



Д р о ф а

ISBN 978-5-358-00769-7



9 785358 007697

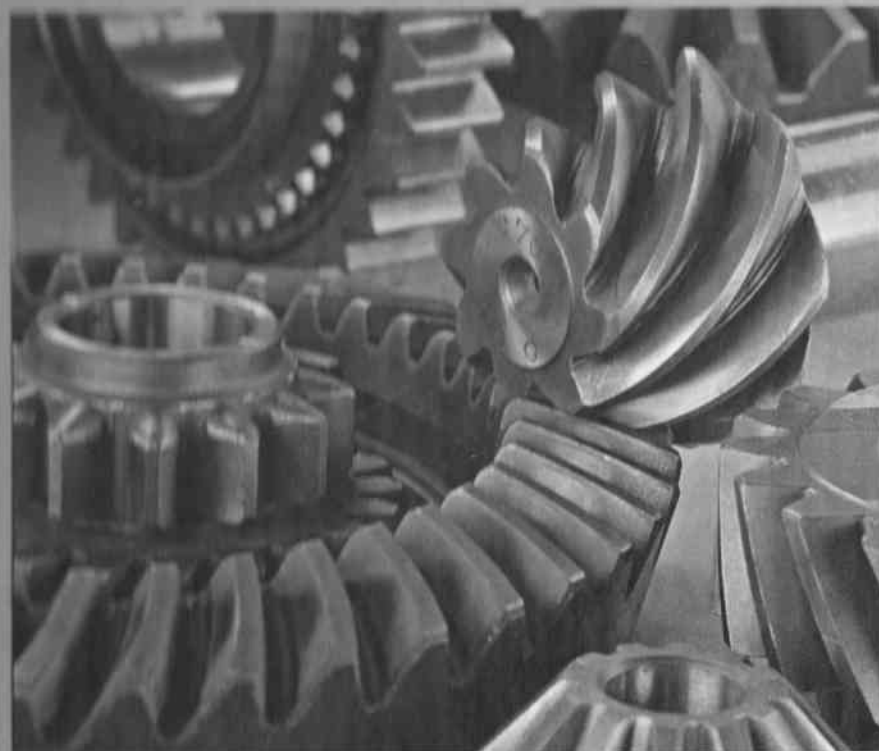
И. С. Стерин

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

И. С. Стерин



С Р Е Д Н Е Е
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



УДК 620(075.32)
ББК 30.3я723
С79

Стерин, И. С.

С79 Материаловедение : учебник для ссузов / И. С. Стерин. — М. : Дрофа, 2009. — 352 с. : ил.

ISBN 978-5-358-00769-7

В книге приведены основные сведения о машиностроительных материалах в соответствии с современными ГОСТами. Рассмотрены важнейшие вопросы, связанные со свойствами металлов, сплавов, неметаллических материалов и способами их определения. Изложены основы теории термической обработки. Особое внимание уделено маркировке отечественных материалов. Для проверки качества усвоенного теоретического материала в конце каждой главы даны контрольные вопросы.

Для студентов технических специальностей средних профессиональных учебных заведений. Может быть полезна учащимся профессионально-технических училищ, лицеев.

УДК 620(075.32)
ББК 30.3я723

Учебное издание

Стерин Иосиф Самуилович

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебник для ссузов

Зав. редакцией *О. В. Карцева*. Редактор *О. В. Карцева*. Художественный редактор *В. А. Антипин*. Художественное оформление *А. В. Пряхин*

Технический редактор *Н. И. Герасимова*

Компьютерная верстка *С. Л. Мамедова*. Корректор *Г. И. Мосякина*

Санитарно-эпидемиологическое заключение

№ 77.99.02.953.Д.006315.08.03 от 28.08.2003.

Подписано к печати 23.07.08. Формат 60 × 90^{1/16}.

Бумага типографская. Гарнитура «Ньютон Дрофа». Печать офсетная. Усл. печ. л. 22,0.

Тираж 3000 экз. Заказ № 9915.

ООО «Дрофа». 127018, Москва, Сушевский вал, 49.

Предложения и замечания по содержанию и оформлению книги просим направлять в редакцию общего образования издательства «Дрофа»: 127018, Москва, а/я 79.

Тел.: (495) 795-05-41. E-mail: chief@drofa.ru

По вопросам приобретения продукции

издательства «Дрофа» обращаться по адресу:

127018, Москва, Сушевский вал, 49.

Тел.: (495) 795-05-50, 795-05-51. Факс: (495) 795-05-52.

Торговый дом «Школьник».

109172, Москва, Малые Каменщики, д. 6, стр. 1А.

Тел.: (495) 911-70-24, 912-15-16, 912-45-76.

Сеть магазинов «Переpletные птицы». Тел.: (495) 912-45-76.

Интернет-магазин: <http://www.drofa.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО «Знак Почета» «Смоленская областная типография им. В. И. Смирнова». 214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2.

ISBN 978-5-358-00769-7

© ООО «Дрофа», 2009

Оглавление

<i>К читателю</i>	8
Глава 1	
Строение металлов	11
1.1. Кристаллические решетки металлов	11
1.2. Реальное строение металлов	13
1.3. Кристаллизация металлов. Построение кривых охлаждения	16
1.4. Аллотропические превращения металлов	20
<i>Контрольные вопросы</i>	22
Глава 2	
Свойства металлов, способы их определения	23
2.1. Общие сведения	23
2.2. Прочность, упругость, пластичность, усталость	25
2.3. Жаропрочность	30
2.4. Твердость	31
2.5. Ударная вязкость	37
2.6. Технологические свойства металлов	39
2.7. Изучение структуры металлов	43
<i>Контрольные вопросы</i>	48
Глава 3	
Основы теории сплавов	49
3.1. Строение сплавов	49
3.1.1. Твердый раствор	50
3.1.2. Химическое соединение	50
3.1.3. Механическая смесь	51
3.2. Диаграммы состояния сплавов	52
3.2.1. Построение диаграммы состояния сплавов первого рода (Pb — Sb)	53
3.2.2. Диаграмма состояния сплавов второго рода (Cu — Ni)	55
<i>Контрольные вопросы</i>	57

Глава 4	
Железоуглеродистые сплавы	58
4.1. Общие сведения	58
4.2. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов	59
4.3. Диаграмма состояния сплавов железо — цементит (Fe — Fe ₃ C)	62
4.3.1. Процессы первичной кристаллизации железоуглеродистых сплавов	64
4.3.2. Процессы вторичной кристаллизации стали	65
4.3.3. Процессы вторичной кристаллизации белых чугунов	69
Контрольные вопросы	70
Глава 5	
Классификация сталей	71
5.1. Общие сведения	71
5.2. Маркировка сталей в России	74
Контрольные вопросы	78
Глава 6	
Углеродистые стали универсального применения	79
6.1. Общие сведения	79
6.2. Углеродистые стали	80
6.2.1. Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380—94)	81
6.2.2. Углеродистые качественные стали (ГОСТ 1050—88)	81
6.2.3. Инструментальные углеродистые стали (ГОСТ 1435—90)	82
6.3. Влияния углерода и примесей на структуру и свойства сталей	83
Контрольные вопросы	85
Глава 7	
Основы термической обработки	86
7.1. Общие сведения	86
7.2. Оборудование термических цехов	87
7.3. Контролируемые атмосферы	89
7.4. Контроль температурного режима	90
7.5. Критические температуры стали и чугуна	94
7.6. Превращения, происходящие в стали при нагреве и охлаждении	99
7.7. Отжиг	104
7.8. Нормализация	109
7.9. Закалка	110
7.10. Отпуск и старение	118

7.11. Обработка стали холодом	121
7.12. Понятие о термомеханической обработке стали	122
7.13. Термическая обработка быстрорежущей стали	124
7.14. Понятие о лазерной термической обработке	127
7.15. Понятие о радиационном облучении стали	130
7.16. Дефекты термической обработки и меры их предупреждения	131
Контрольные вопросы	134
Глава 8	
Конструкционные легированные стали	136
8.1. Цементуемые стали	136
8.2. Улучшаемые стали	138
8.3. Пружинные стали	140
8.4. Конструкционные стали высокой обрабатываемости резанием (автоматные)	142
8.5. Технологические особенности конструкционных сталей	143
8.6. Литейные стали	145
8.7. Хладостойкие стали	146
8.8. Стальная проволока, свойства и применение	147
8.9. Строительные стали	149
8.9.1. Применение, свойства, разновидности	149
8.9.2. Низколегированные стали повышенной прочности	151
8.9.3. Стали повышенной прочности с карбонитридным упрочнением	152
8.10. Судостроительные стали	152
8.11. Хладостойкие стали криогенной техники	153
Контрольные вопросы	158
Глава 9	
Поверхностное упрочнение стали и других материалов	160
9.1. Поверхностное упрочнение металлорежущих материалов	160
9.2. Термические методы	162
9.3. Поверхностная закалка стали	162
9.4. Химико-термическая обработка стали	167
9.4.1. Цементация	168
9.4.2. Азотирование	173
9.4.3. Цианирование	176
9.4.4. Нитроцементация	177
9.4.5. Сульфацианирование	178
9.4.6. Алитирование, хромирование, силицирование, борирование	178

9.5. Понятие о лазерной химико-термической обработке (ЛХТО)	181
9.6. Способы улучшения свойств инструментальных материалов	182
<i>Контрольные вопросы</i>	194
Глава 10	
Инструментальные стали и сплавы	195
10.1. Классификация инструментальных сталей и сплавов, технические требования к ним.	195
10.2. Инструментальные легированные стали (ГОСТ 5950—2000)	196
10.3. Быстрорежущие стали	201
10.4. Твердые сплавы	207
10.5. Керамические материалы для обработки резанием	215
10.6. Сверхтвердые материалы	220
<i>Контрольные вопросы</i>	235
Глава 11	
Чугуны	236
11.1. Характерные особенности чугунов.	236
11.2. Классификация чугунов.	238
11.3. Серые чугуны (СЧ)	240
11.4. Ковкие чугуны (КЧ)	246
11.5. Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ЧШГ)	247
11.6. Высокопрочные чугуны с вермикулярным графитом (ЧВГ)	250
11.7. Легированные чугуны	254
<i>Контрольные вопросы</i>	255
Глава 12	
Цветные металлы и сплавы	256
12.1. Общие сведения	256
12.2. Алюминий и его сплавы	258
12.3. Медь и ее сплавы	261
12.4. Цинк и его сплавы	271
12.5. Магний и его сплавы	272
12.6. Титан и его сплавы	274
12.7. Благородные металлы	276
12.8. Припой и флюсы	280
12.9. Антифрикционные (подшипниковые) и тормозные материалы	282
<i>Контрольные вопросы</i>	288

Глава 13	
Неметаллические материалы	289
13.1. Керамика, стекло, графит	289
13.2. Пластмассы	295
13.3. Эластомеры	312
13.4. Клеевые и лакокрасочные материалы	314
13.5. Древесные материалы	320
<i>Контрольные вопросы</i>	323
Глава 14	
Композиционные материалы	324
14.1. Основные свойства и классификация композиционных материалов.	324
14.2. Композиционные материалы с нуль-мерными наполнителями	326
14.3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями	329
14.4. Эвтектические композиционные материалы	340
<i>Контрольные вопросы</i>	344
Приложение. Справочные данные	346
Список литературы	352

К читателю

Металлы — основа современной тяжелой индустрии. Без них не может развиваться ни одна отрасль народного хозяйства, поэтому развитие металлургии, повышение качества металлов и сплавов всегда относились к числу важнейших народнохозяйственных проблем.

В последние десятилетия у металлов появились серьезные конкуренты — продукты химической промышленности: пластмассы, синтетические волокна, а также различные виды керамики, стекла, композитов. Ежегодное мировое производство пластмасс измеряется миллионами тонн. Необходимость рационального использования природных ресурсов обуславливает особую актуальность проблемы замены металлов высококачественными конструкционными неметаллическими материалами.

И все же пока в мировом производстве синтетические материалы заменили немногим более 6% металлов, которые по-прежнему остаются главным конструкционным материалом. И это вполне закономерно. Почти три четверти существующих химических элементов составляют металлы. Свойства, которыми они обладают, не приусу ни какому другому материалу.

Металлы характеризуются прочностью, твердостью и пластичностью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью, высокой электрической проводимостью и многими другими ценными свойствами. Они хорошо обрабатываются литьем и давлением, режутся и свариваются. В технике широко используются магнитные свойства металлов, их способность противостоять агрессивным химическим средам. Чистые металлы — железо, медь, алюминий, никель, цинк, свинец и другие — составляют основу огромного количества сплавов. Вводя небольшие добавки различных компонентов, можно получать сплавы почти с любыми заранее заданными свойствами, например сверхтвердые, жаростойкие, способные выдерживать огромные давления, не ржавеющие даже под действием самых сильных кислот. Наибольшее распространение в промышленности получили сплавы на основе железа — чугун и сталь. Эти универсальные конструкционные материалы не только обладают высокими

качественными показателями, но имеют относительно небольшую стоимость.

О полезных свойствах некоторых металлов люди узнали еще в глубокой древности. Многие тысячелетия назад человек уже владел искусством обработки металлов. Металлические орудия ускорили прогресс человечества. Они способствовали развитию земледелия, строительства, торговли. Именно металл стал первым всеобщим эквивалентом ценностей.

Археологические раскопки древних поселений в центральной части России, на Урале, Украине, в Белоруссии, Закавказье и других районах говорят о том, что 2,5—3 тысячелетия назад наши далекие предки умели получать железо из руд и изготавливать из него оружие, орудия труда, предметы домашнего обихода.

В середине XIV в. в России появились первые доменные печи, а в XVI—XVII вв. были построены первые железодельные заводы. Быстрыми темпами развивалась русская металлургия в начале XVIII в. — в эпоху Петра I, который хорошо понимал, что без металла не построить флот и не наладить производство вооружения, а следовательно, не создать крепкое независимое государство. Тогда же Урал стал ведущим горнометаллургическим районом России. К 1725 г. Россия выплавляла около 20 тыс. т чугуна высокого качества, опережая Англию, Францию, Германию и другие страны. В последующие годы в России не только увеличивалась добыча полезных ископаемых, в первую очередь металлов, расширялось производство металлических изделий, но и развивалась отечественная наука о металлах. Ученые постигали природу металлов, разрабатывали эффективные методы их получения, создавали новые высококачественные сплавы.

Большой вклад в разработку теоретических основ металлургии внесли выдающиеся русские ученые М. В. Ломоносов, издавший первый в России учебник горнозаводского дела, П. П. Аносов, положивший начало учению о стали и разработавший научные принципы получения высококачественных металлов, а также его последователи П. М. Обухов, А. С. Лавров, Н. В. Калауцкий, А. А. Ржевский. Научные открытия Д. К. Чернова легли в основу ряда важнейших процессов выплавки и обработки чугуна и стали. Величайшим открытием стал периодический закон химических элементов Д. И. Менделеева. Труды Н. И. Беляева в области металлургии и термической обработки стали не потеряли актуальности и в наши дни. Весомый вклад в развитие доменного производства внес М. К. Курако, создавший школу русских инженеров-доменщиков. Теории металлургии, прокатки и калибровки стали посвятил многие годы жизни В. Е. Грум-Гржимайло. В области металловедения, металлографии и технологии производства огнеупорных материа-

лов работали Н. С. Курнаков и А. А. Байков; в области черной металлургии и доменного производства — М. А. Павлов. Велики заслуги перед отечественной наукой И. П. Бардина, Н. П. Чижевского, А. М. Самарина, С. М. Баранова и многих других ученых, инженеров-металлургов, техников.

Сейчас особое значение придается улучшению качества выпускаемых металлических материалов, повышению коэффициента их использования в народном хозяйстве. С этой целью разрабатываются более прогрессивные способы выплавки металлов и получения металлопродукции по новым технологиям.

Механизация и автоматизация производственных процессов, внедрение способов точного литья, широкое применение метода обработки давлением, порошковой металлургии позволяют не только снизить отходы металла, повысить качество выпускаемой продукции, но и высвободить значительный парк металлорежущих станков, уменьшить потребность в квалифицированных рабочих кадрах.

В настоящее время в мире продолжается быстрый рост выплавки черных и цветных металлов. Ежегодный выпуск одной только стали превысил 700 млн т. Если в начале XX в. некоторые важнейшие металлы вообще не производились или производились в ограниченных масштабах, то в настоящее время применяются практически все встречающиеся в природе металлы. Эти удивительные материалы еще многие годы будут надежно служить человечеству. И еще долго люди будут изучать их свойства, исследовать их скрытые возможности, совершенствовать технику и технологию их получения и переработки, расширяя вместе с тем использование неметаллических конструкционных материалов.

* * *

Предлагаемый учебник предназначен студентам средних специальных учебных заведений машиностроительных специальностей. После изучения данного курса будущий специалист должен знать: строение, свойства и назначение материалов, способы их определения; основы теории сплавов, связь структуры и свойств металлов; маркировку сталей и сплавов; виды и сущность термической обработки и поверхностного упрочнения материалов; так же студент должен уметь определять и расшифровывать марку конструкционных материалов и использовать знания для выбора конструкционных и инструментальных материалов в зависимости от условий эксплуатации. В книге представлена обширная информация по чугунам, цветным металлам и сплавам, неметаллическим и композиционным материалам. В конце учебника даются общетехнические сведения, которые помогут учащимся в овладении предметом.

Строение металлов

1.1. Кристаллические решетки металлов

Металлы и сплавы — основной машиностроительный материал. Они обладают многими замечательными свойствами, обусловленными в основном их внутренним строением. Свойства металлов и сплавов можно изменять в необходимом направлении, т. е. расчетливо управлять ими. Мягкий и пластичный металл или сплав можно сделать твердым, хрупким, и наоборот. Для того чтобы сознательно изменять свойства металлов, необходимо знать основы их кристаллического строения.

Как известно, все тела состоят из большого количества атомов, которые удерживаются силами сцепления, совершая колебания большой частоты возле точек равновесия. Свойства металлов зависят от расположения атомов между собой, характера их связей, расстояния между ними. Если изменить расстояние между атомами или порядок их расположения, изменятся и свойства металла. В аморфных телах (смола, стекло, канифоль) атомы расположены беспорядочно. В металлах они находятся в определенном геометрическом порядке, образуя кристаллы, поэтому металлы являются *кристаллическими телами*. Металлы различаются не только порядком расположения атомов, но и строением кристаллической решетки. Кристаллическая решетка представляет собой воображаемую пространственную сетку, состоящую из элементарных ячеек, в узлах которой находятся атомы. Атомы изображаются условно — в виде шариков.

Различают следующие кристаллические решетки металлов с плотной упаковкой атомов: кубическую объемно-центрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную (рис. 1.1).

В ячейке *кубической объемно-центрированной решетки* (рис. 1.1, а) атомы расположены в вершинах и в центре куба. Такая ячейка содержит 9 атомов.

Кубическую объемно-центрированную решетку имеют хром, вольфрам, ванадий, молибден, литий, а при определенных температурах — железо и другие металлы.

В ячейке *кубической гранецентрированной решетки* (рис. 1.1, б) атомы находятся в вершинах куба и на пересечении диагоналей каждой плоскости. Такая ячейка имеет 14 атомов. Кубической гранецентрированной кристаллической решеткой обладают свинец, никель, медь, золото, серебро, платина, железо при определенных температурах — и другие металлы.

В ячейке *гексагональной решетки* (рис. 1.1, в) атомы располагаются в вершинах и в центре шестигранных оснований призмы, три атома — в средней ее плоскости. Ячейка гексагональной решетки содержит 17 атомов. Гексагональную кристаллическую решетку имеют магний, кадмий, цинк, бериллий, осмий и другие металлы. При определенных условиях у некоторых металлов (железо, титан, цирконий, стронций, кобальт, кальций и др.) один вид кристаллической решетки может перестраиваться в другой, например кубическая объемно-центрированная — в гранецентрированную и даже в гексагональную. Элементарная ячейка отображает только один элемент или одну ячейку кристаллической решетки. Вся кристаллическая решетка в реальном металле состоит из большого числа многократно повторяющихся элементарных ячеек.

Немаловажное значение имеет расстояние между атомами ячейки кристаллической решетки или между параллельными атомными плоскостями, образующими элементарную ячейку. Чем это расстояние больше, тем менее прочен металл. Расстояние между атомами из-

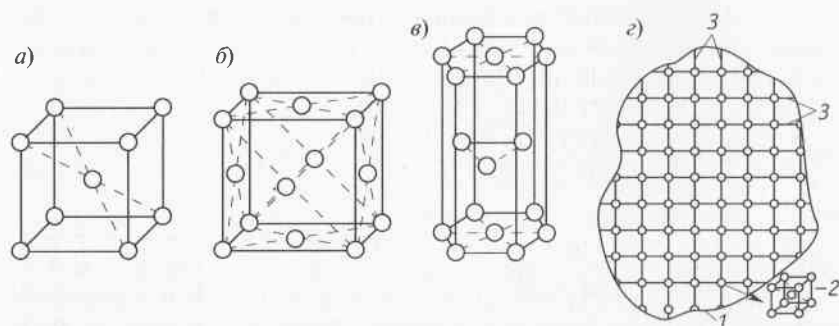


Рис. 1.1. Элементарные ячейки пространственной кристаллической решетки:

а — объемно-центрированный куб; б — гранецентрированный куб; в — гексагональная ячейка; г — схема кристаллической решетки металлов: 1 — зерно — кристаллит металла; 2 — элементарная ячейка; 3 — атомные плоскости

меряется в нанометрах ($1\text{Å} = 1\text{ нм}$) или в ангстремах ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{ м}$). Из практики известно, что железо прочнее меди, медь прочнее алюминия. Расстояние между атомными плоскостями в ангстремах у железа 2,86; у меди 3,6; у алюминия 4,041. В целом для металлов расстояние между атомными плоскостями находится в пределах от 0,1 до 0,7 нм. При нагревании металлов колебания атомов возрастают, при температуре плавления они становятся настолько большими, что атомы значительно удаляются друг от друга, связь их ослабевает, и кристаллическая решетка разрушается.

