260.
36. Чухров М. В. Модифицирование магниевых сплавов. М., «Металлургия», 1972, с. 5—15.
37. Шпагин А. И. Антифрикционные сплавы. М., Металлургиздат, 1956, 320 с.
38. Шпичинецкий Е. С. Цветные металлы и сплавы. Справочник машиностроителя. Т. 6. М., «Машиностроение» 1964, с. 338—365.
39. Шпичинецкий Е. С. Никель и его сплавы. — В кн: Справочник по машиностроительным материалам. Т. 2. М., «Машиностроение», 1959, с. 250—295.
40. Everhart J. L., Hiers G. O. Properties of Tin and Tin Alloys. — In Metals Handbook. Vol. 1. Cleveland, Ohio, 1961, ed. 8, pp. 1064, 1142—1144.
41. Horwick E. W. Properties and Selection of Metals. — In Metals Handbook. Vol. 1. Cleveland, Ohio, 1961, pp. 1157—1172.
42. Pratt G. C. Material for Plain Bearings Review 174 — «International Metallurgical Reviews». London—Ohio, 1973, vol. 10, pp. 62—87.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Волокнистые композиционные материалы — обширный класс материалов, представляющих собой объемное сочетание химически различных компонентов с четко выраженной границей раздела (упрочнителей и матриц), придающих материалам монолитность. К ним относятся, например, стеклопластики, теплозащитные композиции и другие материалы.

При создании таких материалов применяют непрерывные и дискретные поликристаллические волокна и нитевидные кристаллы бора, углерода и различных соединений (окислов, карбидов, боридов, нитридов и др.), а также металлические волокна (проволоки), отличающиеся высокими значениями прочности и модуля упругости.

Армирующие наполнители в виде моноволокон и жгутов, проволоки, сетки, нитей, лент, бумаг, холстов и других волокнистых материалов сочетают с металлическими и неметаллическими (полимерными, углеродными, керамическими и др.) матрицами.

Прочностные и деформативные характеристики волокнистых композиционных материалов при условии совместимости армирующих волокон с матрицей определяются в основном свойствами упрочняющих волокон, их размерами, ориентацией и содержанием в композиции.

Жесткие армирующие волокна воспринимают основные напряжения, возникающие в композиции при нагружении, придавая ей прочность и жесткость в направлении ориентации волокон. Податливая матрица, заполняющая межволоконное пространство, передает напряжения отдельным волокнам благодаря касательным напряжениям, действующим вдоль границы раздела волокно-матрица, и воспринимает напряжения, действующие в направлении, отличном от ориентации волокон.

В настоящее время для получения армированных материалов применяют в основном непрерывные стеклянные, углеродные, борные, органические волокна и проволоки. Керамические волокна (окислов, карбидов и нитридов) находятся в стадии опытных разработок (табл. 1).

Для стеклянных и органических волокон характерно повышенное удлинение при разрыве (2,5—5%) по сравнению с удлинением борных и углеродных волокон (0,4—1,5%). С ростом прочности последних этот показатель увеличивается.

У борных и керамических волокон высокая твердость и малая способность разупрочняться с повышением температуры. Максимальная рабочая температура органических волокон 300° С. Углеродные волокна в нейтральной и восстановительной среде выдерживают нагрев до

Тип волокна	Марка волокна	10 мм					эций *			
		σ_a , кгс/мм ²	V_{σ} , %	$E_a \cdot 10^{-3}$, кгс/мм ²	V_E	ϵ	σ_x	$E_x \cdot 10^{-3}$	σ_x/γ	$\frac{E_x}{\gamma} \cdot 10^{-3}$
					%		кгс/мм ²		км	
Стекланные	ВМ-1 ВМП М-11	390	—	10,5	—	4,4	205	7,0	98	3,35
		470	28	9,5	—	5,0	240	6,6	114	3,15
		470	—	11,0	—	4,9	220	7,4	98	3,9
Борные	БН (сорт 2) БН (сорт 1) Борофил (США)	280	26	40	8	0,7	150	23,0	75	11,5
		320	28	39	9	0,8	175	28,0	87	11,5
		280	13	39	6	0,7	160	23,0	80	11,5
Углеродные	ВМН-4 ВМН-5 Модмор-2 (Англия)	230	35	29	23	0,7	120	14,0	83	10,0
		270	28	31	18	0,9	160	14,5	110	10,0
		290	17	28	8	1,0	170	14,0	117	10,0
Органиче- ские	СВМ PRD-49 (США)	280	—	12	—	2,5	150	6,0	111	4,45
		280	—	13,3	—	2,0	140	8,2	100	5,95

* Содержание наполнителя 60% (объемных)

Примечание V_{σ} и V_E — соответственно коэффициенты вариации прочности и модуля упругости волокон

2200° С, сохраняя при этом свою прочность. На воздухе они начинают окисляться при температуре около 450° С. Повышение окислительной устойчивости борных и углеродных волокон обеспечивается нанесением на их поверхность кислородостойких защитных покрытий из тугоплавких соединений. Для углеродных волокон наибольшее распространение получили пиролитические покрытия, для борных волокон — покрытия карбида кремния и карбида бора.

Свойства матрицы определяют, как правило, уровень рабочих температур композиции, характер изменения ее свойств при воздействии температуры, атмосферных и других факторов, режимы получения и переработки материалов. В качестве матриц используют металлы и сплавы, полимеры, кислородные и бескислородные тугоплавкие соединения, кокс и пироуглерод.

В производстве стекло-, карбо-, боро- и органоволоконитов чаще всего применяют матрицы на основе эпоксидных и полиимидных связующих, а для металлических композиционных материалов с борными и углеродными волокнами и стальной, вольфрамовой и другой проволокой — алюминиевые, магниевые, титановые и другие матрицы.

Механические свойства матрицы являются определяющими для свойств композиций при сдвиге, сжатии и нагружении нормальными напряжениями в направлениях, отличных от ориентации волокон, а также в сопротивлении композиций усталостному разрушению. С ростом механических характеристик матриц пропорционально увеличиваются характеристики механических свойств композиций при сдвиге и сжатии. В волокнистых композиционных материалах усталостное разрушение начинается с матрицы при достижении в ней определенного напряжения. Гетерогенная структура материала, различие в уровнях напряженности волокон и матрицы, а также наличие поверхностей раздела затрудняют процесс зарождения и роста трещин в направлении, перпендикулярном к направлению армирования, и образование магистральной трещины, приводящей к разрушению. Поэтому у композиционных материалов более высокое сопротивление усталостному разрушению, чем у традиционных материалов. Так, например, отношение усталостной прочности (на базе 10^7 циклов) к пределу прочности у стандартных алюминиевых и магниевых сплавов составляет 0,2—0,3, а у боралюминиевой композиции ВКА-1—0,7—0,75, т. е. в 3—4 раза больше.

С увеличением предела прочности матрицы и модуля упругости волокна усталостная прочность композиционных материалов, упрочненных однотипными волокнами, возрастает. Точно так же с увеличением объемного содержания армирующих волокон до критической величины, несколько меньшей, чем при статическом нагружении в матрице, повышается сопротивление усталостному разрушению композиционного материала.

С повышением температуры прочностные и упругие свойства полимерных матриц и адгезия их к волокну постепенно снижаются вплоть до температуры стеклования, в результате чего понижается несущая способность композиционных материалов, особенно при сжатии и сдвиге, увеличиваются ползучесть и нелинейность диаграмм нагружения. Для изделий, длительно работающих при температуре выше 200° С, эпоксидные связующие заменяют более термостойкими, в основном полиимидными

Металлические композиционные материалы отличаются высокой эрмической стабильностью. Температурно-временная зависимость характеристик кратковременной и длительной прочности алюминиевых, магниевых, титановых и никелевых композиционных материалов при нагружении их вдоль оси волокон характеризуется малым темпом азупрочнения.

При 1100 и 1200° С длительная прочность композиционного материала, полученного методом направленной кристаллизации эвтектического сплава Ni_3Al-Ni_3Nb , отличается той же особенностью.

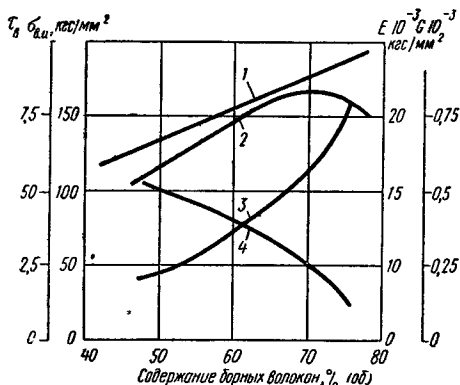


Рис. 1. Зависимости характеристик механических свойств эпоксисироволокнита КМБ-1 от содержания борного волокна:

1 — модуль упругости при растяжении, 2 — предел прочности при изгибе, 3 — модуль сдвига; 4 — предел прочности при сдвиге

Уровень рабочих температур дисперсноупрочненных никелевых сплавов достигает 1300° С, а композиций на основе карбидов, нитридов материалов с углеродной матрицей 1500—2200° С.

Соотношение между упрочняющим и связующим компонентами меняется в зависимости от природы и текстуры наполнителя, смачивающей способности и монолитности матрицы, а также от назначения гернала. Содержание наполнителя в композициях конструкционного назначения с ориентированными непрерывными волокнами составляет 60—80% (объемных), а с хаотическим расположением дискретных волокон и нитевидных кристаллов не превышает 20—30% (объемных), что связано с технологическими трудностями плотной упаковки жгучих наполнителей, характеризующихся широким диапазоном ины и диаметра монокристаллов полигональной формы. На рис. 1 показана зависимость характеристик механических свойств эпоксисироволокнита КМБ-1, упрочненного непрерывными ориентированными волокнами, от их содержания.

Волокнистая форма упрочнителей и существенное различие в прочных и деформативных характеристиках волокон и матриц обуславливает анизотропию физико-механических свойств композиций, которую

можно регулировать путем изменения взаимного расположения и содержания волокон. На рис. 2 приведены зависимости между напряжениями и деформациями при растяжении композиций с различной структурой армирования. Наиболее высокие прочность и жесткость достигаются в композициях с взаимно-параллельным расположением непрерывных волокон при нагружении их в направлении ориентации.

Эти показатели увеличиваются с повышением прочности и модуля упругости армирующих волокон.

Для высоконаполненных композиционных материалов, у которых $V_a > 0,2$ и $E_a \gg E_m$, $\sigma_a \gg \sigma_m$, что имеет место на практике, упругие характеристики в направлении главных осей симметрии — модули Юнга E_x и E_y , коэффициенты Пуассона ν_{yx} , ν_{xz} и модули сдвига G_{xy} , G_{xz} — вычисляются с точностью, удовлетворяющей инженерные расчеты, по уравнениям

$$E_x = E_a V_a; \quad (1)$$

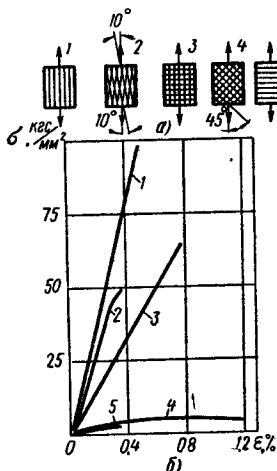
$$E_y = E_z = \frac{E_m}{(1 - V_a)}; \quad (2)$$

$$\nu_{yx} = \nu_{xz} = \nu_a V_a + \nu_m (1 - V_a); \quad (3)$$

$$G_{xy} = G_{xz} = \frac{G_m (1 + V_a)}{(1 - V_a)}, \quad (4)$$

Рис. 2. Схема армирования (а) и зависимости между напряжениями и деформациями при растяжении (б):

1 — 0° ; 2 — $\pm 10^\circ$; 3 — $0,90^\circ$;
4 — $\pm 45^\circ$; 5 — 90°



где E_a , E_m — соответственно модули упругости волокна и матрицы; ν_a , ν_m — соответственно коэффициенты Пуассона волокна и матрицы; V_a — объемное содержание волокна в композиции.

Точность расчетов при анализе и прогнозировании свойств однонаправленных материалов при растяжении по свойствам входящих в них компонентов значительно повышается при использовании в расчетах средней прочности волокна в композиции, определенной на базе эффективной длины волокна, так как при этом учитывается масштабная зависимость прочности волокон от их длины.

При этом выражение, описывающее прочностные свойства однонаправленных (трансверсально-изотропных) композиций при их нагружении вдоль волокон, имеет вид

$$\sigma_x = K_\sigma \bar{\sigma}_{aL_{\text{эф}}} V_a, \quad (5)$$

где $\bar{\sigma}_{aL_{\text{эф}}}$ — средняя прочность волокна, определяемая на базе эффективной длины волокна в композиции, равной $10l_{a\text{кр}}$; $K_\sigma = k_{\sigma L} k_{\sigma \sigma} k_{\sigma \nu} k_{\sigma \phi} k_{\sigma \pi} k_{\sigma m}$ — коэффициенты, учитывающие снижение степеней реализации средней прочности волокна в композиции вслед-

ствие их дискретности, дисперсии прочности и разориентации волокон, а также пористости и нарушения монолитности матрицы.

При соблюдении условий монолитности композиция матрица почти не влияет на коэффициенты реализации средних значений прочности и модуля упругости углеродных волокон, и $k_{\sigma_m} \approx 1$. Влияние матрицы обнаруживается при нарушении монолитности композиционных материалов вследствие уменьшения содержания в них связующего из-за увеличения степени наполнения или пористости, изменения свойств матрицы и прочности сцепления ее с волокнами при нагревании, в процессе термического или естественного старения, а также возрастания ее напряженности вследствие существенной разницы в коэффициентах линейного термического расширения компонентов.

Анизотропию свойств волокнистых композиционных материалов принято характеризовать отношениями показателей модуля упругости E_x/G_{xz} , E_x/E_y или прочности σ_x/τ_{xz} , σ_x/σ_y . Наиболее отчетливо анизотропия проявляется при сопоставлении упругих и прочностных свойств волокон в направлении армирования с сопротивлением межслойному сдвигу и растяжению—сжатию в направлении, перпендикулярном к плоскости укладки волокон, и под углом к направлению армирования. С ростом прочности и жесткости волокон увеличивается различие в прочностных и упругих характеристиках армирующих волокон и матриц, увеличивается степень анизотропии механических свойств, что проявляется в повышенной чувствительности их к разориентации, искривлению и крутке волокон. При использовании в качестве армирующего наполнителя углеродных, органических и других анизотропных волокон увеличивается разница свойств композиции в направлении главных осей армирования. Анизотропию механических свойств самих волокон, таких, как органические и углеродные, необходимо учитывать при анализе и прогнозировании свойств композиций в трансверсальном направлении.

Регулирование степени анизотропии и свойств материалов в плоскости армирования достигается перекрестным расположением армирующих слоев. При ортогональной схеме укладки слоев прочность (σ_x , σ_y) и модуль упругости (E_x , E_y) пропорциональны объемному содержанию волокон в направлении армирования.

Деформативные (модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига) свойства материалов с ортогональной укладкой при их нагружении под углом к основным осям упругой симметрии рассчитывают с использованием уравнений по известным значениям E_x , E_y , E_{45} и ν_{xy} :

$$E_{\varphi} = E_x (\cos^4 \varphi + m \sin^2 2\varphi + n \sin^4 \varphi)^{-1}; \quad (6)$$

$$G_{\varphi} = E_x [2\nu_{xy} + 4m - 4(2m - c) \sin^2 \varphi]^{-1}, \quad (7)$$

$$\text{где } n = \frac{E_x}{E_y}; \quad c = \frac{E_x}{E_{45}}; \quad m = c - \frac{n-1}{4}.$$

Прочность при растяжении или сжатии, сдвиге в плоскости армирования также рассчитывают по аналогичным формулам, позволяющим вычислить прочность для любого направления на основании экспериментальных или расчетных значений прочности в продольном, поперечном и диагональном (под углом 45°) направлениях.

В табл. 2 приведены прочностные свойства композиций алюминий—борное волокно, эпоксисборо- и карбоволоконитов с различной струк-

2. Характеристики механических свойств композиционных материалов с ортогональной и сложной укладкой волокон

Характеристика	Материал								
	ВКА-1 ($V_a = 48\%$)		КМБ-1 ($V_a = 47\%$)				КМУ-1 ($V_a = 57\%$)		
	1 : 0	1 : 1 (0°; 90°)	1 : 0	1 : 1 (0°; 90°)	1 : 2 (0°, 90°)	1 : 1 : 1 (120°; 120°; 120°)	1 : 1	1 : 1 (0°; 90°)	1 : 1 (±15°)
Модуль упругости при растяжении, кгс/мм ² :									
E_x	24 000	12 500	16 200	8 600	6 900	9 200	14 900	7 020	12 300
E_{45°	9 300	—	1 540	1 620	2 000	8 900	1 200	1 400	1 600
E_y	7 100	12 200	1 860	8 500	12 000	9 300	700	7 100	1 050
Модуль упругости при сдвиге, кгс/мм ² :									
G_{xz}	—	—	445	445	445	745	390	390	390
G_{xy}	—	—	—	—	—	3 300	—	3 120	740
Предел прочности при растяжении, кгс/мм ² :									
σ_x	115	52	95	43	32	38	100	46	76
σ_{45°	12	14	8	14	18	68	6	10	7
σ_y	8	54	6,5	45	72	38	1,5	45	4,3
Усталостная прочность на базе 10^7 циклов, кгс/мм ² .	60	22	35	18	12	15	40	20	22
Логарифмический декремент затухания колебаний, %	0,4	—	0,8	1,6	2,4	4,5	1,2	2,4	6

гурой армирования при нагружении их под различными углами к главным осям упругой симметрии.

Композиционным материалам с однонаправленным и перекрестным расположением волокон, когда необходимая толщина изделия создается послойной укладкой армирующих слоев, присущи низкая продольная и низкая трансверсальная прочность. Модуль упругости и предел прочности при межслойном сдвиге и поперечном растяжении — жатии в таких композициях более чем на порядок отличаются от модуля Юнга и прочности в направлении армирования. В ряде случаев эта особенность может препятствовать реализации высоких прочности и жесткости композиций в конструкциях. Повышение прочности сцепления матриц с волокнами путем их поверхностной обработки способствует увеличению прочности материала при сдвиге и сжатии, но не является эффективным средством повышения упругих характеристик при этих видах нагружения. Существенное возрастание жесткости и прочности при межслойном сдвиге, а также сопротивления материала поперечному отрыву достигается созданием в нем поперечных связей. Материалы с пространственно сшитой арматурой (многослойные ткани) используют при создании стеклопластиков и органоволокнитов. Основным недостатком их — значительное искривление волокон основы, что приводит к резкому снижению характеристик механических свойств композиций в этом направлении. Для высокомодульных углеродных и арамидных волокон наиболее приемлема схема трехмерного армирования изотропных текстильных материалов ИТМ, при которой волокна сохраняют прямолинейность. В этом случае в разных направлениях могут быть уложены различные волокна, благодаря чему образуется многокомпонентный материал.

Введение нитевидных кристаллов в межволоконное пространство — вискеризацию — производят осаждением нитевидных кристаллов на поверхность различных армирующих наполнителей или выращиванием их на углеродных волокнах в процессе химических реакций из газовой фазы. Вискеризация позволяет повысить сдвиговые характеристики олимерных композиций без ухудшения их свойств в направлении армирования. При увеличении объемного содержания нитевидных кристаллов на волокне до 4—8% возрастают в 1,5—2 раза сдвиговая прочность материала и на 40—50% модуль упругости при сдвиге и прочность при сжатии.

В некоторых случаях сочетанием разнородных наполнителей удается получить материалы с нужным комплексом свойств. На рис. 3 приведены графики зависимости модуля упругости, предела прочности, ударной вязкости и усталостной прочности углестеклопластиков от содержания углеродных волокон. Модуль упругости, коэффициент Пуассона, усталостная прочность и ударная вязкость однонаправленных трехкомпонентных композиционных материалов монотонно изменяются с изменением соотношения разномодульных волокон в интервале значений, присущих двухкомпонентным композициям. Прочность при растяжении проходит через минимум, соответствующий критическому содержанию низкомодульных волокон, которое увеличивается уменьшением разности между отношением прочности низкомодульных высокомодульных волокон и отношением их модулей упругости.

Сочетание разномодульных волокон позволяет регулировать свойства композиционных материалов: повышать модуль упругости и ударную прочность стеклопластиков, ударную вязкость, прочность

при сжатии и смятии углепластиков, особенно в местах заделок и приложения сосредоточенных нагрузок. При этом наибольший эффект достигается при укладке высокомодульных волокон под углом к направлению ориентации стекловолокон, что дает возможность оптимизировать свойства композиций в плоскости армирования по их жесткости E_x , E_y , G_{xy} и ударной вязкости.

Создание слоистых материалов, когда слои волокнистого материала чередуются со слоями фольги из другого или того же материала, что и волокна в слое композиционного материала, позволяет, изменяя

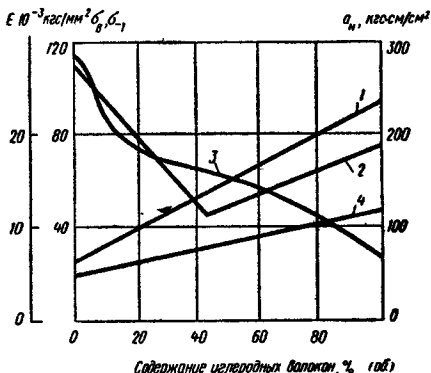


Рис. 3. Зависимость модуля упругости (1) и предела прочности при растяжении (2), ударной вязкости (3) и усталостной прочности (4) карбостекловолокнистых композиций от соотношения углеродных и стеклянных волокон [объемное содержание наполнителя в композиции 62% (об.)]

содержание фольги, регулировать их свойства и степень анизотропии свойств материала, повышать его характеристики в направлениях, отличных от направления укладки волокон, особенно модуль сдвига в плоскости армирования.

Полимерные карбоволокниты характеризуются низкой плотностью, высоким модулем упругости, низким коэффициентом термического расширения, стабильностью коэффициента трения и малым износом при трении, тепло- и электропроводностью.

При получении промышленных карбоволокнитов используют высокомодульные волокна в виде крученых жгутов, состоящих из различного числа элементарных волокон диаметром 5—10 мкм и тканой ленты кордной текстуры с редким утком. Наполнитель в виде тканой ленты более технологичен при переработке, однако наличие слабых уточных нитей уменьшает степень наполнения карбоволокнитов до 45—50% (об.) по сравнению с 55—62% (об.), характерными для материалов на основе жгутов, и, как следствие этого, некоторые прочностные и упругие характеристики карбоволокнитов уменьшаются. В табл. 3 приведены основные характеристики 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, обеспечивает повышение прочности карбоволокнитов при растяжении и изгибе.

Карбоволокниты КМУ-3 и КМУ-3л на основе эпоксианилиноформальдегидного связующего предназначены для изделий, эксплуатирующихся при температурах до 100° С. До температуры 80° С карбоволок-

нити сохраняют свои прочностные и упругие свойства неизменными, соответствующими свойствам материалов КМУ-1у и КМУ-1л

Карбоволокониты на эпоксиэфенольном связующем используют в изделиях, работающих длительно при температурах до 200° С. Для изделий, длительно работающих до 300° С, применяют карбоволокониты 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 карбоволоконитов можно изготавливать 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 препрега 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 карбоволокониты КМУ-3, температура и давление формования которых минимальны.

Особенность карбоволоконитов — их высокая усталостная прочность, большая, чем у боро- и стекловолоконитов, и имеющая тот же порядок, что и прочность титана и легированных сталей. Отличаясь высокой демпфирующей способностью, карбоволокониты существенно превосходят металлы по вибропрочности. Ориентируя волокна под углом друг к другу, можно в больших пределах изменять демпфирующую способность карбоволоконитов и предотвращать резонансный режим деталей, не изменяя их геометрии.

К недостаткам слоистых карбоволоконитов относится их низкая прочность при сжатии и межслойном сдвиге, увеличение которых в 1,5—3 раза достигается различными методами поверхностной обработки углеродных волокон: окислением на воздухе, травлением в азотной кислоте, выращиванием нитевидных кристаллов.

Теплофизические характеристики карбоволоконитов 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 карбоволоконита от температуры, определяемая термическими свойствами карбоволокон, коэффициент линейного расширения которых в интервале температур 20—300° С отрицателен. Коэффициент термического расширения однонаправленного карбоволоконита КМУ-1 в интервале температур 20—120° С близок к нулю, в интервале 120—200° С равен $0,5 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, а для ортогонально армированного материала (укладка 1 : 1) в тех же интервалах температур составляет соответственно $0,6 \cdot 10^{-6}$ и $1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

Полимерные карбоволокониты 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 боростеклониты, состоящие из 7 или 49 параллельных бороволокон, оплетенных 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 175, 160 и 120 кгс/мм² соответственно. При этом предел прочности при сжатии остается постоянным на уровне 120 кгс/мм².

Использование комплексных боростеклонитов 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. 3). В зависимости от температуры эксплуатации изделий указанные наполнители сочетают с модифицированными эпоксидными и полиимидными связующими. Бороволокниты КМБ-1 и КМБ-1к на эпихлоризотианатном 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, низким давлением формования при переработке, вплоть до вакуумного, но уровень рабочих температур этих материалов не превышает 100° С.

Своеобразие геометрических, механических и физико-химических характеристик борного волокна предопределяет ряд специфических особенностей 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, в первую очередь модуля упругости, в композиционном материале и повышает его сопротивление 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 высокая усталостная прочность бороволокнитов, составляющая для материалов КМБ-1м и КМБ-2 35—40 кгс/мм², может быть увеличена при использовании более высокопрочной матрицы.

Наряду с отмеченными особенностями механические свойства бороволокнитов подчиняются общим для армированных систем закономер-

... исследования физико-механических свойств однонаправленных эпоксикарбоволоконитов, эпоксикарбоволоконитов и карбоволоконитов с углеродной матрицей

Характеристика	Карбоволокониты				Бороволокониты				Карбоволоконит с углеродной матрицей КУП-ВМ
	КМВ-1н	КМВ-1у	КМВ-1в	КМВ-1м	КМВ-1к	КМВ-2к	КМВ-3к		
Плотность, г/см³	1,4	1,47	1,55	2,1	2,0	2,0	2,0	1,35	
Предел прочности, кгс/мм², при:									
растяжения	65	102	100	130	90	100	130	20	
сжатия	35	40	54	116	92	125	150	26	
изгибе	80	110	120	175	125	155	145	64	
сдвиге	2,5	3	4,5	6	4,8	6	7,5	4,2	
Модуль упругости, кгс/мм², при:									
растяжения	12 000	18 000	18 000	27 000	21 400	26 000	26 000	16 500	
изгибе	10 000	14 500	16 000	25 000	22 300	21 500	23 800	16 000	
сдвиге	280	350	535	980	700	680	720	—	
Длительная прочность при изгибе за 1000 ч, кгс/мм²	48	88	90	137	122	120	130	—	
Усталостная прочность на базе 10⁷ циклов, кгс/мм²	30	50	35	40	35	40	42	24	
Относительное удлинение при разрыве, %	0,5	0,6	0,6	0,3—0,5	0,3	0,3—0,4	0,3—0,4	—	
Коэффициент Пуассона	0,22	0,27	0,22	0,22	0,22	0,18	0,2	—	
Ударная вязкость, кгс·см/см²	50	44	84	90	78	110	110	12	

ностям. 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 углеродным волокном присущей ему высокой прочности вплоть 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 и вакууме сохраняет неизменной прочность вплоть 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 чугуна вместо углеродного материала позволяет снизить массу тормозных дисков на 40—50% и увеличить ресурс эксплуатации в 1,5—2 раза.

Композиционный материал на алюминиевой основе ВКА-1 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 на магниевой основе, армированный борными волокнами, состоит из чередующихся слоев магниевой фольги и борных волокон 30—50 об. % (табл. 4).

К числу наиболее известных способов изготовления композиционных материалов системы алюминий — борное волокно, алюминий — углеродное волокно, а также магний — борное волокно относятся диффузионное соединение пакетов горячим прессованием и пропитка армирующих материалов жидкометаллической матрицей.

Метод диффузионного соединения пакетов является основным при изготовлении полуфабрикатов и деталей из легких композиционных материалов.

Методом пропитки композиционные материалы получают различными способами, например протяжкой волокон через расплав матрич-

4. Характеристики свойств однонаправленных композиционных материалов с металлической матрицей

Характеристика	Алюминий — стальная проволока		Алюминий — борное волокно	Магний — борное волокно
	Содержание волокна, % (объем.)			
	25	40	50	45
Плотность, г/см ³	4,1	4,8	2,65	2,2
Предел прочности при растяжении, кгс/мм ² , при 20° С	120	160	115	125
400° С	75	80	85	90
Модуль упругости, кгс/мм ²	10 500	12 000	24 000	20 000
Длительная прочность за 100 ч при 400° С, кгс/мм ²	40	45	65	60
Усталостная прочность, на базе 10 ⁷ циклов, кгс/мм ²	30	35	60	55
Коэффициент линейного термического расширения α 10 ⁻⁶ , 1/°С	—	11,8	6,0	6,5

ного материала, вакуумным всасыванием, пропиткой в автоклаве, непрерывным литем с пропиткой и т. д.

Максимальные значения прочности присущи однонаправленным композициям при их нагружении в направлении армирования. При растяжении композиции поперек волокон прочность близка к прочности матрицы и составляет 10—15 кгс/мм².

Повышение трансверсальной прочности достигается в полиматричных системах, например трехкомпонентной композиции, такой, как алюминий—титан—борное волокно. В этом случае при незначительном повышении плотности (на 10—15%) удастся повысить трансверсальную прочность в 2 раза.

Одновременно с повышением трансверсальной прочности наличие титановой фольги на внешней поверхности композиционного материала увеличивает эрозионную стойкость и улучшает условия для создания надежных соединений.

Композиционный материал на алюминиевой основе, армированный стальной проволокой, отличается от других композиционных материалов доступностью и низкой стоимостью армирующего наполнителя, а также лучшими тепло- и электропроводностью.

В качестве матрицы в этом материале используют фольгу из алюминия и алюминиевых сплавов, армирующим элементом служат проволока из аустенитной стали ЭП322 или аустенитно-мартенситной стали ВНС9 диаметром 0,15—0,30 мм с пределом прочности 350—400 кгс/мм². Объемное содержание проволоки в композиции составляет 25—40%.

Свойства композиционного материала алюминий—стальная проволока приведены в табл. 4.

Композиции на основе алюминия и магния, упрочненные углеродными волокнами, обладают более высокими удельными характеристи-

ками $\left(\frac{\sigma_{\text{в}}}{\gamma}, \frac{E}{\gamma}\right)$, поскольку при равной прочности с борными волокнами плотность углеродных волокон на 30% меньше.

Известны два способа изготовления композиционных материалов на основе легких сплавов, армированных углеродными волокнами: свободная пропитка пакетов с углеродными волокнами, предварительно покрытых барьерным слоем, и принудительная пропитка в автоклаве под давлением жидким расплавом.

Прочность композиционных материалов на основе алюминия и магния с углеродными волокнами при содержании последних 30—40% (объемных) составляет при комнатной температуре 70—80 кгс/мм², а при 400° С 60—70 кгс/мм². Их модуль упругости 13 000—15 000 кгс/мм² при плотности 2,3 г/см³ для алюминиевой композиции и 1,8 г/см³ для магниевой композиционного материала.

Указанные композиционные материалы отличаются от обычных промышленных сплавов высокой температурной стабильностью. Их прочность, жаропрочность и модуль упругости мало изменяются с повышением температуры испытания до 450° С.

Композиционные материалы на никелевой основе, упрочненные непрерывными волокнами — проволокой из тугоплавких металлов или сплавов, изготавливают тремя основными методами: вакуумной пропиткой каркаса волокон жидкометаллической матрицей; деформацией пакета чередующихся слоев матричного материала и волокон упрочнителей; методом порошковой металлургии, при котором армирующие волокна заливают суспензией порошкового материала способом шликерного литья с последующим спеканием заготовок или деталей.