1.2. Реальное строение металлов

Несмотря на то что большинство атомов металла в кристаллической решетке обладает одинаковой (средней) энергией и колеблется при данной температуре с одинаковой амплитудой, отдельные атомы имеют энергию и амплитуду колебаний, значительно превышающие средние. Такие атомы могут перемещаться из одного места в другое. Легче, чем остальные, перемещаются атомы поверхностного слоя, которые выходят даже на поверхность (например, атом 1, рис. 1.2, а). Место, где находился такой атом (свободный узел), называют *вакансией*. Оно остается свободным. Через некоторое время на это место перемещается один из соседних атомов, расположенных в более глубоком слое (например, атом 2, рис. 1.2, б); оставленный же им узел становится вакансией. Затем будут перемещаться другие атомы (атом 3, рис. 1.2, в и т. д.). Так постепенно вакансии переместится в глубь кристалла, искажив кристаллическую решетку (рис. 1.2, г). С повышением температуры количество вакансий увеличивается, при этом они чаще переходят из одного узла в другой. Такое движение вакансий играет значительную роль в диффузионных процессах, протекающих в металлах.

В реальном кристалле всегда имеются дефекты строения. Установлено, что реальная прочность любого металла намного меньше

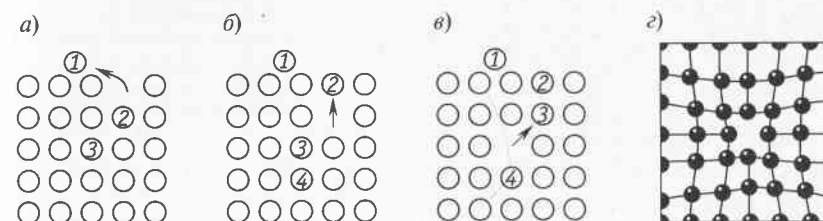


Рис. 1.2. Вакансии в кристаллической решетке:
а — г — перемещение атомов

прочности, полученной на основе теоретических расчетов. Например, известно, что предел прочности железа практически составляет около $300 \cdot 10^6$ Па (30 кгс/мм²). Однако теоретические расчеты показывают, что если у железа соблюдена закономерность расположения атомов, то для его разрушения необходимо приложить нагрузку 10—13 тыс. МПа (1000—1300 кгс/мм²). Причиной столь значительного расхождения между реальной и теоретической прочностью металлов является наличие у реальных кристаллов большого количества структурных дефектов. В результате этого связи между атомами нарушаются, и в сопротивлении действию внешних сил принимают участие не все атомы, составляющие данный кристалл, а только их часть. При отсутствии дефектов все атомы принимали бы участие в сопротивлении действию внешних сил, и тогда разрушить металл было бы значительно труднее.

В лабораторных условиях ученым удалось получить очень тонкие кристаллы, так называемые нитевидные усы. Их диаметр — 2—4 мкм, длина — 10—15 мм. Эти кристаллы по своему строению близки к идеальным. Прочность их на растяжение в 40—50 раз выше прочности реальных кристаллов.

Количество вакансий в кристаллической решетке может достигать огромных размеров. Так, по данным И. Я. Френкеля, в 1 см³ кристаллической решетки кадмия при температуре 300 °С количество вакансий достигает 10^{13} . Вакансии не остаются неподвижными. Они могут перемещаться и объединяться в группы, образуя большие линейные дефекты. Такие дефекты называются *дислокациями*. В отличие от вакансий дислокации имеют большую протяженность. На рис. 1.3 представлена схема кристаллической решетки с дисло-

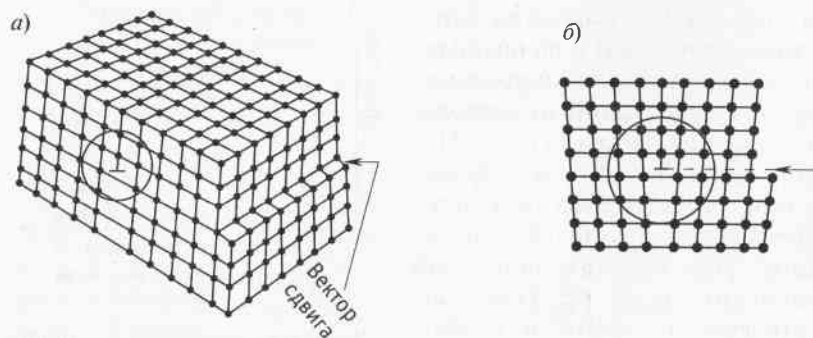


Рис. 1.3. Краевые дислокации: а — сдвиг, создавший краевую дислокацию; б — расположение атомов у дислокации

кацией, характеризующейся отсутствием в нижней части кристалла одного ряда атомов, что приводит к нарушению связей между атомами.

У мест расположения дислокации наблюдается искажение строения кристаллов, вызывающее концентрацию напряжений, которая при воздействии на металл внешних сил может стать причиной образования трещин.

По мнению многих ученых, реальный кристалл содержит около 10^8 дислокации на 1 см². Необходимо отметить, что дислокации отличаются легкой подвижностью, это вызывает разупрочнение металла.

Образованию дислокации способствует также блочное строение кристаллов. Дело в том, что пространственная кристаллическая решетка не является единым целым, она разделена на участки, именуемые блоками, которые повернуты один относительно другого на небольшой угол (10—15'). Места контактов блоков представляют собой поверхности раздела внутри зерен. Протяженность поверхности раздела очень велика, так как размеры блоков составляют от 0,1 до 10 мкм. Это значит, что в 1 мм³ металла находится 10^{12} блоков. На границах блоков возникает напряжение, способствующее образованию системы дислокации.

Современные теории дислокации предлагают два пути приближения реальной прочности металлов к теоретической (рис. 1.4). Первый путь заключается в устранении несовершенства кристаллической решетки и приближении ее строения к идеальному, второй — противоположный первому — состоит в увеличении количества структурных дефектов, пересечении дислокаций и их накоплении, что приводит к торможению движения дислокации и, следовательно, к упрочнению металла. Повысить прочность путем устранения структурных дефектов удается в нитевидных кристаллах, но их практическое использование пока ограничено. Более реальным для практического применения является второй путь.



Рис. 1.4. Зависимость сопротивления деформации от количества дефектов кристаллического строения

Увеличить количество структурных дефектов можно за счет ле-

гирования металла, т. е. растворения в его кристаллической решетке других элементов, а также путем термической обработки. В настоящее время широкое распространение получил способ термомеханической обработки, при котором значительно возрастает количество структурных дефектов и обеспечивается упрочнение металла в результате прекращения движения дислокации. Из этого следует, что плотность расположения атомов неодинакова по различным плоскостям и направлениям кристаллической решетки. Свойства каждого кристалла (химические, физические, механические) зависят от направления кристаллической решетки.

Кристаллы всегда анизотропны в отличие от аморфных тел (канифоль, стекло, смола, пластмассы и др.), свойства которых не зависят от направления, так как они имеют одинаковую плотность атомов.

Все металлы являются *поликристаллами*, поскольку они состоят из огромного количества анизотропных кристаллов. В связи с тем что кристаллы ориентированы по отношению друг к другу под незначительным углом ($10-15^\circ$), тело металла имеет во всех направлениях более или менее одинаковые свойства (усредненные). Поликристаллическое тело изотропное, но эта изотропность мнимая, называемая *квазиизотропией* (от лат. *квази* — мнимый). В результате обработки металлов давлением в холодном состоянии (прокатка, штамповка) изотропная структура может получить частичную анизотропию свойств из-за того, что часть кристаллов будет ориентирована в определенном направлении.

1.3. Кристаллизация металлов. Построение кривых охлаждения

Твердый металл состоит из огромного количества кристаллов, плотно примыкающих друг к другу. Свойства металла зависят не только от порядка расположения атомов в кристалле, но и от формы отдельных кристаллов, их размеров и границ соприкосновения. Порядок расположения атомов (тип кристаллической решетки) — природное свойство металла; форма кристаллов и их размеры зависят от процесса перехода металла из жидкого состояния в твердое. Процесс образования кристаллов при затвердевании металла называется *кристаллизацией*. При кристаллизации металла выделяется теплота. При переходе же металла из твердого состояния в жидкое происходит поглощение теплоты. Наблюдения с помощью измеряющих температуру приборов за процессом понижения температуры при переходе металла из жидкого состояния в твердое позволили

установить определенную закономерность. Сначала температура понижается равномерно. В начальный период образования кристаллов (вследствие выделения скрытой теплоты при формировании кристаллической решетки) падение температуры прекращается, и она остается неизменной до полного затвердения металла. После того как весь металл затвердеет, температура снова начинает понижаться. Температура, соответствующая горизонтальной площадке, называется *критической*.

Механизм процесса кристаллизации изучали многие ученые. На основании долголетних исследований литой стали Д. К. Чернов еще в 1878 г. установил, что кристаллизация металлов подобна кристаллизации солей и что процесс этот состоит из двух элементарных процессов, протекающих одновременно. Первый процесс заключается в образовании центров кристаллизации или зародышей кристаллов (Д. К. Чернов назвал их «зачатками»), второй — в росте кристаллов из этих центров.

Последовательные этапы процесса кристаллизации схематично показаны на рис. 1.5. Первый этап — появление зародышей кристаллов (рис. 1.5, а). По мере остывания металла к зародышам присоединяются все новые и новые атомы жидкого металла, которые группируются в определенном порядке один возле другого (рис. 1.5, б, в), образуя элементарные ячейки кристаллической решетки (элементарная ячейка изображена в виде прямоугольников). Этот процесс продолжается до тех пор, пока не закончится кристаллизация (рис. 1.5, г).

Кристаллы затвердевшего металла имеют неправильную и весьма разнообразную внешнюю форму, что объясняется условиями кристаллизации. В процессе кристаллизации увеличивается количество кристаллов (в 1 мм^3 может образоваться свыше 1000 кристаллов). При соприкосновении грани смежных кристаллов мешают друг другу принять геометрически правильную внешнюю форму.

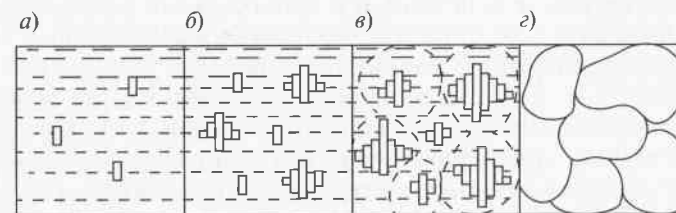


Рис. 1.5. Последовательные этапы процесса кристаллизации:

а — появление зародышей кристаллов; б — рост кристаллов, образование новых центров; в — рост кристаллов; г — границы кристаллов (зерен) затвердевшего металла

Кристаллы, имеющие неправильную внешнюю форму, называются *кристаллитами* или *зернами*. Размер зерен зависит от условий кристаллизации, и прежде всего от скорости охлаждения металла. Чем выше скорость охлаждения металла, тем быстрее он затвердевает, тем больше возникает центров кристаллизации и, следовательно, тем меньшего размера получаются зерна.

Это подтверждается на практике — в тонких быстро охлаждающихся сечениях литых деталей металл имеет более мелкое зерно, чем в толстых массивных литых деталях, охлаждающихся медленнее. Однако скорость охлаждения не всегда можно регулировать.

Мелкое зерно при затвердевании металла образуется в случае создания искусственных центров кристаллизации. Для этого в расплавленный металл вводят специальные вещества, называемые модификаторами. Процесс искусственного регулирования размеров зерен получил название *модифицирования*.

Форма растущих кристаллов зависит не только от условий их столкновения между собой, но также от состава сплава, наличия примесей и условий охлаждения. Механизм образования кристаллов в большинстве случаев носит *дендритный* характер. При дендритной кристаллизации рост зародышей кристаллов происходит с неравномерной скоростью. После образования зародышей их развитие идет главным образом в тех направлениях решетки, которые имеют наибольшую плотность расположения атомов (минимальное межатомное расстояние). В этих направлениях возникают длинные ветви будущего кристалла — оси первого порядка (рис. 1.6). От осей

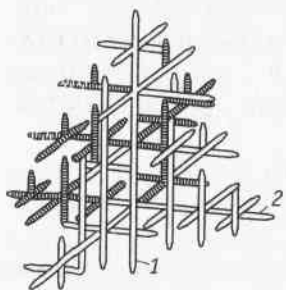


Рис. 1.6. Схема дендритного строения по Д. К. Чернову:

1 — оси второго порядка;
2 — оси третьего порядка

первого порядка под определенными углами растут новые оси — второго порядка 1, от осей второго порядка — третьего порядка 2. По мере кристаллизации образуются оси более высокого порядка (четвертого, пятого, шестого и т. д.), которые постепенно заполняют все промежутки, ранее занятые жидким металлом.

В целях определения критических температур кристаллизации и других параметров металлов строят кривые охлаждения. При этом применяют термический метод, сущность которого состоит в следующем. В тигель (емкость из термостойкого материала, чаще всего из графита или кварца) загружают металл (сплав) и расплавляют

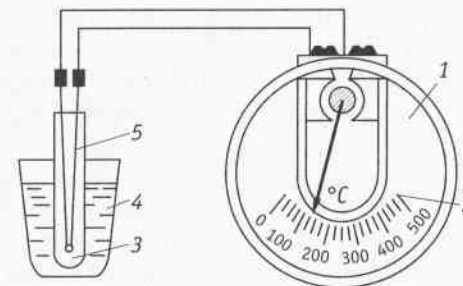


Рис. 1.7. Измерение температуры жидкого металла:

1 — гальванометр; 2 — шкала; 3 — наконечник; 4 — тигель; 5 — термopара

его. Расплавленный металл заливают в тигель 4 (рис. 1.7), в который погружают термopару 5. Тигель ставят на подставку и дают возможность металлу постепенно остыть.

Термopара представляет собой две проволоки из разных металлов (медь — константан, хромель — алюмель, платина — платинородий и др.), концы которых сварены с одной стороны. Свободные концы проволок подсоединяют к гальванометру 1 — милливольтметру. Для того чтобы извлечь термopару из затвердевшего сплава, на нее надевают наконечник 3. Сваренные концы термopары нагреваются от расплавленного металла, поэтому в проволоке возникает электродвижущая сила, отклоняющая стрелку гальванометра, которая, перемещаясь по шкале 2, показывает температуру металла. На миллиметровой бумаге строят график. В определенном масштабе по вертикали на графике наносят показатели температуры, а по горизонтали — показатели времени. С помощью секундомера через каждые пять секунд (можно через каждые 10, 20, 30 с и т. д.) фиксируют показания гальванометра. Значения температур отмечают на графике.

В лабораториях научно-исследовательских институтов кривые охлаждения получают с большой точностью, используя современные автоматические приборы.

Для медленно охлаждающегося чистого металла кривая охлаждения будет иметь вид, показанный на рис. 1.8, а. Кривая охлаждения свидетельствует о том, что жидкий металл охлаждается равномерно до точки А. В точке А понижение температуры прекращается. Между точками А и Б находится участок критической температуры, при которой начинается и заканчивается кристаллизация металла. Далее температура вновь понижается равномерно. Кривая охлажде-

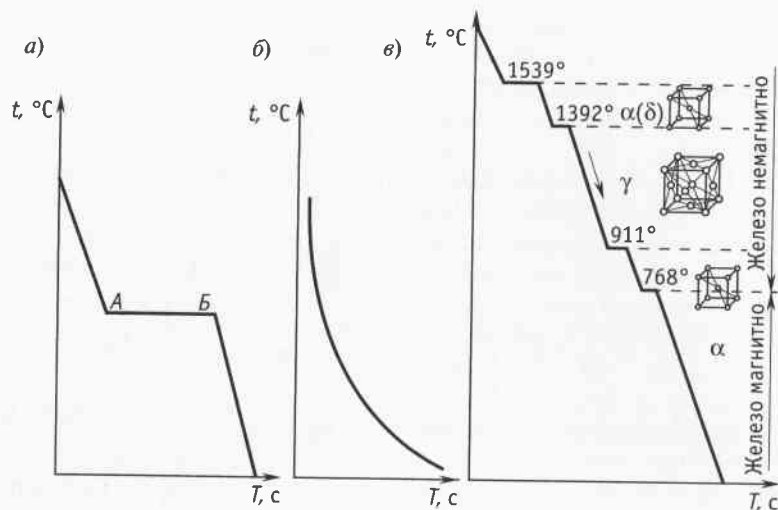


Рис. 1.8. Кривые охлаждения:

а — для медленно охлаждающегося чистого металла; б — аморфного тела; в — сплава

ния сплава показана на рис. 1.8, в (она станет понятна после изучения аллотропических превращений). Охлаждение аморфного тела протекает плавно (рис. 1.8, б), так как оно постепенно отвердевает вследствие уменьшения подвижности частиц. Кажущееся твердым аморфное тело по структуре представляет собой переохлажденную жидкость.

1.4. Аллотропические превращения металлов

Аллотропические превращения есть способность металла, находящегося в твердом состоянии, изменять свое строение при определенных температурах. Сущность этих превращений заключается в том, что у некоторых металлов (железа, олова, титана, кобальта, циркония и др.) при определенной температуре происходит перестройка атомов из одного типа кристаллической решетки в другой. Способность металла при постоянном химическом составе иметь различное строение, а следовательно, и разные свойства называется **полиморфизмом** (полиморфизм — многообразие).

Модификации — структурные различные формы одного и того же металла обозначаются буквами греческого алфавита: α — альфа, β — бета, γ — гамма, δ — дельта. Модификацию, устойчивую при

низкой температуре, принято обозначать буквой α , при повышенной температуре — β , при высокой — γ и при наиболее высокой — δ .

Аллотропические превращения, как и кристаллизация металла, протекают с поглощением или выделением теплоты, поэтому на кривых охлаждения можно наблюдать небольшие горизонтальные площадки. Температуры, соответствующие этим площадкам, называются критическими (как и при кристаллизации).

Переход металла из жидкого состояния в твердое называют первичной кристаллизацией, аллотропические превращения — вторичной кристаллизацией.

На рис. 1.9 представлена кривая охлаждения олова. Горизонтальная площадка при 232°C является критической температурой перехода олова из жидкого состояния в твердое — первичная кристаллизация. При этой температуре образуется модификация β -олово (белое олово), которая при 18°C переходит в модификацию $\beta + \alpha$ -олово. В результате аллотропических превращений (вторичной кристаллизации) (при температуре ниже 12°C существует модификация α -олово (серое олово)). При минусовых температурах на поверхности белого олова образуются серые бугорки, которые рассыпаются в порошок. Это явление называется оловянной чумой. Наибольшая скорость аллотропического превращения β -олова \rightarrow α -олово наблюдается при температуре -30°C . От оловянной чумы можно избавиться только путем переплава олова.

Первичная кристаллизация железа (см. рис. 1.8, в) происходит при 1539°C с образованием объемно-центрированной кубической решетки α (β)-железа, которая существует до температуры 1392°C . При этой температуре наблюдаются аллотропические превращения α -железо \rightarrow γ -железо с образованием гранецентрированной кубической решетки, которая существует до температуры 911°C . При ней в результате аллотропических превращений γ -железо \rightarrow α -железо снова образуется объемно-центрированная кубическая решетка, которая существует вплоть до комнатной температуры. Критическая температура 768°C к аллотропическим превращениям отношения не имеет. Она является границей существования магнитного и не-

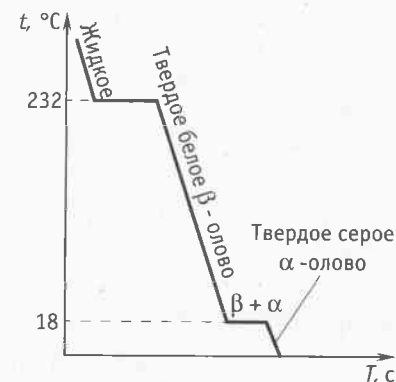


Рис. 1.9. Кривая охлаждения олова

магнитного железа. Как видно из кривой охлаждения железа (см. рис. 1.8, в), при температуре ниже 911°C α -железо может быть магнитным и немагнитным при одном и том же строении кристаллической решетки. Немагнитную область железа в интервале температур от 911°C до 768°C называют β -железом, а магнитную область от температуры 768°C и ниже — α -железом. Аллотропические превращения металла происходят при большинстве видов термической обработки сталей.

Контрольные вопросы

1. От чего зависят свойства металлов?
2. Назовите виды кристаллических решеток металлов. Сколько атомов содержит каждый из них?
3. В каких единицах измеряется расстояние между атомами кристаллической решетки?
4. Что такое вакансия, дислокация?
5. Укажите последовательность этапов процесса кристаллизации.
6. Для чего строят кривые охлаждения?
7. Что такое аллотропические превращения, их практическое значение?
8. Дайте определение модификации, приведите примеры.

Свойства металлов, способы их определения

2.1. Общие сведения

С развитием машиностроения в XIX в. к металлу были предъявлены строгие требования во всех областях техники. Появилась необходимость в разработке общепринятых методов испытания металла на прочность. В конце 50-х гг. XIX в. начинают вводиться систематические испытания прочности металла на разрыв, твердости металла, затем испытания на повторную нагрузку, изгиб, удар и др. В 1852 г. для нужд железных дорог даются сводки по отдельным производствам, первая из них опубликована в 1862 г.

Систематическое изучение способов испытания и условий приемки материалов началось в 1884 г. В 1897 г. в Стокгольме был создан Международный союз по испытанию технических материалов, который разработал международные нормы по испытанию металлов, условия технической приемки, способствовал созданию единообразия в испытании материалов. Введение механических испытаний значительно снизило брак в производстве, так как предварительный контроль устранял негодный металл из последующих технологических процессов. Современное оборудование и приборы дают возможность с большой точностью и надежностью осуществлять контроль над качеством материалов. При выборе материала для конкретной детали машины необходимо исходить из условия, что изготовленная из него деталь будет обладать достаточным запасом надежности и не износится преждевременно. Так, пружины и рессоры должны быть упругими, оси — стойкими против истирания, валы должны хорошо сопротивляться изгибу, подшипники скольжения — обладать антифрикционными свойствами, металлорежущий инструмент должен иметь высокие твердость, теплостойкость и износостойкость.

Все детали машин в процессе эксплуатации в той или иной мере подвергаются воздействию внешних нагрузок. Нагрузки, действующие на деталь во время работы, весьма разнообразны. Они могут растягивать ее, сжимать, изгибать и т. д. При этом воздействия могут производиться плавно, постепенно (статически) или мгновенно

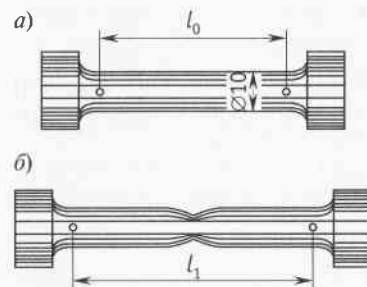


Рис. 2.1. Круглый образец для испытания на растяжение: до (а) и после (б) испытания; l_0 и l_1 — расчетная длина до и после испытания

принимать первоначальную форму после прекращения действия внешних сил называется *упругостью*, а деформация, исчезающая после снятия нагрузки, получила название *упругой*. Если к детали приложить большие усилия, то после прекращения их действия она не примет своей первоначальной формы, а останется деформированной (рис. 2.1, б). Такая деформация называется *пластической*. Способность материала деформироваться под действием внешних нагрузок, не разрушаясь, и сохранять измененную форму после прекращения действия усилий называется *пластичностью*.

Материалы, не способные к пластическим деформациям, называются *хрупкими*. Такие материалы при сильном нагружении или под действием удара разрушаются внезапно. К хрупким материалам относятся стекло, камень, чугун, сурьма, закаленная сталь и др. Важным свойством материалов, наряду с упругостью и пластичностью, является прочность. Она характеризуется максимальной нагрузкой, которую выдерживает материал не разрушаясь.

Детали машин или инструмент в зависимости от условий работы должны обладать определенными механическими свойствами (прочностью, упругостью, пластичностью). Для того чтобы узнать, удовлетворяет ли деталь предъявляемым к ней требованиям, производят специальные испытания. Вид испытания и характер его проведения указываются в технических условиях или на чертежах детали.

Наибольшее распространение получили следующие виды механических испытаний: на растяжение (по ГОСТу 1497—84), на ударный изгиб и ударную вязкость (по ГОСТу 9454—78), на твердость

(динамически). Воздействуя на деталь, внешние нагрузки изменяют ее форму, т. е. деформируют. Если к детали приложены сравнительно небольшие нагрузки, то после прекращения их действия она принимает свою первоначальную форму — деформация исчезает (рис. 2.1, а). Например, при движении вагона железнодорожные рельсы под действием силы тяжести прогибаются, но как только это действие прекращается, рельсы выпрямляются и принимают свою первоначальную форму. Свойство материалов

(по ГОСТу 9012—59*, ГОСТу 9013—59*, ГОСТу 2999—75 и ГОСТу 9450—76), на жаропрочность (по ГОСТу 9651—73).

Детали машин изготавливают резанием, литьем, ковкой, сваркой и другими способами. При этом необходимо хорошо знать технологические свойства материала.

2.2. Прочность, упругость, пластичность, усталость

Прочность, упругость и пластичность определяются при испытании металлов на растяжение. Этот вид испытания весьма распространен. Для проведения испытания изготавливают образцы плоской (из листового материала) или круглой формы. Чаще всего применяют круглые образцы (см. рис. 2.1). В таком образце наиболее важны два размера: диаметр d испытываемой части и расчетная длина l_0 . Испытания выполняют на разрывных машинах различных конструкций. По результатам испытаний машина записывает диаграмму растяжения (рис. 2.2). По оси абсцисс в определенном масштабе указывается удлинение образца (в мм), по оси ординат приложенная к нему нагрузка.

Для получения сравнимых результатов введено понятие «нормальное» напряжение. *Нормальным напряжением* называется нагрузка на единицу площади поперечного сечения образца. Нормальное напряжение обозначается греческой буквой σ . Если нагруз-

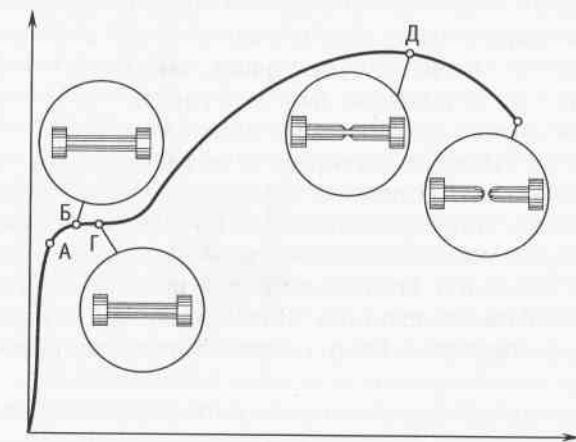


Рис. 2.2. Диаграмма растяжения стального образца

ка P выражена в ньютонах (Н), а площадь поперечного сечения F в квадратных миллиметрах (мм^2), то, пользуясь диаграммой растяжения, можно определить показатели механических свойств металлов (Па):

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

Точка А (см. рис. 2.2) соответствует максимальной нагрузке, которую выдерживает образец, не теряя своих упругих свойств. Если к образцу приложить такую или меньшую нагрузку, а затем ее снять, то никакого остаточного удлинения он не получит. Отношением нагрузки (в точке А) к площади поперечного сечения образца определяется величина предела упругости $\sigma_{0,05}$ (σ_e) в паскалях (Па), т. е. максимальное напряжение, до которого металл сохраняет свои упругие свойства. Выше точки А величина удлинения начинает расти быстрее усилия, поэтому кривая на диаграмме изгибается (точка Б), склоняясь к горизонтальной линии. У некоторых материалов участок от точки Б до точки Г имеет явно выраженную горизонтальную линию и называется *площадкой текучести*. Напряжение, соответствующее площадке текучести, называется *пределом текучести*. Предел текучести измеряется в Па.

В точке Б образец получает заметное остаточное удлинение.

Отношением нагрузки (в точке Г) к площади поперечного сечения образца определяется предел текучести. Если на диаграмме растяжения нет ярко выраженной площадки текучести, то пределом текучести условно считают то напряжение, при котором остаточное удлинение образца составляет 0,2% его первоначальной длины. При расчете деталей машин на прочность конструктор чаще всего исходит из значения предела текучести. Это объясняется тем, что предел текучести определить значительно проще, чем предел упругости, численно же они близки между собой. При дальнейшем увеличении растягивающего усилия (выше значения предела текучести) образец будет все больше удлиняться, при этом диаметр его будет уменьшаться. Когда усилие достигнет наибольшего значения, в образце образуется шейка, т. е. в каком-то месте по длине образца диаметр его уменьшится больше, чем в других местах.

В месте, где появится шейка, образец будет наиболее тонким, в дальнейшем здесь и произойдет разрыв его на две части.

Отношением наибольшей нагрузки (в точке Д) (см. рис. 2.1), которую выдержал образец до разрыва, к первоначальной площади его поперечного сечения определяется величина предела прочности.

Пределом прочности называется напряжение, отвечающее максимальной нагрузке, которую выдержал образец во время испытания. Предел прочности обозначается σ_B и выражается в Па.

Важная характеристика материалов — *удельная прочность*, которая определяется отношением предела прочности к удельному весу металла. Эта характеристика имеет большое значение при выборе материала, когда необходимо уменьшить массу машины.

Показателями пластичности, характеризующими способность металла деформироваться не разрушаясь, являются *относительное удлинение* и *относительное сужение*. Для получения этих показателей обе половинки разорванного образца плотно прижимают друг к другу и измеряют длину рабочей части (l_k), а также диаметр образца (d_k) в том месте, где произошел разрыв. *Относительное удлинение* обозначается греческой буквой δ и измеряется в процентах. Его определяют по формуле

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%,$$

где l_0 — первоначальная расчетная длина; l_k — расчетная длина после испытания.

Относительное сужение поперечного сечения образца ϕ , также измеряемое в процентах, находят по формуле

$$\phi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%,$$

где F_0 — площадь поперечного сечения образца до испытания, в мм^2 ; F_k — площадь сечения образца в месте разрыва (в шейке), мм^2 .

Чем больше относительное удлинение и относительное сужение поперечного сечения образца, тем более пластичен металл. Так, например, техническое железо при растяжении до разрыва удлиняется в 1,5 раза, у серого чугуна относительное удлинение и относительное сужение близки к нулю. Для изготовления большинства деталей машин и конструкций используют относительно пластичные материалы, так как они не подвержены опасности внезапного разрушения.

При испытании на растяжение одного образца можно установить шесть характеристик металла: предел упругости (σ_e), предел текучести (σ_T), предел прочности (σ_B), относительное удлинение (δ), относительное сужение (ϕ) и модуль упругости (E). Эти характеристики дают разностороннее представление о механических свойствах металла.

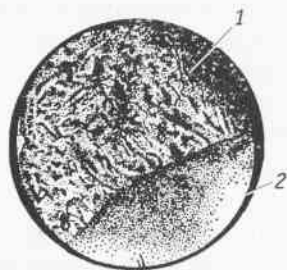


Рис. 2.3. Излом усталостного образца:
1 — зона крупнозернистой структуры; 2 — зона мелкозернистой структуры

Излом при усталости (рис. 2.3) состоит из двух разнородных зон: 1 — крупнозернистой структуры и 2 — мелкозернистой структуры. Излом мелкозернистой структуры образуется в результате трения металла при повторно-переменных нагрузках в местах появления трещин и надрывов. Если «здоровая» часть сечения изделия не в состоянии выдержать приложенной нагрузки, наступает внезапное разрушение, при котором образуется излом крупнозернистой структуры.

Усталостное разрушение наблюдается у таких деталей, как валы, оси, шатуны, пружины, рессоры и др., которые работают в условиях многократно повторяющихся переменных нагрузжений (растяжение — сжатие). Для того чтобы установить способность металлов работать в условиях многократных повторно- или знакопеременных нагрузок, определяют их предел выносливости (или усталости). *Пределом выносливости (усталости)* называют максимальное напряжение, которое выдерживает материал, не разрушаясь, при достаточно большом числе повторно-переменных нагружений (циклов). Для стальных образцов эту характеристику устанавливают при 10 млн циклов, для цветных металлов — при 100 млн циклов. Предел выносливости обозначают греческой буквой σ_{-1} и измеряют в Па. Испытания на усталость проводят на машинах, позволяющих осуществлять повторно-переменные нагружения при изгибе, кручении и растяжении — сжатии.

Чаще всего применяют машину, создающую повторно-переменный изгиб вращающегося образца (рис. 2.4, а). Испытанию подвергают 8—10 одинаковых образцов при различных напряжениях. Счетчик машины показывает количество циклов (оборотов), которые выдержал образец до разрушения при данном напряжении.

При длительной эксплуатации детали машин подвергаются повторно-переменным нагрузкам (растяжение — сжатие). При напряжениях, меньших предела текучести или предела упругости, они могут внезапно разрушиться. Это явление называют *усталостью металлов*.

Оно заключается в том, что сдвиги, происходящие в зернах, приводят к образованию микротрещин, количество и размеры которых постепенно увеличиваются.

Излом при усталости (рис. 2.3) состоит из двух разнородных зон:

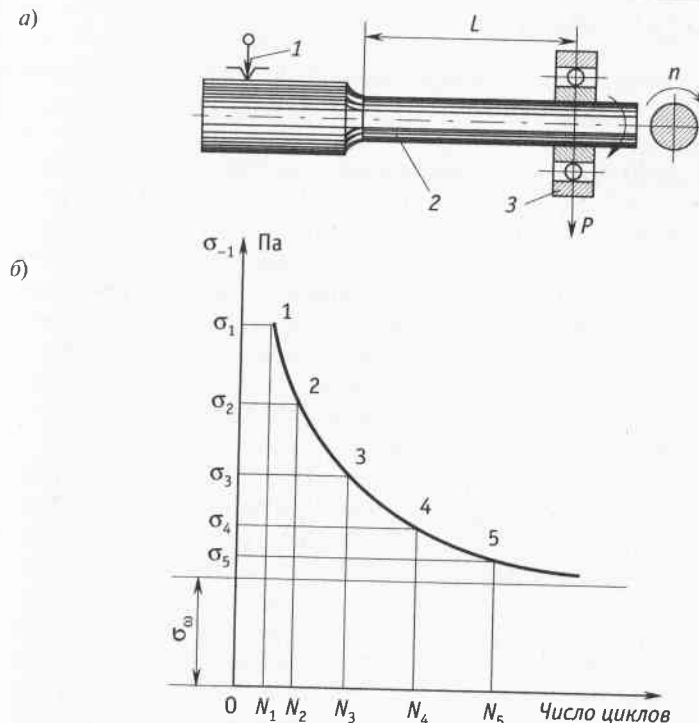


Рис. 2.4. Схема испытания образца на усталость (а) и кривая усталости (б):
1 — зажимной патрон; 2 — образец; 3 — подшипник

По результатам испытания строят диаграмму (рис. 2.4, б), по которой и определяют максимальное напряжение (предел выносливости). На основании опытных данных установлена зависимость предела выносливости от других прочностных характеристик, например:

$$\sigma_{-1} = (0,49 \pm 0,13)\sigma_B;$$

$$\sigma_{-1} = 0,75\sigma_e.$$

По этим формулам можно найти приближенное значение предела выносливости, так как усталость металлов в большой степени зависит от состояния поверхности изделия. Плохо обработанная поверхность, наличие рисок, надразов, коррозия резко снижают предел выносливости, так как являются концентраторами напряжений. Именно в тех местах, где имеются эти дефекты, возникают начальные микротрещины.

2.3. Жаропрочность

В процессе работы многие детали машин нагреваются до высоких температур, достигающих 1000°C и более. Для таких деталей важной характеристикой является *жаропрочность* — способность материалов сохранять необходимую прочность при высоких температурах.

Характеристики, которые определяют при обычных испытаниях, не дают представления о возможности использования материалов при повышенных и высоких температурах. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, с повышением температуры числовые значения предела прочности и предела текучести понижаются, что видно из рис. 2.5. Во-вторых, при повышенных температурах большое значение имеет длительность испытания. Дело в том, что у металлов и сплавов, работающих длительное время под нагрузкой при высоких температурах, наблюдается явление ползучести, т. е. непрерывная пластическая деформация под действием постоянной нагрузки (металл «ползет»). При работе под нагрузкой в условиях комнатной температуры ползучесть у большинства металлов отсутствует.

Жаропрочность металлов и сплавов характеризуют три показателя: предел кратковременной прочности, предел длительной прочности и предел ползучести.

Предел кратковременной прочности (σ_b) определяют, как и при обычных испытаниях, но с нагревом образца до заданной температуры. Эта характеристика служит для расчета на прочность деталей, работающих весьма непродолжительное время (секунды, минуты) при высоких температурах. Длительную прочность устанавливают для деталей, работающих при высоких температурах. *Пределом длительной прочности* называется напряжение, вызывающее разрушение образца при данной температуре через конкретный промежуток времени. Например, предел длительной



Рис. 2.5. Зависимость предела прочности и текучести от температуры

прочности $\sigma_{100}^{600} = 250$ МПа (25 кгс/мм²) означает, что при температуре 600 °C напряжение 250 МПа (25 кгс/мм²) вызывает разрушение образца через 100 ч.

Для деталей, работающих при высоких температурах в течение очень длительного времени, устанавливают *предел ползучести*. Для этого проводят соответствующие испытания, записывая диаграмму ползучести (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Диаграмма ползучести

Диаграмма ползучести состоит из трех участков, адекватных трем стадиям ползучести. На участке *I* ползучесть протекает с постепенно уменьшающейся скоростью (кривая постепенно становится пологой). Здесь металл больше упрочняется от наклепа вследствие растяжения, чем разупрочняется от действия высокой температуры. На участке *II* (прямая линия) ползучесть уравнивается упрочнением. На участке *III* (кривая круто поднимается вверх) разупрочнение начинает преобладать над увеличивающейся скоростью, что приводит к разрушению металла. При высокой температуре детали машин должны работать в условиях, соответствующих участку *II*. Длительность работы на участке *II* может быть разной: от 1000 ч (41,7 дня) до 100 тыс. ч (около 11,4 года). За это время металл не должен удлиняться более чем на $\alpha\%$. Величину α задают разной: от 0,1 до 1%.

Таким образом, *пределом ползучести* называется напряжение, которое за конкретный промежуток времени при данной температуре вызывает заданное удлинение (например, 1%). При расчете предела ползучести необходимо знать температуру испытания, величину деформации, нагрузку и время ее действия. Например, предел ползучести составляет $\sigma_{1/1000}^{600} = 200$ МПа (20 кгс/мм²). Это означает, что для удлинения образца на 1% за 1000 ч при температуре 600 °C предел ползучести должен быть равен 200 МПа (20 кгс/мм²). Если увеличить напряжение, то суммарная деформация возрастет (будет выше 1%).

2.4. Твердость

Твердость — одна из характеристик механических свойств металлов. Обычно ее определяют в лабораторных или в заводских условиях путем воздействия на поверхность металла наконечника, изготовленного из малодеформирующегося материала (твердая закаленная сталь, твердый сплав, сапфир или алмаз) и имеющего форму шарика, конуса, пирамиды или иглы. По сравнению с другими ха-

раактеристиками механических свойств, твердость измеряется достаточно просто несколькими способами, различающимися по характеру воздействия на наконечник. Твердость можно измерять вдавливанием наконечника (способ вдавливания) — сопротивление пластической деформации; царапанием поверхности (способ царапания) — сопротивление разрушению (для большинства металлов путем среза); ударом, либо по отскоку наконечника (шарика) — упругие свойства.

Наибольшее распространение получило измерение твердости вдавливанием. В результате вдавливания с достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Особенность происходящей при этом деформации заключается в том, что она протекает в небольшом объеме, окруженном недеформированным металлом. Пластическую деформацию при вдавливании могут испытывать не только пластичные, но и хрупкие металлы (например, серый чугун), которые при обычных механических испытаниях (на растяжение, сжатие, кручение, изгиб) разрушаются хрупко почти без макроскопически заметной пластической деформации. Таким образом, твердость, характеризующая сопротивление пластической деформации, представляет собой механическое свойство металла, отличающееся от других его механических свойств способом измерения. Остановимся на некоторых преимуществах испытания металлов на твердость по сравнению с другими видами испытаний.

1. При испытании на твердость можно определить количественную зависимость между твердостью пластичных металлов, установленной путем вдавливания, и другими механическими свойствами (главным образом, пределом прочности). Величина твердости характеризует предел прочности сталей (кроме аустенитной и мартенситной структуры) и многих цветных сплавов. Указанная количественная зависимость обычно не наблюдается для хрупких материалов, которые при испытаниях на растяжение (сжатие, изгиб, кручение) разрушаются без заметной пластической деформации, а при измерении твердости получают пластическую деформацию. Однако в ряде случаев и для этих материалов (например, серых чугунов) можно установить эту зависимость (возрастанию твердости обычно соответствует увеличение предела прочности на сжатие). По значениям твердости определяются некоторые пластические свойства металлов.

Твердость, установленная вдавливанием, характеризует также предел выносливости некоторых металлов, в частности меди, дюралюминия и сталей в отожженном состоянии.

2. Измерить твердость значительно проще, чем определить прочность, пластичность и вязкость. Испытания на твердость не требуют изготовления специальных образцов и выполняются прямо на деталях после зачистки их поверхности (создание ровной горизонтальной площадки), а иногда даже и без предварительной их подготовки. Для проведения этих испытаний не требуется много времени. Так, вдавливание конуса осуществляется за 30—60 с, вдавливание шарика — за 1—3 мин.

3. Измерение твердости обычно не влечет разрушения проверяемой детали, которая после испытаний может использоваться по своему назначению, в то время как для определения прочности, пластичности и вязкости приходится изготавливать специальные образцы.

4. Твердость можно измерять на деталях небольшой толщины, а также в очень тонких слоях, не превышающих иногда десятых долей миллиметра, или в микрообъемах металла (измерения микротвердости). Поэтому путем измерения твердости можно оценивать различные по структуре и свойствам слои металла, например поверхностный слой цементированной, азотированной или закаленной стали, имеющей разную твердость по сечению детали. Путем определения микротвердости можно измерить твердость отдельных структурных составляющих в сплавах.

Для получения полной характеристики свойств металла необходимо наряду с измерением твердости провести другие механические испытания. Поскольку измерения твердости в большинстве случаев не влекут за собой разрушения деталей, их можно выполнять при сплошном контроле, в то время как при определении прочности и пластичности проводят выборочный контроль деталей.

Способом вдавливания определяют твердость (макротвердость) и микротвердость. При измерении твердости (макротвердости) в исследуемый материал вдавливают тело, проникающее на сравнительно большую глубину, зависящую от величины прикладываемой нагрузки и свойств металла. Часто вдавливаемое тело имеет значительные размеры (например, стальной шарик диаметром 10 мм), в результате чего в деформируемом объеме оказываются представленными все фазы и структурные составляющие сплава, количество и расположение которых характерны для измеряемого материала. Измеренная твердость в этом случае будет характеризовать твердость всего испытываемого материала.

Выбор формы и размеров наконечника, а также величины нагрузки зависит от целей исследования, структуры, ожидаемых свойств, состояния поверхности и размеров испытываемого образца.

Прибор для измерения твердости принимается по ГОСТу 23677—79. К нему применяются стальные и твердосплавные шарики диаметрами 1,0; 2,0; 2,5; 5,0; 10 мм. Стальные шарики должны иметь твердость не менее 850HV10, а из твердого сплава — 1500 HV10 (твердость по Виккерсу).

На практике пользуются заранее составленными таблицами, в которых приводится твердость (НВ) в зависимости от диаметра отпечатка и соотношения между нагрузкой Р и поверхностью отпечатка А. Используя переводные таблицы, твердость по Бринеллю можно перевести на твердость по Роквеллу и Виккерсу (условно).