Примером такого материала является никельвольфрамовая композиция ВКН-1 — композиция на основе жаропрочного сплава ЖС6К, содержащего 50% (об.) вольфрамовых волокон. Этот материал получают методом вакуумной пропитки каркаса волокон, помещенных в эвакуированные стальные ампулы, расплавом ЖС6К. Свойства материала приведены в табл. 5.

5. Изменение характеристик свойств никелевого композиционного материала, армированного вольфрамовой проволокой (50% объем.) при нагревании

Характеристика	Температура испытания, °С		
	20	1100	1200
Предел прочности при растяжении, кгс/мм ²	70	53	38
Предел текучести, кгс/мм ²	63	50	36
Относительное удлинение при разрыве, %	1,0—2,5	—	—
Длительная прочность за 100 ч, кгс/мм ²	—	15	8

Длительная прочность такого композиционного материала с обычной вольфрамовой проволокой марки ВА составляет при 1100° С 15 кгс/мм² за 100 ч испытания. При замене вольфрамовой проволоки ВА волокном ВТ15 (торированный вольфрам) или проволокой из сплава

вольфрам—гафний—углерод можно увеличить длительную прочность композиции.

Сплавы с направленной кристаллизацией эвтектических структур относят к композиционным, поскольку в процессе их получения образуется типичная для композиционных материалов регулярная ориентированная волокнистая или слоистая структура. Упрочняющая фаза в этих системах имеет форму нитевидных кристаллов, равномерно распределенных в матрице, и прочно связана с ней. Свойства нитевидных кристаллов, извлеченных из эвтектического сплава, примерно такие же, как и свойства нитевидных кристаллов, полученных из газовой фазы.

Изготовление деталей методом направленной кристаллизации производят путем расплавления шихты эвтектического сплава и последующего его охлаждения в форме с постоянной заданной скоростью.

Примерами таких композиций являются Nb—Nb₂C, Ta—Ta₂C, Ni—NiMo, Ni₃Al—Ni₃Nb. Наилучшие сочетания механических свойств были получены на псевдобинарных системах Co—Ta—C и Ni—Al—Nb, а также на моновариантной эвтектике Co—Cr—C. Жаропрочность этой композиции при 1100°С превосходит в 2 раза жаропрочность лучших стареющих никелевых сплавов.

Характеристики механических свойств
эвтектического сплава системы Ni₃Al—Ni₃Nb

Предел прочности при растяжении, кгс/мм ² , при:	
20°С	100
1100°С	50
Относительное удлинение при разрыве, %	0,6
Длительная прочность за 100 ч при 1100°С, кгс/мм ²	15
Усталостная прочность на базе 10 ⁷ циклов при 870°С, кгс/мм ²	40
Ударная вязкость, кгс·см/см ²	1,8

Недостатки этих материалов — малая пластичность (удлинение 0,6%) и плохая устойчивость к высокотемпературному окислению.

ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ

Основные сведения

Пластические массы получают на основе высокомолекулярных соединений — полимеров.

В зависимости от типа связи между макромолекулами различают линейную, разветвленную и сшитую структуры полимерных материалов. Материалы с линейной и разветвленной структурами относятся к термопластичным (термопластам), со сшитой структурой — к термореактивным (реактопластам). Термопласты при нагревании расплавляются, при охлаждении возвращаются в исходное состояние. Реактопласты, отличаясь более высокими рабочими температурами, при нагревании разрушаются и при охлаждении не восстанавливают своих свойств.

Различают полимеры нейтральные и полярные. У нейтральных полимеров молекула мономера имеет симметричное, у полярных — асимметричное строение. Полярные полимеры обладают большим дипольным моментом, они способны притягивать другие молекулы и

прежде всего молекулы воды. Полярные полимеры имеют большое водопоглощение (капрон, винипласт).

Термопласты при нормальной температуре могут находиться в одном из трех физических состояний: стеклообразном, высокоэластическом, вязкотекучем. Все три состояния можно наблюдать на образце из аморфного термопласта после его сжатия и нагревания (рис. 4).

Для реактопластов высокоэластическое состояние нехарактерно, вязкотекучее невозможно, они находятся обычно в стеклообразном состоянии.

Для придания полимерам необходимых свойств в них вводят наполнители (стеклоткань, хлопчатобумажная ткань — для повышения прочности; древесная мука — для снижения усадки и удешевления материала и др.), стабилизаторы (сажа для повышения стойкости

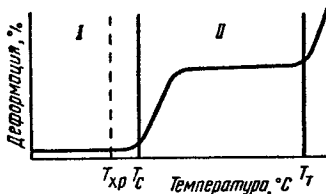


Рис. 4. Термомеханическая кривая:

I — стеклообразное состояние. II — высокоэластическое состояние; III — вязкотекучее состояние

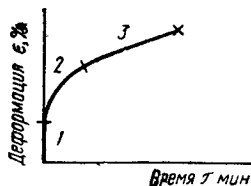


Рис. 5. Кривая ползучести термопластов:

1 — участок упругой деформации, 2 — участок высокоэластической деформации, 3 — участок пластической деформации

полиэтилена против старения и др), пигменты (для окраски материала в нужный цвет), пластификаторы (дибутилфталат для повышения пластичности поливинилхлорида и др.), модификаторы (графит для повышения антифрикционных свойств капрона и др.).

Протекание релаксационных процессов в пластмассах специфично. Это связано с тем, что скорость приложения или снятия нагрузки опережает скорость перестройки длинных, гибких макромолекул полимера, стремящихся перейти в новое состояние равновесия.

Необходимо учитывать разновидность протекания релаксационного процесса — ползучесть пластмасс или развитие деформации во времени под влиянием нагрузки $\epsilon = f(t)$. На рис. 5 показана кривая ползучести для термопласта. Ползучесть у пластмасс проявляется уже при комнатных температурах. Полная деформация образца может быть записана в виде

$$\epsilon = \epsilon_{уп} + \epsilon_{в.э} + \epsilon_{пл},$$

где ϵ — полная деформация образца; $\epsilon_{уп}$ — упругая составляющая деформации; $\epsilon_{в.э}$ — высокоэластическая составляющая деформации; $\epsilon_{пл}$ — пластическая составляющая деформации

Прочность пластмасс зависит от температуры испытания (рис. 6) и от скорости приложения нагрузки (рис. 7). Под влиянием внешних факторов (механические напряжения, свет, тепло, кислород воздуха

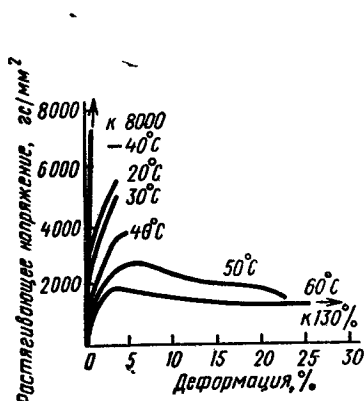


Рис. 6. Диаграммы растяжения полиметилметакрилата при различной температуре

и т. д.) в пластмассах происходят сложные физические и химические процессы, называемые старением. Как правило, в результате старения свойства пластмасс ухудшаются.

Таким образом, результаты, полученные при кратковременных статических испытаниях полимерных материалов, не могут надежно характеризовать поведение деталей под нагрузкой, ибо необходимо учитывать температуру, скорость деформации и влияние среды.

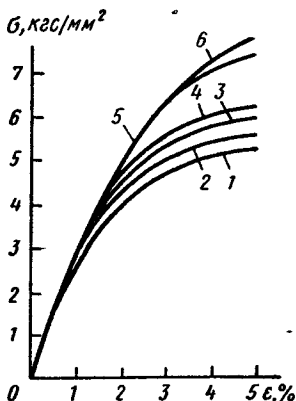


Рис. 7. Диаграммы растяжения поливинилхлорида при различной скорости нагружения $\dot{\sigma}$:

- 1 — $\dot{\sigma} = 2,92 \cdot 10^{-3}$ кгс/(мм²·с),
- 2 — $\dot{\sigma} = 9 \cdot 10^{-3}$ кгс/(мм²·с),
- 3 — $\dot{\sigma} = 4,58 \cdot 10^{-2}$ кгс/(мм²·с);
- 4 — $\dot{\sigma} = 1,07 \cdot 10^{-2}$ кгс/(мм²·с),
- 5 — $\dot{\sigma} = 7$ кгс/мм²·с, 6 — $\dot{\sigma} = 8$ кгс/(мм²·с),

Методы испытаний

Механические, физические и тепловые свойства пластических масс определяют в соответствии с ГОСТами.

Механические свойства определяют методами:

- 1) испытания на растяжение (определение разрушающего напряжения, предела текучести, относительного удлинения) (ГОСТ 11262—68);
- 2) испытания на статический изгиб (ГОСТ 4648—71);
- 3) испытания на сжатие (ГОСТ 4651—68);
- 4) определения модуля упругости для пластмасс, модуль упругости которых не ниже 3000 кгс/см² (ГОСТ 9550—71);
- 5) испытания на ударный изгиб (ударную вязкость) (ГОСТ 4647—69*);
- 6) испытания на изгиб на приборе Динстат (ГОСТ 17036—71);
- 7) определения ударной вязкости на приборе Динстат;

8) определения сопротивления раскалыванию (ГОСТ 13537—68);
9) определения твердости путем вдавливания шарика под заданной нагрузкой (ГОСТ 4670—67);

10) испытания на абразивный износ (ГОСТ 11012—69);

11) определения коэффициента трения (ГОСТ 11629—75).

В ГОСТ 14359—69 приведены общие требования по методам механических испытаний.

Физические и тепловые свойства определяют методами:

1) гидростатического взвешивания для определения плотности (ГОСТ 15139—69);

2) определения водопоглощения в холодной и кипящей воде (ГОСТ 4650—73);

3) определения теплостойкости по Мартенсу (ГОСТ 15089—69);

4) определения температуры размягчения по Вика при испытании в воздушной среде (ГОСТ 15065—69);

5) определения температуры размягчения термопластов по Вика при испытании в жидкой среде (ГОСТ 15088—69);

6) определения показателей теплостойкости при изгибе (ГОСТ 12021—75);

7) определения температуры хрупкости при изгибе (ГОСТ 16782—71);

8) испытания на старение под воздействием естественных климатических факторов (ГОСТ 17170—71);

9) испытания на старение под воздействием искусственных климатических факторов (ГОСТ 17170—71);

10) определения горючести (ГОСТ 17088—71);

11) определения среднего коэффициента линейного теплового расширения (ГОСТ 15173—70);

12) испытания на химическую стойкость (ГОСТ 12020—72);

13) определения стойкости полиэтилена к растрескиванию под напряжением (ГОСТ 13518—68);

14) определения стойкости к действию накала (жаростойкости) (ГОСТ 10456—69);

Изготовление образцов из термопластов регламентировано ГОСТ 12019—66, из реактопластов — ГОСТ 12015—66.

Общие свойства

Плотность пластмасс в среднем в 5—8 раз меньше, чем у стали, меди, и в 2 раза ниже, чем у алюминия. Плотность зависит от природы материала, вида и процентного содержания наполнителя и других факторов.

Механическая прочность пластмасс зависит от вида наполнителя. У термопластов без наполнителя и реактопластов с порошковым наполнителем небольшая прочность. У стеклопластиков — композиционных материалов на основе смол и стеклянного наполнителя в виде элементарных волокон, жгутов разрушающее напряжение при растяжении выше, чем у малоуглеродистых сталей, а удельная прочность (отношение разрушающего напряжения к плотности) их выше, чем у высокопрочных конструкционных сталей типа 30ХГСА. Слоистые и волокнистые пластмассы хорошо сопротивляются действию ударных и динамических нагрузок. Механическая прочность пластмасс зависит от температуры среды и времени приложения нагрузки.

Антифрикционные и фрикционные свойства. У одних пластмасс — горючести, полиамидов, текстолитов, древесно-слоистых пластмасс — низкий коэффициент трения и высокая износостойкость. У других — асбобластиков, фенольных пресскомпозиций с асболоволокнистым наполнителем — высокий коэффициент трения.

Диэлектрические показатели. Все пластмассы — диэлектрики (за исключением материалов со специальным наполнителем). Наилучшие диэлектрики — фторопласты, полиэтилены, полистирол.

Антикоррозионные свойства и химическая стойкость. Пластмассы подвержены коррозии. Большинство пластмасс стойки к агрессивным средам (фторопласты, полиэтилен, полипропилен, винилпласты, стеклопластики на основе эпоксидных, полиэфирных и фенолоформальдегидных смол и др.).

Демпфирующие свойства. Стеклопластики, стеклотекстолиты, гетинксы отличаются способностью к поглощению энергии вибрации. Это дает возможность создавать надежные конструкции.

Радиопрозрачность и немагнитность — специфические свойства асбобластмасс. Благодаря этим свойствам можно решать ряд сложных технических задач простым способом.

Теплопроводность и температуропроводность. Эти показатели для асбобластмасс значительно ниже, чем у металлов. С одной стороны, это позволяет создавать на их основе хорошие теплоизоляционные материалы для кратковременной тепловой защиты при высоких температурах, с другой — приводит к появлению внутренних напряжений при переработке и к нежелательной концентрации тепла, например в подшипниках скольжения.

Теплоемкость у пластмасс выше, чем у металлов.

Коэффициент линейного термического расширения во много раз выше, чем у металлов.

Оптические свойства. Некоторые пластмассы (оргстекло, стеклопластики на основе ненасыщенных полиэфирных смол, производные целлюлозы и др.) отличаются высокой прозрачностью и бесцветностью.

Классификация пластмасс по механическим свойствам

С некоторой долей условности конструкционные пластические массы можно разбить на три группы:

низкой прочности, у которых разрушающее напряжение при растяжении (σ_p) не превышает 500—600 кгс/см²;

средней прочности $\sigma_p = 600 \div 1000$ кгс/см²;

высокой прочности $\sigma_p > 1000$ кгс/см².

К пластическим массам **низкой прочности** можно отнести полиэтилен высокого и низкого давления, полипропилен, поливинилхлорид, полисилол, фторопласт, полиметилметакрилат, этрол, фенольные пресс-пошки, волокнит, фаолит, антегмит, полиарилат, аминопласты и другие; к пластическим массам **средней прочности** — капрон, полиамиды 6; АК7 и П-12, капролон В, полиформальдегид, сополимер СФД, изкарбонат, стекловолокниты АГ-4В и ДСВ, пресс-порошок РСТ, микс ПСК-1, асбобластолит, текстолит, гетинакс, ДСП и другие; к пластическим массам **высокой прочности** — стеклонаполненные полимеры КПС-30 и П68С-30, стеклотекстолиты КАСТ-0,5, стекловолокнистый анизотропный материал СВМ; стекловолокнит АГ-4С, намотанные стеклопластики, стеклопластики контактного формования и др.

Качественная оценка, методы переработки и области применения основных конструкционных пластмасс (табл. 6)

6. Основные конструкционные пластмассы

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг. руб
Термопласты					
Полиэтилен вы- сокого давления ПЭВД (низкой плотности): 15303-003 15602-008 15902-020 16802-070 * ¹ 17602-006 17702-010 17802-015 18002-030 18102-035 * ¹ 18202-055 18302-120 * ¹	ГОСТ 16337—70 *	Нейтральный ма- териал кристалли- ческой структуры с низким водопоглоще- нием, стабилен во влажной среде, не- высокие показатели прочности, значи- тельное удлинение при растяжении, эла- стичный материал, стойкий к растрески- ванию, хорошие ди- электрические пока- затели. Химически стойк к агрессивным средам и органиче- ским растворителям за исключением бен- зина, бензола, хлоро- форма и четырех- хлористого углеро- да, нетоксичен	Литье под давле- нием Центробежное литье. Экструзия. Раздувка. Пневма- тическое, вакуумное формование Штамп- овка. Механиче- ская обработка реза- нием, сверлением, фрезерованием и т. д. Сварка при рас- плавлении горячим воздухом Прессова- ние Вихревое и другие виды напыле- ния	Для несиловых де- талей машиностро- ения типа пробок, за- глушек, прокладок, пленочных изделий, труб, емкостей типа канистр, электронизо- ляционных материа- лов, защитных ан- тикоррозионных и и декоративных по- крытий	0,42— 0,47 0,36— 0,38 0,43— 0,45
Полиэтилен низ- кого давления ПЭНД (высокой плотности): 20106-001	ГОСТ 16338—70 *	Нейтральный ма- териал кристаллич- еской структуры, большее содержание	То же	Для несиловых деталей машино- строения, корпус- ных деталей прибо-	

20706-010
20806-024
20906-040
21006-075 *1

Полипропилен
термостабилизиро-
ванный 02П, 03П

ТУ
6-05-1105—73

ческие свойства. Хи-
мически стоек, более
стойк к бензину, бен-
золу, хлороформу,
чем ПЭВД

Более жесткий ма-
териал, чем полиэти-
лен. Благодаря пра-
вильному располо-
жению атомных
группировок отно-
сительно основной
цепи (изотактическая
структура) отличает-
ся повышенной проч-
ностью по сравнению
с ПЭНД, его тепло-
стойкость также вы-
ше, но морозостой-
кость (температура
хрупкости) ниже при-
мерно в 5 раз, чем у
полиэтилена. Хими-
чески стоек концен-
трированная серная
кислота (58%) и
30% ная перекись во-
дорода при комнат-
ной температуре не
оказывают заметного
влияния. Подвер-
жен более интенсив-
ному старению, чем
ПЭНД

То же, что для
ПЭВД и ПЭНД, кро-
ме сварки, которая
осуществляется в
струе инертного га-
за

установок и насосов,
гальванических моеч-
ных ванн

0,68—
0,815

Трубы, фитинги,
детали текстильного
машиностроения (бо-
бины, шпули и т. д.)
Детали вентилято-
ров, стиральных ма-
шин, электроприбо-
ров Пленки Во-
локна

0,85

Пластические массы

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб.
Поливинилхло- рид суспензион- ный ** ПВХ-С-55, ПВХ-С-47	ГОСТ 14332—69 *	Аморфный мате- риал, подвержен тер- модеструкции при $T > 140^{\circ}\text{C}$. Для по- вышения стойкости против старения в него вводят стабили- заторы. Винипласт обладает высокой хи- мической стойко- стью	Для винипласта: экструзия, ударное прессование, склеи- вание, сварка с при- менением горячего воздуха Механиче- ская обработка Для пластиката ПВХ — экструзия, калан- дрование	Винипласт — для футеровки металли- ческой аппаратуры, изготовления вентил- ляторов, воздухово- дов, химических ап- паратов, труб, фитин- гов. Пластикат ПВХ — для пленки, линолеума, изоля- ции проводов и ка- белей, гибких тру- бок. Гидропласт — для заполнения по- лостей приспособле- ний в металлорежу- щих станках На ос- нове ПВХ изготавли- ваются пено- и поро- пласты	0,48—0,5
Полистирол блочный и эмульсионный суспензионный	ГОСТ 9440—60 *, ТУ П-3—70	Более жесткий ма- териал, чем ПЭВД, ПЭНД, с хорошими диэлектрическими свойствами, недоста- ток — хрупкость и низкая теплостой- кость. Химически стойк. Для повыше- ния ударной вяз- кости и теплостой- кости используют со- полимеризацию сти- рола с другими мо- номерами или совме- щение его с каучука-	Литье под давле- нием Пневматиче- ское и вакуумное формование Экструзия Штамповка. Прессование Скле- йка Механическая обработка	Для корпусных деталей приборов, ра- диоэлектронной ап- паратуры, различ- ных изоляторов, в том числе и устано- вок токов высокой частоты, крупнога- баритных деталей холодильников, де- талей внутренней от- делки самолетов, ва- гонов. Пенополисти- рол — для тепло- и звукоизоляции и промышленности и	0,52— 0,59

Полистирол ударопрочный УПМ-503, УПМ-508Э, УПМ-508Л, УПМ-612Л, УПС-1105 УПМ-3Л, УПС-804, УПС-505, УПК-303 Сополимеры стирола СНП-1, СНП-2	ТУ 6-05-1604—72	звукоизоляционными свойствами, плавучестью, химической стойкостью и водостойкостью Более высокая ударная вязкость, чем у полистирола	То же	Для технических изделий, деталей холодильников и др	0,85
	ГОСТ 13077—67 *	Более высокая механическая прочность и эластичность, чем у полистирола. Стойкие против термоокислительной деградации	»	Для различных технических деталей	1,35
Литьевая масса на основе полистирола ПKN-D5	ТУ 6-05-1522—72	Высокие механическая прочность и электроизоляционные свойства	Литье под давлением	Для деталей высокочастотного оборудования	—
Сополимеры стирола с метилметакрилатом МС	ГОСТ 12271—66 *	Высокие свето- и влагостойкость. Стойкие к атмосферному старению, сравнительно низкая теплоустойчивость	Литье под давлением. Прямое прессование	Для прозрачных и окрашенных технических деталей	1,35
Модифицированный полистирольный пластик АБС-1	ТУ 6-05-1578—72	Высокая ударная вязкость при низких и высоких температурах, повышенная нагревостойкость, стойкость к щелочам, смазочным маслам	Литье под давлением Экструзия. Раздувка	Для крупногабаритных изделий в автомобилестроении и в электротехнике	—

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфические особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб
Фторопласт-4	ГОСТ 10007—72	Нейтральный материал кристаллической структуры В зависимости от скорости охлаждения можно получать материал с различной кристалличностью Совершенно не поглощает воду, стоек во влажной среде. Химически стоек ко всем кислотам и щелочам. Низкий коэффициент трения Высокая теплостойкость Хорошие диэлектрические свойства, в том числе при высоких частотах тока Низкие механические свойства Отличается хладотекучестью (развитие деформации при небольших напряжениях и температуре) При нагреве выше 320° С начинает разлагаться с выделением токсичного фтора Для повышения прочности применяют различные наполнители, в частности графитизированный уголь, коксовую муку, рубленое стеклянное во-	Механическая обработка заготовок, которые прессуют при небольшой температуре (20—25° С), а затем спекают при 370° С в специальных печах. Склейка возможна только при специальной обработке поверхностей. Свариваемость неудовлетворительная. Применяют плунжерную экструзию для изготовления толстостенных труб, стержней и профилей. Пленку изготавливают путем снятия широким резцом стружки с последующей калибровкой на прокатном стане	Для прокладок, уплотнений, сильфонов, деталей химического машиностроения, подшипников скольжения, изоляционной пленки	4,5—9,0 (порошок)

Фторопласт-3	ГОСТ 13744—68	Фторопласт-4 более технологичен в переработке Нейтральный материал кристаллической структуры. Свойства те же, что у фторопласта-4, за исключением пониженных диэлектрических показателей. Не может применяться в качестве диэлектриков на высоких частотах тока. Несколько уступает фторопласту-4 по химической стойкости.	можно получать профильные изделия (трубки, стержни и др.). Прессование Литьевое прессование Литье под давлением Экструзия	используется суспензия для покрытий Главным образом в виде суспензий, предназначенных для нанесения антикоррозионных покрытий, а также деталей электротехнического назначения	10—12 (порошок)
Фторопласт-3М	ТУ 6-05-905—71	Более высокая рабочая температура, чем у фторопласта-3. Имеет разветвленную структуру, вследствие чего кристаллизуется очень медленно, поэтому свойства изделий практически не зависят от скорости охлаждения.	Прессование Литьевое прессование Литье под давлением Экструзия	Главным образом в виде суспензий, предназначенных для нанесения антикоррозионных покрытий	—

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб.
Стекло органиче- ское конструкцион- ное СОЛ, СТ-1, 2-55	ГОСТ 15809—70	Пластифицирован- ный (СОЛ) и непла- стифицированный (СТ-1) полимер ме- такриловой кисло- ты Хорошая свето- прозрачность Недо- статок — поверхно- стное растрескивание (образование «сереб- ра»). Сравнительно высокие механиче- ские свойства. Для повышения статиче- ской прочности изде- лий производят вы- тяжку стекол в высо- коэластическом со- стоянии, в результате чего получается ори- ентированная струк- тура макромолекул. Ориентированный ма- териал отличается высокой пластич- ностью, большой со- противляемостью растрескиванию, ма- лой чувстви- тельностью к концен- трам напряжений, способностью выдер- живать значитель-	Свободное литье с последующей вы- тяжкой. Пневмати- ческое и вакуумное формование. Механи- ческая обработка. Сварка Склейка	Для остекления машин и приборов, светопрозрачных корпусов и кожухов	3,06 (тол- щина 1 мм), 1,11 (тол- щина 20 мм)

Полиметилметакрилат литьевой ЛПТ	МРТУ 6-05-871—66	Высокая светопрозрачность, повышенная теплостойкость. Хрупок	То же	Для остекления приборов, изготовления линз и шкал	—
Полиметилметакрилат литьевой ЛСМ-1	ОСТ 6-01-67—72	Повышенные механические свойства, высокая светопрозрачность, повышенная теплостойкость	»	Для деталей различного технического назначения	1,32
Стеклоорганическое Т-2-35	СТУ 12-10-86—60	Сополимер метилметакрилата с добавкой термостабилизирующего компонента. Повышенная теплостойкость	Свободное литье, пневмо- и вакуумное формование Механическая обработка Сварка. Склейка	Для остекления машин и приборов	—

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфические особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб.
Капрон первичный А, Б, В	ОСТ 6-06-14—70	Полярный кристаллический полиамид. Более высокие механические свойства, чем у ПЭНД, полипропилена и других термопластов. Хорошие антифрикционные свойства. Недостаток — большое водопоглощение и, как следствие этого, нестабильность свойств и линейных размеров во влажной среде. Стоек к действию керосина, бензина, бензола, минеральных и органических масел, концентрированных щелочей и слабых кислот. Легко окисляется при нагревании. Низкий коэффициент теплопроводности. Более низкие электрические свойства, чем у полиэтилена	Литье под давлением. Экструзия. Центробежное литье. Механическая обработка. Склеивка. Сварка. Вихревое и другие виды напыления	Для подшипников скольжения, сепараторов подшипников качения, зубчатых колес, корпусных деталей, лопаток вентиляторов Для антифрикционных, антикоррозионных и декоративных покрытий	1,95
Полиамид П-68	ГОСТ 10589—73 *	Меньшее водопоглощение, более высокие стабильность свойств и предел текучести при растяжении, чем у капрона. Остальные свойства	То же	Для ответственных деталей — антифрикционных и конструкционных, требующих стабильности размеров и свойств	13,0

Полиамид П-12	ТУ 6-05-1309—72	Более низкие механические свойства, чем у капрона. Самое низкое водопоглощение среди полиамидов			4,6
Капрблон В	МРТУ 6-05-988—66	Наиболее жесткий из всех полиамидов. Наибольший модуль упругости и наименьшее относительное удлинение при растяжении. Полимеризация материала осуществляется непосредственно в форме без давления, что позволяет получать заготовки любой массы. Материал удобен для проведения экспериментальных работ, так как опытную деталь можно изготовить из заготовки без дорогостоящей пресс-формы	Свободное литье. Центробежное литье. Изделия изготавливают механической обработкой	Толстостенные трубы. Подшипники скольжения. Шестерни	2,52
Капрон вторичный	МРТУ 6-05-1441—71	Продукт переработки отходов капрона. Более низкие свойства, чем у капрона	Те же, что и для капрона	Для менее ответственных деталей, чем из капрона	1,48
Вторичный полиамид П-68	ТУ 6-05-1451—71	Продукт переработки отходов смолы П-68. Более низкие свойства, чем у П-68	Те же, что и для капрона	Для менее ответственных деталей, чем из П-68	1,2

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб.
Полиамид 548	МРТУ 6-05-1032—66	Невысокая ударная вязкость, малый коэффициент трения, стойкость к действию щелочей и углеводов	Литье под давлением Клей представляет собой, как правило, спиртовой раствор Пленки получают разливом на металлическую поверхность	Для прокладочного материала, изготовления клеев, пленок, покрытий	4,7
Полиамид высоконаполненный типа П-68Т40	ТУ П513—66	Устойчив к воздействию щелочей, масел, жиров, углеводов Хорошие антифрикционные свойства	Литье под давлением	Для конструктивных деталей	9,2
Полиамид П-68, наполненный тальком и графитом типа П-68 Т5 П-68 Г5	ТУ П513—66 ТУ П422—65	Полиамиды с тальком и графитом обладают масло-щелоче-, бензоло-, бензиностойкостью Хорошие антифрикционные свойства	Литье под давлением	Для узлов трения с затрудненной смазкой	—
Сополимеры АК80/20 АК85/15 АК60/40 АК50/50	МРТУ 6-05 1248—69 МРТУ 6-05-1032—66	Продукты поликонденсации соли АГ с ε-капролактамом	Литье под давлением	Для вкладышей подшипников, шестерен, втулок и других деталей	4,2
Амил	МРТУ	Хорошие физико-	Литье под давле-	Для конструк-	2,3

Полиформальдегид	МРТУ 6-05-1018—66	Один из наиболее жестких полимерных материалов. Способен выдерживать сравнительно высокие температуры, более стабилен во влажной среде, чем полиамиды, превосходит последние по сопротивлению ползучести, хорошие антифрикционные свойства, высокая морозостойкость. Хорошие диэлектрические свойства. Высокая химическая стойкость. Недостаток — ограниченная термостойкость расплава, что вызывает трудности при переработке литьем под давлением	• Литье под давлением. Экструзия. Механическая обработка	Для втулок и вкладышей подшипников скольжения, сепараторов, колец подшипников качения, тел качения. Для шестерен, седел клапанов, корпусных деталей электро- и бытовых приборов	—
Сополимер формальдегида с диоксаланом СФД	ТУ 6-05-1543—72	Свойства аналогичны свойствам полиформальдегида. Преимущество — лучшая технологичность при переработке	То же	То же, что и для полиформальдегида. Для вкладышей шарниров, рулевых тяг легковых автомобилей	3,0

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб
Поликарбонат (дифлон)	ТУ 6-05-1668—74	Кристаллический полимер, отличающийся высокой теплостойкостью, морозостойкостью, низким водопоглощением, отсутствием склонности к ползучести. Характеризуется низкой и равномерной усадкой, что позволяет получать изделия высокого класса точности. Высокие показатели электрических свойств. Устойчивость к водным растворам минеральных и органических кислот, к растворам минеральных солей и окисляющим агентам. Прозрачность	Литье под давлением Экструзия Прессование Механическая обработка	Для изготовления корпусных деталей в электромашиностроении, деталей воздушоводов и холодильных машин, труб, вентилях	8,0
Дифлон СТН (25% стекловолокна)	ТУ П672—69	Более высокие механические свойства, чем у дифлона	То же	То же	—
Дифлон КА	ТУ П666—69	Материал модифицирован графитом. Повышенные антифрикционные свойства	»	Преимущественно для узлов трения	—

Стеклонаполненный полиамид П68С-30	ГОСТ 17648—72	ности в 25 раз ниже, чем у капрона, высокая теплостойкость, стабильность размеров изделий, малая усадка. Низкий коэффициент трения. Стекловолокно вводится при экструзии полимера	То же	радиоэлектронике (корпус топливного насоса, крыльчатка вентилятора, корпус фильтра масляного насоса автомобиля, крышка карбюратора, статоры и роторы турбобура и др.)	11,8
Стеклонаполненный анид	ТУ 6-11-209—71	Более низкое водопоглощение, чем у КПС-30, остальные свойства близки к свойствам КПС-30. Стекловолокно вводится при экструзии	»	Для ответственных деталей	3,43
Полиарилат Д-3	ТУ НИИПМ П-467—66	Более высокие механические свойства и теплостойкость, чем у КПС-30	Литье под давлением Экструзия Литьевое прессование	Для конструктивных деталей	—
Пентапласт А	ТУ 6-05 1422—71	Высокая термическая стойкость и повышенная морозостойкость	Литье под давлением Экструзия Прессование Покрытие вихревым способом	Для антифрикционных деталей и изделий конструкционного назначения в машиностроении, приборостроении, электротехнической промышленности	49,0
		Высокомолекулярный простой полиэфир. Высокая химическая стойкость, большая стабильность размеров		Для коррозионно-стойкой аппаратуры, клапанов, гибких шлангов, деталей точных приборов	

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфические особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб
Полиуретан ПУ-1	ТУ В-189—70	Стоек к действию разбавленных минеральных кислот и щелочей, углеводов, органических кислот, масел. Разрушается концентрированными минеральными кислотами	Прямое, литьевое прессование	Для деталей, работающих при температуре от -60 до $+100^{\circ}\text{C}$	—
Ацетилцеллюлозный этрол 2ДТ-55	ТУ 6-05-1528—72	Материал легко окрашивается. Более высокая жесткость, чем у полиэтилена. Невысокая теплостойкость	Прессование прямое и литьевое	Для деталей автомобилей (штурвалы, ручки, кнопки, приборные щитки)	2,3—2,6
Этилцеллюлозный этрол	ТУ ПЗЗ—58	Хорошая водостойкость и электроизоляционные свойства	Прессование прямое и литьевое	Для деталей автомобилей (штурвалы, ручки, кнопки, приборные щитки)	3,1
Нитроцеллюлозный этрол	ТУ ПЗ—68	Хорошие водо- и морозостойкость	То же	То же	0,9
Реактопласты					
Стекловолоконный анизотропный материал	МРТУ 6-11-129—69	Высокие механические и электроизоляционные свойства	Прессование	Для конструктивных деталей в электроизоляции	10,9

Стекловолокнит АГ-4С	ГОСТ 10087—62 *	пропитанных эпоксидной, фенолформальдегидной смолами или их смесями Представляет собой однонаправленную ленту, получаемую на основе крученных стеклянных нитей и аналино-фенолформальдегидной смолы. Технологичность в изготовлении выше, чем у материала СВАН	То же	То же	3,55
Стекловолокнит АГ-4В	ГОСТ 10087—62 *	Изготавливается на основе срезов первичной стеклонити и фенолформальдегидной смолы. Прочностные свойства ниже, чем у АГ-4С	Прессование прямое и литьевое	Для изделий средней прочности	2,4
Прессматериал П-3-1	ТУ МБО.023.096	Модифицированная фенолформальдегидная смола, стекловолокно и другие добавки, повышенная ударная вязкость	Прямое прессование	Для деталей конструкционного назначения	—

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб
Прессматериалы П-50С, П-75С	ТУ 84-81—69	Фенолоформальде- гидная смола, моди- фицированная по- лиамидами, в качест- ве наполнителя— стеклолента, высо- кие механические прочность и тепло- стойкость	Прямое прессова- ние	Для конструк- ционных деталей, к которым предъяв- ляются повышенные требования по проч- ности	—
Прессматериал П-5-2	МРТУ 6-05-1041—71	Модифицирован- ная кремнийоргани- ческая смола и стек- ловолокно, повы- шенные механиче- ская прочность и те- плостойкость	То же	Для конструк- ционных деталей, работающих при по- вышенной темпера- туре	—
Стеклопластик П-2-7с	ТУ МТО 023.065	Получают на осно- ве эпоксидной смолы и стеклоленты, по- вышенная механиче- ская прочность	•	Для конструк- ционных деталей по- вышенной прочности	—
Прессматериал ПМ-67	ТУ П622—69	Получают на осно- ве полиамидной смо- лы, хорошие меха- нические свойства, стойкость к окисле- нию, температура эксплуатации — 180+	Прямое, литьевое прессование	Для конструк- ционных деталей и подшипников сколь- жения	—

Прессматериалы П-2-1 П-2-5	ТУ МБО 023.084 ТУ МБО.023.112	ниже, чем у П-2-7С Модифицированная эпоксидная смола и нетканая лента			—
Прессматериал П-2-3	ТУ МБО.026.085	То же	»		—
Прессматериалы 33-18-В 33-18-С	ВТУ МБО.023 040	Модифицированная эпоксидная смола и стекловолокно или нетканая стеклолен- та. Наряду с хороши- ми механическими свойствами стоек к кислотам, щелочам	Прямое прес- сование	Для конструк- ционных деталей	—
Волокнит К-138-А	ТУ П-44—55	Получают на осно- ве кремнийоргани- ческой смолы, мине- рального наполните- ля и других добавок, высокая теплостой- кость и дугостойкость	Прессование пря- мое и литьевое	Для конструк- ционных и электро- изоляционных дета- лей, работающих при нагревании до 300— 400° С	—
Прессматериал № 176	ОПТУ 578—59	Получают на осно- ве кремнийоргани- ческой смолы, орга- нических, минераль- ных наполнителей и других добавок	То же	Для деталей обще- технического и электротехнического назначения, рабо- тающих при 300— 350° С	—

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб
Стекловолокнит ДСВ-2-Р-2м	ГОСТ 17478—72	Получается про- питкой первичных стеклянных нитей После высушивания пропитанную нить рубят на отрезки оп- ределенной длины, в результате чего ма- териал сыпуч. Более высокие механиче- ские свойства, чем у АГ-4В	Прессование	Для изделий слож- ной конфигурации с тонкими стенками	3,4
Пресспорошок РСТ	МРТУ 6-05-1297—70	Продукт совмеще- ния фенолформаль- дегидных смол с мел- ко нарубленным стек- лянным волокном		Для конструк- ционных электро- технических деталей	1,2
Премикс ПСК-1	ТУ СП-31—66	Пастообразная композиция на осно- ве смол контактного типа, рубленых стек- лонитей и других на- полнителей	Прессование при небольших давле- ниях	Для деталей раз- личного назначения	
Стеклотекстолит конструкционный марки КАСТ	ГОСТ 10292—62	Слоистый стекло- пластик на основе стеклотканей, пропи- таных различными смолами, чаще всего фенолформальде-	Изделия изготав- ливают главным об- разом методом меха- нической обработки	Для перегородок в летательных аппа- ратах, различных электротехнических деталей	4,5 (тол- щиной 0,5 мм)

Намоточные стеклопластики на основе:	МРТУ 6-11-60—67 МРТУ 6-05-1082—67	Высокая удельная прочность, химическая стойкость, малая плотность	Намотка	Для высоконапорных труб, емкостей, оболочек	1,1 0,95
стекложута ЖС-1 (50%) полиэфирной смолы (50%) ПН-1	ГОСТ 10587—72 * ГОСТ 10587—72 *				4,1 4,2
или эпоксидных смол ЭД-8 ЭД-10					
Стеклопластики контактного формования на основе: стеклотканей (50%):	МРТУ 6-11-191—70 МРТУ 6-11-139—69 МРТУ 6-05-1082—67	Высокая прочность, малая плотность, хорошая антикоррозионная стойкость	Контактное формование	Для силовых крупногабаритных деталей несерийного производства	0,87 0,97 0,95
ТСЖ-07 АСТТ (6) С ₂ -Р					
полиэфирной смолы (50%) ПН-1					
или эпоксидных смол ЭД-8	ГОСТ 10587—72 * ГОСТ 10587—72 *				4,1 4,2
ЭД-10					

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб.
Текстолит кон- струкционный ПТ	ГОСТ 5—72 *	Хорошие анти- фрикционные свой- ства, высокая проч- ность при сжатии, не- большое водопогло- щение. Изготавли- вают на основе хлоп- чатобумажной ткани и фенолоформальде- гидной смолы мето- дом прессования. Хо- рошие электроизо- ляционные показа- тели	Механическая об- работка	Для подшипников скольжения, шесте- рен автомобильных двигателей, пишущих машин, текстильных машин. Для деталей электротехнического назначения	3,37 (тол- щиной 11— 22 мм)
Текстолит ме- таллургический марки Б	ТУ М-827—60	Получен на основе хлопчатобумажной ткани бельтинг. Хо- рошие антикорро- зионные свойства	Механическая об- работка	Для вкладышей подшипников про- катного стана	—
Текстолит графи- тированный	ТУ 6-05-031-486—72	Фрикционный ма- териал	То же	Для деталей, рабо- тающих на трение	3,1
Текстолит гиб- кий прокладочный	ТУ 6-05-1548—72	Высокая проч- ность при сжатии	Механическая об- работка, штамповка	Для прокладок	13,4
Текстолитовые намоточные втулки и кольца	ТУ МХП М613—55, ТУ МХП М1514—51, ТУ МХП 2101—49	То же	Механическая об- работка	Для различных конструкционных деталей	—
Текстолитовая крошка	ТУ П-400—69	Более низкие меха- нические свойства, чем у конструкцион-	Прямое прессова- ние	Для шестерен и других конструк- ционных деталей	

Гетинакс листо- вой	ГОСТ 2718—74	вают на основе асбе- стовой ткани, пропи- танной фенолофор- мальдегидной смо- лой	То же	сов, фрикционных дисков гидравличе- ских передач	—
Массы прессо- вочные фенольные: общего назна- чения типа 01-040-02	ГОСТ 5689—73	Хорошие электро- изоляционные свой- ства	Прессование пря- мое и литьевое	Для электроизо- ляционных деталей	0,35
специальные безаммач- ные типа СП1-342-02		Копозиции на ос- нове фенолоальде- гидных смол различ- ных наполнителей, отвердителей, кра- сителей и смазываю- щих веществ. Низ- кая трудоемкость изготовления. Хоро- шие тепло- и элек- троизоляционные свойства	То же	То же	—
электронизо- ляционные ти- па Э2-330-02		Повышенные элек- троизоляционные свойства	Прессование пря- мое и литьевое	Для электроизо- ляционных деталей	0,39
водохимстой- кие типа ВХ1-090-34		Пониженное водо- поглощение, повы- шенная ударная вяз- кость, стойки в кис- лых средах	То же	Для деталей с повышенной водо- и кислотостойкостью	0,49
ударопрочные типа У2-301,07		Высокая ударная вязкость		Для направляю- щих втулок, шесте- рен, кулачков и дру- гих деталей	0,64
жаростойкие типа Ж1-01-040		Повышенная теп- лостойкость		Для деталей элек- ротехнического на- значения	0,265

Пластмасса	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Качественная оценка свойств, специфиче- ские особенности	Методы переработки	Основное назначение	Цена за 1 кг, руб
Материал прес- совочный КФ-3	ТУ 6-05-1625—73	Фрикционный прессматериал с до- бавками асбеста, графита	Прессование	Для тормозных ко- лодок подъемных кранов, вагонов	0,84*
Ретинакс	ГОСТ 10851—73	Фрикционный ма- териал с добавками асбеста, барита и смазывающих ве- ществ	»	То же	—
Фаолит, отверж- денный лист мар- ки А	МРТУ 6-05-1169—69	Кислотоупорная пластмасса на основе жидкой фенолформ- альдегидной смолы и кислотостойкого наполнителя, выпу- скают в виде готовых изделий из отверж- денного фаолита и в виде полуфабрика- та — сырых листов, прессмассы и замазок	Формование без применения высоко- го давления	Для крупногаба- ритных деталей хи- мической аппарату- ры, защитных покры- тий	1,4
Антегмит	ТУ 35-ХП-715—64	Антифрикционный материал на основе фенолформальде- гидной смолы и гра- фитированных про- дуктов	Прессование	Для поршневых колец, сальниковых устройств, насосов, фильтров, деталей трубопроводов	—

Аминопласт,
прессопорошок А
и Б

ГОСТ
9359—73

ной смолы. Хорошие
антифрикционные и
прочностные свой-
ства. Химически
стойки

Не имеет запаха,
светостоек, может
быть окрашен в лю-
бой цвет и абсолютно
нетоксичен. Хоро-
шие диэлектриче-
ские свойства при
минеральных напол-
нителях. Основные
недостатки — склон-
ность к растрескива-
нию при эксплуата-
ции в высокое водо-
поглощение

Прессование

подорожном транс-
порте, для электро-
изоляционных дета-
лей высокого напря-
жения, для деталей
текстильных машин и
общего машинострое-
ния (зубчатые коле-
са, фрикционные
шкивы, ступицы и
т. д.). Для силовых
обшивок, а также для
деталей авиацион-
ных конструкций

Для электроарма-
туры, сигнальных
кнопок, сухих вы-
ключателей высоко-
го напряжения, ду-
гогасительных камер

0,47

Пластические массы

*1 Применяют для изготовления деталей общетехнического назначения.
*2 Стабилизированный ПВХ называют винипластом, пластифицированный ПВХ (30—40% пластификато-
ра) — пластиком, сильно пластифицированный ПВХ (70—80% пластификатора) — гидропластом.

Физико-механические и теплофизические свойства тер

7 Термопластичные пласт

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение при растяжении σ_p , кгс/см ²	Предел текучести при растяжении σ_T , кгс/см ²	Разрушающее напряжение, кгс/см ²		Модуль упругости при растяжении E , кгс/см ²	Относительное удлинение при разрыве ε_p , %
				при статическом изгибе $\sigma_{из}$, $\sigma_{из}$	при сжатии $\sigma_{сж}$, $\sigma_{сж}$		
Полиэтилен высокого давления 15303-003	0,92—0,93	140	100	75	Не разрушается	1 500—2 500 **	600
16802-070	0,92—0,93	90	100	75	То же	1 500—2 500 **	500
17602-006	0,92—0,93	140	100	75	»	1 500—2 500 **	600
18002-030	0,92—0,93	110	95	75	»	1 500—2 500 **	600
18102-035	0,92—0,93	100	90	—	»	1 500—2 500 **	500
18302-120	0,92—0,93	70	—	—	»	1 500—2 500 **	400
Полиэтилен низкого давления 20106-001	0,95	220—320	250—260	200—350	»	5 500—8 000 **	500—800
20306-005	0,95	220—320	220—250	200—350	»	5 500—8 000 **	400—700
21006-075	0,95	220—320	220—230	200—350	Не разрушается	5 500—8 000 **	200—220
Полипропилен 02П, 03П	0,9—0,92	250—400	—	700—800	600	6 700—11 900 **	200—800
Поливинилхлорид суспензионный	1,34—1,39	300—500	—	1 000—1 100	525—600	—	25—400
Винилпласт листовой	1,38—1,43	400—600	—	1 000—1 200	800—1 000	40 000	10—50
Полистирол блочный Т	1,05—1,08	350	—	950—1 000	1 000	27 000 **	1,5
Полистирол эмульсионный А	1,05—1,08	350—400	—	1 000	1 000	26 000 **	1,5
Полистирол суспензионный	1,05—1,06	300	—	500	1 000	31 000 **	1,5
Полистирол ударопрочный УПМ-503	1,05—1,07	175	—	—	—	—	25
УПМ-508Э	1,05—1,07	250	—	—	—	—	25
УПМ-508Л	1,05—1,07	200	—	—	—	—	20
УПМ-612Л	1,05—1,07	250	—	—	—	—	15
УПМ-3Л	1,05—1,07	200	—	—	—	—	12
УПС-1105	1,05—1,07	—	—	—	—	—	—

мопластичных пластмасс низкой прочности (табл. 7)

массы низкой прочности

Ударная вязкость σ , кгс-см/см ²	Твердость при за- данной нагрузке H , кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Температура плавления, °C	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°C)	Удельная теплоемкость, ккал/(кг·°C)	Морозостойкость (температура хрупкости) $T_{хр}$, °C
Не ломается	1,4— 2,5	0,01 **	105— 108	108— 110 **	$2,2 \cdot 10^{-4}$ $\pm 5,5 \cdot 10^{-4}$	—	0,5— 0,68	Не выше —70
То же	1,4— 2,5	0,01 **	105— 108	108— 110 **	$2,2 \cdot 10^{-4}$ $\pm 5,5 \cdot 10^{-4}$	—	0,5— 0,68	—40
»	1,4— 2,5	0,01 **	105— 108	108— 110 **	$2,2 \cdot 10^{-4}$ $\pm 5,5 \cdot 10^{-4}$	—	0,5— 0,68	—70
»	1,4— 2,5	0,01 **	105— 108	108— 110 **	$2,2 \cdot 10^{-4}$ $\pm 5,5 \cdot 10^{-4}$	—	0,5— 0,68	—40
»	1,4— 2,5	0,01 **	105— 108	108— 110 **	$2,2 \cdot 10^{-4}$ $\pm 5,5 \cdot 10^{-4}$	—	0,5— 0,68	—60
»	1,4— 2,5	0,01 **	105— 108	108— 110 **	$2,2 \cdot 10^{-4}$ $\pm 5,5 \cdot 10^{-4}$	—	0,5— 0,68	—50
»	4,5— 5,8	0,004— 0,03 **	120— 125	120— 128 **	$4 \cdot 10^{-4}$ **	—	0,55	Не выше —60
»	4,5— 5,8	0,004— 0,03 **	120— 125	120— 128 **	$4 \cdot 10^{-4}$ **	—	0,55	—60
Не ломается	4,5— 5,8	0,004— 0,03 **	120— 125	120— 128 **	$4 \cdot 10^{-4}$ **	—	0,55	Не выше —60
33—80	6,3	0,5 **	160	160 **	$1,1 \cdot 10^{-4}$	—	0,46	—(5— 15)
100—150	—	—	—	170— 190	—	—	—	—(15— 40)
До 150	15—16	0,4— 0,6	—	70—90	$6 \cdot 10^{-5}$ — $10 \cdot 10^{-5}$	0,13— 0,14	0,2— 0,63	—(10— 50)
20	14—15	0,2	—	100— 105 **	$8 \cdot 10^{-5}$	0,08— 0,12	0,32	—40
22	14—15	0,2	—	105— 108 **	$8 \cdot 10^{-5}$	0,08— 0,12	0,32	—
—	15	0,3	—	110 **	$9 \cdot 10^{-5}$	0,08— 0,12	0,32	—
40	15	—	—	75—80	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
40	15	—	—	75—80	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
40	15	—	—	75—80	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
30	15	—	—	75—80	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
—	15	—	—	75—80	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
35	15	—	—	75—80	$8 \cdot 10^{-5}$	—	—	—

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение при растяжении σ_p , кгс/см ²	Предел текучести при растяжении $\sigma_{т.р.}$, кгс/см ²	Разрушающее напряжение кгс/см ²		Модуль упругости при растяжении E , кгс/см ²	Относительное удлинение при разрыве ε_p , %
				при статическом изгибе *1, $\sigma_{из}$	при сжатии *2, $\sigma_{p.c}$		
УПС-804	1,05—1,07	270	—	—	—	—	30
УПС-505	1,05—1,07	250	—	—	—	—	25
УПК-303	1,05—1,07	180	—	—	—	—	15
Сополимеры стирола СНП-0	1,15	440	—	1 000	—	23 500 **	3
СНП-1	1,15	425	—	950	—	21 000 **	5—8
СНП-2	1,14	400	—	900	—	21 000 **	12—15
СНП-3	1,13	325	—	800	—	20 000 **	20—30
СНП-4	1,12	300	—	650	—	20 000 **	30—50
СНП-5	1,10	300	—	600	—	19 000 **	50—70
Сополимеры стирола САМ, САМН	1,06	265	—	1 200	—	31 000 **	1
Литьевая масса на основе полистирола ПКН-Д5	1,1	350	—	750	—	—	1,2—1,5
ПКН-Д10	1,1	330	—	700	—	—	1,2—1,5
ПКН-Д15	1,1	400	—	650	—	—	1,2—1,5
ПКН-Д20	1,1	400	—	600	—	—	1,2—1,5
ПКН-Д14	1,1	—	—	650	—	—	1,2—1,5
Б-2С	1,1	—	—	400	—	—	1,2—1,5
Сополимеры стирола с метилметакрилатом МС	1,12—1,14	—	—	950—1000	—	2 200 **	2,0
МСН-1	1,12—1,14	—	—	1200	—	23 000 **	2,5
МСН-2	1,12—1,14	—	—	1100	—	—	—
МСН-3	1,12—1,14	—	—	1000—1200	—	—	—
Фторопласт-4	2,15—2,35	210—250	—	110—140	—	4700—8 500 **	250—500
Фторопласт-4Д	2,2	120—200	—	111	200	—	80—300

Продолжение табл 7

Твердость при заданной нагрузке H , кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Температура плавления, °C	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м ч.°C)	Удельная теплоемкость, ккал/(кг.°C)	Морозостойкость (температура хрупкости) $T_{хр}$, °C
15	—	—	75—80	8·10 ⁻⁵	—	—	—
15	—	—	75—80	8·10 ⁻⁵	—	—	—
15	—	—	75—80	8·10 ⁻⁵	—	—	—
15	0,07—0,1	—	74	8,3·10 ⁻⁵	—	—	—
13	0,07—0,1	—	74	8,3·10 ⁻⁵	—	—	—
12	0,07—0,1	—	74	8,6·10 ⁻⁵	—	—	—
10	0,07—0,1	—	73	9,5·10 ⁻⁵	—	—	—
9	0,07—0,1	—	72	10,8·10 ⁻⁵	—	—	—
8,5	0,07—0,1	—	70	9·10 ⁻⁵	—	—	—
16—17	—	—	100—105	7,5·10 ⁻⁵	—	—	—
10	—	—	90—95	—	—	—	—60
10	—	—	90—95	—	—	—	—60
10	—	—	90—95	—	—	—	—60
10	—	—	90—95	—	—	—	—60
10	—	—	90—95	—	—	—	—60
16—17	0,26—0,28	—	72—75	(7—8)·10 ⁻⁵	—	—	—(40—50)
16—18	—	—	72—75	(6—8)·10 ⁻⁵	—	—	—
13—16	—	—	—	—	—	—	—
15—22	—	—	—	—	—	—	—
3—4	0,00	327	—	—	0,21	0,25	—269
3—4	0,00	—	—	—	—	—	—

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение при растяжении σ_p , кгс/см ²	Предел текучести при растяжении $\sigma_{т.р}$, кгс/см ²	Разрушающее напряжение, кгс/см ²		Модуль упругости при растяжении E, кгс/см ²	Относительное удлинение при разрыве ϵ_p , %
				при статическом изгибе *1, $\sigma_{и}$	при сжатии *2, $\sigma_{p.c}$		
Фторопласт-3	2,09—2,16	350—400	—	600—800	200—570	11 600—14 500 *3	20—40
Фторопласт-3М	2,02	230—300	—	350	—	9 600—11 500 *3	150—250
Полиметилметакрилатный порошок ЛП	1,2	420	—	910	840	21 000	1—15
Полиметилметакрилат литревой ЛПТ	1,2—1,8	400	—	1200—1400	700	—	—
Этрод ацетилендиолозный: 2ДТ-43	1,4	500—580	—	500	500—570	22 500	7—8
2ДТ-55	1,4	500—580	—	500	500—570	22 500	7—8
Д-30	1,32	500—580	—	400	500—570	22 500	7—8
Этрод ацетилендиолозный	—	—	—	—	—	—	—
АБЦ-12	1,15—1,23	175	—	450	300	—	40—80
АБЦ-20	1,15—1,23	175	—	350	—	—	40—80
Этрод этилендиолозный	1,2	100—140	—	340	140—200	22 000	50—100
Этрод нитроцеллюлозный	1,8—2	250—300	—	350—400	140—210	18 000—28 000	25—50
Литевой материал на основе ацетобутиратцеллюлозы:	—	—	—	—	—	—	—
ЭЦ-12А	1,18	—	—	600	—	—	—
ЭЦ-20А	1,18	—	—	600	—	—	—
ЭЦ-40А	1,18	—	—	500	—	50—150	50—60
Полуретан ПУ-1	1,21	500—600	—	700—800	—	—	—
Капрон вторичный	1,1—1,2	350	—	450—470	600	—	—
Вторичный полиамид П-68	1,13	400	—	800	700—800	—	300
Полиамид 648	1,12	350—400	—	180—190	700	3 400	350—400
648/27	1,12	350—450	—	180—190	700	—	—
64	1,12	500—600	—	280—300	750	5 600	350—400
64/10	1,12	550—600	—	300—350	750	—	300—350
64/21	1,12	300	—	300	700	—	250
Полиамид 12	1,14—1,15	500	—	—	—	—	100

Продолжение табл. 7

Ударная вязкость α , кгс-см/см ²	Твердость при за- данной нагрузке H , кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Температура плавления, °C	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°C)	Удельная теплоемкость, ккал/(кг·°C)	Морозостойкость (температура хрупкости) T_{xp} , °C
0—160	10—13	0,00	208—210	70	—	0,2	0,22	—195
не ломается	8	0,00	—	65	—	—	—	—195
15	13	—	—	50—74	$(8-12) \cdot 10^{-5}$	—	—	—40
15—18	17	—	—	80—95	$9 \cdot 10^{-5}$	0,28	—	—50
35	4,0	0,4	150—170	40	$1 \cdot 10^{-4}$ — $1,2 \cdot 10^{-4}$	0,14— 0,18	0,3— 0,42	—
20—35	4,5	0,4	150—170	40	$1 \cdot 10^{-4}$ — $1,2 \cdot 10^{-4}$	0,14— 0,18	0,3— 0,42	—
20	8,0	0,5	150—170	50	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,14— 0,18	0,3— 0,42	—
40	5,0	2,2	150—170	35—50	$1,19 \cdot 10^{-4}$ — $1,49 \cdot 10^{-4}$	0,17— 0,19	0,3— 0,4	—50
55	3,7	2,2	150—170	35—50	$1,19 \cdot 10^{-4}$ — $1,49 \cdot 10^{-4}$	0,17— 0,19	0,3— 0,4	—50
15	4,5	0,6	—	40—60	$9,9 \cdot 10^{-5}$ — $19,8 \cdot 10^{-5}$	0,13— 0,24	—	—
6	6,0	0,8	—	35—50	$67 \cdot 10^{-5}$	0,15— 0,21	—	—
40	10	0,4	—	120 ⁸⁷	—	—	—	—
50	8	0,4	—	115 ⁸⁷	—	—	—	—
60	5	0,4	—	80 ⁸⁷	—	—	—	—
10—12	0,1	—	—	60	$(13-13,5) \times 10^{-4}$	0,29	—	—50
21—30	4—5	—	—	180— 200 ⁸⁷	—	—	—	—
80	—	—	—	60	—	—	—	—60
50—160	3,8— 4,2	—	150— 160	87 ⁸⁷	$13 \cdot 10^{-5}$	—	—	—50
50—160	3,8— 4,2	—	—	87 ⁸⁷	$13 \cdot 10^{-5}$	—	—	—50
100—250	4,5— 5,0	—	—	115 ⁸⁷	$13 \cdot 10^{-5}$	—	—	—40
50—300	4,8— 5,2	—	—	135 ⁸⁷	$13 \cdot 10^{-5}$	0,24	—	—40
250	4,8— 5,2	—	—	115 ⁸⁷	$13 \cdot 10^{-5}$	—	—	—40
—	—	0,25	—	42	$(10-20) \cdot 10^{-5}$	0,23	—	—

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение при растяжении σ_p , кгс/см ²	Предел текучести при растяжении $\sigma_T p$, кгс/см ²	Разрушающее напряжение, кгс/см ²		Модуль упругости при растяжении E , кгс/см ²	Относительное удлинение при разрыве
				при статическом изгибе *1, σ_H	при сжатии *2, $\sigma_{p.c}$		
Сополимеры АК 60/40	1,12	400—500	—	—	—	—	40
АК 50/50	1,12	400—500	—	—	—	—	40
АК 80/20	1,13	600—700	—	890—900	830—860	—	150 200 150 200
АК 85/15	1,13	600—700	—	890—900	—	—	—
Полиамид П68Т высоконаполненный	1,31	450—530	—	—	750—800	—	—
П68Т-30	1,35	600—650	—	900	650—740	—	—
П68Т-40	1,52	450—500	—	—	—	—	—
Полиамид П68Т, П68Т, наполненный тальком и графитом	1,13—1,15	400	—	1100	800—1000	—	—
П68-Т10	—	400	—	950—1000	950—1000	—	—
П68-Т20	—	500—600	—	800—900	1000	—	—
П68-Г5	—	500	—	900	—	—	4—4—
П68-Г10	—	500	—	900	—	—	—
Модифицированные полистирольные пластик	1,2	509	—	—	—	—	2
АВС-1	1,2	424	—	—	—	—	2
АВС-2	1,2	389	—	—	—	—	130
АВС-3	1,2	428	—	—	—	—	3
АВС-4	1,4	400	—	650	850	12 600 **	40—
Пентапласт А	—	—	—	—	—	—	—

*1 ГОСТ 4648—71 предусматривается установление разрушающего изгиба при заданной величине изгиба ($\sigma_{изг}$), равной 1,5 годинны образца 1,5 изгиба ($\sigma_{изг}$, шах) для пластмасс, у которых нагрузка проходит через максимум изгиба.

** ГОСТ 4651—68 предусматривается установление разрушающего заданной относительной деформации сжатия, равной 25%, по отношению к шапюхся при сжатии.

** Модуль упругости при изгибе.

** Водопоглощение за 30 сут при 20° С.

** Водопоглощение за 60 сут при 20° С.

** Теплостойкость по НИИПИ.

** Теплостойкость по Вика.

Продолжение табл. 7

Твердость при заданной нагрузке Н, кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Температура плавления, °С	Теплостойкость по Мартенсу, °С	Коэффициент линейного расширения, 1/°С	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°С)	Удельная теплоемкость, ккал (кг·°С)	Морозостойкость (температура хрупкости) T _{хр} , °С
10—12	2,3	—	130—140 *	—	—	—	—
10—12	2,3	—	130—140 *	—	—	—	—
15—17	2,3	218—224	50—60 *	—	—	—	—
15—17	2,3	218—224	50—60 *	—	—	—	—
14—17	—	—	60—80	—	—	—	—
15	—	—	85	(4,5—4,8) × 10 ⁻⁵	—	—	—
—	—	—	100—120	(3—3,5) · 10 ⁻⁵	—	—	—
15—18	2,5—2,8	—	60—80	(10—20) · 10 ⁻⁵	0,23	—	—20
15—18	2,5—2,8	—	60—80	(10—20) · 10 ⁻⁵	0,23	—	—20
15—18	2,5—2,8	—	60—80	(10—20) · 10 ⁻⁵	0,23	—	—20
15—18	2,5—2,8	—	60—80	(10—20) · 10 ⁻⁵	0,23	—	—20
9—11	0,01—0,2	180	76—95	(8—10) · 10 ⁻⁵	—	—	—
—	0,2	—	76—95	(8—10) · 10 ⁻⁵	—	—	—
—	0,2	—	76—95	(8—10) · 10 ⁻⁵	—	—	—
—	0,01—0,2	—	76—95	(8—10) · 10 ⁻⁵	—	—	—
—	—	—	160—170 *	8 · 10 ⁻⁵	—	—	—

при изгибе ($\sigma_{\text{из}}$) для разрушающихся пластмасс, напряжения при не разрушающихся при изгибе, максимальное напряжение при ой величине прогиба или до достижения этой величины.