Между пределом прочности и твердостью НВ различных металлов существует приблизительная зависимость: сталь твердостью 120—175 НВ, $\sigma_b \approx 0,34$ НВ; сталь твердостью 175—450 НВ, $\sigma_b \approx 0,35$ НВ; медь, латунь, бронза отожженная $\sigma_b \approx 0,55$ НВ, наклепанные $\sigma_b \approx 0,40$ НВ; алюминий и алюминиевые сплавы твердостью 20—45 НВ, $\sigma_b \approx (0,33—0,36)$ НВ; дюралюминий отожженный $\sigma_b \approx 0,36$ НВ; дюралюминий после закалки и старения $\sigma_b \approx 0,35$ НВ. Измерение твердости вдавливанием стального шарика не является универсальным способом. Этим способом нельзя испытывать материалы с твердостью более 450 НВ и измерять твердость тонкого поверхностного слоя (толщиной менее 1—2 мм), так как стальной шарик продавливает этот слой и проникает на большую глубину. Толщина измеряемого слоя (или образца) при этом способе должна быть не меньше 10-кратной глубины отпечатка.

Широко известно измерение твердости по глубине отпечатка, получаемого при вдавливании алмазного конуса или стального шарика, — метод *Роквелла*. Определение твердости осуществляется с помощью конусного твердомера (ТР) по ГОСТу 9013—59. Этот метод позволяет изменять нагрузку в широких пределах без изменения значений твердости.

Прибор ТР имеет предварительную нагрузку 100 Н (10 кгс) и окончательную нагрузку с учетом выбора шкалы А, В или С. Для шкалы А один груз на рычаге сообщает образцу дополнительную нагрузку 490,3 Н (50 кгс), следовательно, общая нагрузка составит 588,4 Н (60 кгс), два груза — 882,6 Н (90 кгс) при общей нагрузке 980,7 Н (100 кгс), три груза — 1373 Н (140 кгс) при общей нагрузке 1471 Н (150 кгс). На приборе указана общая нагрузка. Твердость по Роквеллу возрастает с увеличением твердости материала, что позволяет сравнивать показатели твердости по Роквеллу и по Бринеллю. Вместе с тем твердость по Роквеллу не имеет той размерности и того физического смысла, который имеет твердость по Бринеллю. Однако показатель твердости по Роквеллу можно пересчитать на показа-

тель твердости по Бринеллю с помощью диаграмм или дополнительных таблиц, построенных на основании многочисленных экспериментальных работ. ГОСТ 9013—59 претерпел изменения, в результате которого твердость по Роквеллу измеряют, применяя следующие шкалы: А, В, С, D, E, F, G, H, K при температуре около 20 °С. При внедрении в поверхность образца (изделия) алмазного конуса следует пользоваться шкалами А, С, D, а при внедрении стального сферического наконечника — шкалами В, E, F, G, H, K. Приборы для измерения твердости должны соответствовать требованиям ГОСТа 23677—79. Применяемый наконечник алмазный конусный типа НК по ГОСТу 9377—81 с углом при вершине 120°, радиус сферической части 0,2 мм. Номинальный диаметр шариков 1,588 мм (шкалы В, F, G) и 3,175 мм (шкалы E, H, K) по ГОСТу 3722—81. Приложения усилий приведены в табл. 2.1, в Н (кгс).

Твердость по Роквеллу обозначают символом HR с указанием шкалы твердости, которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр. Например: 72,5 HRG — твердость по Роквеллу 72,5 единиц по шкале G.

Таблица 2.1. Приложения усилий при измерении твердости по Роквеллу

Шкала твердости	Обозначение единицы измерения	Предварительное усилие F_0	Основное усилие F_1	Общее усилие F	Диапазон измерений единиц твердости
A	HRA	98,07 (10)	490,3 (50)	588,4 (60)	20—88
B	HRB	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7 (100)	20—100
C	HRC	98,07 (10)	1373,0 (140)	1471,0 (150)	20—70
D	HRD	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7 (100)	40—77
E	HRE	98,07 (10)	882,6 (90)	980,7 (100)	70—100
F	HRF	98,07 (10)	490,3 (50)	588,4 (60)	60—100
G	HRG	98,07 (10)	1373,0 (140)	1471,0 (150)	30—94
H	HRH	98,07 (10)	490,3 (50)	588,4 (60)	80—100
K	HRK	98,07 (10)	1373,0 (140)	1471,0 (150)	40—100

ГОСТ 9013—59 в измененной редакции предлагает диаграммы определений минимальной толщины образца в зависимости от шкалы и ожидаемой твердости при измерении по выше перечисленным шкалам.

В этом же стандарте предусмотрены табличные данные для поправок, добавляемых к величинам твердости по Роквеллу, при измерениях на выпуклых цилиндрических поверхностях.

Манипулируя выше перечисленными шкалами, а вместе с тем и изменяя нагрузки, методом Роквелла можно производить измерения твердости в очень широком диапазоне. Кроме того, после измерений на образцах (изделиях) остается незначительный след, практически не влияющий на его товарный вид.

Измеряя твердость по Бринеллю, заранее учитывают, что на образце (изделии) останутся визуально заметные лунки. Но в том и другом случае на чертеже указывают желательное место замеров твердости.

Методом Роквелла можно измерять твердость закаленной или низкоотпущенной стали (твердостью свыше 450 НВ), т. е. в условиях, когда вдавливание стального шарика (на приборах Бринелля или Роквелла) в твердый материал может вызвать деформацию стального или скол твердосплавного шариков, что даст искаженные результаты. Можно измерить поверхности тонких слоев, но толщиной более 0,5 мм (цементированные или азотированные изделия); очень твердые материалы (более 70 HRC), например твердые сплавы, алмазным конусом при общей нагрузке 588,4 Н (60 кгс); стальным шариком с нагрузкой 980,7 Н (100 кгс) мягкую сталь или отожженные цветные металлы в деталях или образцах толщиной 0,8—2 мм, т. е. в условиях, когда измерение твердости по Бринеллю, выполняемое шариком большого диаметра, может вызвать смятие образца (изделия).

Твердость следует измерять не менее чем в трех точках (особенно алмазным конусом), т. е. не менее трех раз на одном образце. Для расчета лучше принимать среднее значение результатов второго и третьего измерений и не учитывать результат первого измерения. Для определения твердости по Роквеллу требуется меньше времени (30—60 с), чем по Бринеллю, причем результат измерения виден на шкале (указан стрелкой). При измерении твердости по Роквеллу остается меньший отпечаток на поверхности детали. Твердость очень тонких слоев металла (толщиной менее 0,3 мм) при нагрузках 588,4 Н и 1471 Н (60 и 150 кгс) измерять нельзя, так как алмазный конус проникает на глубину, превышающую толщину этих слоев. Вместе с тем с увеличением твердости измеряемого материала глу-

бина отпечатка уменьшается, вследствие чего снижается точность измерения (особенно металлов твердостью более 60 HRC). Для этих целей иногда применяют приборы типа суперроквелл (тип ТРС) по ГОСТу 22975—78 или Виккерс (тип ТВ) по ГОСТу 2999—75, с помощью которых измеряют твердость при меньшей нагрузке и с меньшей глубиной вдавливания. Предварительная нагрузка при этом составляет 29,42 Н (3 кгс). Каждое деление шкалы индикатора такого прибора соответствует глубине вдавливания, равной 1 мкм. Поэтому чувствительность данного прибора заметно выше.

2.5. Ударная вязкость

Ударной вязкостью называют отношение работы ударного разрушения образца к площади его поперечного сечения в месте концентратора. Ударная вязкость измеряется в Дж/см² (кгс·м/см²). На рис. 2.7 показан образец с концентратором (надрезом). Размеры образца, форма концентратора и способ обработки места надреза оказывают большое влияние на результаты измерения ударной вязкости. Концентраторы выполняют в твердых металлах абразивом, а в мягких — фасонной фрезой с дополнительным шлифованием или доводкой дна концентратора.

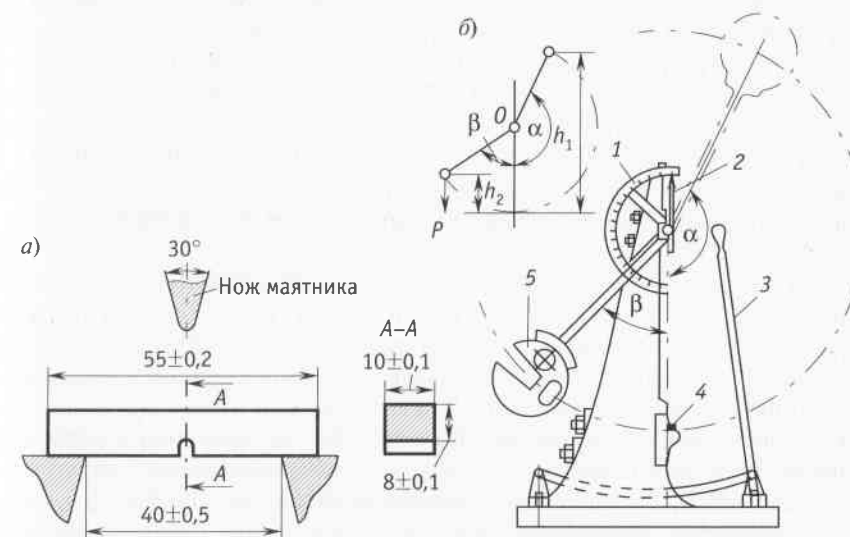


Рис. 2.7. Схема испытания на ударную вязкость:
а — размеры образца, положение ножа маятника; б — схема маятникового копра: 1 — шкала; 2 — стрелка; 3 — тормоз; 4 — образец; 5 — маятник

Ударную вязкость определяют с помощью копров (см. рис. 2.7, б) по ГОСТу 10708—82. Разрушение образца осуществляется маятником, свободно качающимся в опорах и имеющим нож определенной формы и размеров. Образец устанавливают на нижние опоры копра симметрично опорам, т. е. так, чтобы надрез был обращен в сторону, противоположную направлению удара. Маятник поднимают в верхнее положение и закрепляют посредством защелки. В таком положении маятник обладает потенциальной энергией Ph_1 , где P — масса маятника; h_1 — высота подъема. Затем маятник опускают. При падении он разрушает образец, после чего поднимается на некоторую высоту h_2 , обладая при этом энергией Ph_2 , меньшей энергии Ph_1 . Разность между Ph_1 и Ph_2 определяет работу, затраченную на разрушение образца. Стрелка, установленная на станине копра, захватывается маятником и указывает на шкале угол подъема маятника после разрушения образца. Работа удара K [Дж (кгс • м)] определяется по формуле

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

где l — расстояние от оси маятника до его центра массы; α и β — углы подъема маятника соответственно до и после разрушения.

Угол α принимают постоянным, поэтому стрелку перед началом испытания переводят по шкале в положение, соответствующее 0° . Весь расчет работы разрушения можно не проводить, так как копры снабжены таблицей, в которой против каждого значения угла указаны соответствующие значения K . Чем меньше работа разрушения K , тем более точными должны быть измерения. Поэтому для образцов, требующих небольшую работу разрушения, следует применять менее мощный копер. Удобными для испытания являются маятниковые копры, у которых можно изменять высоту подъема маятника и тем самым регулировать работу удара.

Зная работу удара K , можно найти ударную вязкость KC образца с надрезом [Дж/см² (кгс • м/см²)]:

$$KC = \frac{K}{S_0}.$$

Здесь K — работа удара, Дж (кгс • м); S_0 — начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, см², где $S_0 = H'_1 \cdot B$, H'_1 — начальная высота рабочей части образца, см; B — начальная ширина образца, см.

В приведенной формуле работа удара K отнесена к площади поперечного сечения образца в месте надреза. Между тем удар маятника воспринимается не площадью сечения образца, а определенным

объемом вокруг места надреза, в котором происходит деформация. Чем больше этот деформируемый объем, тем выше способность металла рассредоточивать деформацию и тем больше ударная вязкость. Ударная вязкость снижается при повышении прочностных свойств металла (если одновременно ухудшается пластичность). Для более хрупких металлов при испытании используют образцы без надреза, тогда ударную вязкость обозначают $K_{6,н}C$.

Ударная вязкость значительно изменяется при понижении температур (в условиях, когда вязкое разрушение становится хрупким). Поэтому испытания на ударную вязкость используют для определения *хладноломкости*, т. е. перехода стали из вязкого в хрупкое состояние при пониженных температурах.

Работу удара обозначают двумя буквами (KU , KV или KT) и цифрами. Буква K — работа удара, буквы U , V или T — вид концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца.

Например:

$KV^{-40} 50/2/2$ — *работа удара*, определенная на образце с концентратором вида V при температуре -40°C ; максимальная энергия удара маятника 50 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 2 мм;

$KCT^{+100} 150/3/7,5$ — *ударная вязкость*, определенная на образце с концентратором вида T при температуре $+100^\circ\text{C}$; максимальная энергия удара маятника 150 Дж, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

2.6. Технологические свойства металлов

Технологические свойства металлов — это часть их общих физико-химических свойств. Знание этих свойств позволяет более обоснованно проектировать и изготавливать изделия с улучшенными для данного металла (сплава) качественными показателями. Так, хорошие литейные свойства металла (сплава) дают возможность получать фасонные отливки без внутренних и внешних дефектов. К технологическим свойствам металлов относятся: жидкотекучесть, усадка, пластичность, свариваемость, паяемость, упрочняемость, незакаляемость, прокаливаемость, обрабатываемость резанием. Эти свойства определяются температурами плавления, кипения, заливки, кристаллизации. Чем ниже эти температуры, тем меньше стоимость расплава.

Жидкотекучесть — это способность металла заполнять литейную форму. Она зависит от вязкости, поверхностного натяжения и температуры заливки расплава. Чем выше жидкотекучесть расплава, тем легче заполнять сложную литейную форму.

Усадка показывает разницу между линейными размерами модели и отливки. Чем меньше усадка металла, тем меньше его склонность к образованию усадочных раковин и трещин.

Пластичность, или деформируемость, — способность металла изменять форму при гибке, ковке, штамповке, прокатке и прессовании без нарушения целостности. Некоторые технологические пробы, используемые для исследования металлов на деформируемость, стандартизированы. Оценка качества металла при исследовании его деформируемости производится визуально по состоянию поверхности после испытания.

Испытание на изгиб в холодном и нагретом состояниях нормируется ГОСТом 14019—80 и производится на образцах по ГОСТу 7564—97.

Испытания проводят на образце с постоянной площадью поперечного сечения, который подвергают изгибу сосредоточенной нагрузкой в середине пролета между опорами (рис. 2.8). Расстояние между опорами l (мм) определяется (рис. 2.8, а) с округлением до 1,0 мм и вычисляется по формуле

$$l = (D + 3a) \pm \frac{a}{2},$$

где D — диаметр закругления (толщина) оправки, мм; a — толщина или диаметр (диаметр вписанной окружности для многоугольного сечения образца), мм.

Ширина оправки (см. рис. 2.8, б) и опор должна быть больше ширины образца.

Испытание *на изгиб* проводят: до заданного угла изгиба; до появления первой трещины в растянутой зоне образца с определением угла изгиба; до параллельности сторон; до соприкосновения сторон.

Испытание на изгиб проводят при плавном увеличении нагрузки на образец. Если испытание проводят до появления первой трещины с определением угла изгиба, то скорость испытания не должна превышать 15 мм/мин.

При испытании на изгиб в жестко закрепленной в тисках оправке образец одним концом зажимают в тисках и изгибают на заданный угол (рис. 2.8, з). Радиус оправки оговаривается в нормативно-технической документации на металлопродукцию.

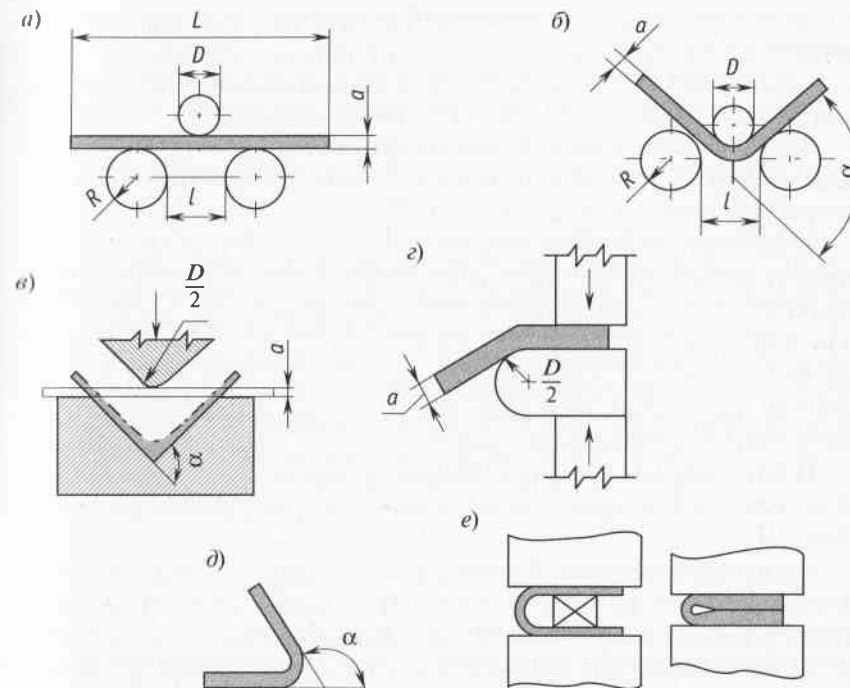


Рис. 2.8. Испытания на изгиб:

а, б — до заданного угла; в — на определенный угол; г — в жесткой оправке; д — до и после снятия нагрузки; е — до соприкосновения сторон

При испытании *до заданного угла изгиба* образец устанавливают на опоры (см. рис. 2.8, а) или на матрицу (см. рис. 2.8, б) и изгибают при помощи оправки до заданного угла. Угол изгиба можно измерять до и после снятия нагрузки (см. рис. 2.8, д). Испытание до появления первой трещины проводят по той же методике, что и изгиб до заданного угла. Угол изгиба измеряют без снятия нагрузки.

Испытания на изгиб до параллельности сторон проводят после предварительного изгиба образца на угол не менее 150° по рис. 2.8, б, в, г. Далее догибают до соприкосновения сторон образца с прокладкой толщиной, равной толщине (диаметру) оправки с образованием естественной петли. Опорные поверхности должны быть больше половины длины образца (см. рис. 2.8, е).

Результаты испытаний проводят в соответствии с указаниями нормативно-технической документации. Если таких указаний нет, то признаком того, что образец выдержал испытание на изгиб, слу-

жит отсутствие излома, расслоений и трещин, видимых невооруженным глазом.

Предельной пластичностью считается момент появления первой трещины, установленной невооруженным глазом.

Испытание на перегиб лент, листов и полос толщиной до 4 мм и шириной 20 мм производят по ГОСТу 13813—68, а проволоки различных сечений — по ГОСТу 1579—80.

Испытание на усадку выполняют по ГОСТу 8817—73 в целях выявления способности металла принимать заданные размеры и форму. Испытания на *расплющивание* проводят по ГОСТу 8818—73 с прутками и готовыми заклепками в холодном состоянии. Цель испытаний — определение годности материала для изготовления головок заклепок, болтов, винтов и гвоздей. Расплющивание производят до получения головки заданных размеров, устанавливаемых отношением диаметра D расплющенной головки к диаметру d прутка или стержня заклепки. Испытаниями на *навивание* проволоки, выполняемыми по ГОСТу 10447—80, устанавливают способность проволоки навиваться на цилиндр для получения пружины. Диаметры цилиндра и навиваемой проволоки регламентированы техническими условиями. Испытанием проволоки на *скручивание* (ГОСТ 1545—63) определяют ее пластичность и структуру на изломе. Расчетная длина проволоки равна 100 ее диаметрам. Такой вид испытаний проводят при изготовлении фасонных деталей из проволоки. При соединении кусков листового металла встык в холодном состоянии (кровля крыш, вентиляционные трубы и др.) осуществляют испытания на «двойной кровельный замок» (ГОСТ 13814—68). Испытание на выдавливание проводят по ГОСТу 10510—80 (метод Эриксона) на специальном приборе. В металле выдавливается сферическая лунка до момента уменьшения усилия вытяжки. Положительным результатом считается отсутствие нарушения целостности поверхностного слоя металла. Чем пластичнее материал, тем больше длина вытянутой лунки.

Свариваемость — способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения при их плавлении. Хорошей свариваемостью обладают низкоуглеродистые стали. Для сваривания высокоуглеродистых и большинства легированных сталей, а также чугунов применяют сложные технологические процессы. Хорошая свариваемость характеризуется плотным швом в зоне сварки, без трещин и раковин. Качество сварного соединения определяется ГОСТами 13585—68, 6996—66, 3242—69, 7512—75 и 10145—62.

Паяемость — способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения с помощью промежуточного сплава —

припоя (адгезива), температура плавления которого значительно ниже температуры соединяемых металлов. При пайке не происходит структурных изменений соединяемых металлов, так как они не нагреваются до высоких температур и не плавятся, как при сварке. Припой и соответствующие им флюсы выбирают в зависимости от металлов и сплавов, подлежащих пайке. Параметры паяных соединений нормируются ГОСТом 19249—73.

Упрочняемость — способность металлов и сплавов улучшать свои свойства (прочность, износостойкость, твердость и др.) за счет термической, химико-термической, термомеханической, механической и других видов обработки.

Незакаливаемость — способность металлов и сплавов не изменять свои прочностные и пластические свойства после нагревания и резкого охлаждения, что имеет большое значение при сварочных процессах. Незакаливается металл нагревают до 750 °С, затем резко охлаждают в воде, после чего проверяют его на изгиб.

Прокаливаемость характеризуется критическим диаметром прутка, который закаливается насквозь. Испытание на прокаливаемость проводят по ГОСТу 5657—69. Для этого изготавливают специальный образец, который после нагревания и выдержки при определенной температуре охлаждают с торца на специальной установке. После охлаждения образца измеряют его твердость от охлажденного торца вдоль оси.