при сжатии ($\sigma_{\text{с}}$) для разрушающихся пластмасс, напряжения при большого поперечного сечения образца ($\sigma_{\text{ис}}$) для материалов, не разру-

Изменение свойств термопластов низкой прочности под действием внешних факторов (рис. 8—11 и табл. 8—17)

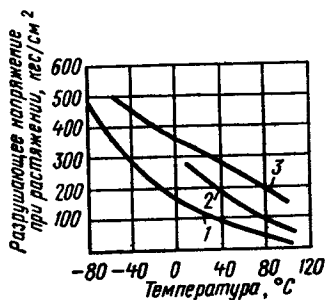


Рис. 8. Зависимость разрушающего напряжения при растяжении от температуры:

1 — полиэтилен ВД; 2 — полиэтилен НД с относительной молекулярной массой 30 000; 3 — полиэтилен НД с относительной молекулярной массой 350 000

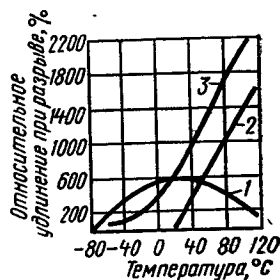


Рис. 9. Зависимость относительного удлинения при разрыве от температуры:

1 — полиэтилен ВД; 2 — полиэтилен НД с относительной молекулярной массой 30 000; 3 — полиэтилен НД с относительной молекулярной массой 350 000

8. Изменение свойств светостабилизированного полиэтилена 15802—020 при атмосферном старении в условиях Ленинграда

Показатель	Без стабилизатора		Со стабилизатором — сажа ДГ100	
	Исходные данные	После старения в течение 1 года	Исходные данные	После старения в течение 1 года
σ_p , кгс/см ²	130	120	150	150
$\sigma_{p,c}$, кгс/см ²	95	110	95	110
ε_p , %	560	60	550	80
T_{xp} , °С	—70	—35	—70	—65

Значения модуля упругости при изгибе полиэтилена НД в зависимости от температуры приведены ниже:

Температура, °С	—120	—100	—80	—60	—40
Модуль упругости при изгибе, кгс/см ²	31 800	27 500	24 300	23 100	21 080
Температура, °С	—20	0	20	50	70
Модуль упругости при изгибе, кгс/см ²	16 800	10 100	5 700	1 660	1 040

9. Зависимость характеристик механических свойств винипласта от температуры

Характеристика	Температура, °C										
	-196	-75	-20	0	20	40	60	75	100	130	150
Разрушающее напряжение, кгс/см ²	1380	1220	900	720	500	400	320	200	40	20	10
Относительное удлинение при разрыве, %	0"	0	0	8	20	30	60	200	350	80	50

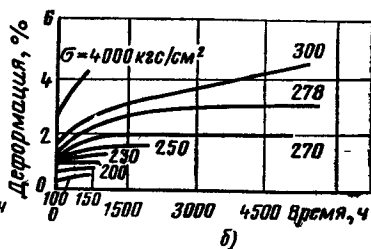
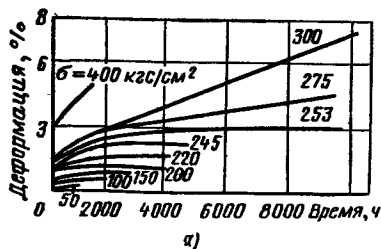
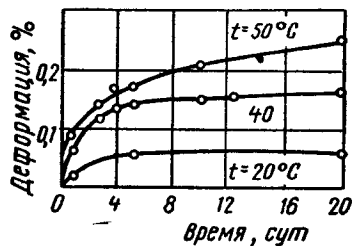
Рис. 10. Кривые ползучести винипласта при различных температурах ($\sigma = 50$ кгс/см²)

Рис. 11. Кривые ползучести винипласта при различных напряжениях: а — при растяжении (комнатная температура); б — при сжатии (комнатная температура)

10. Зависимость характеристик механических свойств блочного полистирола от температуры (в % к показателям при 20° С)

Характеристика	Температура, °С					
	-70	-20	0	50	80	90
Разрушающее напряжение при растяжении, кгс/см ²	—	107	105	95	80	60
Модуль упругости при растяжении, кгс/см ²	100	107	105	97	93	84
Разрушающее напряжение при изгибе, кгс/см ²	—	105	102	95	88	75
Ударная вязкость, кгс см/см ²	105— 115,5	100— 104	100— 102	97— 98	—	—

11. Атмосферное старение полистирола и его сополимеров в условиях Ленинграда

Материал	Исходные данные		После старения в течение 1 года	
	α , кгс см/см ²	σ_H , кгс/см ²	α , кгс см/см ²	σ_H , кгс/см ²
Блочный	17	1001	2,8	728
Суспензионный	23	1096	2,4	747
Эмульсионный	22	1071	3,8	853
Сополимер стирола				
САМ	21,5	1123	3,4	642
МС	16	1058	13,6	—
МСН	26	1175	22,0	—
УПМ-503	43	Гибкий	1,3	318

12. Изменение свойств полистирола и его сополимеров при хранении в комнатных условиях

Материал	Исходные данные		После старения			
	α , кгс см/см ²	σ_H , кгс/см ²	3 года		5 лет	
			α , кгс см/см ²	σ_H , кгс/см ²	α , кгс см/см ²	σ_H , кгс/см ²
Блочный	17	1000	17	1000	17	1000
Суспензионный	23	1100	22,5	1100	21	1100
Эмульсионный	22	1070	22	1070	20	1100
Сополимер стирола САМ	21,5	1120	21	1100	20,5	1100

Полимер	Продолжительность старения, ч									
	α , кгс·см/см ²	σ_H , кгс/см ²	500		1000		2000		3000	
			α , кгс·см/см ²	σ_H , кгс/см ²	α , кгс·см/см ²	σ_H , кгс/см ²	α , кгс·см/см ²	σ_H , кгс/см ²	α , кгс·см/см ²	σ_H , кгс/см ²
Блочный	18,5	1000	16	970	15	960	15	940	17	950
Суспензионный	23,0	1040	24	1040	21	1030	23	1020	25	990
Эмульсионный	23,0	1000	23	1000	23	1030	—	—	23	1040
Сополимер стирола:										
САН	21,5—25	1120—1400	24	1470	23—27	1160—1540	19,5	1150	21	1120
МС	16	1060	—	—	15	1025	18	1050	17	1040
МСН	26	1175	—	—	26	1180	23,5	1210	26	1160

14. Зависимость характеристик механических свойств фторопласта-4 от температуры

Характеристика	Температура, °C									
	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100	120
σ_p , кгс/см ² незакаленного образца	—	350	325	300	200	180	—	135	115	—
закаленного образца	—	500	440	330	250	240	—	200	190	—
E , кгс/см ² (при изгибе)	27 800	23 900	23 300	18 100	8 500	5 100	4 800	3 800	—	2 450
незакаленного образца	13 200	11 300	9 800	7 400	4 700	4 000	2 900	2 180	—	1 100
ε_p , % незакаленного образца	—	70	100	150	470	650	—	600	540	—
закаленного образца	—	100	160	190	400	500	—	500	480	—

15. Зависимость деформации фторопласта-4 при сжатии от температуры

Деформация, %	Нагрузка (кгс/см ²), вызывающая деформацию при температурах (°C)						
	-50	0	25	50	100	150	200
1	203	157	62	49	31	17,5	11
2	304	210	92	66	39	27	20
3	350	236	105	77	48	33	27
4	374	251	120	85	59	39	31
5	390	262	127	92	62	44	35

16. Ползучесть фторопласта-4 при степени кристалличности 50%
($\lg \varepsilon_t = \lg \varepsilon_1 + a \lg t$)

Напряженное состояние	Температура, °C	Напряжение, кгс/см ²	Деформация, %		Коэффициент a
			(ε_1)	(ε_t)	
Сжатие	20	33	6,00	6,25	0,03
»	20	21	3,05	3,19	0,032
Растяжение	40	28	2,72	2,87	0,038
»	100	28	5,58	5,90	0,040
»	140	21	4,67	4,94	0,042
»	200	14	4,08	4,50	0,048
»	250	14	5,17	5,58	0,055

Примечания: 1. Условные обозначения: ε_1 — деформация за 1 сут, ε_t — деформация за 4 сут, t — продолжительность работы, сут.
2. Деформацию ε_1 и коэффициент a для других условий нужно определять опытным путем

Характеристика	Температура, °C								
	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100
σ_p (кгс/см ²) закаленного образца	950	835	730	550	390	290	200	140	80
E , кгс/см ² (при изгибе):									
незакаленного образца	26 600	22 700	19 700	17 000	14 500	10 800	8 100	2 740	1 750
закаленного образца	25 100	21 200	17 300	15 500	11 600	8 200	4 800	1 350	710
e_p (%) закаленного образца . . .	21	28	28	21	70	65	430	830	840

Физико-механические и теплофизические свойства термореактивных пластмасс низкой прочности (рис. 12 и табл. 18)

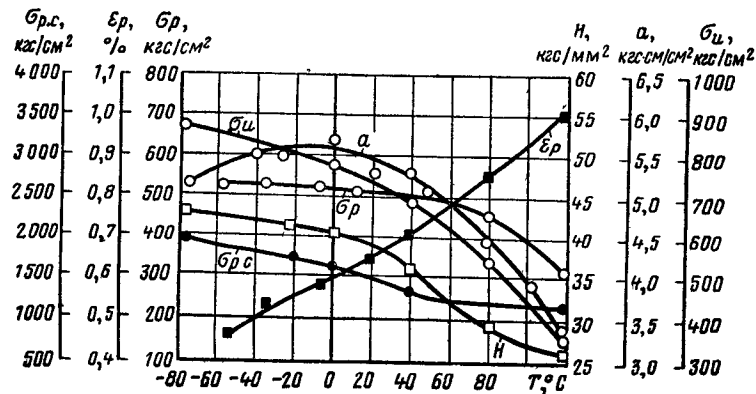


Рис. 12. Зависимость характеристик механических свойств массы прессовочной фенольной 03-010-02 от температуры:

$\sigma_{р.с}$ — разрушающее напряжение при сжатии; σ_p — разрушающее напряжение при растяжении; $\sigma_{и}$ — разрушающее напряжение при статическом изгибе; α — ударная вязкость; H — твердость при заданной нагрузке; e_p — относительное удлинение при разрыве

18. Термореактивные пласт

Пластмассы	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение, кгс/см ²			Модуль упругости при растяжении E, кгс/см ²	Относительное удлинение при разрыве ε_p , %	Ударная вязкость α , кгс·см/см ²
		при растяжении, σ_p	при сжатии, $\sigma_{p.c}$	при статическом изгибе, $\sigma_{\text{и}}$			
Массы прессовочные фенольные; общего назначения							
01-040-02	1,45	—	—	600	—	—	$\frac{5,0}{1}$
01-030-02	1,45	350	1 600	600	70 000—80 000	0,6—0,8	$\frac{5,0}{1}$
02-030-02	1,4	375	1 600	700	75 000—80 000	0,6—0,8	$\frac{6,0}{1}$
02-040-02							
02-010-02							
03-010-02							
07-010-02							
специальные безаммиачные:							
Сп 1-342-02	1,4	280	1 400	600	2 000	—	$\frac{4,5}{1,9}$
Сп 2-342-02							
специальная безаммиачная с повышенными механическими свойствами							
Сп 3-342-02	1,4	—	1 600	600	—	—	$\frac{5,0}{2,9}$
электронизолационные							
Э1-340-02	1,4	240—550	1 100—2 900	600—950	2 000—88 000	0,6—0,7	$\frac{3,5-5}{1,8-2}$
Э9-342-73	1,85						
Э10-342-63							
Э11-342-63							
Э2-330-02							
Э3-340-65							
Э3-340-61							
Э6-014-30							
Э8-361-63							
влагохимстойкие							
ВХ 1-090-34	1,6	—	1 500	550	70 000—90 000	—	$\frac{4,5}{1}$
ВХ 2-090-69	1,6	280	1 500—1 600	550	70 000—175 000	—	$\frac{4,5}{1,6}$
ВХ 2-090-68							
ВХ 3-090-14	1,5	—	1 100—1 700	600	56 000—184 000	—	$\frac{6,0}{8,0}$
ВХ 4-080-34	1,75	—	—	350	—	—	$\frac{1}{1}$

Иссы низкой прочности

	данной нагрузке H , кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, мг	Теплостойкость по Мартену, °C	Маслостойкость, %	Бензиностойкость, %	Рабочая температу- ра, °C	Коэффициент линей- ного расширения, 1/°C	Коэффициент тепло- проводности, ккал/(м ч.°C)	Удельная теплоем- кость, ккал/(кг.°C)	Морозостойкость, °C
I	60	125	—	—	—	—	—	—	—	—
-30	60	125	0,03	0,05	—	(4,5— 5,3)·10 ⁻⁵	0,18— 0,2	0,32— 0,33	—60	
-30	55	130	0,03	0,05	От -50 до +110	(4,6— 5,3)·10 ⁻⁵	0,18— 0,2	0,32— 0,33	—60	
I	55	130	0,03	0,05	—	—	—	—	—	
II	55	130	0,03	0,05	—	—	—	—	—	
—60	10—55	125— 250	0,01— 0,03	0,01— 0,05	От -60 до +220	(1,9— 5,3)·10 ⁻⁵	0,18— 0,33	0,35— 0,36	—60	
-40	15	125	0,03	0,03	От -40 до +110	—	—	—	—50	
-38	20	125	0,03	0,02	—	—	—	—	—50	
-31	15	125	0,03	0,03	—	—	—	—	—50	
I	20	115	—	—	—	—	—	—	—	

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение, кгс/см ²			Модуль упругости при растяжении E, кгс/см ²	Относительное удлинение при разрыве ε_p , %	Ударная вязкость a, кгс·см/см ²
		при растяжении, σ_p	при сжатии, $\sigma_{p.c}$	при статическом изгибе, $\sigma_{из}$			
Ударопрочные У 1-301-07 У 2-301-07	1,45	300	1 000	800	Не менее 60 000	0,38	$\frac{9}{1}$
У 3-301-07 - Жаростойкие Ж 1-010-40 и др.	1,9	—	1 500— 2 000	400	70 000— 90 000	—	$\frac{3}{—}$
Ангелмит: АТМ-1Г АТМ-1	1,74 1,8— 1,85	60—80 180— 220	450 1 000— 1 200	200 400— 500	—	—	$\frac{1,6}{2,75}$
КФ-3 КФ-3М	1,7— 1,85 1,95	270 —	1 000— 1 860 800	800— 1 250 600	—	—	$\frac{21}{10}$
Пресспорошок * марок А и Б (аминопласт) Волокнит К-138-А	1,4— 1,55 1,8	400— 500 —	1 200— 1 900 —	600— 800 500	—	—	$\frac{5}{20}$
Прессматериал № 176 Премикс ПСК-1	2,0 1,75— 1,85	— 400	700 900	150 800	—	—	$\frac{2,5}{—}$
Текстолитовая крошка Фазолит	1,3— 1,4 1,5— 1,6	400— 500 120— 385	1 400— 2 000 580— 900	500— 700 260— 600	—	—	$\frac{—}{2,0}$
Пресспорошок РСТ	—	—	—	600	—	—	—

* Данные в %

Примечание. В данных для а в числителе — образцы без надр

Продолжение табл 18

Давление на грузе Н, кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, мг	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Маслостойкость, %	Бензиностойкость, %	Рабочая температу- ра, °C	Коэффициент линей- ного расширения, 1/°C	Коэффициент тепло- проводности, ккал/(м ч °C)	Удельная теплоем- кость, ккал/(кг °C)	Морозостойкость, °C
25	90	140	0,03	0,03	От -40 до +110	$(3-3,5) \cdot 10^{-5}$	0,18— 0,20	0,3— 0,34	—
50	20	145	0,015— 0,03	0,02— 0,04	От -40 до +120	—	—	—	—
—	—	600 170	—	—	—	$0,22 \cdot 10^{-5}$ $0,85 \cdot 10^{-5}$	90—120 30—35	—	—
—41	0,65— 1 *	—	—	—	—	$(0,94-2,5) \cdot 10^{-5}$	0,45	0,28	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	0,4— 0,7	—	—	$5,3 \cdot 10^{-5}$	0,1— 0,27	0,3— 0,4	—
9,0	0,5 *	360	—	—	—	—	—	—	—60
—	—	250	—	—	—	—	—	—	—
—	0,5 *	180	0,05	0,05	—	$0,24 \cdot 10^{-5}$	0,22— 0,25	—	—
—15	—	115— 125	—	—	—	$(3-3,5) \cdot 10^{-5}$	—	—	—
20	—	100	—	—	—	$(2-3) \cdot 10^{-5}$	0,25— 0,9	—	—
—	—	110	—	—	—	—	—	—	—

знаменателе — образцы с надрезом (для масс прессовочных фенольных)

Физико-механические и теплофизические свойства т

19. Термопластичные ПК

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение при растяжении σ_p , кгс/см ²	Предел текучести при растяжении $\sigma_{т.р}$, кгс/см ²	Разрушающее напряжение, кгс/см ²		Модуль упругости при растяжении E , кгс/см ²	Относительное удлинение при разрыве
				при статическом изгибе, $\sigma_{из}$	при сжатии, $\sigma_{р.с}$		
Капрон первичный А, В, В П-68Н, П-68С	1,13—1,15	550—700	530	900—1 000	850—1 000	8 000—10 000	100
Полиамид АК-7	1,13—1,15	500—600	570	800—900	700—900	11 000—12 000	10
Капролон В	1,14	700—730	—	800—900	700—900	11 000—12 000	10
Анид	1,16	900—950	—	1 200—1 500	1 200—1 250	20 600—23 100	20
Полиформальдегид стабилизированный А, В, В	1,14—1,16	700—1 000	—	800—1 000	700—1 000	—	50—10
Сополимер формальдегида СФД, СТУД	1,4—1,41	580—620	—	800—900	—	25 000—30 000	12—30
Поликарбонат (дифлон)	1,2	600—700	630	1 000—1 100	800—900	22 000—24 000	20—10
Дифлон СТН (25% стекловолокна)	1,2	900	—	—	—	—	5
Дифлон КА (модифицирован графитом)	1,2	670—780	—	1 000—1 100	800—900	—	50
Полиметилметакрилат литьевой ЛСМ-1	1,12—1,18	748	—	997	—	—	5
ЛСМ-2	1,2—1,8	745	—	927	—	—	6
Стекло органическое СОЛ	1,2	775	—	1 195	—	30 600	23
СТ-1	1,19	710	—	990	—	29 000	3,1
2-55	1,2	830	—	1 010	—	30 900	20
Т-2-35	1,2	780	—	1 180	—	32 100	4,1
Полиариат Д-3	1,2	1 080	—	1 550	—	39 800	12
	1,2	925	—	1 210	—	41 600	2,1
	1,2	1 055	—	1 760	—	39 200	10
	1,2	1 000	—	1 200	—	40 800	3,1
	1,2	850—900	—	1 000—2 000	900—1 200	6 000—7 000	10

* Теплостойкость по Вика.

** Водопоглощение за 10 сут.

Примечание. Всяку данные в числителе для ориентирования

пластичных пластмасс средней прочности (табл. 19)

массы средней прочности

Ударная вязкость α , кгс·см/см ²	Твердость при заданной нагрузке Н, кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Температура плавления, °C	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	Удельная теплоемкость, ккал/(кг·°C)	Морозостойкость (температура хрупкости), °C	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·ч·°C)
100—130	10—12	1,5—5	210—218	50—55	$(12—14) \cdot 10^{-5}$	—	—20	0,24
100—120	10—15	3,3—3,7	213—220	55—60	$(11—12) \cdot 10^{-5}$	0,4—0,5	—60	0,18—0,2
100—120	10—15	1,3	240—243	60	$(10—12) \cdot 10^{-5}$	0,4—0,5	—	0,2—0,22
100—160	20—25	1,5	—	75	$10 \cdot 10^{-5}$	—	—50	—
1—30	—	0,5—0,6	—	65	$10 \cdot 10^{-5}$	—	—60	0,25
75—130	20—25	3,5	170—180	120	$8,1 \cdot 10^{-5}$	0,35	—60	0,2
80	—	—	160—170	150—155 *	—	—	—60	—
20—140	15—16	0,2	235—275	120—130	$6 \cdot 10^{-5}$	0,28	—100	0,17
30	15—16	—	—	—	—	—	—	—
20—140	16	—	—	—	—	—	—	—
18,9	16,6	0,7	—	94	—	—	—	—
16,7	14,8	0,6	—	94	—	—	—	—
25,5	21,1	—	150—160	—	$7,1 \cdot 10^{-5}$	0,300	—	0,158
13,0	21,5	—	—	—	—	—	—	—
33,3	23,7	1,6 **	>180	—	$7,7 \cdot 10^{-5}$	0,413	—	0,156
13,8	23,7	—	—	—	—	—	—	—
32	23,7	2,4 **	180—190	—	$6,9 \cdot 10^{-5}$	0,404	—	0,160
14,8	29,9	—	—	—	—	—	—	—
28,9	—	2,3 **	>230	—	$7,56 \cdot 10^{-5}$	0,375	—	0,155
15,0	27,4	—	—	—	—	—	—	—
1—80	20—25	0,02	260—275	210*	—	—	—100	—

*стекла, в знаменателе — для неориентированного

**Изменение свойств реактопластов
низкой прочности под действием
внешних факторов (рис. 13 и табл. 20)**

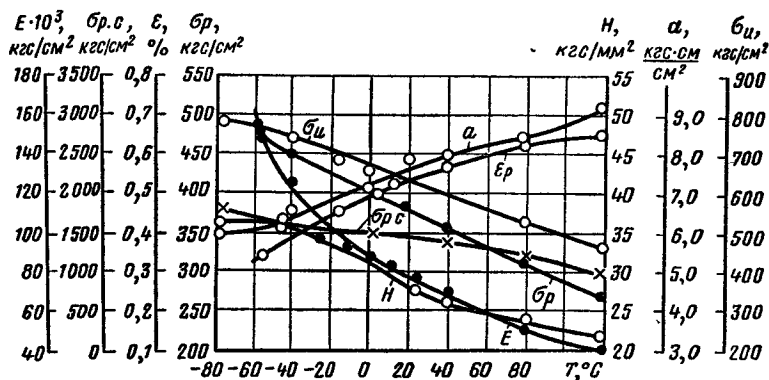


Рис. 13. Зависимость характеристик механических свойств массы прессовочной фенольной У2-301-07 от температуры:

E — модуль упругости, другие обозначения — см. рис. 12

**20. Атмосферное старение массы прессовочной фенольной 03-010-02
в жарком сухом климате**

Показатели	Продолжительность старения, мес				
	0	6	12	24	60
$\sigma_{\text{н}}$, кгс/см ² . .	675	760	777	729	675
α , кгс·см/см ²	4,8	4,7	5,4	5,4	4,8
H , кгс/мм ² . .	21,3	41,0	41,8	36,9	37,7

21. Изменение характеристик свойств полиамидов при старении в теплом влажном климате

Характеристика	Продолжительность старения, мес.														
	0	1	3	6	12	0	1	3	6	12	0	1	3	6	12
	Капрон Б					АК-7					П-68				
σ_p , кгс/см ²	762	654	402	324	309	802	610	433	155	337	585	502	201	172	240
σ_d , кгс/см ²	1090	508	460	444	503	1092	520	438	289	456	790	579	396	293	473
α , кгс·см/см ²	144	144	79	5,7	10,2	158	115	3,8	2,7	7,5	97	111	5,9	1,8	—
ε_p , %	80	402	242	70	60	283	296	230	—	65	212	313	—	—	5

22. Изменение характеристик свойств полиамидов при тепловом старении

Характеристика	Темпера- тура, °C	Продолжительность старения, сут.																
		0	2	5	15	30	40	0	2	5	15	30	40	0	2	5	15	30
		Капрон						АК-7						П-68				
σ_p , кгс/см	70	762	844	884	748	—	710	802	760	776	744	—	741	585	712	621	629	662
	100	762	836	884	847	—	713	802	850	822	800	—	788	585	723	626	632	597
	140	762	379	296	237	193	—	802	347	279	230	195	—	585	126	199	238	126

[illegible]

Характеристика	Продолжительность старения, сут.																	
	0	2	5	10	20	30	0	2	5	10	20	30	0	2	5	10	20	30
	Капрон Б						АК-7						П-68					
σ_p , кгс/см ² . . .	762	—	672	799	652	717	802	788	762	855	857	804	585	434	418	317	333	297
σ_H , кгс/см ² . . .	1090	1092	1273	1150	1265	1177	1092	1100	1292	1150	995	1127	585	434	418	317	333	297
a , кгс·см/см ² . . .	144	152	155	149	30	10	153	115	42	85	130	89	790	855	882	866	916	870
ε_p , %	80	62	117	131	146	—	75	180	4	4	4	4	212	33	5	2	20,3	27
																	2	2

24. Изменение свойств полиамидов при старении в умеренно холодном климате

Характеристика	Продолжительность старения, мес.														
	0	1	3	6	12	0	1	3	6	12	0	1	3	6	12
	Капрон Б					АК-7					П-68				
σ_p , кгс/см ² . . .	762	587	499	372	358	802	514	512	397	354	585	602	426	302	215
σ_H , кгс/см ² . . .	1090	622	465	475	438	1092	653	468	488	464	790	605	533	597	581
a , кгс·см/см ² . . .	144	101	100	64,7	8,9	158	96	94	96	93,8	97	115	94,2	101	93,5
ε_p , %	80	229	280	160	198	283	262	250	100	205	212	256	143	—	16

25. Зависимость характеристик свойств поликарбоната (дифлон) от температуры

Характеристика	Температура, °C						
	-54	-30	24	50	70	100	135
σ_p , кгс/см ²	980	868	662	553	476	390	280
E , кгс/см ²	28 000	26 250	24 500	21 000	—	—	—

26. Изменение характеристик свойств поликарбоната (дифлон) при тепловом старении

Характеристика	Температура, °C	Продолжительность старения, сут						
		0	5	10	20	30	90	120
σ_p , кгс/см ²	80	434	364	305	379	383	300	335
	100	434	216	276	241	259	231	174
	130	434	293	309	281	242	56,5	38
	150	434	156	121	42,4	—	—	—

27. Изменение характеристик свойств поликарбоната (дифлон) при световом старении

Характеристика	Продолжительность старения, сут					
	0	5	10	20	30	90
σ_p , кгс/см ²	434	303	289	266,8	281	178

28. Долговечность органических стекол

Характеристика	Марка оргстекла			
	СОЛ	СТ-1	2-55	Т-2-55
σ_p , кгс/см ²	~400	~380	~360	~370
Средняя долговечность при напряжении 100 кгс/см ² , ч	>3000	>1000	>1000	>1000
Температура, °C	60	80	100	100

29. Изменение характеристик свойств органических стекол (номинальной толщиной 10 мм) при ускоренном тепловом старении (в течение 5 ч)

Характеристика	Ст-1		2-55		Т-2-55		
	Исходные данные	После прогрева при 160° С	Исходные данные	После прогрева при 180° С	Исходные данные	После прогрева при 200° С	После прогрева при 230° С
σ_p , кгс/см ²	892	814	995	1 000	1 014	1 030	605
ε_p , %	5,9	7,2	3,9	4,4	4,0	4,8	1,8
α , кгс·см/см ²	13,2	14,8	14,6	17,9	15,5	18,2	9,6
E , кгс/см ²	30 400	30 700	37 800	37 200	36 900	38 000	36 100
Светопрозрачность, %	92,1	92,1	91,8	91,5	90,6	91,2	79,8
Температура размягчения, °С	121	115	138,5	128	135,5	125	121,5

30 Изменение характеристик свойств органических стекол (номи

Характеристика	СОЛ *					СТ-1 *			
	0	2	4	10	15	0	2	3	5
	Продолжительность								
σ_p , кгс/см ²	$\frac{746}{711}$	$\frac{675}{692}$	$\frac{—}{627}$	$\frac{587}{—}$	$\frac{589}{—}$	$\frac{860}{—}$	$\frac{741}{—}$	$\frac{719}{—}$	$\frac{760}{—}$
$\sigma_{p, a}$, кгс/см ²	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ε_p , %	—	$\frac{3,6}{3,9}$	$\frac{—}{2,6}$	$\frac{1,6}{—}$	$\frac{2,1}{—}$	$\frac{4,1}{—}$	$\frac{4,1}{—}$	$\frac{3,9}{—}$	$\frac{3,3}{—}$
H , кгс/мм ²	$\frac{22,8}{20,6}$	$\frac{20}{22,0}$	$\frac{19,8}{21,6}$	$\frac{19,4}{—}$	$\frac{21,4}{—}$	$\frac{24,0}{—}$	—	$\frac{25,6}{—}$	$\frac{21,8}{—}$
Светопрозрачность, %	$\frac{93,4}{93,2}$	$\frac{91,0}{91,9}$	$\frac{—}{90,2}$	$\frac{89,3}{—}$	$\frac{82,6}{—}$	$\frac{92,2}{—}$	$\frac{91}{—}$	$\frac{90,8}{—}$	$\frac{91,3}{—}$
Температура размягчения, °С	$\frac{91}{92,5}$	$\frac{91}{90}$	$\frac{95}{95}$	$\frac{97,5}{—}$	$\frac{93,0}{—}$	$\frac{116,0}{—}$	$\frac{114}{—}$	$\frac{112}{—}$	$\frac{109}{—}$

* Листы органических стекол были закреплены вертикально

** За указанное время «серебро» на поверхности листов обнаружено не

Примечание. В числителе — данные для листового материала
1 ч при 145° С (СТ-1) и при 165—170° С (2-55 и Т-2-55)

нальной толщиной 100 мм) в процессе атмосферного старения *

10	СТ-1			2-55				Т-2-55		
	0	2	3	0	1	2	3	0	1	2
старения, год**										
$\frac{767}{-}$	$\frac{861}{891}$	$\frac{749}{769}$	$\frac{779}{769}$	$\frac{1075}{1100}$	$\frac{883}{886}$	$\frac{802}{858}$	$\frac{678}{771}$	$\frac{990}{-}$	$\frac{698}{-}$	$\frac{401}{-}$
$\frac{1538}{1468}$	$\frac{1303}{1315}$	$\frac{1403}{1350}$	$\frac{1865}{1824}$	$\frac{1738}{1708}$	$\frac{1617}{1592}$	$\frac{1624}{1573}$	$\frac{2012}{-}$	$\frac{1750}{-}$	$\frac{1806}{-}$	
$\frac{3,9}{-}$	$\frac{4,7}{4,8}$	$\frac{5,1}{6,0}$	$\frac{4,1}{3,9}$	$\frac{4,0}{3,7}$	$\frac{3,5}{3,5}$	$\frac{3,9}{3,3}$	$\frac{1,4}{1,6}$	$\frac{2,3}{-}$	$\frac{1,4}{-}$	$\frac{0,3}{-}$
$\frac{22}{-}$	$\frac{23,3}{23,7}$	$\frac{22,4}{22,4}$	$\frac{21,3}{22,4}$	$\frac{27,8}{28,4}$	$\frac{24,4}{26,8}$	$\frac{25,2}{24,8}$	$\frac{22,4}{20,2}$	$\frac{27,8}{-}$	$\frac{25,2}{-}$	$\frac{25,0}{-}$
$\frac{86,2}{-}$	$\frac{91,7}{92}$	$\frac{88,9}{90}$	$\frac{90,1}{91}$	$\frac{91,8}{92}$	$\frac{89,9}{89,8}$	$\frac{88,3}{87,5}$	$\frac{88,6}{89,0}$	$\frac{91}{-}$	$\frac{90,6}{-}$	$\frac{89,8}{-}$
$\frac{107,5}{-}$	$\frac{116,5}{116,0}$	$\frac{110,0}{115,5}$	$\frac{111,0}{111,5}$	$\frac{137}{136}$	$\frac{127}{123}$	$\frac{122}{123}$	$\frac{121,5}{117,5}$	$\frac{136,5}{-}$	$\frac{127,5}{-}$	$\frac{126,0}{-}$

было

в состоянии поставки в знаменателе — для материала, прогретого в течение

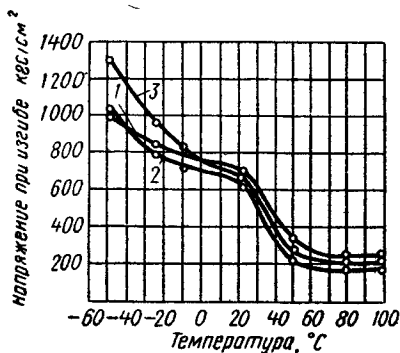


Рис. 14. Зависимость напряжения при изгибе полиамидов от температуры:

1 — ПА-68; 2 — капрон; 3 — АК-7

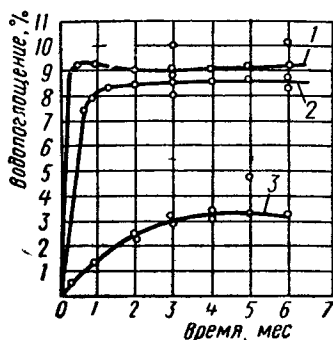


Рис. 15. Водопоглощение полиамидов:

1 — АК-7; 2 — капрон; 3 — ПА-68

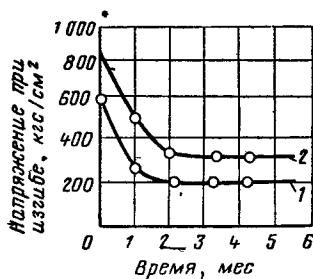


Рис. 16. Зависимость напряжения при изгибе полиамидов от времени пребывания в воде:

1 — капрон; 2 — ПА-68

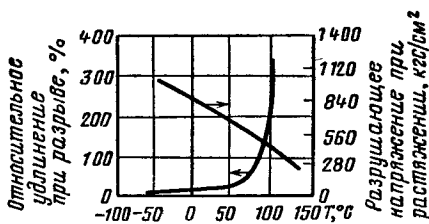


Рис. 17. Зависимость характеристик механических свойств полиформальдегида от температуры

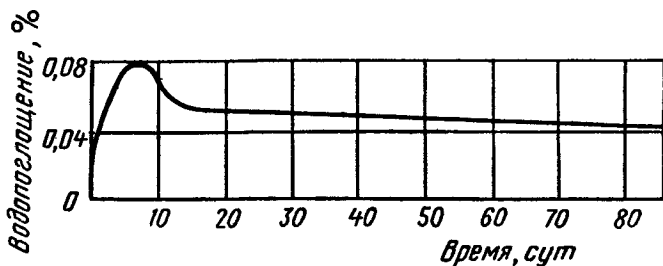


Рис. 18. Зависимость водопоглощения полиформальдегида от времени

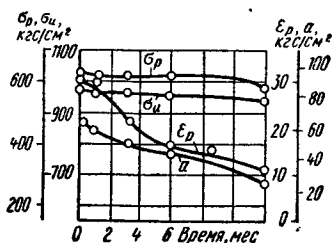


Рис. 19. Изменение характеристик механических свойств сополимера СФД при атмосферном старении в условиях Москвы:

σ_p — разрушающее напряжение при растяжении; σ_n — напряжение при изгибе; ϵ_p — относительное удлинение при растяжении; α — ударная вязкость (шкалы слева направо: σ_p ; σ_n ; ϵ_p ; α)

Рис. 20. Изменение характеристик механических свойств полиформальдегида при атмосферном старении в условиях Москвы (обозначения — см. рис. 19)

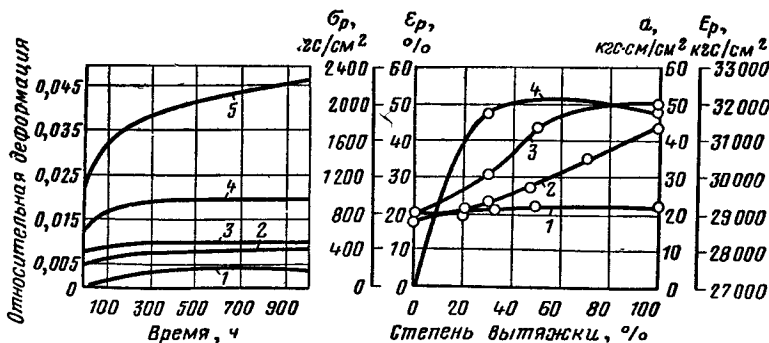
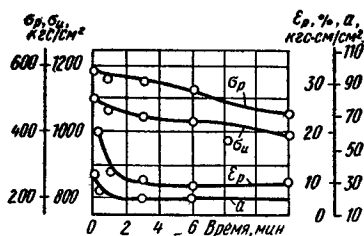


Рис. 21. Ползучесть поликарбоната при различных напряжениях:

1 — 39 кгс/см² при 100° С; 2 — 78 кгс/см² при 100° С; 3 — 228 кгс/см² при 25° С; 4 — 156 кгс/см² при 100° С; 5 — 195 кгс/см² при 100° С

Рис. 22. Зависимость характеристик механических свойств органических стекол от степени ориентации:

1 — разрушающее напряжение при растяжении σ_p ; 2 — ударная вязкость α ; 3 — модуль упругости при растяжении E_p ; 4 — относительное удлинение при разрыве ϵ_p

Физико-механические и теплофизические свойства тер

31. Термореактивные пластмассы

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение			Сопротивление рас- калыванию S_p , кгс/см	Модуль упругости при растяжении E , кгс/см ²	Относительное удли- нение при разрыве ϵ_D , %
		при растяже- нии σ_p , кгс/см ²	при сжатии σ_p с', кгс/см ²	при статиче- ском изгибе $\sigma_{из}$, кгс/см ²			
АГ-4В	1,7— 1,9	800	1 300	1 200	—	—	—
ДСВ-2-Р-2М, Л	1,7— 1,85	—	1 300	1 600	—	—	—
О	1,7— 1,85	800	1 300	2 300	—	—	—
П	1,7— 1,85	—	1 300	2 800	—	—	—
ДСВ-4-Р-2М; Л	1,7— 1,85	—	1 300	1 200	—	—	—
О	1,7— 1,85	—	1 300	2 000	—	—	—
П	1,7— 1,85	—	1 300	2 700	—	—	—
Текстолит конструк- ционный	1,3— 1,4	1000 *	2 500 1 500	1 600	125	100 000	1
ПТК	1,3— 1,4	850 *	2 300 1 400	1 450	125	95 000	1
ПТ	1,3— 1,4	650 *	2 000 1 200	1 200	125	65 000	1
ПТ-1	1,3— 1,4	—	2 000 1 200	—	320	—	—
Текстолит металлурги- ческий В	1,3— 1,4	900 *	2 000 1 000	1 200	—	—	—
Текстолит графитиро- ванный	1,3— 1,4	500 *	—	1 300	—	—	—
Текстолит гибкий, про- кладочный МА	1,3— 1,4	800— 1 000	—	800— 1 400	150— 200	—	—
Гетинакс листовой А, В, В, Вс, Г, Д, Ав, Гв, Вв, Дв, Вв	1,68— 1,8 1,39— 1,42	—	1 300	1 400	—	—	—
Стекловолокнонат П-5-2	—	950	—	1 600	—	—	—
Прессматериал ПМ-67	—	—	—	—	—	—	—

* По основе

** Теплостойкость по Вика

Примечание. Для σ_p в числителе — данные для нагрузки, пер

реактивных пластмасс средней прочности (табл. 31)
средней прочности

Ударная вязкость a , кгс-см/см ²	Твердость при за- данной нагрузке H , кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент ли- нейного расшире- ния, $1/°C$	Коэффициент теп- лопроводности, ккал/(м·ч·°C)	Удельная теплоем- кость, ккал/(кг·°C)	Морозостойкость, °C
30	26—30	0,2	280	$(1=1,5) \cdot 10^{-5}$	0,39	—	—60
45	—	—	280	—	—	—	—
60	—	—	280	—	—	—	—
80	—	—	280	—	—	—	—
35	—	—	280	—	—	—	—
50	—	—	280	—	—	—	—
70	—	—	280	—	—	—	—
35	25—35	0,8	125	$(3,3-4,1) \cdot 10^{-5}$	0,2—0,29	0,35— 0,36	—
35	25—35	1,2	125	$(3,3-4,1) \cdot 10^{-5}$	0,2—0,29	0,35— 0,36	—
35	28—32	1,4	120	$(3,3-4,1) \cdot 10^{-5}$	0,2—0,29	0,35— 0,36	—
—	—	0,7	120	—	—	—	—
30	—	0,2	120	—	—	—	—
30	—	—	120	—	—	—	—
3=15	—	—	150	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—	—	—
50	24,9— 29,5	0,3	270— 290 **	—	—	—	—

ендикулярной к слоям, в знаменателе — параллельно слоям.

Изменение свойств термореактивных пластмасс средней прочности под влиянием внешних факторов (рис. 23 и табл. 32—33)

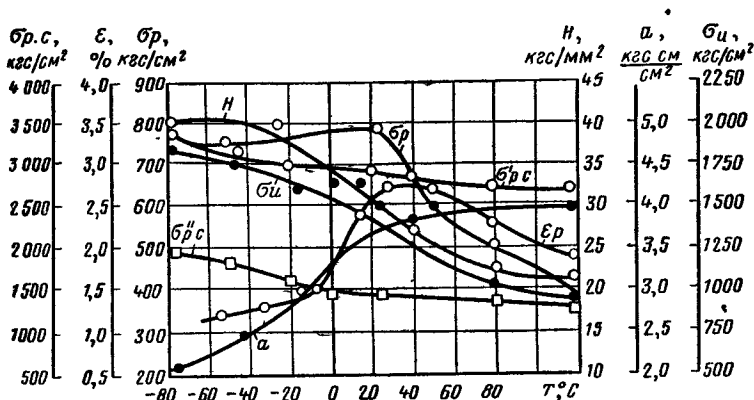


Рис. 23. Зависимость характеристик механических свойств текстолита от температуры:

$\sigma'_{р.с}$ — разрушающее напряжение при сжатии поперек слоев, $\sigma''_{р.с}$ — разрушающее напряжение при сжатии вдоль слоев (другие обозначения см. рис. 12)

32. Изменение характеристик свойств материала АГ-4В при тепловом старении

Характеристика	Температура, °C	Продолжительность старения, сут.						
		0	30	60	90	120	270	360
σ_p , кгс/см ²	60	962	785	639	791	747	924	885
	90	962	740	746	—	1003	902	1031
	120	962	804	832	891	729	770	872
	150	962	674	602	636	515	652	331
	200	962	—	—	386	—	49,7	46,5

Продолжение табл. 32

Характери- стика	Темпера- тура, °С	Продолжительность старения, сут.						
		0	30	60	90	120	270	360
кгс/см²	60	2138	1682	1512	1412	1388	1530	1622
	90	2138	1456	1213	—	1050	902	1031
	120	2138	1531	1230	1210	1286	2190	1953
	150	2138	2089	1663	853	1264	2160	1946
	200	2138	—	—	779,6	—	157	127
кгс·см/см²	60	57,2	36,7	52,4	51,0	65,7	46,6	48,2
	90	57,2	43,8	29,1	—	26,1	23,1	28,6
	120	57,2	23,8	26,0	20,5	25,6	42,0	38,6
	150	57,2	13,3	37,8	24,3	18,9	29,7	27,4
	200	57,2	—	—	32,5	—	36,8	30,0
кгс/мм²	60	46,5	43,4	42,3	42,5	45,2	38,4	48,8
	90	46,5	37,4	54,5	—	39,6	52,0	57,8
	120	46,5	56,5	52,7	40,3	53,1	46,5	53,5
	150	46,5	45,9	53,8	50,9	40,4	44,8	51,6
	200	46,5	—	—	14,4	—	9,2	10,1

33. Изменение характеристик свойств пресматериала АГ-4В при атмосферном старении

Характеристика	Продолжительность старения, мес				
	0	6	24	48	60
кгс/см ²	962 962	—	645 1014	786 925	722 820
кгс/см ²	2138 2138	1606	1002 1380	1590 835	854 1301
кгс·см/см ²	52,7 52,7	42,5	32,6 43,8	23,0 42,0	41,0 59,7
кгс/мм ²	46,5 46,5	41,3	43,5 38,2	42,4 40,5	44,9 38,8

Примечание В числителе — данные для умеренно холодного климата, в знаменателе — для жаркого сухого климата

Физико-механические и теплофизические свойства термопластичных полимеров (табл. 34)

34. Термопластичные и терморезистивные полимеры

Платформа	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение, кгс/см ²			Сопротивление растяжению S _p , кгс/см	Модуль упругости при растяжении E, кгс/см ²
		при растяжении σ_p	при статическом изгибе $\sigma_{из}$	при сжатии $\sigma_{сж}$		
Термо						
Стеклонаполненный капрон КПС-30	1,3—1,32	1 300—1 600	2 100—2 500	1 100—1 200	—	71 000
Стеклонаполненный полиамид П68С-30	1,28—1,3	1 200—1 400	1 800—2 200	1 100—1 200	—	64 000
Стеклонаполненный анид	1,40	1 490	2 100—2 200	1 280	—	—
Реакто						
Стекловолокнистый анизотропный материал. СВАН-Р-2М	1,8—2,0	3 500	5 000	4 500 (поперек слоев)	—	—
СВАН-БФ	1,8—2,0	3 500	5 000	3 500	—	—
СВАН-ЭН	1,8—2,0	4 500	6 500	4 500	—	—
СВАН-ТФЭ-Р	1,8—2,0	3 500	5 000	3 500	—	—
СВАН-ЭР	1,8—2,0	4 500	7 000	4 500	—	—
Стекловолокнит: АТ-4С	1,7—1,9	5 000	2 500	1 000 ** 2 000	0 ** 150	—
АГ	—	—	—	—	—	—
Прессматериалы: П-50С	2,0	2 000	1 800	—	—	—
П-75С	2,0	2 500	1 500	—	—	—
Стеклопластик П-2-7С	—	9 000—12 500	7000—8 000	3 000—4 000	—	—
Стекловолокнит: П-2-6В	2,0	—	1 500	1 000	—	—
П-2-6С	2,0	9 000	5 000	2 500	—	—
Прессматериалы: П-2-1	—	10 000—11 000	—	3 400—3 500	—	—
П-2-5	2,0	10 000	6 500	4 000	—	—
Прессматериалы: 33-18-В	1,9	—	2 000	1 500	—	—
33-18-С	1,9	9 000	6 000	—	—	—
Стеклотекстолит конструкционный: КАСТ	1,9	3 300 * 2 100	—	—	—	206 000 * 123 000
КАСТ-В	1,85	3 200 * 2 000	1 500	1 100 ** 3 500	—	200 000 * 110 000

ТИЧНЫХ И ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ПЛАСТМАСС ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ (14—37)

ые пластмассы высокой прочности

Удлинение при разрыве ϵ_p , %	Ударная вязкость a , кгс см/см ²	Твердость при заданной нагрузке H , кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м ч °C)	Удельная теплоемкость, ккал/(кг °C)	Морозостойкость, °C
<i>ласты</i>								
2,5	20—30	20—21	1,3—1,8	195—208	$(10-12) \cdot 10^{-5}$	I	I	I
1,3	20	20—21	0,25—0,35	180—200	$(10-12) \cdot 10^{-5}$	I	I	I 60
2,0	28—30	21,2	I	250—260	I	I	I	I
<i>ласты</i>								
I	180	I	0,10	300	I	I	I	I
I	300	I	0,5	65	I	I	I	I
I	500	I	0,15	200	I	I	I	I
I	400	I	0,15	250	I	I	I	I
I	500	I	0,15	200	I	I	I	I
I	150	I	0,2	280	$(7-10) \cdot 10^{-5}$	0,39	I	I 60
I I I	400 500	I I I	I I	120	I I I	I I I	I I I	I I I
I I I	450—600	I I I	I I	I I	I I I	I I I	I I I	I I I
I I I	150 400	I I I	I I	220 280	I I I	I I I	I I I	I I I
I I I	600—700	I I I	I I	I I	I I I	I I I	I I I	I I I
I I I	I	I I I	I I	I I	I I I	I I I	I I I	I I I
I I I	200 600	I I I	I I	180 190	I I I	I I I	I I I	I I I
0,5—1,0	80 * 60	24—35	I	I	I	I	I	I
I	65 * 50	I	2—3	245—280	$8,3 \cdot 10^{-5}$	0,244	I	I

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение, кгс/см ²			Сопротивление раскалыванию S_p , кгс/см	Модуль упругости при растяжении E , кгс/см ²
		при растяжении σ_p	при статическом изгибе $\sigma_{изг}$	при сжатии $\sigma_{сж}$, кгс/см ²		
КАСТ-Р	1,85	$\frac{2\ 800^*}{1\ 700}$	—	—	—	—
Стеклотекстолит:						
ВФТ-С	1,85	$\frac{4\ 000^*}{2\ 490}$	3 375	$\frac{1\ 715}{3\ 580}$	190	217 000 *
СКМ-1	1,77	$\frac{1\ 600^*}{—}$	400	—	—	—
СК-ФР	1,8	$\frac{3\ 200^*}{1\ 600}$	1 950	—	—	—
Стеклотекстолит электротехнический листовой:						
СТ	$\frac{1,6}{1,85}$	$\frac{—}{700^*}$	950	—	130	—
СТ-1	$\frac{1,6}{1,85}$	$\frac{—}{750^*}$	1 000	—	—	—
СТЭФ	$\frac{1,6}{1,9}$	$\frac{—}{1\ 750^*}$	2 200	—	250	—
СТЭФ-1	$\frac{1,8}{1,9}$	$\frac{—}{2\ 000^*}$	2 400	—	—	—
Асбестостолит:						
А	1,7	$\frac{650}{1\ 190}$	1 100	$\frac{1\ 260}{3\ 150}$	300	140 000— 200 000
В	1,7	$\frac{650}{1\ 190}$	900	$\frac{1\ 260}{3\ 150}$	300	—
Стеклопластики контактного формования на основе стеклоткани ТЖС-0,7 и полиэфирных смол	1,6	1 870	1 700	960 ** 2 440	—	100 000
Древесно-слозные пластики:						
ДСП-А	—	—	—	—	—	—
ДСП-В	—	$\frac{2\ 600^{***}}{2\ 200}$	$\frac{2\ 800^{***}}{2\ 600}$	$\frac{1\ 800}{1\ 600^{***}}$	150 150 *** 140	300 000 300 000
ДСП-В-а	—	$\frac{3\ 000^{***}}{2\ 500}$	—	$\frac{1\ 850^{***}}{1\ 650}$	160 *** 140	300 000
ДСП-В-э	—	$\frac{2\ 600^{***}}{2\ 200}$	$\frac{2\ 800^{***}}{2\ 600}$	$\frac{1\ 600^{***}}{1\ 550}$	150 *** 140	—
ДСП-В-М (короткельисты)	—	2 000	2 200	1 300	125	—

Продолжение табл. 34

вяз-	Ударная кость α , кгс·см/см ²	Твердость при заданной нагруз- ке H , кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	Коэффициент теп- лопроводности, (ккал/м·ч·°C)	Удельная тепло- емкость, ккал/(кг·°C)	Морозостойкость °C
70 *	—	—	—	—	—	—	—	—
60 *	—	—	—	—	—	—	—	—
105 *	—	—	—	240	7,9·10 ⁻³	0,28—	0,23—	—
85	—	—	—	215	—	0,3	0,25	—
60 *	—	—	—	370	—	—	—	—
55	—	—	—	—	—	—	—	—
90 *	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	—	—	—	—
12—35	30	—	—	185	—	—	—	—
15—45	—	—	—	185	—	—	—	—
40—	—	—	—	185	—	—	—	—
140	—	—	—	—	—	—	—	—
50—	—	—	—	185	—	—	—	—
150	—	—	—	—	—	—	—	—
35	30—45	2	—	—	—	—	—	—
25	28—45	2	—	—	—	—	—	—
191	—	—	—	—	—	—	—	—
80	25	—	—	180	(0,3—0,4)·10 ⁻³	—	—	—
80	25	—	—	180	(0,3—0,4)·10 ⁻³	—	—	—
80	—	—	—	180	(0,3—0,4)·10 ⁻³	—	—	—
80	25	—	—	180	(0,3—0,4)·10 ⁻³	—	—	—
60	—	25	—	180	((0,3—0,4)·10 ⁻³	—	—	—

Пластмасса	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение, кгс/см ²			Сопротивление раскалыванию S_p , кгс/см	Модуль упругости при растяжении E , кгс/см ²
		при растяжении σ_p	при статическом изгибе σ_k	при сжатии σ_{pc}		
ДСП-Б-Т (короткие листы)	—	—	—	—	110	—
ДСП-В	—	1 400 ***	1 800 ***	1 250 ***	140 ***	180 000
ДСП-В-Э	—	1 100	1 500	1 200	130	—
ДСП-В-М (короткие листы)	—	1 300	1 400	1 000	125	—
ДСП-Г (профиль)	—	—	1 500	1 250	140	180 000
ДСП-Г-М (профиль)	—	—	840	1 000	125	—

* В числителе — данные по основе, в знаменателе — по утку.

** В числителе — данные вдоль слоев, в знаменателе — поперек слоев.

*** В числителе — данные для коротких листов, в знаменателе — для

35. Изменение массы (%) образцов из КПС-30 в различных средах при нормальной температуре

Среда	Время, ч		
	24	240	3000
Бензин А-72	0,04	0,07	0,72
Бензин В-70	0,13	0,3	0,99
Дизельное топливо	0,1	0,21	0,83
Веретенное масло	0,03	0,2	0,49

36. Изменение массы образцов из КПС-30 в различных средах при повышенных температурах

Среда	Температура, °С	Время, ч	Изменение массы, %
Бензин А-72	80°	10	0,13
Дизельное топливо	80	10	0,06
Веретенное масло	140	10	—0,31
Машинное масло Су	140	10	—0,1

Продолжение табл. 34

Относительное удлинение при разрыве ε_r , %	Ударная вязкость a_k , кгс см/см ²	Твердость при заданной нагрузке H , кгс/мм ²	Водопоглощение за 24 ч, %	Теплостойкость по Мартенсу, °C	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	Коэффициент теплопроводности, ккал/(м ч °C)	Удельная теплоемкость, ккал/(кг °C)	Морозостойкость, °C
I	70	I	I	180	$(0,3 - 0,4) \cdot 10^{-6}$	—	—	—
I	30	25	I	180	$(0,3 - 0,4) \cdot 10^{-6}$	—	—	I
I	25	I	I	180	$(0,3 - 0,4) \cdot 10^{-6}$	—	—	I
I	30	I	I	180	$(0,3 - 0,4) \cdot 10^{-6}$	—	—	I
I	17	I	I	180	$(0,3 - 0,4) \cdot 10^{-6}$	—	—	I

длинных.

37. Изменение характеристик свойств смолы ЭД-6, отвержденной малеиновым ангидридом, при атмосферном старении

Характеристика	Продолжительность старения, мес.				
	0	1	6	12	24
σ_H , кгс/см ² . .	$\frac{650}{650}$	$\frac{960}{567}$	$\frac{612}{695}$	$\frac{765}{575}$	$\frac{872}{668}$
H , кгс/мм ² . .	$\frac{15,8}{15,8}$	$\frac{12,0}{21,2}$	$\frac{23,1}{22,5}$	$\frac{19,7}{19,4}$	$\frac{16,1}{17,5}$

Примечание В числителе — данные для умеренно холодного климата, в знаменателе — для теплого влажного климата

КЕРАМИКА И СИТАЛЛЫ

Многие керамические материалы благодаря сочетанию ценных эксплуатационных свойств находят все большее применение в различных отраслях машиностроения. Некоторые современные керамические материалы отличаются высокой механической прочностью, которую сохраняют вплоть до температур порядка 1000—1500°C, высокой твердостью, малой истираемостью. Это определило применение некоторых

разновидностей керамики в качестве конструкционного материала для изготовления металлорежущего инструмента, деталей, работающих на истирание при одновременном нагреве, например, фильер для протяжки проволоки и т. д.

Отличительная особенность керамики — хрупкость и соответственно низкий предел прочности при ударном изгибе. Это ограничивает возможности применения керамических изделий.

У керамических материалов, как правило, очень хорошая устойчивость к агрессивным химическим реагентам — кислотам, щелочам и другим активным веществам. Поэтому керамику, а также ситаллы и каменное литье широко применяют для изготовления или футеровки емкостей для химической обработки различных металлов. К химически стойкой керамике относятся фарфор, а также высокоглиноземистая керамика.

Керамика

Окисная керамика

Керамика из чистых окислов Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 (табл. 38) отличается очень высокой прочностью при сжимающих и изгибающих усилиях и сохраняет эту прочность до высоких температур. Керамику из окиси алюминия успешно применяют для изготовления металлорежущих резцов, фильер (валок) для протяжки проволоки.

Наиболее широкое распространение получила из окиси алюминия корундовая керамика, из которой изготавливают резцы, имеющие, как это видно из табл. 39, ряд преимуществ перед металлическими и твердосплавными резцами.

Резцы с пластинками из микролита (табл. 40) находят применение при обработке конструкционных и легированных сталей, различных чугунов и особенно цветных металлов, а также неметаллических материалов (графита, пластмасс, твердых пород дерева). Микролитовые пластинки по форме и размерам соответствуют твердосплавным пластинкам по ГОСТ 17163—71. По физико-техническим и механическим показателям они должны соответствовать ведомственным техническим условиям. Кроме стандартных пластинок по заказу могут быть изготовлены пластинки специальной формы, которые имеют несколько режущих лезвий.

Кроме режущего инструмента из микролита изготавливают волокна для протяжки проволоки и прутков из черных и цветных металлов, направляющих всех видов для прядильных, крутильных, мотальных и других подобных машин, а также сопла для пескоструйных и дробеструйных аппаратов, гидромониторных долот и других деталей, работающих на истирание.

Фарфор

Фарфор — традиционный и широко распространенный керамический материал, который находит применение во многих отраслях техники, в том числе и в машиностроении. В табл. 41 приведены основные свойства различных видов фарфора.

Характеристика	Керамика из окислов		
	Al_2O_3	ZrO_2	MgO
Система кристаллов	Гексагональная	Кубическая (стабилизированная)	Кубическая
Плотность, г/см ³	3,99	5,60	3,60
Твердость по минералогической шкале	9	7	5—6
Температура плавления, °C	2050	2700	2800
Средняя удельная теплоемкость, кал/(г·°C)	0,260 (20—1000° C)	0,140 (20—1000° C)	0,233 (20° C) 0,276 (900° C)
Коэффициент теплопроводности (при условно нулевой пористости), кал/(см·с·°C)	0,0723 (100° C) 0,0218 (600° C) 0,0131 (1400° C)	0,00466 (100° C) 0,00501 (600° C) 0,00533 (1400° C)	0,0823 (100° C) 0,0263 (600° C) 0,0138 (1400° C)
Коэффициент термического расширения (средний линейный) $\alpha \cdot 10^6$; 1/°C	8,4 (20—1000° C)	7,7 (70—1000° C)	13,5 (20—1000° C)
Предел прочности, кгс/мм ² : при сжатии	300 (20° C) 150 (400° C) 90 (1000° C) 10 (1500° C) 5 (1600° C)	210 (20° C) 120 (1000° C) 80 (1200° C) 13 (1400° C) 2 (1500° C)	140 (20° C) 150 (400° C) 115 (1000° C)

Продолжение табл. 38

Характеристика	Керамика из окислов		
	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	MgO
при растяжении	26 (10° C)	14,85 (20° C)	9,85 (25° C)
	24 (800° C)	11,25 (885° C)	10,70 (400° C)
	13 (1200° C)	9,30 (1030° C)	11,25 (600° C)
	3 (1400° C)	8,42 (1200° C)	10 (800° C)
	1,1 (1460° C)	1,3 (1540° C)	5,63 (1200° C)
при изгибе	15,2 (20° C)	23,3 (20° C)	4,22 (1300° C)
	9,5 (1000° C)	16 (1000° C)	11,0 (20° C)
	7,6 (1200° C)	12,2 (1200° C)	10 (1000° C)
	6,1 (1350° C)	9,5 (1350° C)	8,7 (1200° C)
	3,6 (1500° C)	7,2 (1500° C)	7,5 (1350° C)
Микротвердость, кгс/мм ²	1,7 (1600° C)	5,4 (1600° C)	5,5 (1500° C)
	2000—3000	700—900	4,0 (1600° C)
	3,82 (20° C)	1,72 (20° C)	
	3,70 (400° C)	1,30 (465° C)	2,14 (25° C)
	3,45 (800° C)	1,16 (850° C)	2,10 (400° C)
Термическая стойкость	2,75 (1200° C)	1,07 (1225° C)	1,93 (800° C)
	1,50 (1500° C)	0,96 (1360° C)	1,47 (1000° C)
	Хорошая	Удовлетворительная	Удовлетворительная

39. Характеристики свойств разных инструментальных материалов

Характеристика	Микролит (ЦМ-332)	Твердый сплав			Быстро режущая сталь Р18
		ВК8	T15K6	T60K6	
HRA	92—93	88	90	91	83
Предел прочности, кгс/мм ² . . .	До 45	130	110	90	370
при изгибе	До 500	330	400	400	380
при сжатии	1200	850	850	900	600
Красностойкость, предел тем- пературы эксплуатации, °C	До 3,96	14,4	11,1	8	8,8
Плотность кажущаяся, г/см ³	0,042	0,14	0,065	—	0,05
Теплопроводность кал/(см·с·°C)	85	60	50	—	—
Коэффициент линейного рас- ширения $\alpha \cdot 10^7$, 1/°C (20— 800° C)					

40. Размеры (мм) режущих пластинок из микролита

№ пластины	a	b	c	l	d	h	Масса, г
0109	14	10	5,5	—	—	—	2,6
0111	16	10	5,5	—	—	—	3,0
0113	18	12	7,0	—	—	—	5,1
0121	30	16	9,5	—	—	—	15,5
0203	10	8	3	—	—	—	0,8
0223	14	12	4,5	—	—	—	2,7
0225	14	12	6,0	—	—	—	3,5
0227	18	16	6,0	—	—	—	6,1
0229	18	16	8,0	—	—	—	7,8
0725-0726	15	9	5,0	9,0	—	—	1,7
0729-0730	20	11	6,0	11,0	—	—	2,3
0733-0734	25	14	8,0	14,0	—	—	3,5
1007-1008	12	8	4,5	8,0	—	—	1,7
1011-1012	16	10	5,5	10,0	—	—	2,4
1015-1016	20	12	7,0	12,5	—	—	4,6
1305	5	15	5	—	—	—	1,0
1307	6	15	6	—	—	—	1,9
1309	8	18	7	—	—	—	2,9
1311	10	20	8	—	—	—	3,5
1207	—	—	—	35	28,6	10	14,0
1209	—	—	—	35	32,0	10	18,0

Химически стойкая керамика

Химически стойкая керамика (табл. 42) находит применение для изготовления или футеровки различных емкостей, в которых осуществляется химическая обработка металлов. Химически стойкая керамика отличается малой пористостью, полной непроницаемостью для жидкостей, достаточно большой механической прочностью, а также удовлетворительной термостойкостью. Химически стойкую керамику подразделяют на футеровочную, насадочную и аппаратурную.

41. Важнейшие характеристики свойств фарфора

Характеристика	Вид фарфора		
	Нормальный высоко- вольтный	Кварц- полево- шпатный	Глинозе- мистый
Плотность кажущаяся, г/см ³	0	0	0
Водопоглощение, %	0	0	0
Предел прочности при растяжении, кгс/мм ² :			
неглазурованный фарфор	3,4	4,4	5,9
глазурованный фарфор	3,5—5,7	6,5	7,8
Предел прочности при статическом изгибе, кгс/мм ²	6—9 7—10	9 11	12,4 15,5
Предел прочности при динамическом изгибе неглазурованного фарфора, кгс/мм ²	0,017—0,020	0,020	0,032
Удельное объемное сопротивление при 20° С, Ом·см	10 ¹² —10 ¹³	5·10 ¹²	6,7·10 ¹²

42. Характеристики основных свойств некоторых керамических химически стойких масс

Характеристика	Вид керамики		
	Глино- шамотная с грубо- зернистой структу- рой	Глино- шамотная с тонко- зернистой структу- рой	Фарфор
Плотность кажущаяся, г/см ³	2—2,2	2,10—2,25	2,3—2,4
Водопоглощение, %	2—10	0,2—3	0—0,2
Предел прочности, кгс/мм ² :			
при сжатии	3—9	8—15	40—50
при изгибе	1—2	2,5—7	5,0—12,0
при растяжении	0,6—1	2,5—2,5	3,0—6,0
Кислотостойкость, %	95—98	97—99,5	94,5—99,7
Количество теплоты при нагреве до 350° С и охлаждении при 20° С в во- де	До 20	До 30	Более 15
Коэффициент термического расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С	2,5—5,5	2,5—6,0	4,0—6,0
Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·°С·ч)	0,7—1	1,2—2,4	1,4—1,6

Каменное литье

Каменное литье (табл. 43) — продукт плавки изверженных горных пород (базальт, диабаз и др.), механически прочный, химически стойкий и изнаноустойчивый материал. Каменное литье выпускают в виде изделий для футеровки емкостей, транспортировки агрессивных жидкостей и деталей химической аппаратуры.

43. Свойства основных видов каменного литья

Характеристика	Вид каменного литья		
	Кислото-стойкое и износо-стойкое	Термо-стойкое и износо-стойкое	Кислото-стойкое, износо-стойкое и термо-стойкое
Плотность кажущаяся, г/см ³	2,9—3,0	2,9	2,9
Водопоглощение, %	До 0,1	До 0,15	До 0,1
Твердость по минералогической шкале (Мооса)	7		
Предел прочности, кгс/мм ²			
при сжатии	37—45	33	33
при изгибе	5,8—6,7	4,0	4,0
Коэффициент термического расшире- ния $\alpha \cdot 10^6$, 1/°C	53—71	45	47
Коэффициент теплопроводности, ккал/(м·°C·ч)	0,7—1,0	1,4	0,92
Температура размягчения, °C	980—1000	1040	900
Модуль упругости $E \cdot 10^6$, кгс/см ²	0,9	0,45	—
Кислотостойкость, %, (ГОСТ 473—64)			
в серной кислоте	99,9—99,8	96,1	99,9
в соляной кислоте	97,8—99,7	73,8	99,6

Ситаллы

Ситаллы — неорганические материалы, получаемые путем направленной кристаллизации стекла.

Ситалловые изделия получают двумя способами порошковым методом спекания и кристаллизацией изделий, отформованных методами стекольной технологии. Многие виды изделий из ситалла после их формования и кристаллизации подвергают соответствующей механической обработке для придания им точных геометрических размеров и фактуры поверхности.

Наиболее эффективный метод обработки ситаллов — шлифование их инструментом из естественных и синтетических алмазов. С помощью алмазных инструментов изделия из ситаллов могут быть обработаны до 10—12-го класса чистоты по ГОСТ 2789—73.

Ситаллы классифицируют по применению и содержанию основной кристаллической фазы.

В машиностроении и металлообработке наиболее перспективен класс износостойчивых и химически устойчивых ситаллов, которые содержат в качестве основной кристаллической фазы кордиерит и пироксен.

Изделия из ситаллов разнообразных составов подчиняются ведомственным техническим условиям.

Детали из ситалла можно соединять между собой и с другими материалами, например, металлом или керамикой с помощью стеклокристаллического цемента или клеев и замазок на основе эпоксидной смолы и жидкого стекла. Соединения из стеклокристаллического цемента требуют термообработки при температурах 400—600°C. Эпоксидный

клей после затвердевания при комнатной температуре или легком подогреве можно использовать при температуре до 180°C. Эпоксидный клей стоек к воде, кислотам и различным растворителям. Ситаллы с металлами можно соединять также путем металлизации и последующей пайки

Нанесение покрытий осуществляется вжиганием пасты, испарением и конденсацией металла в вакууме, химическим осаждением металла, напылением

В табл. 44 приведены важнейшие свойства некоторых износостойчивых разновидностей ситаллов

44 Характеристики основных физико-химических свойств некоторых классов ситаллов

Характеристика	Класс ситаллов	
	Магнезиальные	Пироксеновые
Плотность кажущаяся, г/см ³	2,5—2,85	2,8—2,95
Водопоглощение, %	0,02	0
Удельная теплоемкость, ккал/(кг °C)	0,17—0,22	—
Коэффициент теплопроводности, ккал/(м ч °C)	0,8—1,8	—
Температуропроводность, м ² /ч	(1,5—3,4) 10 ⁻³	—
Температура разрушения (термостойкость), °C	До 1000	200
Жаропрочность под нагрузкой, °C	800—1200	1150
Предел прочности, кгс/мм ² при изгибе	14—18	40
Ударная вязкость, кгс см/мм ²	45—105	95
Модуль упругости	9,9—13,2	14
Коэффициент Пуассона	0,25—0,34	—
Микротвердость кгс/мм ²	700—970	970—1050

СОРТАМЕНТ

Болванки, заготовки, прутки, профили

Болванка обжатая. Номинальные размеры и допускаемые отклонения приведены в табл. 45.

Заготовка квадратная (ГОСТ 4693—57*). Номинальные размеры и допускаемые отклонения приведены в табл. 46.

Сталь кованая круглая и квадратная (ГОСТ 1133—71). Стандарт распространяется на кованую сталь круглого и квадратного сечения от 40 до 200 мм. Прутки поставляются длиной не менее 1,5 м — при диаметре круга или стороне квадрата до 50 мм, 1,0 — при диаметре круга или стороне квадрата свыше 50 до 75 мм, 0,75 м — при диаметре круга или стороне квадрата свыше 75 мм. Номинальные размеры и предельные отклонения следующие.

Диаметр или сторона квадрата мм	Предельные отклонения, мм
40; 42; 45, 48, 50	+2,0
52; 55; 58 60, 63; 65, 68, 70	+2,5
73, 75; 78, 80, 83 85	+3,0
90; 95; 100 105	+3,5
110; 115	+4,0
120, 125, 130, 135, 140; 145	+4,5
150	+5,0
155, 160, 165	+6,0
170, 175 180	+7,0
185; 190, 195 200	+8,0

Сталь горячекатаная круглого (ГОСТ 2590—71), квадратного (ГОСТ 2591—71) и шестигранного сечений (ГОСТ 2879—69). Номинальные размеры и допускаемые отклонения приведены соответственно в табл. 47, 48 и 49.

45. Номинальные размеры (мм) и предельные отклонения (мм) болванки обжатой

46. Номинальные размеры (мм) и предельные отклонения (мм) заготовки квадратной

Сторона квадрата	Радиус закругления	Допускаемые отклонения по стороне квадрата
140; (150), 160	20	± 5
(170); 180	25	± 5
190	25	± 6
200; (210)	30	± 6
220	35	± 6
(240); 250	35	± 7
(260), 280	40	± 8
300	45	± 8
320, 360	50	± 10
400; 450	60	± 10

Сторона квадрата	Радиус закругления	Допускаемые отклонения по стороне квадрата
40; 45, 50	7	+1,0; -1,5
56, 60, 63, 70	9	+1,3; -2,0
75; 80; 85; 90	12	+1,6; -2,5
95; 100; 105	15	+1,8; -3,0
110; (115); 120, 125	18	+2,0; -3,5
130 140; 150	21	+2,4; -4,0
160, 170; 180	25	+3,0; -5,0
190, 200	30	+4,0; -6,0
210; 220, 240, 250	35	+5,0; -7,0

47. Сталь горячекатаная круглая

Диаметр, мм	Предельные отклонения (мм) при точности прокатки		
	высокой	повышен- ной	обычной
5; 5,5; 6; 6,3; 6,5; 7; 8; 9	+0,1 -0,2	+0,2 -0,5	+0,3 -0,5
От 10 до 19 через 1 мм	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5
От 20 до 25 через 1 мм	+0,2 -0,3	+0,2 -0,5	+0,4 -0,5
От 26 до 48 через 1 мм	+0,2 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7
50; 52; 53; 54; 55; 56; 58	+0,2 -0,8	+0,2 -1,0	+0,4 -1,0
60; 62; 63; 65; 67; 68; 70; 72; 75; 78	+0,3 -0,9	+0,3 -1,1	+0,5 -1,1
80; 82; 85; 90; 95	+0,3 -1,1	+0,3 -1,3	+0,5 -1,3
100; 105; 110; 115	—	+0,4 -1,7	+0,6 -1,7
120; 125; 130; 135	—	+0,6 -2,0	+0,8 -2,0
От 160 до 200 через 10 мм	—	—	+0,9 -2,5
От 210 до 250 через 10 мм	—	—	+1,2 -3,0

48. Сталь горячекатаная квадратная

Сторона квадрата, мм	Предельные отклонения (мм) при точности прокатки		
	высокой	повышен- ной	обычной
От 5 до 9 через 1 мм	+0,1 -0,2	+0,2 -0,5	+0,3 -0,5
От 10 до 19 через 1 мм	+0,1 -0,3	+0,1 -0,5	+0,3 -0,5
От 20 до 25 через 1 мм	+0,2 -0,3	+0,2 -0,5	+0,4 -0,5
От 26 до 48 через 1 мм	+0,2 -0,5	+0,2 -0,7	+0,4 -0,7
50; 52; 55; 58	+0,2 -0,8	+0,2 -1,0	+0,4 -1,0
60; 63; 65; 70; 75	+0,3 -0,9	+0,3 -1,1	+0,5 -1,1
80; 85; 90; 93; 95	+0,3 -1,1	+0,3 -1,3	+0,5 -1,3
100; 105; 110; 115	—	+0,4 -1,7	+0,6 -1,7
От 120 до 150 через 5 мм	—	+0,6 -2,0	+0,8 -2,0
От 160 до 200 через 10 мм	—	—	+0,9 -2,5

49. Сталь горячекатаная шестигранная

Диаметр вписанного круга, мм	Предельные отклонения по размеру (мм) при точности прокатки		Диаметр вписанного круга, мм	Предельные отклонения по размеру (мм) при точности прокатки	
	обыч-ной	повышен-ной		обыч-ной	повышен-ной
8; 9	+0,3 -0,5	+0,1 -0,3	50; 52; 55	+0,4 -1,0	+0,2 -0,9
10; 11; 12; 13; 14;	+0,3 -0,5	+0,2 -0,3	60; 63; 65; 70; 75	+0,5 -1,1	+0,3 -1,0
15; 16; 17; 18; 19	+0,4 -0,5	+0,2 -0,4	80; 85; 90; 95	+0,5 -1,3	+0,4 -1,2
20; 21; 22; 24; 25	+0,4 -0,5	+0,2 -0,6	100	+0,6 -1,7	+0,5 -1,5
26; 28; 30; 32;	+0,4 -0,7	+0,2 -0,6			
34; 36; 38; 40;					
42; 45; 48					

Примечания: 1. По требованию потребителя поставляют шестигранную сталь следующих размеров: 23; 27; 29; 41; 43; 44; 46; 53; 57 и 67 мм с предельными отклонениями, указанными в таблице по ближайшему меньшему размеру.
2. По соглашению сторон шестигранную сталь поставляют размером более 100 мм.

Сортамент и точность калиброванной круглой, квадратной и шестигранной стали приведен в табл. 50.

50. Калиброванная круглая, квадратная и шестигранная сталь

Номинальный размер (ГОСТ 7417-57), мм	Допускаемые отклонения (—), мм, при классе точности					Номинальный размер <i>a</i> (ГОСТ 8559-57 *) или <i>d</i> (ГОСТ 8560-67), мм
	2а	3	3а	4	5	
3,0	0,014	0,02	0,04	0,06	0,12	3,0
3,1—6,0	0,018	0,025	0,048	0,08	0,16	3,2; 4; 4,5; 5; 5,5; 6,0
6,1—10,0	0,022	0,03	0,058	0,10	0,20	6,3; 7; 8; 9; 10
10,2—13,0	0,027	0,035	0,07	0,12	0,24	11; 12; 13; 14; 15;
13,5—18,0	0,027	0,035	0,07	0,12	0,24	16; 17; 18
16,5—30,0	0,033	0,045	0,084	0,14	0,28	11; 12; 13; 14; 15;
31,0—50,0	—	0,05	0,10	0,17	0,34	16; 17; 18
52,0—65,0	—	0,06	0,12	0,20	0,40	19; 20; 21; 22; 24;
67,0—80,0	—	—	—	0,20	0,40	25; 26; 27; 28; 30
82,0—100,0	—	—	—	0,23	0,46	32; 34; 36; 38; 40;
						41; 42; 45; 46; 48; 50
						53; 55; 56; 60; 63; 65
						70; 75; 80
						85; 90; 95; 100

Примечание. Обозначения: *a* — сторона квадратной стали; *d* — диаметр круглой стали или диаметр угольника для шестигранной стали

Сталь круглая со специальной отделкой поверхности — серебрянка (ГОСТ 14955—69). Стандарт распространяется на круглую холодно-тянутую сталь со специальной отделкой поверхности (шлифованную, полированную и т. п.) — серебрянку

Существуют следующие группы отделки поверхности: А — полированная с шероховатостью поверхности не ниже 9-го класса; Б — шлифованная и полированная с шероховатостью не ниже 8-го класса; В — шлифованная и полированная с шероховатостью не ниже 7-го класса; Г — шлифованная с шероховатостью поверхности не ниже 6-го класса; Д — шлифованная или ободранная в процессе изготовления (шероховатость поверхности не проверяется).

Диаметр серебрянки и предельные отклонения приведены в табл. 51. Серебрянку диаметром от 0,2 до 0,6 мм поставляют в мотках или катушках, диаметром от 0,6 до 30 мм в прутках длиной от 1,0 до 3,5 м в зависимости от диаметра

51. Диаметр и предельные отклонения по диаметру серебрянки

Диаметр, мм	Предельные отклонения (—), мм, при классе точности				
	2	2а	3	3а	4
От 0,2 до 0,3 через 0,05	0,005	0,008	0,013	0,020	—
От 0,35 до 0,6 через 0,05	0,06	0,010	0,015	0,025	—
От 0,65 до 0,95 через 0,05	0,07	0,012	0,018	0,03	—
От 1 до 2,15 через 0,05	0,01	0,014	0,02	0,04	0,06
От 2,2 до 3,0 через 0,05	0,01	0,014	0,02	0,04	0,06
От 3,1 до 6,0 через 0,1	0,013	0,018	0,025	0,048	0,080
От 6,1 до 10 через 0,1	0,016	0,022	0,03	0,058	0,10
От 10,25 до 14,0 через 0,25; 14,5 — от 15 до 18 через 1,0	0,023	0,027	0,35	0,07	0,12
18,5, 19,0; 19,5, от 20,0 до 30,0 через 1,0	—	0,033	0,045	0,084	0,14

Прутки из бериллиевой бронзы (ГОСТ 15835—70). Стандарт распространяется на тянутые круглые, квадратные, шестигранные прутки и круглые прессованные прутки.

Номинальные диаметры круглых тянутых прутков и номинальные диаметры вписанной окружности квадратных и шестигранных прутков и предельные отклонения по ним приведены в табл. 52. Диаметры прессованных прутков и предельные отклонения по ним следующие:

Диаметр, мм	Предельное отклонение, мм
42,0, 45,0, 48,0, 50,0	—2,0
55,0; 60,0, 65,0, 70,0; 75,0, 80,0	—2,4
85,0; 90,0, 95,0; 100,0	—2,8

Прутки изготовляют немерной длины. тянутые — от 1,5 до 4 м, прессованные диаметром 42—75 мм — от 1,0 до 2,5 м; прессованные диаметром 80—100 мм — от 0,7 до 2,0 м.

52. Прутки из бериллиевой бронзы тянутые

Номинальный диаметр, мм	Предельные отклонения для прутков (—), мм				
	круглых			квадратных и шестигранных	
	Класс точности				
	3а	4	5	4	5
5,0	0,048	0,08	0,16	0,08	0,16
5,5				—	—
6,0				0,08	0,16
6,5	0,058	0,10	0,20	—	—
7,0				0,10	0,20
7,5				—	—
8,0				0,10	0,20
8,5				—	—
9,0				0,10	0,20
9,5	—	—	—	—	—
10,0				0,10	0,20
10,5	0,07	0,12	0,24	—	—
11,0				0,12	0,24
11,5				—	—
12,0				0,12	0,24
13,0				—	—
14,0				0,12	0,24
15,0				—	—
16				—	—
17				0,12	0,24
18				—	—
19,0	0,14	0,28	0,14	0,28	
20,0			—	—	
21,0			0,14	0,28	
22,0			0,14	0,28	
23,0			—	—	
24,0			0,14	0,28	
25,0			—	—	
26,0			—	—	
27,0			0,14	0,28	
28,0			—	—	
30,0			0,14	0,28	
32,0	0,17	0,34	0,17	0,34	
35,0			—	—	
36,0			0,17	0,34	
38,0			0,17	0,34	
40,0			—	—	

Сталь прокатная угловая равнополочная (ГОСТ 8509—72). Профили поставляют с шириной полок от 20 до 250 мм, толщиной полок от 3 до 30 мм. Профили изготовляют длиной от 4 до 13 м (по согласованию сторон допускается изготовление профилей свыше 13 м).

Сталь прокатная угловая неравнополочная (ГОСТ 8510—72). Профили выпускают с шириной большой полки от 25 до 250 мм, шириной малой полки от 16 до 160 мм, толщиной полок от 3 до 20 мм. Профили изготовляют длиной от 4 до 13 м.

Сталь горячекатаная. Швеллеры (ГОСТ 8240—72). Стандарт распространяется на швеллеры с уклонами внутренних граней полок и швеллеры с параллельными гранями полок. Швеллеры изготовляют высотой

от 50 до 400 мм, с шириной полки от 32 до 115 мм, с толщиной стенки от 4,4 до 8,0 мм Швеллеры изготовляют длиной от 4 до 13 м (по согласованию сторон допускается изготовление профиля длиной свыше 13 м).

Сталь горячекатаная. Балки двутавровые (ГОСТ 8239—72) Балки изготовляют высотой от 100 до 600 мм, с шириной полки от 55 до 190 мм, с толщиной стенки от 4,5 до 12 мм. Балки поставляют длиной от 4 до 13 м (по согласованию сторон допускается изготавливать балки длиной свыше 13 м)

Сталь холодногнутая угловая равнобокая и неравнобокая (ГОСТ 8276—63*) Стандарт распространяется на холодногнутую сталь, изготовленную на профилегибочных станах. Равнобокие профили из углеродистой стали изготовляют с шириной полки от 16 до 220 мм, толщиной полки от 1,0 до 10 мм. Неравнобокие профили изготовляют из углеродистой стали с шириной большой полки от 25 до 220 мм, шириной малой полки от 20 до 180 мм, толщиной полки от 1,5 до 10 мм.

Равнобокие профили из низколегированной стали поставляют с шириной полки от 16 до 200 мм, толщиной полки от 1,0 до 10 мм. Неравнобокие профили из низколегированной стали изготовляют с шириной большой полки от 25 до 220 мм, шириной малой полки от 20 до 180 мм, толщиной полки от 1,5 до 10 мм.

Профили поставляют длиной от 4 до 12 мм.

Уголки стальные гнутые неравнополочные (ГОСТ 19772—74). Стандарт распространяется на неравнополочные уголки, изготавливаемые на профилегибочных станках из холоднокатаной и горячекатаной стали обыкновенного качества, углеродистой качественной конструкционной и низколегированной. Уголки изготовляют с шириной большой полки от 25 до 160 мм, с шириной меньшей полки от 20 до 125 мм, с толщиной полки от 1,5 до 8,0 мм. Профили изготовляют длиной от 4 до 12 м.

Сталь холодногнутая. Швеллеры (ГОСТ 8278—75) Стандарт распространяется на швеллеры, изготавливаемые на профилегибочных станках. Швеллеры изготовляют высотой от 30 до 400 мм с шириной полки от 10 до 200 мм, с толщиной профиля от 1 до 10 мм. Швеллеры поставляются длиной от 4 до 12 м.

Сталь холодногнутая Швеллеры неравнополочные (ГОСТ 8281—69). Стандарт распространяется на неравнополочные швеллеры, изготавливаемые методом профилирования на профилегибочных станках. Швеллеры изготовляются высотой от 16 до 270 мм, с шириной большой полки от 20 до 90 мм, с шириной малой полки от 10 до 80 мм. Швеллеры поставляются длиной от 4 до 12 м.

Сталь холодногнутая корытная равнополочная (ГОСТ 8283—67). Стандарт распространяется на стальной профиль, изготавливаемый методом профилирования на профилегибочных станках. Профили из углеродистой стали выпускают с высотой стенки от 20 до 240 мм, шириной профиля от 10 до 70 мм, высотой полки от 16 до 50 мм. Толщина профиля — от 1,0 до 6 мм. Профили поставляют длиной от 4 до 12 м.

Профили гнутые стальные. С-образные профили (ГОСТ 8282—57*). С-образные профили выпускают с высотой от 16 до 400 мм, с шириной горизонтальной полки от 10 до 160 мм, с высотой вертикальной полки от 6 до 50 мм. Толщина профиля — от 2 до 7 мм при наибольших наружных размерах профиля до 160 мм и от 3 до 7 мм при наибольших наружных размерах профиля свыше 160 мм. Профили изготовляют длиной от 3 до 12 м.

Сталь холодногнутая зетовая равнополочная (ГОСТ 13229—67*)
Стандарт распространяется на стальной профиль, изготавливаемый методом профилирования на профилегибочном станке. Зетовые профили из углеродистой стали выпускают высотой от 10 до 250 мм с шириной полок от 10 до 90 мм, толщиной профиля от 1,2 до 6,0 мм. Профили поставляют длиной от 4 до 12 м.

Сталь чистотянутая для шпонок сегментная (ГОСТ 8786—68)
Размеры сечений стали для шпонок приведены в табл. 53.

Сталь чистотянутая для шпонок (ГОСТ 8787—68*). Размеры сечений для шпонок приведены в табл. 54.

53. Номинальные размеры сечений (мм) чистотянутой стали для сегментных шпонок

Высота	Радиус	Длина основания	Высота	Радиус	Длина основания
1,4	4	3,8	10	25	24,5
2,6	7	6,8	11	28	27,3
3,7	10	9,7	13	32	31,4
5,0	13	12,6	15	38	37,1
6,5	16	15,7	16	45	43,1
7,5	19	18,6	17	55	50,8
9,0	22	21,6	19	65	59,1

54. Номинальные размеры сечений (мм) чистотянутой стали для шпонок

Ширина	Высота	Фаска или радиус закругления	Ширина	Высота	Фаска или радиус закругления
2	2	0,16—0,25	20	12	0,6—0,8
3	3		22	14	
4	4		24	14	
			25	14	
			28	16	
			32	18	
5	5	0,25—0,40	36	20	1,0—1,2
6	6		40	22	
7	7		45	25	
8	7		50	28	
10	8	0,40—0,60	56	32	1,6—2,0
12	8		63	32	
14	9		70	36	
16	10		80	40	2,5—3,0
18	11		90	45	
			100	50	

Листы, ленты, полосы

Сталь листовая горячекатаная (ГОСТ 19903—74). Стандарт распространяется на листовую горячекатаную сталь шириной 500 мм и более, изготавливаемую в листах толщиной от 0,5 до 160 мм и рулонах толщиной от 1,2 до 12 мм.

Сталь, изготавливаемую в листах, поставляют следующих размеров:

Толщина, мм	0,5—0,6	0,65—0,75	0,8—0,9	1,0
Ширина, мм	600—710	600—710	660—800	600—1000
Длина, мм	1 200—1 420	1 420—2 000	1 500—2 000	1 420—2 000

Толщина, мм	1,2—1,4	1,5—1,8	2,0—2,2	2,5—2,8
Ширина, мм	600—1 200	600—1 500	600—1 500	600—1 500
Длина, мм	2 000—3 000	2 000—6 000	2 000—6 000	2 000—6 000

Толщина, мм	3,0—3,9	4,0—5,0	6,0—7,0	8,0—10,0
Ширина, мм	600—1 800	700—1 800	700—2 000	700—2 500
Длина, мм	2 000—6 000	2 000—6 000	2 000—6 000	2 000—12 000

Толщина, мм	11—12	13—25	26—40	42—160
Ширина, мм	1 000—2 500	1 000—2 800	1 250—3 600	1 250—3 800
Длина, мм	2 000—12 000	2 500—12 000	2 500—12 000	2 500—9 000

Сталь, изготавливаемую в рулонах, поставляют следующих размеров

Ширина, мм	500—630	650—950	950—1 100	1 250—1 400
Толщина, мм	1,2—12	1,5—12,0	1,5—12	1,5—12,0

Ширина, мм	1 500—1 800	1 900—2 000	2 100—3 200
Толщина, мм	3,0—12,0	6,0—10,0	7,0—10,0

Сталь листовая холоднокатаная (ГОСТ 19904—74). Стандарт распространяется на листовую холоднокатаную сталь шириной 500 мм и более, изготавливаемую в листах толщиной от 0,5 до 5,0 мм и рулонах толщиной от 0,5 до 3,0 мм.

Сталь, изготовленную в листах, поставляют следующих размеров:

Толщина, мм	0,5	0,55—0,65	0,7—0,75	0,8—1,0	1,1—1,3
Ширина, мм	500—1100	500—1250	500—1420	500—1500	500—1800
Длина, мм	1000—3000	1000—3500	1000—4000	1000—4000	1000—6000

Толщина, мм	2,2—2,5	2,8—3,2	3,5—3,9	4,0—4,5	4,8—5,0
Ширина, мм	500—2300	500—2300	1250—2300	1250—2800	1250—2300
Длина, мм	1000—6000	1000—6000	2000—4750	2000—4500	2000—4500

Сталь, изготовленную в рулонах, поставляют следующих размеров:

Ширина, мм	500—1000	1100—1250	1400	1420
Толщина, мм	0,5—3,0	0,55—3,0	0,7—3,0	0,7—2,5

Ширина, мм	1500	1600	1900—2300
Толщина, мм	0,8—2,5	1,1—2,5	2,2—2,5

Сталь горячекатаная толстолистовая двухслойная коррозионнотстойкая (ГОСТ 10885—74) Стандарт распространяется на горячекатаную толстолистовую двухслойную коррозионнотстойкую сталь с основным слоем из углеродистой или низколегированной стали и плакирующим слоем из коррозионнотстойкой (нержавеющей) стали или никеля. Общая толщина листов и толщина коррозионного слоя следующие:

Общая толщина листов, мм	Толщина коррозионнотстойкого слоя, мм
4; 5	1,0—1,5
6; 7	1,5—2,0
8; 9; 10; 11; 12; 14	2,0—3,0
16; 18; 20	2,5—3,5
22; 24; 25	3,0—4,0
28; 30	3,5—5,0
32; 36; 40	4,0—6,0
45; 48; 50	4,5—7,0
53; 55; 60	5,0—7,5
65; 70; 75; 80; 85	6,0—12,0
90; 95; 100; 105; 110	6,0—15,0
120; 125; 130; 140; 150; 160	6,0—20,0

Примечания 1 В двухслойной стали, изготовленной электрошлаковой сваркой, промежуточный слой относится к основному слою.

2 По соглашению сторон допускается изменение толщины коррозионнотстойкого слоя

3 Для листов, изготовленных способом литого плакирования, допускается увеличение толщины коррозионнотстойкого слоя.

4 По требованию потребителя для листов толщиной 32, 36 и 40 мм допускается толщина коррозионнотстойкого слоя в пределах 6,0—9,0 мм

— Длина и ширина двухслойных листов и допускаемые отклонения по ширине, длине, толщине и косине среза соответствуют ГОСТ 19903—74

Сталь толстолистовая высоколегированная коррозионнотстойкая и жаростойкая (ГОСТ 7350—66*). Листы изготовляют толщиной от 4 до 50 мм. Размеры листов и допускаемые отклонения по размерам должны соответствовать требованиям ГОСТ 19903—74.

Сталь тонколистовая конструкционная легированная высококачественная специального назначения (ГОСТ 11268—65*). Стандарт распространяется на тонколистовую сталь, применяемую в термически обработанном состоянии. Размеры листов и допускаемые отклонения должны соответствовать ГОСТ 19903—74 и 19904—74.

Сталь толстолистовая и широкополосная конструкционная легированная высококачественная специального назначения (ГОСТ 11269—65*). Применяется в термически обработанном состоянии. Толстолистовая сталь поставляется горячей- и холоднокатаной, широкополосная — горячекатаной. По размерам и допускаемым отклонениям толстолистовая сталь должна соответствовать ГОСТ 5681—57*.

Лента стальная горячекатаная (ГОСТ 6009—74). Стандарт распространяется на стальную ленту шириной от 20 до 220 мм и толщиной от 1,5 до 5,0 мм, получаемую горячей прокаткой и продольной резкой горячекатаной листовой рулонной стали.

Сталь прокатная полосовая (ГОСТ 103—57*) изготавливается шириной от 12 до 200 мм, толщиной от 4 до 60 мм.

Толщина и ширина полос следующие:

Толщина полосы, мм	Ширина полосы, мм
4, 5, 6, 7, 8	12, 14
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12	16
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	18
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	20, 22
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16	25, 28
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20	30, 32, 36
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32	40
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36	45, 50, 56
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40, 45	60, 63, 65, 70, 75
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 32, 36, 40, 45, 50, 56	80
4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 30, 36, 40, 45, 50, 56, 60	85, 90, 95
	100, 105, 110,
	120, 125, 130,
	140, 150, 160,
	170, 180, 190,
	200

Допускаемые отклонения по толщине прокатной полосовой стали следующие:

Толщина полосы, мм	4—6	7—16	18	20	22	25
Допускаемые отклонения, мм	+3 —0,5	+0,2 —0,5	+0,2 —0,6	+0,2 —0,7	+0,2 —0,8	+0,2 —1,0
Толщина полосы, мм	28—32	36	40	45—50	56—60	
Допускаемые отклонения, мм	+0,2 —1,2	+0,2 —1,4	+0,2 —1,6	+0,3 —2,0	+0,3 —2,4	

Допускаемые отклонения по ширине прокатной полосовой стали следующие:

Ширина полосы, мм	12—50	56	60	63; 65	70; 75	80, 85
Допускаемые отклонения, мм	+0,5 —1,0	+0,5 —1,1	+0,5 —1,2	+0,5 —1,3	+0,5 —1,4	+0,7 —1,6
Ширина полосы, мм	90, 95	100; 105		110; 115		120; 125
Допускаемые отклонения, мм	+0,9 —1,8	+1,0 —2,0		+1,0 —2,2		+1,1 —2,4
Ширина полосы, мм	130	140	150	160	170, 180	190; 200
Допускаемые отклонения, мм	+1,2 —2,6	+1,2 —2,8	+1,3 —3,0	+1,4 —3,2	+1,5 —3,6	+1,7 —4,0

Полосы горячекатаные из высококачественной стали 18ЮА (ГОСТ 15883—70) предназначены для производства изделий способом холодной вытяжки.

Размеры и предельные отклонения горячекатаных полос из высококачественной стали 18ЮА следующие:

Толщина, мм	8,55±0,15
Ширина, мм	195+ ⁺¹⁰
Длина, мм	1900+ ⁺²⁰⁰

Листы конструкционные из алюминия и алюминиевых сплавов (ГОСТ 12592—67**). Размеры листов и допускаемые отклонения по толщине приведены в табл. 55. Размеры листов в зависимости от марки сплава и состояния поставки приведены в табл. 56.

Ленты из алюминия и алюминиевых сплавов (ГОСТ 13726—68**). Толщина лент и предельные отклонения по толщине приведены в табл. 57.

Ширина лент и предельные отклонения по ширине следующие:

	Ширина ленты, мм	Предельные отклонения, мм
От 40 до 175		±0,5
Более 175 до 300		±1,0
» 300 » 600		±3,0
» 600 » 1000		±5,0

Листы и полосы латунные (ГОСТ 931—70). Стандарт распространяется на горячекатаные и холоднокатаные листы и холоднокатаные полосы. В табл. 58 приведены толщина и предельные отклонения по толщине горячекатаных листов, в табл. 59 — толщина и предельные отклонения по толщине холоднокатаных листов, в табл. 60 — толщины и предельные отклонения по толщине холоднокатаных полос.