Обрабатываемость резанием — свойство металла или сплава обрабатываться резцом или абразивом. При хорошей обрабатываемости получается малая шероховатость поверхности (чистота), обеспечивается точность размеров готовой детали. Хорошо обрабатываемые металлы обладают невысоким сопротивлением резанию, не затрудняют процесс стружкообразования, не снижают стойкость инструмента. Повышенной и высокой обрабатываемостью резанием обладают конструкционные стали (ГОСТ 1414—75). За эталон обрабатываемости принята сталь 45.

2.7. Изучение структуры металлов

Механические свойства металлов и сплавов в основном предопределяются их структурным строением. По структурному строению заготовки можно судить о ее качестве, определить условия предварительной обработки (литье, обработка давлением, сварка, термическая или химико-термическая обработка). Рассмотрим основные способы определения структуры металлов и сплавов.

Макроскопический анализ. Этот способ заключается в изучении строения металла невооруженным глазом или при увеличении (через лупу) до 30 крат. При таком анализе можно исследовать большую поверхность детали (заготовки). Чаще всего макроанализ является предварительным исследованием структуры металла. Он отличается простотой и доступностью, не требует значительных средств и времени. Этим способом пользуются для выявления пористости металла, ликвации (неоднородности отдельных участков поверхности по химическому составу, структуре, неметаллическим и газовым включениям) пузырей, трещин, послойной кристаллизации, остатков усадочной раковины, рыхлоты, расслоения, обезуглероживания и науглероживания поверхности, свищей (газовых пузырей), флокенов (беспорядочно ориентированных трещин), инородных металлических и шлаковых включений, раскатанных трещин, рванин, чешуйчатости, морщин, остатков окалины, шлифовочных трещин, направления волокон при обработке давлением и т. д.

Наиболее простой и быстрый способ изучения структуры металлов — рассмотрение изломов. По излому стали, например, можно обнаружить перегрев, так как в этом случае излом будет крупнозернистым (на изломе будут отчетливо видны блестящие). Таким путем можно также отличить закаленную сталь от отожженной. По излому устанавливают толщину цементированного слоя, а иногда судят и о качестве стали. Так, слоистый (шиферный) излом свидетельствует о том, что сталь загрязнена неметаллическими включениями, излом со светлыми блестящими, напоминающими чешуйки нафталина, говорит о хрупкости и низкой эксплуатационной стойкости быстрорежущей стали. По излому можно узнать о вязкости стали. Кристаллический блестящий излом характерен для низкой вязкости стали, а волокнистый матовый — указывает на достаточную ее вязкость.

Для макроисследования металла используют специальные образцы — макрошлифы (рис. 2.9). Для этого от исследуемой заготовки отрезают пластинку (темплет) так, чтобы в нее попала большая часть исследуемого сечения детали. Плоскость отрезанной пластинки шлифуют. Часто макрошлиф получают на одной из поверхностей заготовки. Если такую поверхность протравить специальными кислотами (реактивами), можно увидеть макроструктуру металла. По макрошлифу устанавливают направление волокон в ковном прокатанном или штампованном металле (см. рис. 2.9), ликвацию (по сере и фосфору), зону термического влияния сварного шва и др.

Однако макроанализ не дает возможности получить количественные характеристики структуры металла.

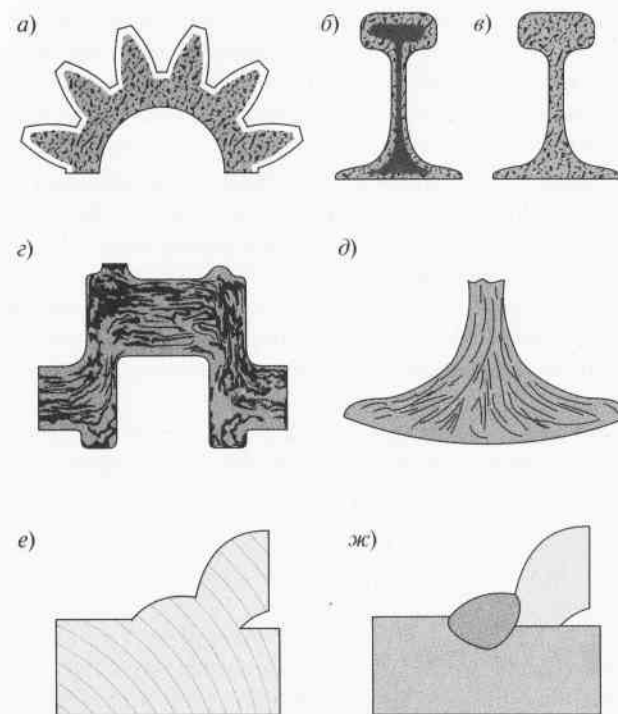


Рис. 2.9. Макрошлифы:

а — поверхностная закалка зубьев шестерни; б — ликвация (неоднородность химического состава) серы; в — равномерное распределение серы; г — результат гибки пруткового металла, волокна коленчатого вала после штамповки прокатанной заготовки; д — распределение волокон головки клапана после осадки прокатанной заготовки; е, ж — сварное соединение до и после травления

Микроструктурный анализ. Этот способ заключается в исследовании структуры материалов при больших увеличениях с помощью микроскопов. Размер увеличения зависит от цели исследования и структуры сплавов. В одних случаях большие увеличения нецелесообразны, в других, наоборот, являются необходимыми. Исследование структуры методом оптической микроскопии впервые было предложено горным инженером Павлом Петровичем Аносовым в 1831 г.

Микроскоп как никакой другой прибор помог раскрыть многие секреты металлов. Кристаллическая структура металла особенно отчетливо видна под микроскопом на поверхности излома. Но самые обширные и важные сведения дало исследование под микроскопом

плоских, специально обработанных (до зеркального блеска), а затем протравленных металлических поверхностей (микрошлифов). В настоящее время широко применяется электронный микроскоп, который в комплексе с оптическим микроскопом позволил глубоко изучить и понять свойства и поведение металлических материалов.

Увидеть под микроскопом какую-либо структуру можно только в том случае, если металл содержит различные составляющие, различающиеся по своим оптическим свойствам (рис. 2.10).

Максимальное увеличение оптического микроскопа — 1500 крат, увеличение электронного микроскопа — от 20 до 200 тыс. крат.

Оптическая металлография дала возможность раскрыть типы, расположение и процесс образования структурных составляющих в металле.

Электронная металлография стала незаменимой при выявлении дефектов кристаллической решетки, от которых в значительной мере зависят свойства металлов.

Рентгеноструктурный анализ. Этот способ применяют для изучения строения кристаллической решетки. Начало ему было положено в 1912 г., когда Макс фон Лауэ, Вальтер Фридрих и Пауль Киппинг впервые направили узкий рентгеновский луч на кристалл сернокислой меди, за которым поставили фотографическую пластинку. Помимо центрального черного пятна от пучка, прошедшего через кристалл, на пластинке отчетливо было видно множество расположенных в строгом порядке черных точек. Эти точки давали лучи, которые при прохождении через кристалл отклонялись от центрального пучка под разными углами. Удачный эксперимент позволил установить сразу два фундаментальных факта: во-первых, рентге-

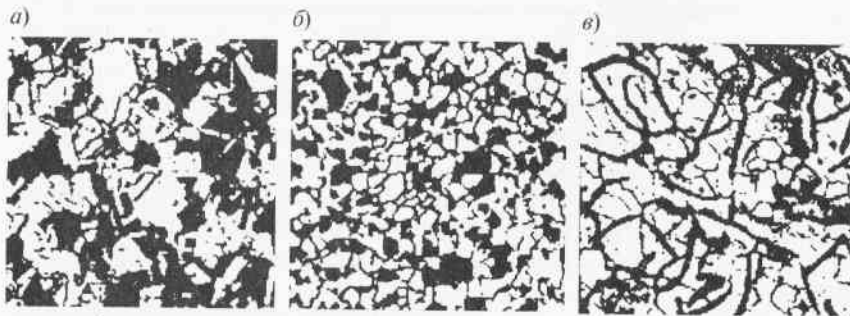


Рис. 2.10. Микроструктура:

а — оловянистая бронза после прокатки и отжига; б — сталь с содержанием 0,4% углерода (темные участки — перлит, светлые — феррит); в — серый чугун (светлые участки — феррит, темные — графит)

новское излучение по природе представляет собой электромагнитные волны, во-вторых, кристалл — это трехмерная периодическая решетка, расстояние между узлами которой близко к длине волны рентгеновского излучения. Этим способом, но при более совершенной аппаратуре, ученые пользуются и в настоящее время.

Радиографический анализ. Этот способ начал развиваться с появлением искусственных радиоактивных изотопов. Чаще всего его применяют как автордиографический. Для изучения распределения какого-либо химического элемента в структуре металла в него вводят радиоактивный изотоп этого элемента. Приготавливают макро- или микрошлиф, на который накладывают пластику или бумагу со специальной эмульсией, чувствительной к излучению радиоактивного изотопа. В местах скопления изотопа эмульсия засвечивается. После фотообработки изучают распределение химического элемента в структуре металла, как в макро-, так и в микро-масштабах. При этом удается установить не только качественные, но и количественные характеристики.

При исследовании металла большое значение имеют температуры плавления ($T_{пл}$), рекристаллизации ($T_{рек}$) и отношение $T_{рек}/T_{пл}$. В табл. 2.2 такие данные представлены не для всех металлов, а выборочно.

Таблица 2.2. Температуры плавления и рекристаллизации некоторых металлов (выборочно)

Металл	$T_{рек}, ^\circ\text{C}$	Температура плавления $T_{пл}, ^\circ\text{C}$	$T_{рек}/T_{пл}$
Sn	0	232	0,54
Pb	0	327	0,46
Zn	20	419	0,42
Al	150	658	0,45
Ag	200	961	0,38
Cu	250	1083	0,39
Fe	450	1539	0,40
W	1200	3370	0,41
Cd	10	321	0,47
Au	200	1063	0,35
Ni	550	1452	0,47
Mo	900	2600	0,41

Контрольные вопросы

1. Дайте определение упругости и пластичности.
2. Как определить предел прочности, относительное удлинение, относительное сужение?
3. Что такое предел выносливости?
4. Назовите факторы, влияющие на жаропрочность.
5. Какими способами определяется твердость и как она обозначается на чертежах?
6. Что такое ударная вязкость и как ее определить?
7. Перечислите способы технологических проб и их назначение по рис. 2.8.
8. Расскажите о значении микроанализа в практике.
9. Назовите особенности микроструктурного анализа.
10. Объясните принцип рентгеноструктурного и радиографического анализов.

Основы теории сплавов**3.1. Строение сплавов**

Чистые металлы редко применяют в машиностроении, так как они не обеспечивают необходимого комплекса механических и технологических свойств изготавливаемых из них деталей. Широко используют сплавы, состоящие из двух и более элементов (из двух металлов, например, меди и цинка, или из металла и неметалла, например, железа и углерода). Элементы, входящие в сплав, называются *компонентами*. Сплавы получают сплавлением компонентов, спеканием, электролизом и возгонкой. Компоненты, входящие в сплав, в жидком состоянии почти всегда растворяются друг в друге, образуя жидкий раствор. Атомы такого раствора равномерно перемешаны один с другим (рис. 3.1). Свойства сплавов зависят главным образом от взаимодействия компонентов при затвердевании. При затвердевании сплавов образуются твердый раствор, химическое соединение или механическая смесь.

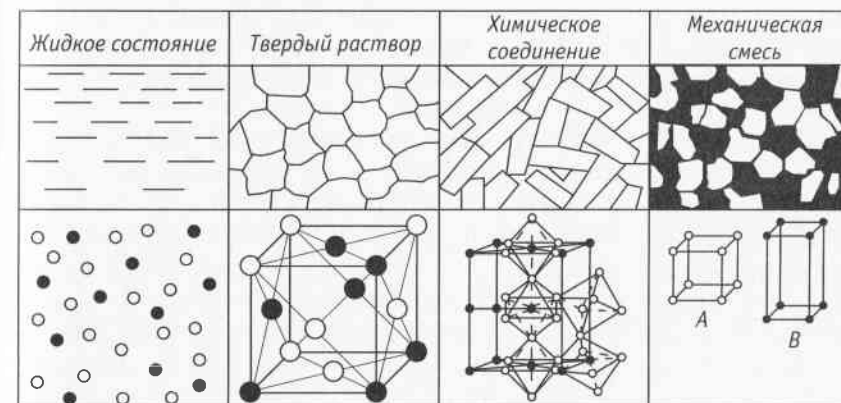


Рис. 3.1. Микроструктура и элементарные ячейки кристаллических решеток сплавов из двух компонентов (*A* — белые шарики; *B* — черные шарики)

3.1.1. Твердый раствор

При переходе в твердое состояние в сплавах сохраняется однородность распределения атомов различных компонентов, а следовательно, и свойство растворимости. При кристаллизации сплава атомы компонентов входят в единую ячейку кристаллической решетки, поэтому получаются однородные и одинаковые по составу зерна. С помощью металлографического микроскопа различить компоненты, входящие в сплав, невозможно. Твердый раствор, как и чистый металл, имеет однообразную кристаллическую решетку. В кристаллической решетке чистого металла все узлы заняты атомами одного компонента, а в решетке твердого раствора — атомами компонентов, составляющих сплав. В твердых растворах растворимость компонентов неограниченна (рис. 3.2) при любом их количественном соотношении (медь с никелем).

Свойства сплавов, образующих твердые растворы, изменяются плавно и отличаются от свойств компонентов, из которых они состоят.

Сплавы, представляющие твердые растворы, отличаются ценными свойствами. Они тверже и прочнее, чем входящие в них компоненты, обладают хорошей пластичностью, высоким электросопротивлением, не изменяющимся при изменении температуры, повышенным сопротивлением коррозии. Благодаря высокой пластичности такие сплавы хорошо обрабатываются давлением.

3.1.2. Химическое соединение

Компоненты некоторых сплавов при кристаллизации могут входить в химическую связь, образуя химическое соединение. Например: железо с углеродом образуют химическое соединение Fe_3C — кар-

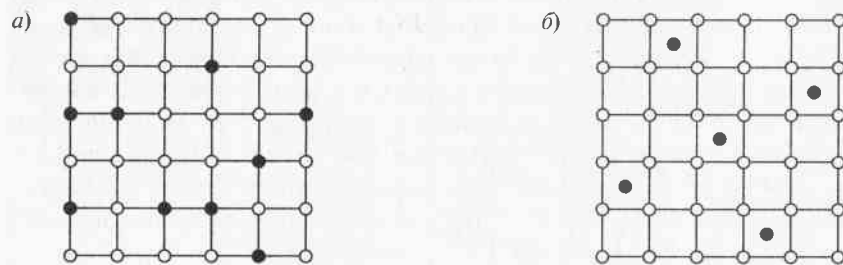


Рис. 3.2. Расположение атомов в кристаллической решетке твердых растворов:

а — твердый раствор замещения; б — твердый раствор внедрения

бид железа (цементит); медь с магнием — Cu_2Mg ; магний со свинцом — Mg_2Pb и др. Химическое соединение, как и твердый раствор, обладает однородной структурой. Кристаллическая решетка его включает атомы обоих компонентов. Однако в кристаллической решетке химического соединения в отличие от твердого раствора атомы каждого компонента находятся в строго определенном количестве и расположены всегда одинаково.

Например, химическое соединение железа с углеродом Fe_3C всегда состоит из трех атомов железа и одного атома углерода, соединение Mg_2Pb всегда имеет два атома магния и один атом свинца. Таким образом, химическое соединение имеет постоянный состав и выражается химической формулой, а состав твердых растворов изменяется в широких пределах и твердый раствор не может быть выражен химической формулой. Химические соединения обладают очень высокой твердостью и хорошим электросопротивлением. Иногда их твердость в 10 раз превышает твердость чистых компонентов. Например, железо с углеродом образует химическое соединение Fe_3C , твердость которого в 10 раз выше твердости железа. Химические соединения вольфрама и титана с углеродом (карбиды), отличающиеся очень высокой твердостью, используются для изготовления режущих инструментов. В отличие от твердых растворов химические соединения характеризуются высокой хрупкостью, для обработки давлением они непригодны.

3.1.3. Механическая смесь

Отдельные компоненты в твердом состоянии не растворяются один в другом (с образованием твердого раствора) и не входят между собой в химическую реакцию (с образованием химического соединения). При кристаллизации у каждого из таких компонентов создается своя, свойственная только ему одному кристаллическая решетка. Перемешиваясь один с другим при постоянной температуре и определенном процентном соотношении, они образуют механическую смесь, в которой при рассмотрении под микроскопом видны отдельные компоненты. Так, механическая смесь $\text{Pb} - \text{Sb}$ (свинец — сурьма) образуется при температуре 246°C при соотношении компонентов: $\text{Pb} - 87\%$, $\text{Sb} - 13\%$.

Механические смеси имеют хорошие литейные свойства. Особенно это относится к эвтектическим сплавам, которые обладают большей жидкотекучестью и меньшей температурой плавления, чем составляющие их компоненты.

3.2. Диаграммы состояния сплавов

Сплавы можно получать при соединении большинства металлов друг с другом, а также с неметаллами. Довольно велико количество сплавов, которые могут быть образованы из двух компонентов. Например, можно получить 98 различных сплавов свинца с сурьмой, если непрерывно увеличивать содержание сурьмы на 1%.

В технике применяют огромное число сплавов. Изучить и запомнить все существующие сплавы и их свойства — задача сложная и трудоемкая. Решение ее значительно облегчается при построении диаграмм состояния сплавов, которые могут дать наглядное представление о протекающих в сплавах превращениях в зависимости от их химического состава и температуры. При построении диаграмм состояния сплавов на оси абсцисс указывают химический состав или концентрацию сплава в процентах. Для этого горизонтальную линию определенной длины делят на 100 одинаковых частей и каждое деление принимают за 1% одного из компонентов сплава (рис. 3.3). Если линия AB относится к сплавам свинца с сурьмой, то каждая точка одновременно показывает процент содержания в сплаве сурьмы и свинца (см. стрелку, указывающую увеличение процентного содержания сурьмы в сплаве).

Например, в точке a мы имеем сплав, состоящий из 10% сурьмы и 90% свинца, а в точке b — сплав из 20% сурьмы и 80% свинца. Точка A соответствует чистому свинцу (100%), а точка B — чистой сурьме (100%). Таким образом, на горизонтальной линии могут быть указаны все сплавы в количественном соотношении свинца с сурьмой.

По оси ординат указывают в определенном масштабе температуру. Диаграммы состояния сплавов имеют две вертикальные оси, каждая из которых представляет один из элементов сплава. Для того чтобы построить диаграмму состояния сплавов, сначала на основании результатов лабораторных исследований строят ряд кривых охлаждения сплавов одних и тех же элементов, но с различной концентрацией. На основе этих кривых строят диаграмму. Вид диаграммы зависит от того, что образуется при затвердевании сплавов — механические смеси, твердые растворы или химические соединения. По этому признаку сплавы делят на группы, каждая из которых имеет типичную диаграмму состояния. Сплавы, компоненты кото-

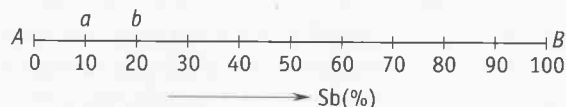


Рис. 3.3. Ось абсцисс диаграммы состояния сплавов (Pb—Sb) $A—B$

рых при затвердевании образуют только механические смеси, относятся к первой группе. Диаграмму этих сплавов условно называют *диаграммой состояния сплавов первого рода*. Диаграмму сплавов, образующих при затвердевании только твердые растворы, называют *диаграммой состояния сплавов второго рода*.

3.2.1. Построение диаграммы состояния сплавов первого рода (Pb—Sb)

Наиболее типичными для диаграмм первого рода являются сплавы свинца с сурьмой. На примере этих сплавов рассмотрим принцип построения таких диаграмм.

По результатам термического исследования получим кривые охлаждения ряда сплавов свинца с сурьмой. Чем больше будет таких кривых, тем более точной получится диаграмма состояния сплавов. Для построения диаграммы (рис. 3.4) возьмем пять сплавов свинца с сурьмой различной концентрации: a — 5% сурьмы и 95% свинца; b — 10% сурьмы и 90% свинца; c — 20% сурьмы и 80% свинца; d — 40% сурьмы и 60% свинца; e — 80% сурьмы и 20% свинца.

Все они имеют две критические температуры: верхнюю и нижнюю. Изучение процессов кристаллизации этих сплавов показывает, что верхняя критическая температура соответствует началу, а нижняя — концу затвердевания сплава.

Таким образом, кристаллизация указанных сплавов резко отличается от кристаллизации чистых металлов. Сплавы кристаллизуются в интервале температур, а чистые металлы — при постоянной

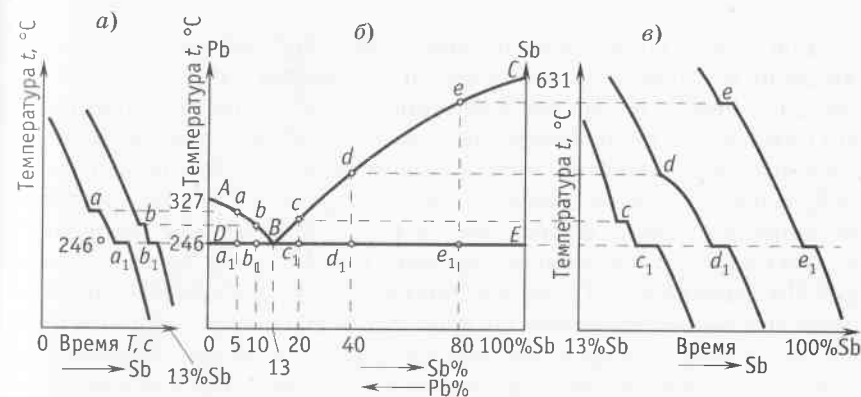


Рис. 3.4. Диаграмма состояния сплавов Pb—Sb (первого рода): a — кривые охлаждения доэвтектических сплавов; b — диаграмма состояния сплавов Pb—Sb; e — кривые охлаждения заэвтектических сплавов

температуре. Только один сплав, содержащий 13% сурьмы и 87% свинца, имеет одну критическую температуру, т. е. затвердевает при постоянной температуре. Это объясняется тем, что при указанном сочетании компонентов и температуре 246 °С из жидкого сплава одновременно выделяются кристаллы свинца и сурьмы. Образуясь одновременно, они затрудняют рост друг друга, в результате чего создается мелкозернистая структура сплава. Такая механическая смесь кристаллов, выделяющихся из жидкого сплава одновременно, называется *эвтектикой* (от греч. *эутектос* — хорошо сложенный). Сплавы указанной концентрации называют *эвтектическими*. Результаты анализа кристаллизации остальных сплавов свинца с сурьмой свидетельствуют о том, что в начале кристаллизации из жидкого сплава выделяются кристаллы того элемента, который является избыточным по отношению к эвтектическому составу (87% свинца и 13% сурьмы). При кристаллизации сплавов *a* и *b* (рис. 3.4, б) в избытке к эвтектическому составу будет свинец. Следовательно, в начале кристаллизации будут выделяться кристаллы свинца. Это будет происходить до того момента, пока в жидком сплаве не останется 87% свинца и 13% сурьмы. Тогда при температуре 246 °С из оставшейся жидкости начнет выделяться эвтектика и на этом кристаллизация закончится (точки a_1 и b_1). В твердом состоянии сплавы *a* и *b* состоят из кристаллов свинца и эвтектики, представляющей собой равномерную механическую смесь свинца и сурьмы.