55. Размеры (мм) и допускаемые отклонения (мм) по толщине конструктивных листов из алюминия и его сплавов

[illegible]

56. Размеры листов (мм) конструкционных из алюминия и его сплавов

Состояние поставки	Алюминий, алюминидный сплав	Толщина	Ширина	Длина
Отожженные	АД00, АД0, АД, АД1, АМц, АМг2 и АВ	От 0,5 до 0,7	1000, 1200, 1400, 1500 и 1600	От 2000 до 4000
		От 0,8 до 5,0	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800 и 2000	От 2000 до 4000
		От 5,5 до 10,0	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800 и 2000	От 2000 до 7000
	Д1А, Д16Б, Д16А, Д19А, и Д20А	От 0,5 до 0,7	1000, 1200, 1400, 1500, и 1600	От 2000 до 7000
		От 0,8 до 10,0	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800 и 2000	От 2000 до 7000
		От 0,5 до 6,5	1200 и 1500	От 3000 до 4000
	Д16У и Д19У	От 0,5 до 4,0	1200 и 1500	От 2000 до 7000
		От 2,0 до 4,5	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800 и 2000	От 2000 до 7000
		От 0,5 до 0,8		От 2000 до 4000
	АМг6У	От 0,9 до 1,6		От 2000 до 6000
		От 1,8 до 3,0	1000, 1200 и 1425	От 2000 до 7000
Полунагартованные	АМц, АМг2 и АМг3	От 0,5 до 0,7	1000, 1200, 1400, 1500 и 1600	От 2000 до 7000
		От 0,8 до 4,0	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800 и 2000	От 2000 до 7000
		От 4,5 до 10,0	1000, 1200, 1400, 1500 и 1600	От 2000 до 4000
	Д12	От 9,5 до 6,5	1200 и 1500	От 3000 до 4000
Нагартованное	АД00, АД0, АД, АД1, АМц и АМг2	От 0,5 до 0,7	1000, 1200, 1400, 1500 и 1600	От 2000 до 7000
		От 0,8 до 4,5	1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800 и 2000	От 2000 до 7000

Продолжение табл. 56

Состояние поставки	Алюминий, алюминиевый сплав	Толщина	Ширина	Длина
		От 5,0 до 10,0	1000, 1200, 1400, 1500 и 1600	От 2000 до 4000
Нагартованные	ММ	От 1,0 до 4,5 От 1,5 до 4,5	1000, 1200, 1400 и 1500 1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800 и 2000	От 2000 до 4000 От 2000 до 7000
	АМг6В	От 5,0 до 10,0	1000, 1200 1400, 1500 и 1600	От 2000 до 4000
Закаленные и естественно состаренные	Д1А, Д16Б, Д16А, Д19А, Д20А и АВ	От 0,5 до 0,7 От 0,8 до 1,2 От 1,5 до 10,0	1000, 1200 1400, 1500 и 1600 1000, 1200, 1400, 1500 1600, 1800 и 2000	От 2000 до 5000 От 2000 до 5000
	Д16У и Д19У	От 0,5 до 1,2 От 1,5 до 4,0	1200 и 1500 1200 и 1500	От 2000 до 4000 От 2000 до 7000
Закаленные и искусственно состаренные	В95А	От 0,5 до 0,7 От 0,8 до 1,2 От 1,5 до 10,0 От 0,5 до 0,8 От 0,9 до 1,6 От 1,8 до 10,0	1000, 1200, 1400, 1500 и 1600 1000, 1200, 1400, 1500 1600, 1800 и 2000 1000, 1200 и 1425	От 2000 до 5000 От 2000 до 5000 От 2000 до 7000 От 2000 до 4000 От 2000 до 5000 От 2000 до 7000
		От 1,2 до 10,0	1000, 1200 и 1425	От 2000 до 7000
Закаленные и искусственно состаренные особо прочные	В95А	От 1,2 до 10,0	1000, 1200 и 1425	От 2000 до 7000
Нагартованные после закалки и естественно состаренные	Д16Б и Д16А АД00, АД0, АД, АД1, АМц, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6Б, АВ, Д1А, Д16А, Д19А и Д20А В95А	От 1,5 до 7,5 От 5,0 до 10,5 От 5,0 до 10,5	1000, 1200, 1400 и 1500 1000, 1200, 1400, 1500, 1600, 1800 и 2000 1000, 1200 и 1425	От 2000 до 7000 От 2000 до 7000 От 2000 до 7000
		От 5,0 до 10,5	1000, 1200 и 1425	От 2000 до 7000

57. Толщина лент (мм) из алюминия и алюминиевых сплавов и предельные отклонения (мм) по толщине (мм)

Толщина ленты	Предельные отклонения при ширине ленты		Толщина ленты	Предельные отклонения при ширине ленты	
	от 40 до 600	свыше 600 до 1000		от 40 до 600	свыше 600 до 1000
0,25 0,30 0,40 0,50	— 0,05	— 0,08	1,00 1,10 1,20 1,30 1,40	— 0,10	— 0,15
0,60 0,70		— 0,10			
0,80 0,90	— 0,08	— 0,12	1,50 1,60 1,70 1,80 1,90 2,00	— 0,15	— 0,20

58. Толщина (мм) горячекатаных латунных листов и предельные отклонения (мм) по толщине

Толщина	Предельные отклонения для листов размером, мм		Толщина	Предельные отклонения для листов размером, мм	
	600×1500 (710×1410)	1000×2000		600×1500 (710×1410)	1000×2000
5 6	— 0,45	— 0,50 — 0,55	15 16	— 0,80	— 1,0
7 8		— 0,60	17		— 1,2
9 10	— 0,60	— 0,70	18 19		— 1,3
11 12	— 0,70	— 0,80	20 21 22	— 1,0	— 1,4
13 14		— 0,90	25	— 1,2	— 1,6

59. Толщина (мм) холодноотянутых латунных листов и предельные отклонения (мм) по толщине

Толщина, мм	Предельные отклонения для листов размером, мм			Толщина, мм	Предельные отклонения для листов размером, мм		
	600×1500, 600×2000	800×2000 (710×1410)	1000×2000		600×1500, 600×2000	800×2000 (710×1410)	1000×2000
0,4	—0,06	—	—	2,5 2,75 3,0	—0,18	—0,21	—0,24
0,5	—0,08	—0,09	—	3,5 4,0	—0,20	—0,24	—0,28 —0,30
0,6 0,7 0,8		—0,10	—	4,5 5,0	—0,22	—0,27	—0,32
0,9 1,0 1,1	—0,10	—0,12	— —0,16	5,5 6,0	—0,25	—0,30	—0,36
1,2 1,3 1,35 1,4 1,5	—0,12	—0,14	—0,18 —0,20	6,5		—0,35	—0,40
1,6 1,65 1,8	—0,14	—0,16		7,0 7,5 8,0	—0,27	—0,37	—0,44
2,0	—0,15	—0,18	—0,22	9,0			—0,48
2,2	—0,16			10,0 11,0 12,0	—0,30 —0,36	—0,40 —0,50	—0,50 —0,60 —0,70

Проволока

Сортамент круглой холодноотянутой проволоки (ГОСТ 2771—57) — стальной, медной, алюминиевой и др. — приведен в табл. 61.

Допускается по требованию потребителя поставлять проволоку следующих не включенных в табл. 61 номинальных диаметров, мм: 0,31; 0,35; 0,37; 0,55; 0,65; 1,25; 2,3; 2,7; 2,9; 3,1; 3,3; 3,5; 5,5; 5,8; 6,5. Допускаемые отклонения по этим диаметрам устанавливаются равными отклонениям ближайшего большего диаметра по табл. 61 за исключением диаметра 0,95 мм, для которого допускаемые отклонения устанавливаются теми же, что и для проволоки диаметром 0,90 мм.

Допускается в технически обоснованных случаях поставка проволоки с двусторонними допускаемыми отклонениями в зависимости от групп точности.

Проволоку низкоуглеродистую качественную (ГОСТ 792—67) изготовляют без покрытия (светлой КС) и с покрытием (оцинкованной КО) диаметром от 0,5 до 6,0 мм.

60. Толщина (мм) холоднокатаных латунных полос и предельные отклонения (мм) по толщине

Толщина	Предельные отклонения для полос		Толщина	Предельные отклонения для полос	
	повышенной точности	нормальной точности		повышенной точности	нормальной точности
0,4	—	—0,06	2,25	—0,10	—0,12
0,5	—	—0,06	2,5	—0,10	—0,12
0,6	—	—0,07	2,75	—0,10	—0,12
0,7	—	—0,08	3,0	—0,12	—0,14
0,8	—	—0,08	3,5	—0,12	—0,16
0,9	—	—0,09	4,0	—0,12	—0,18
1,0	—0,08	—0,09	4,5	—0,15	—0,20
1,1	—0,09	—0,10	5,0	—0,15	—0,20
1,2	—0,09	—0,10	5,5	—0,15	—0,20
1,3	—0,09	—0,10	6,0	—0,15	—0,25
1,35	—0,09	—0,10	6,5	—0,15	—0,25
1,4	—0,09	—0,10	7,0	—0,15	—0,25
1,5	—0,09	—0,10	7,5	—0,15	—0,25
1,6	—0,10	—0,12	8,0	—0,15	—0,25
1,65	—0,10	—0,12	9,0	—0,18	—0,30
1,8	—0,10	—0,12	10,0	—0,18	—0,30
2,0	—0,10	—0,12			

Проволока стальная углеродистая пружинная (ГОСТ 9389—60*). В зависимости от механических свойств установлены четыре класса пружинной проволоки: I, II, III. Проволоку классов I, II и III изготавливают по группам точности ГТ4, а класса III — по группе точности ГТ3а (ГОСТ 2771—57).

Допускаемые отклонения по группам точности ГТ3а и ГТ4 для следующих номинальных диаметров, мм: 0,14; 0,15; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,25; 0,28; 0,30; 0,32; 0,36; 0,40; 0,45; 0,50; 0,56; (0,60); 0,63; 0,70; (0,75); 0,80; (0,85); 0,90; 1,0; 1,10; 1,20; (1,30); (1,40); (1,50); 1,60; (1,70); 1,80; 2,00; 2,20; (2,30); 2,50; 2,80; 3,00; 3,20; (3,40); (3,50); 3,60; 4,00; 4,50; 5,00; 5,60; 6,00; 6,30; 7,00; 8,00.

Проволоку стальную пружинную термически обработанную (ГОСТ 1071—67*) изготавливают диаметрами, мм: 1,20; 1,40; 1,60; 1,80; 2,0; 2,30; 2,50; 2,75; 3,0; 3,20; 3,40; 3,50; 3,60; 3,75; 4,0; 4,10; 4,20; 4,50; 4,80; 5,0; 5,50.

Предельные отклонения должны соответствовать группе точности ГТ4 по ГОСТ 2771—57. Проволоку изготавливают из сталей 65ГА, К65ГА, К65А и 50ХФА.

Проволока стальная для пружинных шайб (ГОСТ 11850—72). Стандарт распространяется на стальную проволоку квадратного, прямоугольного и трапециевидного сечений. Квадратную проволоку выпускают со стороны квадрата от 0,5 до 16 мм, прямоугольную — с большей стороной от 0,8 до 10 мм и меньшей стороной от 0,5 до 7,5 мм.

Проволока из меди, раскисленной марганцем, для электровакуумной промышленности (ГОСТ 10989—64). Стандарт распространяется на круглую проволоку, применяемую для изготовления деталей электровакуумной промышленности. Проволоку изготавливают диаметром от 0,3 до 1,3 мм.

Номинальные диаметры проволок, мм					Допускаемые отклонения (-), мм						
Группа размеров					Класс точности						
I	II	III	IV		1	2	2a	2	3a	4	5
0,10	0,10	0,10	От 0,1 до 0,28 через 0,01		0,003	0,005	0,008	0,013	0,020	0,035	0,050
—	0,11	0,11									
—	0,12	0,12									
—	—	—									
0,16	0,16	0,14									
—	—	0,16									
—	0,20	0,18									
—	—	0,20									
0,25	—	0,22									
—	0,25	0,25									
—	0,30	0,28									
—	—	0,32	0,32	0,32	0,004	0,006	0,010	0,015	0,025	0,040	0,060
—	—	—	0,34	0,34							
—	—	0,36	0,36	0,36							
0,40	0,40	0,40	0,38	0,38							
—	—	—	0,40	0,40							
—	—	—	0,42	0,42							
—	—	0,45	0,45	0,45							
—	—	—	0,48	0,48							
—	0,50	0,50	0,50	0,50							
—	—	—	0,53	0,53							
—	—	0,56	0,56	0,56							
0,60	0,60	—	0,60	0,60							
—	—	0,63	0,63	0,63	0,005	0,007	0,012	0,018	0,030	0,045	0,070
—	—	—	0,67	0,67							
—	—	0,70	0,70	0,70							
—	—	—	0,75	0,75							
—	0,80	0,80	0,80	0,80							
—	—	—	0,85	0,85							
—	—	0,90	0,90	0,90							
—	—	—	0,95	0,95							

Продолжение табл. 61

Номинальные диаметры проволок, мм				Допускаемые отклонения (-), мм						
Группа размеров				Класс точности						
I	II	III	IV	1	2	2a	3	3a	4	5
1,00	1,00	1,00	1,00	—	0,010	0,014	0,020	0,040	0,060	0,120
—	—	—	1,05							
—	—	1,10	1,10							
—	—	—	1,15							
—	—	1,20	1,20							
—	—	—	1,30							
—	—	1,40	1,40							
—	—	—	1,50							
1,60	1,60	1,60	1,60							
—	—	—	1,70							
—	—	1,80	1,80							
—	—	—	1,90							
—	2,00	2,00	2,00							
—	—	2,10	2,10							
—	—	2,20	2,20							
2,5	—	2,5	2,50							
—	—	—	2,60							
—	—	—	2,80							
—	3,0	—	3,00							
—	—	3,2	3,2							
—	—	—	3,4							
—	—	3,6	3,6							
4,0	4,0	—	3,8	—	0,013	0,018	0,025	0,048	0,080	0,16
—	—	4,0	4,0							
—	—	—	4,2							
—	—	4,5	4,5							
—	—	—	4,8							
—	5,0	5,0	5,0							
6,0	—	5,6	5,6	—						
—	6,0	—	6,0							

Номинальные диаметры проволоки, мм				Допускаемые отклонения (—), мм						
Группа размеров				Класс точности						
I	II	III	IV	1	2	2a	3	3a	4	5
— — — — — — —	— — 8,0 — — — —	6,3 — 7,0 — 8,0 — 9,0 —	6,3 6,7 7,0 7,5 8,0 8,5 9,0 9,5	—	0,016	0,022	0,030	0,058	0,10	0,20
10,0 — — — — — — 16,0	10,0 — — 12,0 — — — 16,0	10,0 — 11,0 — 12,0 — 14,0 — 16,0	10,0 10,5 11,0 11,5 12,0 13,0 14,0 15,0 16,0	—	—	0,027	0,035	0,070	0,12	0,24

Примечания: 1. Допускаемые отклонения для проволоки диаметром от 0,1 до 1,0 мм (включительно) установлены по ГОСТ 3047—66*. Допускаемые отклонения для проволоки диаметром от 1,0 до 16,0 мм установлены для классов точности: 2 — по ОСТ 1012, 2a — по ОСТ НКМ 1016, 3 — по ОСТ 1023, 3a — по ОСТ НКМ 1027, 4 — по ОСТ 1024, 5 — по ОСТ 1025.

2. Группу IV размеров применять не рекомендуется.

62. Номинальные размеры сечения (мм) и классы точности изготовления (ГОСТ 2771—57) проволоки из медно-цинковых сплавов

Размер	Форма сечения	Класс точности	
		повышенной	нормальной
От 0,10 до 0,30 От 0,32 до 12,0	Круглая	— 3а	3а 4
3,0 3,5 4,0 4,5 5,0 5,5 6,0 7,0 8,0 9,0 10,0 11,0 12,0	Квадратная и шестигранная	4	5

Проволока из медно-цинковых сплавов (ГОСТ 1066—75). Стандарт распространяется на проволоку из медно-цинковых сплавов марок Л68, Л63 и ЛС59-1 по ГОСТ 15527—70: круглую — диаметром от 0,1 до 12 мм; квадратного и шестигранного сечения — диаметром от 3 до 12 мм. Размеры круглой проволоки и допускаемые отклонения по диаметру должны соответствовать ГОСТ 2771—57.

Классы точности изготовления в зависимости от размера и формы сечения проволоки приведены в табл. 62; за диаметр проволоки квадратного и шестигранного сечений принимается диаметр вписанной окружности, т. е. расстояние между параллельными гранями проволоки.

Проволока сварочная из алюминия и алюминиевых сплавов (ГОСТ 7871—75). Стандарт распространяется на тянутую и прессованную проволоку диаметром от 0,8 до 12 мм.

Проволока из латуни свинцовой марки ЛС63-3 (ГОСТ 19703—74). В табл. 63 приведены диаметры латунной проволоки и ее предельные отклонения.

Проволока латунная для холодной высадки (ГОСТ 12920—67). Стандарт распространяется на латунную проволоку марки Л63. В табл. 64 приведены диаметры проволоки и допускаемые отклонения.

Проволока нейзильберовая (ГОСТ 5220—71). Стандарт распространяется на проволоку круглого сечения диаметром от 0,1 до 5,0 мм (табл. 65).

63. Диаметр (мм) проволоки из свинцовой латуни и его предельные отклонения (мм) по диаметру

Диаметр	Предельные отклонения (—) по диаметру проволоки точности изготовления		Диаметр	Предельные отклонения (—) по диаметру проволоки точности изготовления	
	нормальной (класс точности 4)	повышенной (класс точности 3а)		нормальной (класс точности 4)	повышенной (класс точности 3а)
0,45	0,040	0,025	2,70	0,060	0,040
0,48			2,80		
0,50			2,90		
0,53			3,00		
0,56					
0,63	0,045	0,030	3,20	0,080	0,048
0,70			3,30		
0,75			3,40		
0,80			3,50		
0,90			3,60		
	0,060	0,040	3,70		
1,00			3,80		
1,10			3,90		
1,20			4,00		
1,30			4,20		
1,40			4,50		
1,50			4,80		
1,60			5,00		
1,70			5,50		
1,80			6,00		
1,90			6,50	0,10	0,058
2,00			7,00		
2,10			7,50		
2,20			8,00		
2,30			8,50		
2,40			9,00	0,12	0,070
2,50			10,00		
2,60			11,00		
			12,00		

64. Диаметр (мм) и предельные отклонения (мм) латунной проволоки для холодной высадки

Диаметр готового изделия	Диаметр проволоки для					Предельные отклонения (—) по диаметру проволоки точности изготовления	
	болтов и винтов	гаек	заклепок	шпильек	шурупов	нормальной	повышенной
1,00	—	—	1,00	—	—	0,04	—
1,20	—	—	1,20	—	—		
1,40	1,20	—	1,40	—	—		
1,60	1,32	—	1,60	—	1,45		
2,00	1,70	—	2,00	—	1,80		
2,50	2,16	—	2,50	—	2,35		
3,00	2,60	—	3,00	2,64	2,85 (2,40)	0,05	—
3,50	—	—	3,50	—	3,35		
4,00	3,48	5,28	4,00	3,50	3,85 (3,26)		
5,00	4,38	6,00	5,00	4,43	4,8 (4,10)		
6,00	5,20	8,30	6,00	5,28	5,8		
7,00	—	—	7,00	—	—	0,10	0,06
8,00	7,10	9,60	8,00	7,10	7,8		
9,00	—	—	9,00	—	—		
10,00	8,85	—	10,00	8,85	9,8		

65. Диаметр (мм) и предельные отклонения (мм) нейзильберовой проволоки

Диаметр проволоки	Предельные отклонения (—) по диаметру проволоки точности изготовления		Диаметр проволоки	Предельные отклонения (—) по диаметру проволоки точности изготовления	
	повышенной	нормальной		повышенной	нормальной
0,10	—	0,020	1,30	—	0,040
0,15			1,40		
0,20			1,50		
0,25			1,60		
0,30			1,80		
0,40	—	0,025	2,0	0,040	0,060
0,50			2,20		
0,60			2,50		
0,70	—	0,030	2,80		
0,80			3,00		
0,90			3,50	0,048	0,080
1,00	—	0,040	4,00		
1,10			4,50		
1,20			5,0		

Трубы (табл. 66, 67)
66. Основной сортамент стальных труб

Трубы	Наруж- ный диаметр	Толщина стенки	Длина, м	ГОСТ
	мм			
Малых размеров	0,32— 4,80	0,1—1,6	0,3—7,0	14162—69
Прецизионные:				
горячекатаные	25—325	2,5— 20,0	4,0— 12,0	9567—60*
калиброванные	7—710	0,1— 32,0	1,0—9,0	9567—60*
Особо тонкостенные нер- жавеющие бесшовные, холодотянутые и ката- ные	4,0— 120,0	0,2—8,0	1,0—8,0	10498—63*
Общего назначения:				
бесшовные холодно- тянутые и катаные	1,0—200	0,1— 12,0	1,5—9,0	8734—75
бесшовные горячека- танные	25—800	2,5— 75,0	4,0— 12,5	8732—70*
электросварные хо- лоднокатаные и тя- нутые	5,0— 110,0	0,5—5,0	1,5—9,0	10707—73
Общего назначения элек- тросварные с прямым швом	8,0— 1620	1,0— 16,0	2,0— 10,0	10704—63*
Нержавеющие:				
электросварные . . .	8,0— 102	1,0—4,0	1,5—8,0	11068—64*
бесшовные, горячеде- формированные . . .	57,0— 325	1,5— 32,0	1,5— 10,0	9940—72*
бесшовные, холодно- и теплодеформиро- ванные	5,0—250	0,2— 22,0	1,5—9,0	9941—72*
Водогазопроводные свар- ные	6,0—150	1,8—4,0	4—12	3262—75
Для карданных валов электросварные	45—71	1,6—3,5	0,475— 8,5	5005—65*
Высокого давления для ди- зелей бесшовные . . .	6—13	—	0,5	11017—64
Для мотовелопромышлен- ности:				
бесшовные волоочные и не волоочные . .	6—102	0,8—7,5	1,5—9,0	12132—66*
электросварные . . .	6—102	0,8—7,5	1,5—9,0	12132—66*
Биметаллические корро- зионностойкие бесшов- ные, холоднокатаные и тянутые	6—370	1,5— 10,0	1,5—9,0	10192—62*

67. Основной сортамент круглых труб из цветных металлов и сплавов

Название или назна- чение труб	Металл трубы	Наруж- ный диаметр	Толщина стенки	Длина, мм	ГОСТ
		мм			
Капиллярные	Медь и латунь	1,2—2,5	0,35— 0,5	10	2624—67*
Для сильфо- нов, тонко- стенные	Полутон- пак	8—80	0,07— 0,8	0,2 и более	5685—51*
Тонкостен- ные	Медь и латунь	1,5—28	0,015— 0,7	В бухтах	11383—65
То же	Никель	0,4—5,4	0,05— 0,3		0,2—0,4
Рadiatorные	Медь и латунь	4—11	0,15— 0,2	—	529—41*
Общего назначения	Бронза	42—300	5—60	До 4	1208—73
Теплообмен- ные	Мельхиор	10—35	0,8—4,0	0,5—6,0	10092—62
Биметалли- ческие	Медь— сталь	6—370	1,5— 10,0	1,5—9,0	10192—62*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аузукалис Я. В., Булавс Ф. Я., Гунаев П. М. Деформативные и прочностные свойства углейластиков при сжатии. — «Механика полимеров» 1973, № 1, с. 29—35.
2. Балкевич В. Л. Техническая керамика. М., Стройиздат, 1968, 199 с.
3. Гунаев Г. М. Бороволокниты. — В кн.: Пластики конструкционного назначения. Под ред. Е. Б. Тростянской. М., «Химия», 1974, с. 320—326.
4. Каталог технических ситаллов. М., Стройиздат, 1969, 47 с.
5. Конструкционные полимеры. Кн. 1. М., изд. МГУ, 1972, 322 с. Авт.: П. М. Огибалов, Н. И. Малинин, В. П. Нетребко, Б. П. Кишкин.
6. Маркелов П. А. Резание металлов инструментами с керамическими пластинками. М., Оборонгиз, 1960, 284 с.
7. Материалы в машиностроении. Справочник. Т. 5. М., «Машиностроение», 1969, с. 7—156.
8. Назаров Г. И., Сушкин В. В., Дмитриевская Л. В. Конструкционные пластмассы. Справочник. М., «Машиностроение», 1973, 187 с.
9. Павлушкин Н. М. Спеченный корунд. М., Гостройиздат, 1963, 203 с.
10. Свойства стеклопластиков, усиленных высокомолекулярными волокнами. — «Механика полимеров», 1972, № 1, с. 68—74. Авт.: А. М. Скудра, Э. З. Плуме, Г. М. Гунаев, В. А. Ярцев, Н. А. Беляева.
11. Современные композиционные материалы. Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. М., «Мир», 1970, 672 с.
12. Сопроотивление сдвигу композитов на основе вискеризованных волокон. — «Механика полимеров», 1973, № 3, с. 492—501. Авт.: Г. М. Гунаев, И. Г. Жигун, Т. Г. Сорина, В. А. Якушин.
13. Справочник по пластическим массам. Под ред. М. И. Гарбара, В. М. Катаева, М. С. Акутина. Т. 1. М., «Химия», 1967, 462 с.

14. Справочник по пластическим массам. Под ред. М. И. Гарбара, В. М. Катаева, М. С. Акутина. Т. 2. М., «Химия», 1969, 517 с.
15. Справочник по пластическим массам. Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина, Т. 1, Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Химия», 1975, 443 с.
16. Стекло. Справочник. М., Стройиздат, 1973, 487 с.
17. Структура, свойства и испытания углепластиков. — «Механика полимеров», 1975, № 2, с. 248—257. Авт.: А. Т. Туманов, Г. М. Гуняев, В. Г. Мотцау, Е. И. Степаңычев.
18. Туманов Т. А., Портной К. И. Новые пути повышения жаропрочности никелевых сплавов. — «ДАН СССР», 1971, т. 197, № 1, с. 75—77.
19. Туманов Т. А., Портной К. И. Новые материалы в современной технике. — «ДАН СССР», 1972, т. 205, № 2, с. 336—338.
20. Химическая технология керамики и огнеупоров. М., Стройиздат, 1972, 551 с. Авт.: П. П. Будников, В. Л. Балкевич, А. С. Бережной, И. А. Булавин, Г. В. Куколев, Д. Н. Полубояринов.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Азотирование стали — Свойства азотированных изделий 348—352 — Строение азотированного слоя 338, 339

— в тлеющем разряде (ионное) 347, 348

— газовое 341—347

— жидкое 352—356

— интенсивностающей 226

— с добавками углеродосодержащих газов 356

Азотонауглероживание — см.

Нитроцементация высокотемпературная, цианирование высокотемпературное

Алтирование 563, 564, 572 —

Методы, характеристики 364 —

см. также *Обработка химико-термическая металлов для защиты от окисления*

Алюминий — Марки, состав 464

Алюминирование — см. *Алтирование*

Алюмоборирование 575, см. также *Обработка химико-термическая металлов для защиты от окисления*

Амплитуда напряжений цикла 23

Армирующие волокна — см. *Волокна армирующие*

Аустенит 67, 72, 155, 311 —

Виды зерна 295, 296, 298 —

Распад 306—309

Б

Баббиты 407

— калыевые 407—409

— оловянные 407—409

— свинцовые 407—409

Бейнит 72, 308, 309

Борирование 361—363 — Виды, методы, характеристики 362

Бороволокниты 593, 594 — см. также *Материалы композиционные волокнистые*

Бронзы 431 — Классификация 431 — Маркировка 431 — Полуфабрикаты 433; 440

— безоловянные 431, 433 — Марки, назначение, состав 434, 436 — Характеристики свойств 438, 439

— оловянные 431 — марки, назначение, состав 432—435 — Характеристики свойств 437

В

Валиковая проба 45, 46

Вискеризация 591

«Водородная болезнь» 418, 463

Волокна армирующие 583, 585, 586

Вольфрам — Взаимодействие с различными средами 559

— Назначение 561

— Получение 558

— Характеристики свойств 559, 560

Выносливость 22

Выплавка стали 139 — Способы
138

Вытяжка стали — Категории 38

Вязкость ударная 28 — Опреде-
ление 29—30

Г

ГОСТ 5—72* 624

103—57* 684

380—71* 73, 132

434—71* 420

492—73 442, 449, 450, 456

493—54* 435, 436

494—69 430

495—70 419

529—41* 420, 430, 700

613—65 435

617—72 420

767—70 416, 419

792—67 690

800—55* 186

801—60* 186, 187

802—58 261

804—72 507

849—70 449, 450, 572

859—66* 415, 416

860—60* 396

931—70 430, 685

977—65* 132

1048—70* 440

1050—74 86

1066—75 696

1071—67* 203, 691

1133—71 674

1173—70* 419

1208—73 440, 700

1209—73 408

1320—74 408

1412—70 371

1414—75 127

1435—74 148, 197

1497—73 12, 419

1499—70* 398

1535—71 420

1579—63 419

1585—70 383

1595—71 440

1628—72 440

ГОСТ 1761—70* 440

1778—70 285

1789—70 440

1791—67 446

2055—43 21

2060—73 430

2112—71* 420

2132—58 454

2169—69 575

2170—73 454, 458

2176—67 230

2179—59 454

2208—70 430

2283—69* 204

2581—71 508

2590—71 675

2591—71 675

2624—67* 420, 430, 700

2704—66 324

2718—74 625

2771—57 690, 691, 696

2789—73 410, 673

2860—65 22, 31

3047—66* 695

3248—60 16

3262—75 699

3443—57 373

3565—58 18

3640—75 500

3773—72 504

3882—74 180, 181

4041—71* 86

4134—75 434

4159—64* 575

4442—72 430

4543—71 100, 101, 197,

279

4647—69* 601

4648—71 601, 634

4650—73 602

4651—68 601, 634

4670—67 602

4692—57 674

4693—57* 674

4727—67 186

4748—70* 440

4752—55* 420

4784—65* 464

5005—65* 699

5017—74 432

5063—73 446, 458

5187—70* 446, 458

5189—75 446

ГОСТ 5220—71 446
 5221—72 440
 5222—72 440
 5272—68* 58
 5307—69 446
 5520—69* 129
 5535—50 324
 5582—61* 230
 5632—72** 172, 186, 187,
 209, 234, 241, 250, 254,
 279, 572
 5638—75 419
 5639—65 37, 296
 5657—69 313, 315
 5981—57* 683
 5685—51 430
 5689—73 625
 5695—51* 700
 5905—67* 575
 5950—73 148, 153, 161
 5960—72* 172
 6009—74 684
 6012—67 454
 6235—73 454
 6511—60 440
 6862—71 269, 270
 6996—66 46, 47, 51
 7117—62 504, 505
 7293—70 374
 7350—66* 230, 683
 7769—63 377, 378
 7871—75 696
 8190—56** 402
 8239—72 680
 8240—72 679
 8276—63* 680
 8278—75 680
 8281—69 680
 8282—57* 680
 8283—67 680
 8509—72 679
 8510—72 679
 8675—62 318
 8697—58** 627
 8732—70* 699
 8734—75 699
 8786—68 681
 8787—68* 681
 8817—73 41
 9012—59* 33
 9013—59 35
 9045—70* 37, 38, 41, 86,
 93

ГОСТ 9359—73 627
 9389—75 199, 691
 9440—60* 606
 9450—60 36
 9454—60 27, 28, 41, 51
 9455—60 27
 9456—60 27, 41
 9550—71 601
 9567—60* 699
 9651—73 16, 41
 9925—61 261
 9940—72* 230, 699
 9941—72* 230, 699
 10007—72 608
 10025—62 440
 10087—62* 619
 10092—75 446, 700
 10145—62 18, 46
 10155—62 262, 446
 10160—75 262, 265
 10192—62* 699, 700
 10292—62 622
 10446—63 413
 10456—69 602
 10498—63* 699
 10500—63** 246
 10510—74 41
 10587—72* 623
 10589—73* 612
 10702—63* 86
 10704—63* 699
 10707—73 699
 10851—73 626
 10885—74 683
 10989—64 691
 10994—74 212, 214
 11012—69 602
 11017—64 699
 11068—64* 699
 11069—74 464
 11070—74 575
 11150—65 15
 11262—68 601
 11268—65* 683
 11269—65* 683
 11383—65 420, 430, 700
 11629—75 602
 11701—66 38, 39, 419
 11849—66 378, 379, 380,
 382
 11850—72 691
 12015—66 602
 12019—66 602

ГОСТ 12020—72 602
 12021—75 602
 12132—66* 699
 12271—66* 607
 12592—67** 685
 12766—67* 274, 456
 12920—67 430, 696
 13047.1—67 454
 13047.18—67* 454
 13077—67* 607
 13083—67 454, 455
 13229—67* 681
 13518—68 602
 13537—68 602
 13548—68* 454, 700
 13585—68 45
 13726—68** 685
 13744—68 609
 13813—68 40
 13814—68 40
 13819—68 58
 13938.0—68 419
 13938.12—68 419
 13938.13—69 419
 14019—68 40, 419
 14113—69 411
 14162—69 699
 14332—69* 606
 14359—69 602
 14623—69 60
 14891—69* 132
 14906—69* 609
 14955—69 678
 14959—69 197, 205
 15065—69 602
 15088—69 602
 15089—69 602
 15139—69 602
 15173—70 602
 15471—70 419
 15527—70 401, 422, 423, 696
 15809—70 610
 15834—70 440
 15835—70 440, 678
 15883—70 685
 15885—70 440
 16130—72 420, 430
 16337—70* 604
 16338—70* 604
 16523—70* 93
 16782—71 602
 17036—71 601

ГОСТ 17088—71 602
 17163—71 668
 17170—71 602
 17217—71 446
 17478—72 622
 17648—72 617
 17711—72 425
 18175—72 434
 19249—73 53
 19250—73 52
 19265—73 164, 168
 19282—73 129
 19703—74 696
 19772—74 680
 19904—74 683
 19807—74 535
 19903—74 682, 683
 19904—74 682

Д

Деформация статочная 20
 — упругая 20

Диаграммы превращения аустенита изотермические 306

— термокинетические 307, 309

Диффузионное насыщение стали металлами 363—368 — см.

также под его названиями, например. *Алитирование, Си-лицирование, Хромирование, Цинкование*

Долговечность усталостная 24

Дрессировка стали 38

Ж

Жаропрочность 245

Железо — Модификации 64

Живучесть — 3

З

Закалка подшипников качения 191

Закалка сталей 312 — Характеристика 292—293

— автоматных 106—118

— высокопрочных средне-легированных 216—218

- инструментальных 297, 298
- конструкционных 298
- нетеплостойких высокой твердости 153
- нетеплостойких повышенной вязкости 157
- полутеплостойких высокой твердости 161
- полутеплостойких повышенной вязкости 162
- пружинных 204, 205, 210, 212—214
- теплостойких высокой твердости 169, 170
- теплостойких повышенной вязкости 173, 174

И

- Измерение твердости вдавливанием алмазной пирамиды (испытания на микротвердость) 36**
- по Бринеллю 33, 34
 - по Виккерсу 33—35
 - по Роквеллу 35—36

Инвар 271

Ингибитор 61

Инструменты из твердых сплавов — Классификация 184

Испытания динамические 12

Испытания механические для определения штампваемости на микротвердость 39

- на растяжение 39
- на твердость 39

Испытания на вытяжку и коническую матрицу по Фукуи 43

- на вытяжку сферической лунки 41
- на вытяжку цилиндрического колпачка и отбортовку отверстия 41, 42

Испытания на вязкость ударную 27, 28

- на двойной кровельный замок 40

- на длительную прочность 18
- на изгиб 40 — Методы, образцы 21
- на изгиб по Гюту, Вольтеру, на пружинение при чистке по Элеру 40
- на кручение 19—21
- на микротвердость — см. *Измерение твердости*
- на осадку черных металлов и сплавов 41
- на перегиб 40
- на ползучесть 16—18
- на расплющивание 43

Испытания на растяжение при комнатной температуре —
Определяемые характеристики — Форма и размеры образца 14

- при повышенной температуре — Определяемые характеристики 16
- при пониженной температуре — Определяемые характеристики 15

Испытания на усталость 22 —
Образцы, условия 25, 26
 — специальные 26

Испытания по Олзену, Эйвери, Гиллери 42
 — при повторно-переменной нагрузке 12

К

Каменное литье 672, 673

Карбидная неоднородность —
 см. *Карбидный балл*

Карбидный балл 161, 165, 189

Карбоволокниты 593 — см. также Материалы композиционные волокнистые

- полимерные 592, 593
- слоистые 593
- с углеродной матрицей 595, 596

- Карбонитрирование** — см. *Нитроцементация высокотемпературная*
- Карбюризаторы** 324, 325
- жидкие 332
 - твердые 328, 329
- Керамика** 607 — см. также под ее названиями, например: *Каменное литье; Фарфор*
- окисная 668, 671 — Характеристики свойств 669, 670
 - химически стойкая 671 — Характеристики свойств 672
- Ковар** 271
- Ковка сталей нетеплостойких повышенной вязкости** 160
- полутеплостойких высокой твердости 161
 - теплостойких высокой твердости 168
 - теплостойких повышенной вязкости 173
- Константан** 446
- Контролируемые атмосферы** 305
- Копель** 446
- Коррозионная стойкость металлов** 59, 60 — Объемный метод оценки 60 — Оценка по десятибалльной шкале 59
- сплавов 59
- Коррозия металлов** 57 — Виды 58
- Показатель 58, 60
 - Способы защиты 60—63
- Коэффициент асимметрии цикла** 23
- затекания 55
 - пористости 54
- Кривая усталости** — Построение 25
- малоциклового 26, 27
- Кривые деформации** 12
- Кристаллическая решетка** 70, 71
- Л
- Латуни** 419 — Марки, обозначение, состав 419, 422—425
- Полуфабрикаты 421, 430, 431
 - Характеристики свойств 421, 426—429
- Легирующие элементы** 139, 141 — Влияние на свойства бронз 432, 433
- Влияние на свойства латуней 419, 421
 - Влияние на свойства меди 418
 - Влияние на свойства сплавов медноникелевых 441
 - Влияние на свойства сплавов никелевых 455
 - Влияние на свойства сталей 73, 74—78, 215, 216, 321, 322
 - Влияние на свойства чугуна 322
 - Классификация 69
 - Назначение 64
- Легирующие элементы графитизирующие** 69
- карбидообразующие 73, 309
 - нейтральные 73
- Лента пружинная термически обработанная** — Материал для изготовления 201 — Отпуск 202 — Свойства прочностные и число переменных изгибов 202
- холоднокатаная 203 — Характеристики свойств 204
- М
- Магний** 506 — Характеристики свойств 507, 508
- Магниты** 268 — см. *Сплавы магнитно-твердые*
- Материалы композиционные волокнистые** 599 — Анизотропия свойств 589 — Способы изготовления 596, 598
- вискеризованные 591
 - дисперсноупрочненные 587
 - металлические 586, 587, 597

- на алюминиевой основе 597
- на никелевой основе 598
- на основе алюминий — стальная проволока 597
- на основе алюминия и магния 597, 598
- на основе легких сплавов 598
- слоистые 592
- с направленной кристаллизацией эвтектических структур 599
- с однонаправленным и перекрестным расположением волокон 591
- с ортогональной и сложной укладкой волокон 589, 590
- с пространственно сшитой арматурой 591

Материалы неметаллические — см. под их названиями, например: *Керамика; Ситаллы; Пластические массы*

- подшипниковые 407, 415 — см. под их названиями, например: *Баббиты оловянные; Баббиты свинцовые; Сплавы алюминиевые подшипниковые*

Медь 415 — Марки, состав 417

- Полуфабрикаты 419, 420
- Характеристики свойств 415, 416, 418

Металлы — Коррозия — см. *Коррозия металлов*

- тугоплавкие 547 — см. также под их названиями, например: *Вольфрам; Молибден; Ниобий; Тантал*
- цветные — см. под их названиями, например: *Алюминий; Магний; Медь; Титан; Цинк*
- черные — см. *Стали; Чугун*

Метод АЕГ, института пластической деформации металлов ГДР, Зибеля 43

- испытаний листов и лент гидравлический 41, 42

Модификаторы 600

Модуль упругости при сдвиге — Определение 19

Молибден — Взаимодействие с различными средами 556

- Назначение 556, 558
- Получение и обработка 554
- Характеристики свойств 554—556

МРТУ 4-2-114—66 187

- 6-05-871—66 611
- 6-05-988—66 613
- 6-05-1018—66 615
- 6-05-1032—66 614
- 6-05-1032—66 614
- 6-05-1041—71 620
- 6-05-1082—67 623
- 6-05-1169—69 626
- 6-05-1248—69 613, 614
- 6-05-1297—70 622
- 6-05-1441—71 613
- 6-06-308—70 614
- 6-11-60—67 623
- 6-11-129—69 618
- 6-11-139—69 623
- 6-11-191—71 623

Н

Нагрев для термообработки сталей 302 — Зернистость стали 295, 296

- Назначение 289
- Применение контролируемых атмосфер 303, 304
- Продолжительность при аустенитизации 297, 298, 300
- Составы солей 305
- Температура аустенитизации 296, 297, 299
- Условия 290—294

Надежность 30

Наклеп поверхностный — Виды 220, 221

- Влияние на свойства деталей из сталей высокопрочных 220—222

Наполнители 584, 600

- армирующие 583

- Напряжение** истинное 12, 13
 — номинальное — 24
 — условное 12, 13
- Напряжение** цикла максимальное 23
 — минимальное 23
 — среднее 23
- Никель** 447 — Марки, состав, назначение 449, 450
 — Полуфабрикаты 454
 — Характеристики свойств 447, 448, 451—454
- Никотирование** — см. *Азотирование с добавками углеродосодержащих газов*
- Ниобий** — Взаимодействие с различными средами 549, 551
 — Получение и обработка 548, 549
 — Применение 551
 — Характеристики свойств 548, 549
- Нитроцементация** 194
 — высокотемпературная 356—360
 — низкотемпературная — см. *Азотирование с добавками углеродсодержащих газов*
- О**
- Обработка** — Виды — см. под их названиями, например: *Обработка термическая; Обработка химико-термическая*
 — горячая механическая
- Обработка термическая** сплавов также под их названиями, например: *Сплавы алюминиевые деформируемые* — *Обработка термическая*
- Обработка термическая** сталей — см. *Закалка сталей; Отжиг сталей; Отпуск сталей*, а также под их названиями, например: *Стали высокопрочные* — *Обработка термическая*
 — Виды 289 — Схемы режимов 312
 — после цементации 334 — Режимы 335
 — предварительная 15
- Обработка термомеханическая** 238
- Обработка химико-термическая** — Виды — см. под их названиями, например: *Цементация; Цианирование*
- Обработка химико-термическая** металлов для защиты от окисления 561, 578—581
 — вакуумным диффузионным насыщением 566, 567
 — диффузионным насыщением в порошковых смесях 562, 564, 565
 — см. *Силицирование*
 — диффузионным насыщением из химически активных сред 567
 — ионизационным диффузионным насыщением 576, 577
 — циркуляционным диффузионным насыщением 567—572, 575, 576
- Обработка химико-термическая** сталей 323
 — см. под ее названиями, например: *Азотирование сталей; Борирование; Нитроцементация*
- Образец** Менаже 28, 50, 51
- Оксидирование** 170, 171
- ОПТУ** 578—59 621
- ОСТ** 6-01-67—72 611
 6-06-14—70 612
 1012 695
 1023 695
 1024 695
 1025 695
 НКМ 1016 695
 НКМ 1027 695
- Отжиг** сталей 310 — Нормы выдержки 300 — Характеристики 290—291

- нетеплостойких высокой твердости 152, 153
- нетеплостойких повышенной вязкости 157
- полутеплостойких высокой твердости 161
- полутеплостойких повышенной вязкости 162
- теплостойких высокой твердости 168
- теплостойких повышенной вязкости 173
- Отливки** — Группы, назначение, методы контроля 141 — Обработка термическая 142
 - бронзовые 431
- Отливки из сталей** 137 — Назначение, методы контроля 141
 - высоколегированных 143
 - конструкционных легированных 142—148
 - конструкционных нелегированных 141, 142
- Отливки из чугуна**
 - высокопрочного с шаровидным графитом 374, 375
 - жаростойкого 377
 - ковкого 376
 - отлитые в металлические формы 374
- Отливки латунные** 421
- Отпуск** ленты термически обработанной пружинной 202
 - подшипников качения 192
- Отпуск сталей** — Характеристика 289
 - автоматных 106—118
 - высокий 321, 322
 - высокопрочных среднелегированных 216, 217, 222
 - карбидный 168, 169
 - нетеплостойких высокой твердости 154, 155
 - нетеплостойких повышенной вязкости 159
 - низкий 320, 321
 - полутеплостойких высокой твердости 161
 - полутеплостойких повышенной вязкости 163
 - после шлифования 170
 - пружинных 201, 205, 206—208, 210

- смягчающий 173
- Охлаждение плоскопараллельных концевых мер** 154
- Охлаждение сталей при закалке** 292, 293
 - при нормализации 291
 - при обработке термической 320 — Охлаждающие среды для закалки 316—320 — Прокаливаемость сталей 313—316 — Режимы 309—313 — Фазовые превращения, их диаграммы 306—309
 - при отжиге 290, 291
 - при отпуске 293, 294

П

- Пайка** — Выбор величины зазоров 53
 - Выбор основного металла 51, 52
 - Выбор припоя 51
 - Выбор способа нагрева 53
- Параметры Ирвина** 31, 32
- Патентирование** 198
- Паяемость** 51
- Пластификаторы** 600
- Пластические массы** — Классификация 599, 603 — Методы испытаний 601, 602 — Свойства 602, 603
 - термопластичные — см. *Термопласты*
 - терморезистивные — см. *Резисторы*
- Пластмассы** — см. *Пластические массы*
- Подшипники качения** — Закалка 191
 - Материалы для изготовления 185, 186, 190 — см. также *Сплавы коррозионностойкие*
- Нитроцементация 194
- Отпуск 192
- Цементация 191, 193, 194
- Цианирование 191, 194
- Ползучесть** — Понятие 16
- Полиамиды** 603, 612—614
- Полимеры** 599, 600
- Полутомпак** 419

- Предел выносливости** 22, 24 —
 Обозначения 24 — Определение при испытании на усталость 24, 25
 — ограниченный — Понятие 24
- Предел длительной прочности** —
 Определение, понятие 18
- Предел ползучести** — Определение 16, 17
 — условный — Определение, понятие 17
- Предел пропорциональности** при кручении — Обозначение, определение 16
 — условный (при растяжении) — Обозначение, определение 14
- Предел прочности при изгибе** 22
 — при кручении истинный 20, 21
 — при растяжении 15
 — условный (относительный) 21
- Предел текучести условный** —
 Обозначение, понятие 13
 — условный при кручении — Обозначение, определение 20
 — условный при растяжении — Обозначение, определение 15
 — физический — Обозначение, понятие 13
 — физический при растяжении — Обозначение, определение 14
- Предел упругости условный** —
 Обозначение, понятие 13
 — при растяжении — Обозначение, определение 14
- Прибор Шора** 37
- Примеси в стали** — Влияние на структуру и свойства стали 65, 66 — Классификация 64
- Припой** — Метод оценки затекания в зазор 55, 50 — Метод оценки растекаемости 54 — Требования к ним 51
 — для сплавов твердых 184
 — на медной и медно-никелевой основах 401, 404—407

- оловянно-свинцовые 395, 397—401
 — серебряные 401—403

Проба валиковая — см. *Валиковая проба*

Проволока пружинная термически обработанная — Стали для изготовления 203 — Характеристики механических свойств 203

- холоднодеформированная — Материал для изготовления — Отпуск 201 — Характеристики механических свойств 199

Прокаливаемость стали 313 — Способы определения 313—315

Прочность стали конструктивная 322 — Критерии оценки 30—32

Р

Работа, затрачиваемая на зарождение трещины 29

- затрачиваемая на развитие трещин 29, 32
 — излома 51

Реактопласты — Качественная оценка, методы переработки, назначение 618—627

- высокой прочности — Изменение свойств под влиянием внешних факторов 666, 667 — Физико-механические и теплофизические свойства 662—666
 — низкой прочности — Изменение свойств под влиянием внешних факторов 648 — Физико-механические и теплофизические свойства 641—645
 — средней прочности — Изменение свойств под влиянием внешних факторов 660, 661 — Физико-механические и теплофизические свойства 658, 659

С

- Свариваемость** 45 — Методы оценки 45—51
- Сварка сталей высокопрочных** 223 — Виды 224 — Методы предотвращения сварных трещин 224
- коррозионностойких 227
- Сдвиг относительный** 20
- при кручении — Обозначение, определение 21
- Силицирование** 365, 368, 565, 566
- Методы, характеристики 367
- Ситаллы** 673 — Характеристики свойств 674
- Соединение паяное** — Выбор 53, 54
- Металлографические исследования 57
- Определение механических свойств 56, 57
- Факторы, влияющие на качество 51
- Соединение сварное** — Испытания на вязкость разрушения 51
- Испытания на статический изгиб надрезанных образцов 50, 51
- Испытания на ударный изгиб 51
- Критерии и методы его сопротивления образованию горячих трещин 47—49
- Определение его сопротивления образованию холодных трещин 49
- Определение механических свойств 46, 47
- Причины хрупкого разрушения 50
- Сопротивление временное** — Обозначение, понятие 13
- при растяжении — Обозначение, определение 15
- Сопротивление истинное разрыву** — Обозначение 15
- Определение 15
- Понятие 15
- Сортамент болванок, заготовок, профилей, прутков** 674—681
- листов, лент, полос 682—689
- проволоки 690—698
- труб 699—700
- Сплавы алюминиевые деформируемые** 465 — Коррозионная стойкость 465, 468, 472, 479, 483
- Марки, состав 466, 470, 473, 477, 480, 482
- Назначение 465, 468, 472, 479, 483
- Обработка термическая 468, 473, 478, 479, 483
- Полуфабрикаты 465, 467, 469, 472, 478, 484, 486
- Пределы длительной прочности и ползучести 482
- Характеристики механических свойств 465, 467, 468—471, 474—478, 484—486, 488
- Сплавы вольфрамовые** 560, 561
- Сплавы жаропрочные** — Классификация 245
- на железо-никелевой основе 254, 255 — Назначение 254 — Пределы длительной прочности и ползучести 255
- на кобальто-никелевой основе 257 — Марки, пределы длительной прочности, состав 259
- на никелевой основе 254, 255 — Назначение 256 — Обработка термическая 256 — Полуфабрикаты 256 — Пределы длительной прочности и ползучести 257
- Сплавы коррозионностойкие (кислотостойкие)** — Марки, состав 244 — Обработка термическая 244 — Применение 186, 243
- Сплавы магниевые** — Назначение 507
- в чужках — Марки, состав 508
- деформируемые — Марки, состав, полуфабрикаты, назначение 518, 519 — Обработка термическая 517 — Характеристики свойств 515, 516, 520, 521

- дитейные — Марки, состав, назначение 509, 510 — Обработка термическая 513 — Характеристики свойств 509—514
- со специальными физическими и химическими свойствами 455 — Марки, состав, назначение 456 — Характеристики свойств 457, 458
- сверхлегкие 521 — Марки, состав, назначение 522 — Свойства 521
- Сплавы магнитно-мягкие** — Марки; состав, основные характеристики 263 — Назначение 262, 266 — Обработка термическая 264, 265 — Характеристики магнитных свойств 264, 265
- магнитно-твердые 266, 268 — Марки, состав, магнитные свойства 267, 269, 270 — Обработка термическая 266, 268 — Полуфабрикаты 268, 269
- медноникелевые 441 — Марки, состав, назначение 442, 443 — Характеристики свойств 444—446 — Полуфабрикаты 448
- молибденовые 556, 557
- никелевые — Марки, состав, назначение 456 — Полуфабрикаты 455, 458 — Характеристики свойств 457, 458
- Сплавы медные жаропрочные** 459 — Марки, состав, назначение 460 — Режимы обработки, типы, полуфабрикаты 461 — Характеристики свойств 462, 463
- молибденовые 556, 557
- никелевые — Марки, состав, назначение 456 — Полуфабрикаты 455, 458
- Характеристики свойств 457, 458
- ниобиевые 550, 551
- Сплавы пружинные** 194, 195 — Классификация 208
- высокоэлектропроводные 215
- коррозионностойкие 208, 210 — Марки, состав 209 — Режимы обработки 213
- немагнитные 210, 211 — Марки, состав, характеристики механических свойств, обработка термическая 212 — Режимы обработки 213
- с низким температурным коэффициентом модуля упругости 213, 215 — Марки, состав, характеристики механических свойств, режимы обработки 214
- Сплавы с высоким электрическим сопротивлением** — Назначение 274 — Марки, состав 274 — Характеристики свойств 275—277
- с заданным температурным коэффициентом линейного расширения — классификация 271 — Марки, состав, термическая обработка сплавов с минимальным ТКЛР 270 — Марки, характеристики свойств сплавов с заданным ТКЛР 273—274 — Назначение 271
- с особыми физическими свойствами — Виды 259 — см. также под их названиями, например: *Сплавы магнитно-мягкие; Сплавы с высоким электрическим сопротивлением*
- танталовые 553
- Сплавы твердые** 178, 179 — Марки СССР, обозначение, характеристики 179, 180 — Припой 184 — Флюсы 185 — Характеристики эксплуатационных свойств 181, 182
- нестандартные — Характеристики 183
- Сплавы титановые** 530, 547 — Коррозионная стойкость 533 — Легирующие элементы 531, 533, 534

- Марки, состав 534, 535
- Назначение 547
- Обработка термическая 537
- Сплавы цинковые антифрикционные** 503 — Марки, состав 505 — Назначение 504, 506 —
- Характеристики свойств 504, 505

- для литья под давлением
- Марки, состав, назначение 502

Стабилизаторы 600

Стали бесперлитные 93

- быстрорежущие — см. *Стали инструментальные теплостойкие высокой твердости*

Стали высокопрочные 215

- Назначение 216, 218 — Обработка термическая 218, 219 — Сварка и соединения сварные 223, 224

- Требования при конструировании и разработке технологий 220—223

- интенсивно стареющие (мартенситностареющие) — Азотирование 226 — Обработка термическая, состав 225, 226

- коррозионностойкие — Обработка термическая 227, 228 — Технология изготовления 226 — Состав, 226, 228 — Характеристики механических свойств 226—228

- среднелегированные 215, 221, 223 — Марки свойств 217

Стали для отливок — Варианты технологического процесса 136

- Влияние состава на свойства 139, 141 — Диаграмма железо—углерод 137
- Классификация 137, 139
- Литейные свойства 135, 136 — Марки, состав 144, 145
- Обработка термическая 142, 146 — Способы выплавки 138, 139 — Характеристики свойств 140

- высоколегированная 147 — Классы, назначение 147

Стали жаропрочные — Классификация 245

- аустенитные — Марки, обозначения 250, 251 — Назначение 254 — Обработка термическая 251, 252 — Пределы ползучести и длительной прочности 253

- мартенситно-ферритные — Назначение, обработка термическая 246

- мартенситные — Назначение 246 — Пределы длительной прочности и ползучести 248, 249

- перлитные — Назначение 250 — Пределы ползучести и длительной прочности 248, 249 — Характеристики механических свойств 247

Стали инструментальные

- Классификация 143, 148 — Назначение 143, 175—178 — Состав 143

- нетеплостойкие высокой твердости 148—155

- нетеплостойкие повышенной вязкости 155—159

- полутеплостойкие высокой твердости 159—162

- полутеплостойкие повышенной вязкости 162, 163

- теплостойкие высокой твердости 164—171

Стали конструкционные автоматные

- Марки, обозначение, составы 125—126 — Назначение 101, 124 — Обработка термическая 106—118 — Характеристики механических свойств 127, 128

- для криогенной техники 132 — Марки СССР, обозначения, состав 132, 133 — Назначение 132 — Обработка термическая 84, 90, 106—118 — Требования 132 — Характеристики механических свойств 134

- легированные — Классификация 100 — Марки, состав 102—105 — Технологические свойства 120—123 — Характеристики механических свойств 106—119
- листовые углеродистые и низколегированные, работающие под давлением 129 — Марки, обозначения, состав 129
- низколегированные 93 — Марки 94, 95 — Характеристики механических свойств 96—99
- северного исполнения 129 — Марки, характеристики 130, 131 — Назначение 132 — Требования к ним 129
- углеродистые качественные конструкционные 86—93
- углеродистые обыкновенного качества 73—85
- Сужение образца относительное 14

Т

- Тантал — Взаимодействие с различными средами 552, 553
- Получение и обработка 551, 552
- Применение 553, 554
- Характеристики свойств 552, 553
- Твердость 33—36, 37
- Измерение — см. *Измерение твердости*
- Понятие 32
- Шкалы 35, 36
- Тензочувствительность 277
- Термопласты 599, 600 — Качественная оценка, назначение, методы переработки 604—618
- высокой прочности — Изменение свойств под влиянием внешних факторов 666, 667 — Физико-механические и теплофизические свойства 662, 663

- низкой прочности — Изменение свойств под влиянием внешних факторов 636—641 — Физико-механические и теплофизические свойства 628—635
- средней прочности — Изменение свойств под влиянием внешних факторов 649—657 — Физико-механические и теплофизические свойства 646, 647
- Титан 525 — Коррозионная стойкость 529
- Марки, состав 528
- Способы получения 526
- Характеристики свойств 525, 527, 529, 530
- Томпак 419
- Трещины горячие — Обозначение 47
- кристаллизационные 47
- подсолнечные 47
- Трещины холодные 223, 224 — Образование 49
- ТУ 6-05-898—71 625
- 6-05-905—71 609
- 6-05-1105—73 605
- 6-05-1309—72 613
- 6-05-1344—71 611
- 6-05-1422—71 617
- 6-05-1451—71 613
- 6-05-1522—72 607
- 6-05-1528—72 618
- 6-05-1543—72 615
- 6-05-1548—72 607, 624
- 6-05-1604—72 607
- 6-05-1625—73 626
- 6-05-1668—74 616
- 6-11-209—71 617
- 14-1-193—72 209
- 14-1-594—73 186
- 14-1-595—73 186, 187
- 14-1-631—73 186, 187
- 14-222-19—72 276
- 14-222-26—73 209
- 48-08-476—71 404
- 48-08-484—71 504
- 48-21-163—72 434
- 48-21-297—73 404
- 48-21-299—73 404
- 84-81—69 620
- 141-41—71 276

В-189—70 618
 МБО.023.084 621
 МБО.023.096 619
 МБО.023.099 621
 МБО.023.112 621
 МБО.026.085 621
 МП-44—55 621
 МТО.023.065 620
 МХП М613—55 624
 МХП М1514—51 624
 НИИ ПМ П-467—66 617
 ПЗ—68 618
 ПЗ—70 606
 ПЗ3—58 618
 П400—609 624
 П422—65 614
 П513—66 614
 П622—69 620
 П666—69 616
 П672—69 616
 СП-31—66 622

У

Углеродоазотирование — см.
Азотирование стали жидкое
 Ударная вязкость — см. *Вязкость ударная*
 Удлинение образца остаточное 17
 Удлинение образца относительное после разрыва — Обозначение, определение 14, 15 — Понятие 14
 — при растяжении — Обозначение 16
 Усталость — Понятие 22
 — коррозионная сталей высокопрочных 221
 — малоцикловая сталей высокопрочных 221

Ф

Фарфор 668 — Характеристики свойств 672
 Феррит 67, 72

Флюсы — Классификация 52 — Назначение 52, 53, 184 — Требования к ним 52
 — для алитирования металлов — Состав 566
 — для твердых сплавов — Характеристики 185

Х

Хладотекучесть пластмасс 608
 Хромирование 365, 564, 565, 573 — см. также *Обработка химико-термическая металлов для защиты от окисления диффузионным насыщением в порошковых смесях* — Методы, характеристики 366, 367

Ц

Цементация 323 — Глубина слоя 323, 326, 327, 333 — Режимы 324, 325 — Свойства цементованных изделий 334, 336—338 — Технология 327—334
 — в твердом карбюризаторе 328
 — газовая 328, 329
 — подшипников качения 191, 194
 Цианирование 170
 — высокотемпературное 360, 361
 — низкотемпературное — см. *Азотирование жидкое*
 — подшипников качения 191, 194
 Цикл напряжений — Понятие 23
 — асимметричный 23
 — симметричный 23
 Цинк — Марки, состав 500 — Характеристики свойств 501
 Цинкование 368

Ч

- Число твердости по Бринеллю 33
 - по Виккерсу 34
 - по Роквеллу 35
- Чугун 368 — Виды отливок 369
 - Жаростойкость и жаропрочность 373, 377—380
 - Классификация 373
 - Механические свойства 370—376
 - Назначение 368, 383—385
 - Рост 373, 378
 - Технологические свойства 390—392
 - Усадка линейная 390, 392

- Физические свойства 383, 385—390
- Химические свойства 380—382

Ш

- Шероховатость поверхности —
 - Требования для деталей из сталей высокопрочных 220
- Штампруемость — Влияющие факторы 37, 38
 - Показатели 38, 39
 - Понятие 37

Алла Юрьевна *Акимова*, Борис Николаевич *Арзамасов*, Ирина Александровна *Арутюнова*, Виктор Львович *Балкевич*, Анатолий Матвеевич *Борздыка*, Владимир Алексеевич *Брострем*, Елена Валентиновна *Васильева*, Борис Константинович *Вульф*, Юлий Александрович *Геллер*, Анатолий Сергеевич *Гуляев*, Михаил Ефимович *Дриц*, Владимир Николаевич *Евсеев*, Валентин Константинович *Ефремов*, Моисей Исаакович *Жебин*, Владимир Васильевич *Зимин*, Ольга Соломоновна *Квурт*, Юрий Михайлович *Лактин*, Лев Израилевич *Левин*, Эдуард Ноевич *Либерман*, Анатолий Викторович *Мельников*, Александр Константинович *Николаев*, Александр Сергеевич *Николаев*, Ким Исаевич *Портной*, Яков Михайлович *Потак*, Дмитрий Антонович *Прокошкин*, Валентин Сергеевич *Раковский*, Александр Григорьевич *Рахштадт*, Евгений Александрович *Скороходов*, Владимир Александрович *Федорович*, Виктор Михайлович *Шестопал*, Григорий Ефимович *Шпичинецкий*, Ефим Самойлович *Шпичинецкий*, Рид Павлович *Шубин*.

СПРАВОЧНИК МЕТАЛЛИСТА

том 2

Под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема

Редактор издательства И. С. Трещалина

Технический редактор А. И. Захарова

Корректоры А. П. Озерова и А. А. Снастина

Переплет художника А. Я. Михайлова

Сдано в набор 2/III 1976 г. Подписано к печати 6/VII 1976 г. Т-06779.
Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Усл. печ. л. 37,38
Уч.-изд. л. 52,0. Тираж 125 000 (2-й з-д 40 001—80 000) экз. Зак. № 1130
Цена 2 р. 76 к.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, Б-78,
1-й Басманный пер., д. 3

Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10