У сплавов *c*, *d* и *e* в избытке к эвтектическому составу находится сурьма, поэтому процесс кристаллизации начнется с выделения кристаллов сурьмы, а закончится при температуре 246 °С выделением эвтектики.

Эти сплавы в твердом состоянии будут состоять из кристаллов сурьмы и эвтектики. При построении диаграммы состояния сплавов свинец — сурьма на оси абсцисс указывают их концентрацию. После этого из каждой точки горизонтальные оси, обозначающей концентрацию, проводят вертикальные линии, на которых отмечают (в определенном масштабе) критические температуры начала и конца затвердевания сплава данной концентрации. Эти температуры определяют из кривых охлаждения сплавов. Температура затвердевания свинца 327 °С на оси ординат будет соответствовать 0% сурьмы, а температура 631 °С затвердевания сурьмы — 100% сурьмы. Таким образом, на диаграмме получится ряд точек. Если точки, соответствующие началу кристаллизации различных сплавов, соединить между собой и провести линию через точки, соответствующие концу кристаллизации сплавов, образуется диаграмма состояния сплавов свинец — сурьма.

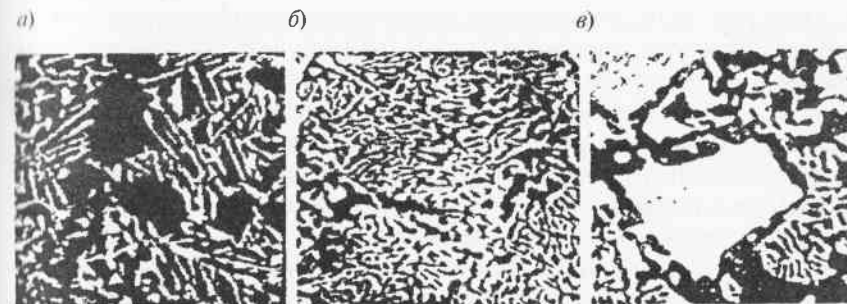


Рис. 3.5. Микроструктура сплавов Pb—Sb:

a — доэвтектическая (эвтектика плюс темные кристаллы свинца); *б* — эвтектическая (эвтектика — механическая смесь свинца и сурьмы); *в* — заэвтектическая (эвтектика плюс светлые кристаллы сурьмы)

Эта диаграмма имеет пять различных областей, дающих представление о состоянии любого сплава свинец — сурьма при любой температуре. Область выше линии *ABC* — *жидкий сплав*; в интервале точек *ABD* — *кристаллы свинца и жидкий сплав*; в интервале точек *BCE* — *кристаллы сурьмы и жидкий сплав*; ниже линии *DB* — *кристаллы свинца и эвтектика*; ниже линии *BE* — *кристаллы сурьмы и эвтектика*.

Линия *ABC* называется линией *ликвидус* (от лат. *ликвидус* — жидкий, расплавленный). Выше этой линии любой сплав свинца с сурьмой находится в жидком состоянии. Линия *DBE* получила название линии *солидус* (от лат. *солидус* — твердый) или *эвтектической линии*. Ниже этой линии все сплавы свинца с сурьмой будут в твердом состоянии. Между линиями ликвидуса и солидуса существуют твердые кристаллы и жидкий сплав. Точка *B* показывает состав эвтектики. Сплавы, расположенные левее этой точки, называются *доэвтектическими*, правее ее — *заэвтектическими*. В структуре доэвтектических сплавов кроме эвтектики всегда есть некоторое количество свинца (рис. 3.5, *a*), а в заэвтектических кроме эвтектики — сурьма (рис. 3.5, *в*).

3.2.2. Диаграмма состояния сплавов второго рода (Cu — Ni)

Диаграммы состояния сплавов второго рода характерны для сплавов, компоненты которых обладают неограниченной взаимной растворимостью, как в жидком, так и в твердом состоянии. Следовательно, сплавы такого типа после затвердевания будут состоять из кристаллов твердого раствора. На примере сплавов меди с никелем (Cu — Ni) рассмотрим принцип построения таких диаграмм.

Как уже было представлено, для построения диаграммы состояния сплавов надо знать температуры начала и конца затвердевания сплавов, отличающихся по химическому составу (концентрации). Получив кривые охлаждения для ряда сплавов меди с никелем, определим температуры начала и конца затвердевания этих сплавов. Диаграмму строят следующим образом. На оси абсцисс указывают содержание никеля от 0 до 100% (рис. 3.6). Из крайних точек, т. е. от 0 и 100%, проводят перпендикулярные линии (оси ординат), на которых (в определенном масштабе) проставляют значения температуры. Из расположенных по оси абсцисс точек, соответствующих концентрации сплавов, проводят вертикальные линии и указывают на них температуры начала и конца затвердевания сплавов. Соединив плавными линиями точки начала a и конца b затвердевания сплавов меди с никелем, получают диаграмму их состояния. Линией ликвидуса будет кривая, проведенная через точки a . Линией солидуса — кривая, проведенная через точки b . Диаграмма имеет три области: в области *I* все сплавы меди с никелем находятся в жидком состоянии, в области *II* сосуществуют кристаллы твердого раствора и жидкий сплав, в области *III* все сплавы состоят из кристаллов твердого раствора.

Поскольку температура конца затвердевания у всех сплавов меди с никелем различная, диаграмма состояния этих сплавов принципиально отличается от диаграммы состояния первого рода: линия солидуса диаграммы состояния сплава меди с никелем имеет криволинейный характер. На диаграмме состояния сплавов первого рода линия солидуса прямая (см. рис. 3.4), так как окончание затвердевания всех сплавов происходит при одной и той же температуре. Причина такого различия заключается в том, что у всех сплавов, образующих механические смеси (диаграмма первого рода), концентра-



Рис. 3.6. Диаграмма состояния сплавов Cu—Ni второго рода (ж. с. — жидкий сплав; т. р. — твердый раствор)

ция жидкости в конце кристаллизации всегда одинакова. У сплавов, образующих твердые растворы, концентрация жидкости в конце кристаллизации будет неодинаковой. Сплавы, создающие твердые растворы, как и чистые металлы, имеют микроструктуру из однородных зерен, по которой нельзя отличить твердые растворы от чистых металлов. Они различаются лишь строением кристаллической решетки: у чистых металлов кристаллическая решетка состоит из однородных атомов, у твердых растворов — из атомов двух или более компонентов. Неограниченные твердые растворы образуют следующие пары компонентов: Cu — Ni, Au — Ag; Fe — Ni; Fe — Cr; Fe — Co; Fe — V и др. Рассмотренные диаграммы состояния сплавов являются наиболее простыми и вместе с тем наиболее важными. Встречаются и другие группы сплавов. Например, компоненты, входящие в сплав, могут образовать химические соединения или компоненты могут в ограниченном количестве растворяться друг в друге в твердом состоянии. В таких случаях диаграммы состояния сплавов будут более сложными — они будут представлять собой ту или иную комбинацию диаграмм состояния первого и второго рода.

Построенные на основании нескольких кривых охлаждения, диаграммы состояния сплавов в сжатой и наглядной форме дают картину изменения строения, а следовательно, и свойств сплава при изменении его концентрации и температуры. Такие диаграммы позволяют без проведения опытов определить температуры, при которых происходят плавление и затвердевание сплавов, а также аллотропические превращения в них. Пользуясь диаграммами, можно установить режимы термической обработки сплавов, а также режимы их горячей обработки давлением. Существует определенная зависимость между типом диаграмм состояния сплавов и некоторыми свойствами сплавов (электросопротивлением, твердостью и др.).

Контрольные вопросы

1. От чего зависят свойства сплавов?
2. Дайте характеристику твердого раствора.
3. Что такое химическое соединение?
4. Назовите особенности механических смесей?
5. Для чего строят диаграммы состояния сплавов?
6. Расскажите о принципе построения диаграмм состояния сплавов первого рода.
7. Дайте характеристику линиям ликвидуса, солидуса и эвтектической точке.
8. Объясните разницу между диаграммами 1-го и 2-го рода.

Железоуглеродистые сплавы

4.1. Общие сведения

Несмотря на появление большого количества новых машиностроительных материалов, которые по своим свойствам часто конкурируют со сталями и чугунами, пока трудно представить себе возможность дальнейшего научно-технического прогресса без железоуглеродистых сплавов.

Академик А. Е. Ферсман писал: «Железо не только основа всего мира, самый главный металл окружающей нас природы, оно основа культуры и промышленности, орудие войны и мирного труда. И трудно во всей таблице Д. И. Менделеева найти другой такой элемент, который был бы так связан с прошлыми, настоящими и будущими судьбами человечества».

Сталь и чугун применяют во всех областях техники. Многие тысячи километров железных дорог соединяют между собой города и страны, стальные мосты переброшены через реки. По стальным трубопроводам поступают нефть и газ. Стальные балки служат несущими каркасами для заводских цехов, крытых стадионов, высотных зданий, телевизионных вышек и высоковольтных линий. Из железоуглеродистых сплавов строят корабли, изготавливают станки, машины, вагоны, тракторы и инструмент.

Потребность человечества в железоуглеродистых сплавах растет с каждым годом. Если в 1800 г. мировое производство стали составляло около 100 тыс. т, в 1900 г. — около 7 млн т, то в 1960 г. оно достигло четверти миллиарда тонн, а в 1970 г. перешагнуло через полумиллиардный рубеж. Сегодня мировое производство стали достигло около 1 млрд т в год. Это обусловлено, прежде всего, наличием большого числа пригодных для промышленной разработки месторождений железных руд. Кроме того, ни один другой металл не способен так изменять свои технические характеристики после использования легирования и специальной обработки, как железо и его сплавы. Железоуглеродистые сплавы способны к таким превращениям, в результате которых резко меняются их свойства в весьма широком диапазоне.

4.2. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов

Сталь и чугун — основные машиностроительные материалы. Они составляют 95% всех используемых в технике сплавов.

Сталью называют сплавы железа с углеродом и *другими* элементами, содержащие до 2% углерода. Углерод — важная примесь стали. От его содержания зависят прочность, твердость и пластичность стали. Кроме железа и углерода в состав стали входят кремний, марганец, сера и фосфор. Эти примеси обычно попадают в сталь в процессе выплавки и являются ее неизбежными спутниками.

Чугун — сплав на железной основе. Принципиальное отличие чугуна от стали заключается в более высоком содержании в нем углерода (более 2,14%). Наибольшее распространение получили чугуны, содержащие 3—3,5% углерода. В состав чугунов входят те же примеси, что и в сталь, т. е. кремний, марганец, сера и фосфор, но в несколько больших количествах. Углерод в чугуне может находиться в химическом соединении с железом либо в свободном состоянии в виде графита.

Чугуны, у которых весь углерод находится в химическом соединении с железом, называют *белыми* (по виду излома), а чугуны, весь углерод которых или большая его часть представляет собой графит, получили название серых. В данной главе рассматривается строение белых чугунов.

В железоуглеродистые сплавы входят различные структурные составляющие, свойства которых обуславливают свойства стали и чугуна.

Феррит — твердый раствор небольшого количества углерода (до 0,04%) и легирующих элементов (кремний, марганец, никель, фосфор и др.) в α -железе (рис. 4.1, а) — мягкая, пластичная и недостаточно прочная структурная составляющая. Его относительное удлинение δ равно 30%, твердость — 50—80 НВ, предел прочности $\sigma_{\text{н}} = 300$ МПа (30 кгс/мм²). Практически это чистое железо. Механические свойства феррита в большой степени зависят от размеров зерен. Феррит обладает магнитными свойствами (до температуры 768 °С).

Цементит — химическое соединение железа с углеродом — карбид железа (рис. 4.1, б—г). Он содержит 93,33% железа и 6,67% углерода. Отличается большой твердостью (800 НВ, т. е. в 10 раз тверже феррита) и значительной хрупкостью. Цементит слабо маг-

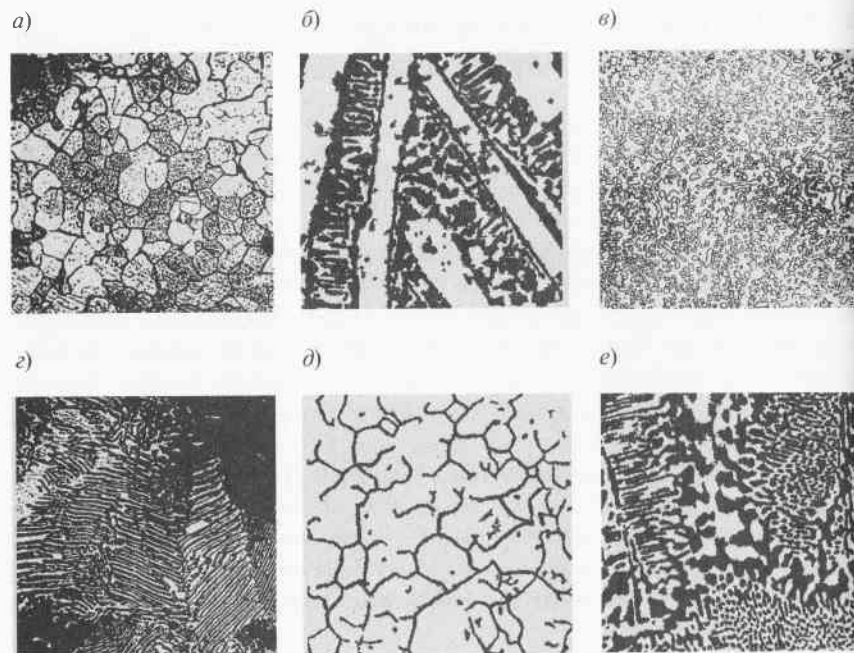


Рис. 4.1. Микроструктуры железоуглеродистых сплавов: а — зерна феррита; б — светлые пластины цементита в заэвтектическом белом чугуна; в — зернистый перлит, зерна цементита; г — пластинчатый перлит, пластины цементита; д — зерна аустенита, установленные методом окисления при 925 °С; е — ледебурит эвтектического белого чугуна

нитен, а при температурах выше 215 °С — немагнитен. Углерод может проникать в железо двумя способами. Атомы углерода могут занимать в пространственной решетке свободные места между атомами железа. Однако при комнатной температуре в пространственной решетке железа может поместиться всего 0,0001% углерода. Остальные атомы углерода проникают в железо другим путем: вступают с ним в химическую связь. При этом образуется карбид железа Fe_3C (цементит), состоящий из трех атомов железа и одного атома углерода.

В настоящее время в технике используется более 12 тыс. железных сплавов, главным образом сталей. Для практического применения железные сплавы выбирают в точном соответствии с техническими и экономическими требованиями.

Феррит и цементит являются основными структурными составляющими железоуглеродистых сплавов. Они могут располагаться,

например, в структуре стали каждый в отдельности или в виде равномерной механической смеси, которая называется *перлитом*. Такое название эта смесь получила потому, что шлиф ее при травлении имеет перламутровый отлив. Так как перлит образуется в результате процессов вторичной кристаллизации, его называют *эвтектоидом* (в отличие от эвтектики). Образование перлита происходит при температуре 727 °С. В нем содержится 0,8% углерода.

Перлит имеет две разновидности. Если цементит в перлите расположен в виде пластинок, его называют *пластинчатым* (рис. 4.1, г), если же цементит расположен в виде зерен, перлит называют *зернистым* (рис. 4.1, в). Под микроскопом пластинки цементита кажутся блестящими, потому что обладают большой твердостью, хорошо полируются и при травлении кислотами разъедаются меньше, чем мягкий феррит. После травления можно наблюдать темные участки перлита в сочетании с ферритом или цементитом. Поскольку перлит состоит из феррита и цементита, его свойства определяются количеством этих составляющих. Содержание феррита в перлите в шесть раз больше, чем цементита. Механические свойства перлита зависят также от формы цементита. У пластинчатого перлита твердость составляет 180—200 НВ, предел прочности $\sigma_b = 800$ МПа (80 кгс/мм²), относительное удлинение $\delta = 10$ —12%. У зернистого перлита прочность и твердость несколько ниже, а пластические свойства выше. Так как перлит содержит α -железо, он обладает магнитными свойствами.

Если железоуглеродистые сплавы нагреть до определенных температур, произойдет аллотропическое превращение α -железа в γ -железо и образуется структурная составляющая, которая называется *аустенитом*. Аустенит представляет собой твердый раствор углерода (до 2,14%) и других примесей в γ -железе (рис. 4.1, д). Способность углерода растворяться в железе неодинакова при различных температурах. При температуре 1147 °С и выше в кристаллической решетке у γ -железа может раствориться максимальное количество углерода (2,14%). При температурах ниже 1147 °С растворимость углерода в γ -железе постепенно уменьшается, а избыточный углерод выделяется в виде цементита. При 727 °С γ -железо может растворять не более 0,8% углерода. При этой температуре происходит распад аустенита с образованием перлита. Лишь в некоторых сталях, содержащих большое количество никеля или марганца, структура аустенита может сохраниться и при температурах ниже 727 °С (вплоть до комнатной). Аустенит — мягкая структурная составляющая (хотя и тверже феррита). Его твердость 180 НВ, относительное удлинение

$\delta = 40\text{--}50\%$. Он отличается большой пластичностью, магнитными свойствами не обладает.

В белых чугунах всегда имеется еще одна структурная составляющая — *ледебурит*. Это эвтектическая смесь, т.е. равномерная механическая смесь зерен аустенита и цементита, получающаяся в процессе кристаллизации (рис. 4.1, *е*). Ледебурит содержит 4,3% углерода. Он образуется при температуре 1147 °С. Первоначальная структура его не сохраняется при температурах ниже 727 °С, так как содержащийся в нем аустенит при 727 °С превращается в перлит. При температурах ниже 727 °С (вплоть до комнатной) ледебурит представляет собой механическую смесь перлита и цементита. Ледебурит отличается большой твердостью (550 НВ) и хрупкостью.

Изучение структурных составляющих железоуглеродистых сплавов позволяет сделать следующий важный вывод: *при комнатной температуре железоуглеродистые сплавы всегда состоят из двух структурных элементов — мягкого пластичного феррита и твердого цементита, упрочняющего сплав*. Эти элементы могут образовать механическую смесь либо находиться в свободном состоянии.

4.3. Диаграмма состояния сплавов железо—цементит ($\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$)

Для того чтобы лучше ознакомиться со структурой железоуглеродистых сплавов различного состава и превращениями, которые они претерпевают, обратимся к диаграмме их состояния ($\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$).

Основы для разработки диаграммы состояния сплава железа с углеродом заложил выдающийся русский металлург Д. К. Чернов, опубликовавший в 1868 г. ряд работ, в которых он впервые указал на структурные превращения, протекающие в железоуглеродистых сплавах при их нагревании и охлаждении. Работы Д. К. Чернова вызвали широкую дискуссию, которая послужила толчком к многочисленным исследованиям в этой области. В результате труда ряда ученых в конце XIX в. была разработана диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов.

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов представлена на рис. 4.2. Она охватывает не все сплавы железа с углеродом, а лишь те, которые содержат до 6,67% углерода. Это объясняется тем, что железоуглеродистые сплавы, содержащие более 5% углеро-

да, не представляют практического интереса, 6,67% углерода взято в качестве предела на том основании, что при таком его количестве образуется химическое соединение Fe_3C (цементит), которое может рассматриваться как самостоятельный компонент сплава. В диаграмме сделаны два упрощения: не показана область существования δ -железа (упрошен левый верхний угол диаграммы) и не приведена различная растворимость углерода в α -железе (упрошен левый нижний угол диаграммы).

Эти упрощения не оказывают существенного влияния на практическое изучение железоуглеродистых сплавов. Диаграмма состояния сплавов $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ условно разделена на две части: диаграмму углеродистых сталей и диаграмму белых чугунов. *Углеродистые стали* — это сплавы железа, содержащие до 2,14% углерода.

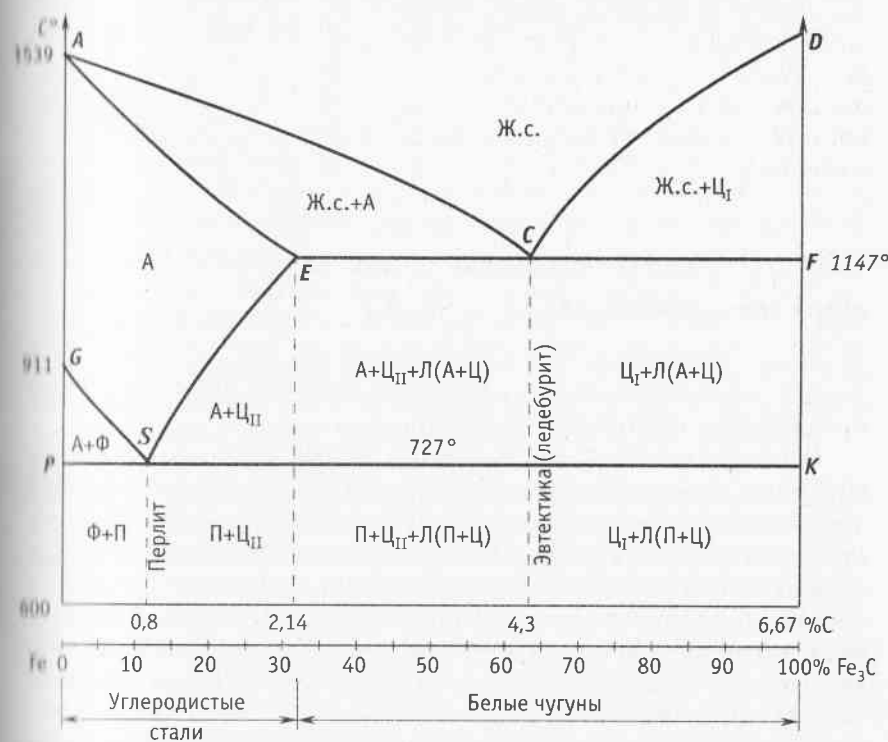


Рис. 4.2. Диаграмма состояния сплавов $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ в упрощенном виде:
Ж.с. — жидкий сплав; А — аустенит; П — перлит; Ф — феррит; Ц — цементит
(Ц_I — первичный; Ц_{II} — вторичный); Л — ледебурит

Стали, имеющие в своем составе до 0,8% углерода, называются *доэвтектоидными*, 0,8% углерода — *эвтектоидными*, свыше 0,8% до 2,14% углерода — *заэвтектоидными*.

Белые чугуны — это сплавы железа, содержащие от 2,14 до 6,67% углерода. При содержании от 2,14 до 4,3% углерода белые чугуны называются *доэвтектическими*, при 4,3% — *эвтектическими* и свыше 4,3 до 6,67% — *заэвтектическими*.

4.3.1. Процессы первичной кристаллизации железоуглеродистых сплавов

На диаграмме (см. рис. 4.2) показано состояние Fe — Fe₃C при первичной и вторичной кристаллизации. Проанализируем ту часть диаграммы, которая охватывает процессы первичной кристаллизации. Эти процессы характеризуются кривыми *ACD* и *AECF*.

Кривая *ACD* — линия ликвидуса — отображает температуры, при которых начинается затвердевание железоуглеродистых сплавов. Кривая *AECF* — линия солидуса — соответствует температурам, при которых кристаллизация заканчивается. Линия *AE* относится к сталям, а линия *ECF* — к белым чугунам. Точка *A* характеризует температуру плавления чистого железа (1539 °C), а точка *D* — температуру плавления цементита (1600 °C). Точка *E* соответствует максимальному количеству углерода, которое может быть растворено в аустените при высоких температурах. Точка *C* указывает на состав эвтектики и соответствует содержанию в сплаве 4,3% углерода. Температура образования эвтектики 1147 °C. Линия *ECF* называется *эвтектической*, так как в любой ее точке происходит образование эвтектики (ледебурита).

В процессе первичной кристаллизации, по линии *AC*, из жидкого сплава будут выделяться кристаллы твердого раствора углерода в γ -железе, т. е. аустенит. При содержании углерода в сплавах до 2,14% (углеродистые стали) первичная кристаллизация закончится образованием однородного по составу аустенита. Для сплавов с содержанием углерода от 2,14 до 4,3% (доэвтектические чугуны) первичная кристаллизация закончится образованием аустенита, при понижении температуры на линии *EC* образуются эвтектика, содержащая 4,3% углерода, т. е. ледебурит, и вторичный цементит, который выделится из переохлажденного углеродом аустенита при температурах ниже 1147 °C — в процессе вторичной кристаллизации. В точке *C* при 1147 °C образуется эвтектика, содержатся 4,3% углерода, т. е. ледебурит.

На линии *CF* (заэвтектические чугуны) из жидкого сплава выделится тот компонент, который является избыточным по отношению к эвтектике, т. е. цементит (в эвтектике содержится 4,3% углерода, а в цементите — 6,67%). Так как цементит образуется при первичной кристаллизации, его называют первичным. На линии *CF* возникнет эвтектика — ледебурит. Следовательно, в результате первичной кристаллизации заэвтектические чугуны будут состоять из первичного цементита и ледебурита. Линия *ECF* (1147 °C) называется эвтектической, так как на ней образуется механическая смесь аустенита и цементита — ледебурит. Ледебурит имеет эвтектический состав, следовательно, его кристаллизация протекает при постоянной температуре 1147 °C.

В результате первичной кристаллизации сталь получает структуру аустенита, характеризующуюся хорошей пластичностью и вязкостью. Поэтому такая сталь хорошо поддается обработке давлением при высоких температурах. Белые чугуны имеют в своем составе хрупкий и твердый ледебурит, который исключает возможность их обработки давлением даже при высоких температурах. Эта разница в технологических свойствах железоуглеродистых сплавов делает содержание углерода 2,14% той границей между сталью и белыми чугунами, за которой при первичной кристаллизации появляется ледебурит.

4.3.2. Процессы вторичной кристаллизации стали

Если бы железо не испытывало структурных превращений в твердом состоянии, то диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов при всех температурах ниже 1147 °C (вплоть до комнатной) была бы одинаковой (см. рис. 4.2, линия *AECF*). Однако железо подвержено аллотропическим превращениям, поэтому эти сплавы не сохраняют своей первичной структуры.

Рассмотрим процессы вторичной кристаллизации сталей. Для наглядности выделим левую часть диаграммы на рис. 4.2, охватывающую процессы вторичной кристаллизации стали (рис. 4.3).

Как мы уже рассмотрели, первичная структура стали включает зерна аустенита. Она сохраняется до линии *GSE* (см. рис. 4.2 и 4.3). Указанная линия соответствует температурам, при которых начинается вторичная кристаллизация сталей различного состава. Линия *PSK* характеризует температуру, при которой завершаются процессы вторичной кристаллизации. Для сталей, представленных на диаграмме, эта температура равна 727 °C. При температурах ниже 727 °C существенных превращений в сталях не наблюдается, структура, полученная при 727 °C, сохраняется при дальнейшем охлажде-

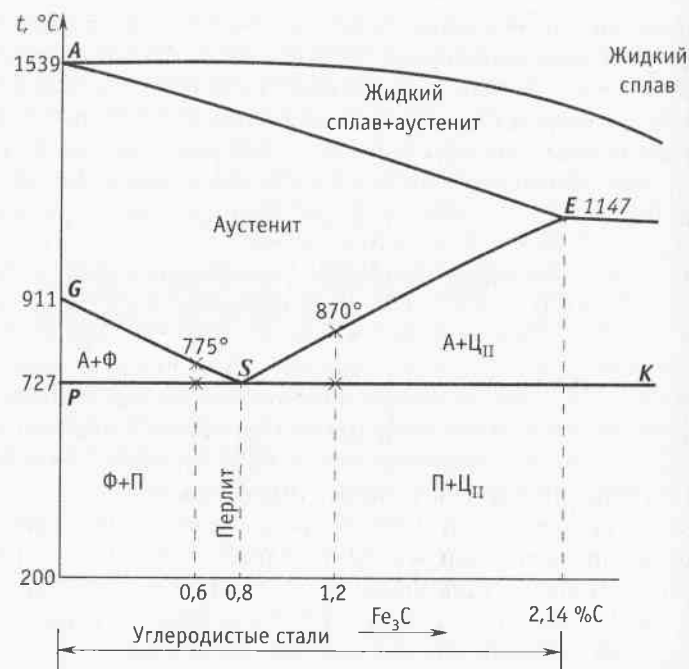


Рис. 4.3. Область сталей в диаграмме состояния сплавов Fe—Fe₃C

нии сплава (вплоть до комнатной температуры). Линия *PSK* называется эвтектоидной. Точка *S* диаграммы соответствует составу эвтектоида — перлиту. Какие структурные превращения претерпевает сталь при твердом состоянии? Начнем изучение этих превращений с линии *GS* (см. рис. 4.3). Точка *G* соответствует превращению, происходящим в чистом железе при 911 °С. Известно, что при этой температуре γ -железо переходит в α -железо. У сталей этот процесс также происходит, но ввиду того, что в решетке γ -железа имеется то или иное количество углерода, он протекает при более низких температурах, чем у чистого железа. Кроме того, переход γ -железа в α -железо у сталей осуществляется не при постоянной температуре, а в интервале температур (между линиями *GSE* и *PSK*). Следовательно, линия *GS* диаграммы для сталей, содержащих до 0,8% углерода, соответствует температурам, при которых начинается выделение феррита из аустенита (так как сталь содержит не чистое γ -железо, а твердый раствор углерода в γ -железе, т. е. аустенит).

Рассмотрим подробнее, как будет протекать вторичная кристаллизация доэвтектоидной стали, содержащей 0,6% углерода. Указан-

ная сталь сохраняет первичную структуру аустенита до температуры 775 °С. При этой температуре начинается ее аллотропическое превращение, т. е. выделение феррита из аустенита. Так как в феррите содержится ничтожное количество углерода, оставшийся аустенит будет постепенно, по мере выделения феррита обогащаться углеродом. Когда концентрация углерода в оставшемся аустените достигнет 0,8% при 727 °С, произойдет распад аустенита на равномерную механическую смесь феррита и цементита, которая называется перлитом. Таким образом, в интервале температур от 775 до 727 °С сталь, содержащая 0,6% углерода, будет иметь в своем составе феррит и аустенит, а при температурах ниже 727 °С — феррит и перлит. Структура феррит — перлит сохранится без значительных изменений и при дальнейшем охлаждении стали вплоть до комнатной температуры. Аналогичные превращения характерны для всех доэвтектоидных сталей (содержащих менее 0,8% углерода). Разница будет лишь в температурах начала выделения феррита.

Если сталь содержит 0,8% углерода, ее вторичная кристаллизация будет протекать при постоянной температуре (727 °С) и сопровождаться только одним процессом — образованием перлита. Это объясняется тем, что в данном случае содержание углерода в стали соответствует эвтектоидному составу. Вторичная кристаллизация стали, содержащей более 0,8% углерода, характеризуется линиями *SE* и *SK* (см. рис. 4.3). Точка *E* указывает на максимальное количество углерода, которое может быть растворено в аустените, а точка *S* — на количество углерода, которое может быть растворено в аустените при 727 °С. Линия *ES* соответствует предельной растворимости углерода в аустените при различных температурах. На линии *SK* заканчивается вторичная кристаллизация сталей, имеющих в своем составе более 0,8% углерода, с образованием перлита (в результате распада аустенита).

Как происходят процессы вторичной кристаллизации стали, содержащей 1,2% углерода? Сталь с таким количеством углерода сохраняет первичную структуру аустенита при охлаждении до 870 °С. При более низкой температуре аустенит не способен растворить 1,2% углерода, поэтому при дальнейшем охлаждении сплава из кристаллической решетки аустенита будет выделяться избыточный углерод в виде цементита. Так как этот цементит образуется в результате вторичной кристаллизации, его называют вторичным цементитом и обозначают Fe₃C_{II}.

Вследствие выделения цементита содержание углерода в оставшемся аустените будет непрерывно снижаться и при температуре 727 °С достигнет 0,8%. При этой температуре аустенит превратится

в перлит. На этом вторичная кристаллизация закончится. Таким образом, рассматриваемая сталь в интервале температур от 870 до 727 °С имеет структуру аустенита и вторичного цементита, а при температурах ниже 727 °С состоит из вторичного цементита и перлита. Аналогичные превращения в твердом состоянии испытывают все заэвтектоидные стали, т. е. стали, содержащие более 0,8% углерода, разница между ними лишь в температурах начала выделения вторичного цементита.

В структуру доэвтектоидных сталей при комнатной температуре входят феррит и перлит. Чем больше в них углерода, тем больше будет перлита и меньше феррита. Эвтектоидная сталь содержит только перлит. Структура заэвтектоидных сталей при комнатной температуре перлитоцементитная. С увеличением в этих сталях углерода растет количество цементита и уменьшается количество перлита. Микроструктуры сталей с различным содержанием углерода представлены на рис. 4.4.

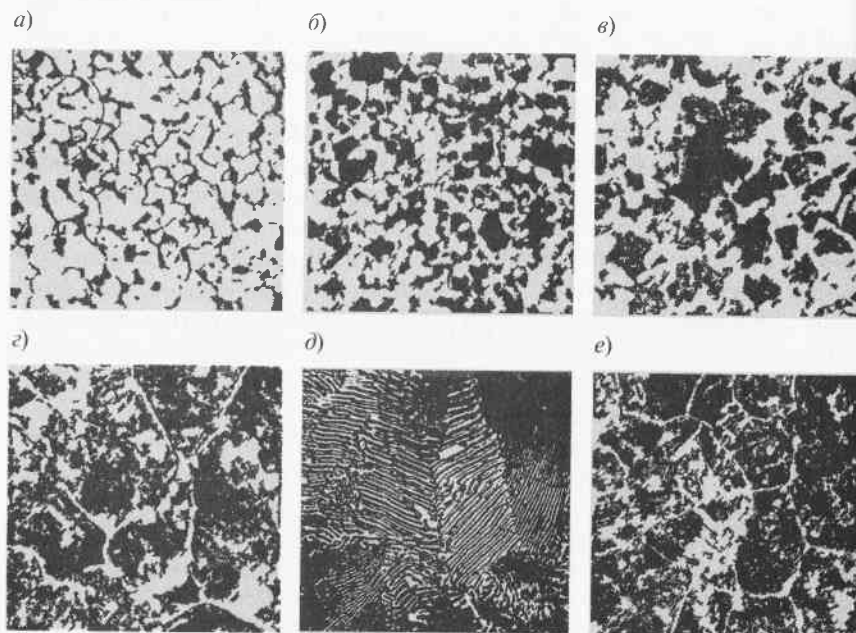


Рис. 4.4. Микроструктуры сталей с различным содержанием углерода (%). Доэвтектоидные (а — с): а — 0,05 (светлое — феррит, темное — перлит); б — 0,25 (феррит плюс перлит); в — 0,5 (феррит плюс перлит); г — 0,7 (перлит плюс ферритная сетка); эвтектоидная (д) — 0,8 (пластинчатый перлит); заэвтектоидная (е) — 1,2 (перлит плюс цементитная сетка)

4.3.3. Процессы вторичной кристаллизации белых чугунов

Первичная структура белых чугунов может содержать ледебурит, аустенит и первичный цементит. Так как ледебурит представляет собой механическую смесь аустенита и цементита, то и в структуру белого чугуна входят аустенит и первичный цементит. В твердом состоянии цементит не претерпевает структурных превращений, следовательно, вторичная кристаллизация чугунов связана только с теми превращениями, которые происходят в аустените при его охлаждении (см. рис. 4.2).

Высокоуглеродистый аустенит при охлаждении подвергается двум превращениям. Первое состоит в выделении избыточного углерода в виде вторичного цементита в интервале температур от 1147 °С до 727 °С. Второе превращение заключается в образовании перлита при температуре 727 °С. Указанные превращения протекают и в аустените, входящем в состав ледебурита. Поэтому при температурах ниже 727 °С ледебурит представляет собой механическую смесь перлита и цементита. Микроструктура белых чугунов при комнатной температуре показана на рис. 4.5.

Анализ диаграммы состояния сплавов Fe — Fe₃C позволяет сделать следующий вывод: при комнатной температуре микроструктура доэвтектоидных сталей включает феррит и перлит, эвтектоидных сталей — перлит, заэвтектоидных сталей — вторичный цементит и перлит. В микроструктуру белых доэвтектоидных чугунов входят перлит, вторичный цементит и ледебурит, эвтектоидного чугуна — ледебурит, заэвтектоидного чугуна — первичный цементит и ледебурит.

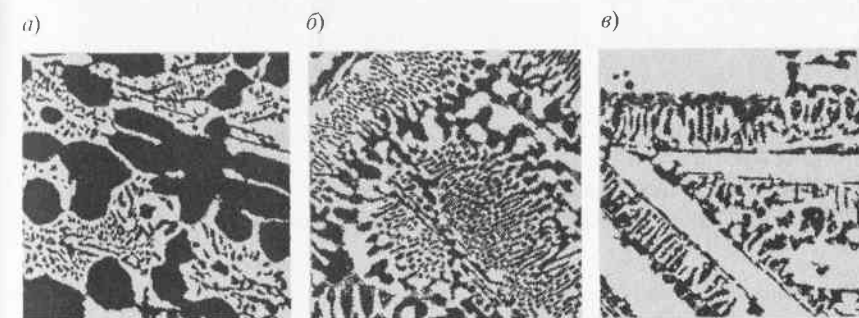


Рис. 4.5. Микроструктура белых чугунов: а — доэвтектоидного (перлит и ледебурит); б — эвтектоидного (ледебурит); в — заэвтектоидного (ледебурит и цементит)

При использовании диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов следует иметь в виду три важных обстоятельства. Структурные превращения, протекающие в процессе охлаждения железоуглеродистых сплавов, являются обратимыми. При нагревании сплава наблюдаются обратные явления. Например, если при охлаждении аустенит переходит в перлит, то при нагревании перлит превращается в аустенит. Диаграмма показывает те превращения, которые происходят при довольно медленном охлаждении, когда успевают осуществиться все процессы. При быстром охлаждении сплава (например, при закалке) структурные превращения носят иной характер. Данные диаграммы относятся лишь к углеродистым сталям и белым чугунам. Для изучения сплавов, содержащих специально введенные присадки, эта диаграмма применяться не может.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения структурным составляющим железоуглеродистых сплавов: аустениту, ферриту, перлиту, цементиту, ледебуриту.
2. Какие стали называют доэвтектоидными, эвтектоидными и заэвтектоидными?
3. Объясните суть процесса первичной кристаллизации железоуглеродистых сплавов.
4. Покажите на диаграмме Fe — Fe₃C (см. рис. 4.2) начало и конец первичной и вторичной кристаллизации.
5. По рис. 4.3 расскажите о процессах вторичной кристаллизации стали.
6. Какие компоненты входят в микроструктуру доэвтектоидных сталей при комнатной температуре?
7. При какой температуре образуется механическая смесь ледебурит, перлит?
8. Что обозначают температуры 1539, 1600, 1147, 727, 768 °C?
9. Какие структурные составляющие существуют между линиями GS и PS, SE и SK (см. рис. 4.3)?
10. Какие структурные составляющие образуются в точках S и C (см. рис. 4.3)?
11. Какой характер имеют структурные превращения, протекающие в процессе охлаждения железоуглеродистых сплавов?

Классификация сталей

5.1. Общие сведения

Сталь — основное сырье для производства листового и профильного проката. Наибольшее распространение в различных отраслях народного хозяйства получили углеродистые стали. В общем объеме производства сталей углеродистые составляют 80%.

В настоящее время нет единой международной классификации сталей. Существует много признаков, по которым классифицируют стали в стандартах и промышленной статистике различных стран. К основным из них относят способ производства, химический состав, сортament, качество, структуру в равновесном состоянии или после охлаждения на воздухе, основные свойства и области применения.

По способу производства стали разделяют на бессемеровскую, конвертерную (с продувкой кислородом), мартеновскую, электро-сталь, тигельную и сталь, получаемую прямым восстановлением из обогащенной руды (окатышей).

Для повышения чистоты сталей и сплавов и уменьшения анизотропии механических свойств производят вспомогательную обработку. Виды обработки обозначают индексами:

- ВИ (ВИП) — переплав в вакуумных индукционных печах;
- Ш (ЭШП) — электрошлаковый переплав;
- ВД (ВДП) — переплав в вакуумных, дуговых печах;
- ШД — вакуумно-дуговой переплав стали, полученной электрошлаковым переплавом;
- ЭЛП — электронно-лучевой переплав;
- ПДП — плазменно-дуговая плавка;
- ОДП — обычная дуговая плавка.

Индексы, обозначающие виды вспомогательной обработки, иногда указывают рядом с маркой стали.

В зависимости от типа используемого для выплавки плавильного агрегата сталь разделяют на мартеновскую, кислородно-конвертерную, электро-сталь, выплавленную в дуговых или индукционных электрических печах.

В зависимости от технологии выплавки сталь разделяют на основную и кислую. Главное значение имеет производство более дешевой основной стали, при выплавке которой обеспечивается удаление вредных примесей серы и фосфора до допустимого уровня.

По степени раскисленности (связанности кислорода в жидкой стали) нелегированную (углеродистую) сталь подразделяют на спокойную, кипящую и полуспокойную. В последние годы в России разработан ряд марок полуспокойной низколегированной стали (08ГФпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс и др.).

Разделение стали по способу выплавки продолжают использовать в статистических данных многих стран и международных организаций как один из показателей технического уровня в сталеплавлении производстве.

По химическому составу в стандартах России сталь подразделяют на нелегированную (углеродистую) и легированную. Нелегированная сталь кроме углерода, определяющего ее механические и технологические свойства, содержит остаточные раскисляющие элементы: марганец (до 1,25% по ГОСТу 380—94), кремний (до 0,30%), алюминий (до 0,02%), а также переходящие из сырья элементы (медь, хром, никель, серу, фосфор и др.), допустимые массовые доли которых регламентируются стандартами.

В зависимости от массовой доли введенных легирующих элементов легированную сталь в отечественных стандартах подразделяют на низколегированную, среднелегированную и высоколегированную. В низколегированной стали суммарная массовая доля легирующих элементов составляет не более 2,5%, в среднелегированной — 2,5—10%, в высоколегированной — более 10% при массовой доле железа 45%.

По сортаменту и стадии производства. Для характеристики изделия из стали необходимы сведения как о марке стали, так и о сортаменте (форме изделия), который в большой степени определяется стадиями производства. Поэтому во многих странах стальные изделия классифицируют по стадии производства, форме, массе и состоянию поверхности. Эти признаки относят также к изделиям порошковой металлургии, отливкам, изделиям произвольной формы, полученным свободной ковкой или штамповкой, сварным профилям.

По стадиям производства различают сырые изделия, жидкую сталь (для разлива в слитки, непрерывного литья заготовок и отливок), твердую сталь (слябы прямоугольного поперечного сечения, ширина которых минимум вдвое больше толщины, и слитки различных форм и размеров).

К сырым изделиям относится железо-пористый губчатый кусковой или сыпучий продукт, получаемый в твердом виде без плавления из железной руды при восстановлении оксидов железа посредством введения смеси газов CO и H₂. Губчатое железо используют в качестве сырья в электросталеплавиальном производстве. Сплавив губчатое железо с ферросплавами, получают высококачественные легированные стали с минимальным количеством известных примесей. Губчатое железо используют в качестве сырья для производства железных порошков в порошковой металлургии; заготовками являются слитки или слябы, подвергнутые горячему деформированию путем прокатки иликовки, а также заготовки, полученные методом непрерывного литья.

По качеству стали подразделяют на сталь обыкновенного качества, качественную, высококачественную и особовысококачественную. Сталь всегда содержит примеси. Если марганец и кремний необходимы по условиям технологии выплавки, то сера и фосфор относятся к вредным примесям, не поддающимся полному удалению. В малом количестве в стали постоянно присутствуют скрытые примеси: кислород, водород, азот. Чем меньше вредных примесей, тем выше качество стали.

По структуре в равновесном состоянии (т. е. после отжига) стали подразделяют на доэвтектоидные, имеющие в структуре избыточный феррит, эвтектоидные с перлитной структурой, заэвтектоидные, имеющие в структуре избыточные (вторичные) карбиды, и ледебуритные, в которых первичные карбиды выделяются из жидкой фазы при кристаллизации.

По основным свойствам стали классифицируют, чтобы определить эксплуатационные свойства, в наиболее полной мере отвечающие требованиям потребителей. Такую классификацию используют в стандартах большинства технически развитых стран. В качестве основных свойств стали обычно принимают: прочность в состоянии поставки при 20 °С, повышенных или отрицательных температурах; сопротивление хрупкому разрушению; деформируемость или способность к холодному деформированию (в том числе волочением); восприимчивость к термической обработке (цементации, улучшению и др.); свариваемость; обрабатываемость резанием (например, для автоматных сталей); стойкость к химической или атмосферной коррозии; физические свойства.

По назначению стали обычно подразделяют на стали общего назначения, конструкционные, инструментальные и стали с особыми свойствами.

К сталям общего назначения относят нелегированные (углеродистые) стали обыкновенного качества и качественные, показатели

свойств которых в горячекатаном или термически обработанном (нормализованном) прокате регламентируются. В стали, предназначенной для сварных конструкций, массовая доля углерода не должна превышать 0,22%.

Конструкционную сталь — нелегированная, низколегированная или среднелегированная — применяют для изготовления различных деталей машин, механизмов и конструкций в машиностроении; она имеет определенные значения показателей прочности, пластичности и вязкости (т. е. конструкционной прочности). Конструкционные стали, как правило, у потребителя подвергаются термической обработке, поэтому их подразделяют на цементуемые (подвергаемые цементации), улучшаемые (подвергаемые закалке и отпуску) и рессорно-пружинные. Конструкционные стали также классифицируют по более узкому назначению: сталь подшипниковая, сталь рессорно-пружинная, сталь для железнодорожных рельсов и колес, сталь для холодного выдавливания и высадки и др.

Близкие по химическому составу к конструкционным сталям нелегированные и низколегированные стали, но не предназначенные для термической обработки у потребителя, объединяют в группу строительных сталей, которые применяют в основном для изготовления сварных металлических конструкций.

Инструментальную сталь используют для изготовления измерительного, режущего, штампового и других инструментов. Инструментальные стали обычно классифицируют на пять групп: нелегированные, низколегированные, средне- и высоколегированные для штампов холодного деформирования, среднелегированные для штампов горячего деформирования и быстрорежущие.

К *сталям с особыми свойствами* относят стали, которые наряду с определенными значениями показателей механических свойств при температуре окружающей среды имеют какое-либо резко выраженное физическое или физико-химическое свойство: коррозионно-стойкие, жаропрочные и теплоустойчивые, износостойкие, с нормированным коэффициентом, с особенностями теплового расширения, с особыми магнитными и электрическими свойствами и т. д.

5.2. Маркировка сталей в России

В России принята буквенно-цифровая система обозначения марок сталей.

В обозначение марки нелегированной углеродистой конструкционной *стали* обыкновенного качества входят: Ст (сталь), цифра —

условный номер в зависимости от химического состава стали и буквы, определяющие степень раскисления стали (кп — кипящая, пс — полупокойная, сп — спокойная). Например: Ст1кп; Ст2пс; Ст3сп.

При увеличении номера от 1 до 6 в стали возрастает содержание углерода от 0,06 до 0,49%. Введена также система маркировки краской для удобства складирования: Ст0 — красная, зеленая; Ст1 — желтая, черная; Ст2 — желтая; Ст3 — красная; Ст3Гпс — красная, коричневая; Ст3Гсп — синяя, коричневая; Ст4 — черная; Ст5 — зеленая; Ст6 — синяя.

Нелегированные конструкционные *качественные стали* обозначают словом «Сталь» и двузначным числом, указывающим среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента (например: Сталь08, Сталь10, Сталь20, соответственно 0,08; 0,10; 0,20% углерода). Для сталей, полностью не раскисленных, в обозначение добавляют буквы «кп», «пс» (например: Сталь15кп; Сталь20пс). Для спокойной стали буквы не добавляют.

В обозначение марки нелегированной *углеродистой инструментальной стали* входят: буква У, цифра, указывающая среднюю массовую долю углерода в десятых долях процента (например: У8; У10; У12, соответственно 0,8; 1,0; 1,2% углерода).

В *легированных* сталях цифры, стоящие после буквы в обозначении марки стали, показывают примерную массовую долю элемента, округленную до целого числа. При средней массовой доле легирующего элемента до 1,5% цифру за буквой не обозначают. Массовая доля углерода указывается вначале в сотых (конструкционные стали) или десятых (инструментальные стали) долях процента.

А — азот;	П — фосфор;
Б — ниобий;	Р — бор;
В — вольфрам;	С — кремний;
Г — марганец;	Т — титан;
Д — медь;	Х — хром;
Е — селен;	Ц — цирконий;
К — кобальт;	Ч — редкоземельный;
Л — бериллий;	Ф — ванадий;
М — молибден;	Ю — алюминий.
Н — никель;	

Так, конструкционную сталь, содержащую в процентном отношении: С = 0,42—0,50; Мп = 0,5—0,8; Cr = 0,8—1,0; Ni = 1,3—1,8; Мо = 0,2—0,3 и V = 0,10—0,18, обозначают 45ХН2МФ.

Инструментальную сталь для штампов горячего деформирования, содержащую (%): С = 0,32—0,40; Si = 0,80—1,20; Mn = 0,15—0,40; Cr = 4,5—5,5; Mo = 1,20—1,50 и V = 0,3—0,5; Si = 0,90—1,2, обозначают 4Х5МФС.

Если в инструментальной легированной стали углерода $\geq 1,0\%$, цифру в начале марки обычно не проставляют (например, Х, ХВГ).

В обозначение марки *подшипниковой стали* входят: буква Ш и буквы, обозначающие легирующие элементы. За буквой Х (легированная хромом) обозначают цифры, соответствующие массовой доле хрома в десятых долях процента (например, ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ).

Буква А в конце марки любой стали указывает, что сталь относится к категории *высококачественной* (30ХГСА, У7А), в середине обозначения марки — что сталь *легирована азотом* (16Г2АФ), в начале марки — что сталь *автоматная повышенной обрабатываемости резанием* (А35Г2). Буквы АС в начале марки указывают, что сталь *автоматная со свинцом* (АС35Г2).

Особовысококачественную сталь обозначают, добавляя через дефис в конце марки буквы Ш или другие буквы (табл. 5.1) (30ХГС-Ш или 95Х18-Ш). Это означает, что сталь подвергалась электрошлаковому переплаву, обеспечивающему эффективную очистку от сульфидов и оксидов.

Стали, полученные специальными методами, обозначаются буквами через дефис в конце марочного обозначения марки (см. табл. 5.1). Например, хромистая сталь ШХ15-ШД для прецизионных подшипников по химическому составу соответствует подшипниковой стали ШХ15, но производится методом переплава в вакуумно-дуговой печи электродов из стали ШХ15, которые изготовлены из слитка, полученного электрошлаковым переплавом. Для более точного определения марки стали следует пользоваться специальными справочниками.

Сталь, не содержащая в конце марки А, Ш или другие буквы (см. табл. 5.1), относится к категории качественных (30ХГС, У7).

В конце марки конструкционной стали могут быть дополнительные буквенные обозначения: ПП — сталь *пониженной прокаливаемости*, Л — *литейная*, К — сталь *для котлов* и др.

Строительную сталь обозначают буквой С и цифрами, условно соответствующими пределу текучести проката. Буква К в конце марки — вариант химического состава стали с повышенной *коррозионной стойкостью* в атмосфере, а буква Т — *термоупрочненный прокат* (например, С245; С345Т; С390К).

Таблица 5.1. Дополнение к марочным обозначениям высоко- и особовысококачественных сталей

Дополнение	Первичная обработка	Последующий сплав
ВД	Вакуумно-дуговой переплав	—
ВИ	Вакуумно-индукционная выплавка	—
ИД	»	Вакуумно-дуговой
ИП	»	Плазменно-дуговой
ИШ	»	Электрошлаковый
ИЛ	»	Электронно-лучевой
ГР	Газокислородное рафинирование	—
П	Плазменно-дуговой переплав	—
ПТ	Плазменная выплавка	—
ПД	»	Вакуумно-дуговой
ПЛ	»	Электронно-лучевой
ПП	»	Плазменно-дуговой
ПШ	»	Электрошлаковый
СШ	Обработка синтетическим шлаком	—
Ш	Электрошлаковый переплав	—
ШД	»	Вакуумно-дуговой
ШЛ	»	Электронно-лучевой
ШП	»	Плазменно-дуговой
ЭЛ	Электронно-лучевой переплав	—

В обозначение марки *быстрорежущей* стали входят: буква Р, цифра, следующая за ней, указывает среднюю массовую долю вольфрама в процентах. Во всех быстрорежущих сталях массовая доля хрома составляет около 4%, поэтому в обозначении марки букву Х не указывают. Ванадий, массовая доля которого в различных марках колеблется от 1 до 5%, обозначается буквой Ф, если его средняя массовая доля составляет более 2,5%.

Массовая доля углерода в марочном обозначении быстрорежущей стали не указывается, так как она в массовой доле составляет около 1%. Если быстрорежущая сталь легирована молибденом или

кобальтом, их массовая доля указывается в марке. Например, быстрорежущую сталь, содержащую (%): $C = 1,0-1,1$; $Cr = 3,0-3,6$; $W = 8,5-9,6$; $V = 2,1-2,5$; $Co = 7,5-8,5$; $Mo = 3,8-4,8$, обозначают P9M4K8.

Контрольные вопросы

1. Какое практическое значение в народном хозяйстве России имеют стали?
2. По какому принципу классифицируются стали в России?
3. Как понять и обозначить стали, классифицируемые по способу производства?
4. Расскажите о классификации сталей по химическому составу, сорту и стадии производства.
5. На какие виды делятся стали по структуре, качеству и основным свойствам?
6. Что означает классификация по основным свойствам?
7. Назовите области применения конструкционной и инструментальной сталей.
8. Какая система обозначения марок сталей принята в России?
9. Перечислите марки стали обыкновенного качества.
10. Как обозначаются марки конструкционных качественных сталей?
11. Как маркируются углеродистые инструментальные стали?
12. Приведите примеры маркировки легированных конструкционных и инструментальных сталей.

Углеродистые стали универсального применения

6.1. Общие сведения

К конструкционным сталям универсального назначения относятся стали, содержащие $C = 0,08-0,70\%$ и предназначенные для изготовления различных деталей машин и изделий.

Номенклатура конструкционных сталей велика, что объясняется многообразием условий работы деталей, разнообразием технологической среды и условий производства, где изготавливают детали. Оптимальный выбор стали основан на знании основных закономерностей формирования структуры и свойств, зависящих от легирования, термической обработки, технологического процесса, способов получения заготовки и детали.

Конструкционные стали универсального применения разделяются на *углеродистые* ($C = 0,08-0,60\%$) и *легированные* ($C = 0,10-0,70\%$). Легированные стали по уровню прочности, достигаемому термической обработкой, разделяют на две группы: *нормальной и повышенной прочности* (от $\sigma_B \leq 1500$ МПа), *высокопрочные* ($\sigma_B > 1500$ МПа). Стали первой группы делят на *низкоуглеродистые* (цементуемые), содержащие $C = 0,1-0,3\%$, *среднеуглеродистые* (улучшаемые) с содержанием $C = 0,35-0,5\%$ и *высокоуглеродистые* (рессорно-пружинные), где $C = 0,5-0,7\%$. Особую группу сталей *высокой обрабатываемости резанием* (автоматных сталей) образуют углеродистые и легированные стали со специальными добавками серы, свинца и кальция.

Свойства углеродистых сталей определяются содержанием углерода и способом применяемой обработки. Увеличение содержания углерода приводит к росту прочности и падению пластичности и вязкости ферритно-перлитной стали. При этом температурный порог хрупкости значительно повышается.

Прокаливаемость из-за малой устойчивости переохлаждения аустенита слишком мала, что является основным недостатком углеродистых сталей. Критический диаметр цилиндрического образца при закалке в воду (мартенситная структура) для различных углеродистых сталей составляет 10–20 мм и увеличивается в указанных

пределах при повышении содержания углерода от 0,3 до 0,8%. В сечении диаметром около 40 мм даже при закалке в воду в центре происходит ферритно-перлитное превращение. Оптимальное сочетание показателей прочности, пластичности и ударной вязкости обеспечивается отпуском закаленной стали.

Легирование сталей повышает их прочность. В результате увеличивается прокаливаемость легированных сталей по сравнению с прокаливаемостью углеродистых. Во-первых, становится возможным термическое упрочнение крупных деталей с максимальной толщиной до 100—120 мм. Во-вторых, благодаря малым критическим скоростям охлаждения аустенита при закалке используются более мягкие охлаждающие среды, чем вода, что уменьшает деформацию закаленных деталей и повышает качество закалки.

В машиностроении основная доля легированных сталей — низколегированные стали универсального назначения. По стоимости и комплексу свойств в термически обработанном состоянии эти стали в наибольшей степени соответствуют требованиям обеспечения прочности и эксплуатационной надежности деталей машин.

6.2. Углеродистые стали

Углеродистые (нелегированные) стали являются наиболее дешевыми сталями и составляют около 80% объема продукции черной металлургии. Эти стали выплавляются различными способами: в кислородных конвертерах, мартеновских печах и электропечах, что определяет содержание примесей и качество.

По качеству их разделяют на углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380—94 и ГОСТ 535—88), содержащие С до 0,49% и углеродистые качественные стали (ГОСТ 1050—88) с С до 0,65%. Содержание углерода определяет комплекс механических, физических и технологических свойств сталей. При увеличении содержания углерода растет доля цементита в структуре горячекатаных сталей, повышаются прочность и твердость при значительном одновременном снижении пластичности. По технологическим свойствам при горячей и холодной обработке давлением, сварке и обработке резанием углеродистые стали превосходят большинство легированных сталей. При закалке деталей из углеродистых сталей их недостатками являются малая прокаливаемость и большие деформации. Из-за малой прокаливаемости термическое улучшение возможно для деталей, максимальная толщина которых не превышает 10—20 мм. Необходимость закалки в воде, чтобы получить скорость

охлаждения больше критической, является причиной появления больших закалочных напряжений, искажения формы и размеров изделий.

6.2.1. Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380—94)

В зависимости от технологии раскисления стали выпускаются трех разновидностей (ГОСТ 380—94): *кипящие* с содержанием С < 0,27% (Ст1кп, Ст2кп, Ст3кп и Ст4кп), *полупокойные* (Ст1пс, Ст2пс, Ст3пс, Ст4пс, Ст5пс и Ст6пс), *спокойные* (Ст1сп, Ст2сп, Ст3сп, Ст4сп, Ст5сп, Ст6сп). К ним относятся также стали с повышенным содержанием марганца (Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст5Гпс), Мп = 0,8—1,10%. Эти стали имеют повышенную прочность по сравнению с прочностью сталей Ст3пс, Ст3сп и Ст5пс.

В стали Ст0 ограничивают только содержание углерода (не более 0,23%) к количеству серы и фосфора, а также к технологии ее выплавки не предъявляют специальных требований, а только нормируют временное сопротивление ($\sigma_B \geq 300$ МПа).

В сталях обыкновенного качества нормируется содержание примесей на более высоком уровне, чем у сталей других групп: S ≤ 0,05%, P ≤ 0,04%, As ≤ 0,08.

С увеличением цифры в марке стали увеличивается количество углерода, химический состав можно определить по сертификату, сопровождающему сталь. Цифры в маркировке не несут определенной функциональной нагрузки.

6.2.2. Углеродистые качественные стали (ГОСТ 1050—88)

К углеродистым качественным сталям относятся следующие марки стали: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55пп) и 60. Предусмотрен выпуск кипящих сталей марок: 08кп, 10кп, 11кп, 18кп, 20кп. Стали 11кп и 18кп используют для плакирования, от других кипящих сталей они отличаются содержанием серы (≤ 0,035%), фосфора (≤ 0,030%) и меди (≤ 0,20%). Полупокойные стали выпускают марок 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

Особенностями химического состава углеродистых качественных сталей являются суженный интервал допустимого содержания углерода (0,08%) и нормированное содержание хрома (0,10—0,25%). Для предупреждения «подкаливания» при охлаждении проката и обеспечения его твердости не выше 255 НВ независимо от содержания углерода ограничено содержание серы и фосфора (до 0,035% каждого элемента).

Цифры марок сталей обозначают среднюю долю углерода в сотых %. Например: Сталь 20, Сталь 45, где средняя доля углерода соответственно 0,20% и 0,45%.

6.2.3. Инструментальные углеродистые стали (ГОСТ 1435—90)

Из инструментальных углеродистых сталей получают горячекатаную, кованую и калиброванную сталь, сталь серебрянку, сталь для сердечников, а также слитки, листы, ленту, проволоку и другую продукцию. Из этих сталей изготавливают режущий инструмент для обработки металлов, дерева и пластмасс, измерительный инструмент, штампы для холодного деформирования.

Теплостойкость инструментальных углеродистых сталей не превышает 200 °С, при нагревании выше этой температуры они теряют свою твердость, а следовательно, режущие свойства и износостойкость.

Инструментальные углеродистые стали условно можно разделить на две группы: *качественные стали* — У7, У8, У8Г, У9, У10, У11, У12 и У13; *высококачественные стали* — У7А, У8А, У8ГА, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А.

В качественных инструментальных углеродистых сталях допускается содержание 0,03% серы и 0,035% фосфора, в высококачественных — 0,02% серы и 0,03% фосфора. Стали, полученные методом электрошлакового переплава, содержат до 0,015% серы.

Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, значительно превышающей твердость обрабатываемого материала, износостойкостью и теплостойкостью (способностью сохранять свойства при высоких температурах). Измерительный инструмент, изготовленный из такой стали, должен быть твердым и длительное время сохранять заданные размеры и форму. Рабочие детали штампов и накатных роликов для холодного деформирования (вытяжки, гибки, высадки, пробивки отверстий, накатки, раскатки), сделанные из этой стали, должны иметь высокую твердость, обладать износостойкостью при достаточной вязкости. Все это достигается путем закалки с отпуском, а для измерительного инструмента — за счет искусственного старения.

Из стали У9 производят деревообрабатывающий режущий инструмент (сверла, фрезы, ножи) и ножовочные полотна для обработки стали. Металлорежущий инструмент (фасонные резцы, сверла, метчики, плашки, развертки, фрезы, напильники и ходовые винты прецизионных станков) изготавливают из сталей У10, У11 и У12, бритвенные ножи, лезвийный хирургический инструмент и напильни-

ки — из стали У13, слесарные молотки, зубила, губки тисков — из сталей У7 и У8, шаблоны, скобы, детали микрометрического инструмента, гладкие и резьбовые калибры, цанги, фрикционные диски, пружины — из сталей У8, У9 и У10. Как правило, изготовлению инструмента предшествует отжиг на зернистый цементит, который способствует лучшей обрабатываемости резанием и уменьшает коробление деталей при закалке.

Цифра, стоящая после буквы У, обозначает долевое количество углерода в десятых частях %. Например, сталь У7, У8, У10, У12 процентные доли углерода составляют соответственно 0,7%; 0,8%, 1%; 1,2%.

6.3. Влияния углерода и примесей на структуру и свойства сталей

Кроме железа и углерода, стали в своем составе имеют некоторое количество постоянных примесей. Эти примеси оказывают различное влияние на структуру, а следовательно, и на свойства сталей. Неизбежными спутниками сталей являются сера, фосфор, марганец, кремний, а также углерод — необходимый компонент сталей, оказывающий основное влияние на их структуру и свойства. Чем больше содержание углерода, тем выше твердость и прочность стали, но тем ниже пластичность и вязкость (рис. 6.1). Наибольший

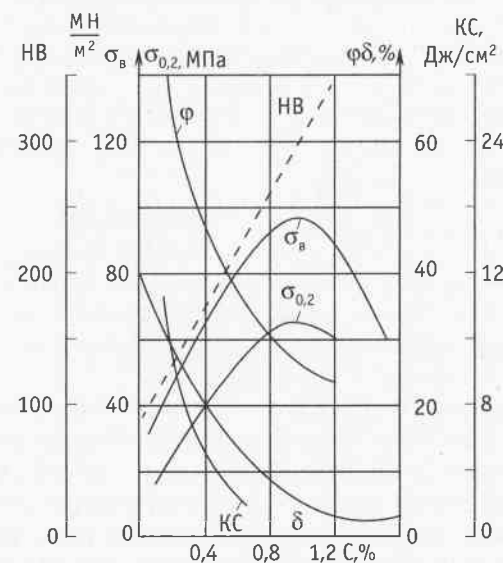


Рис. 6.1. Влияние содержания углерода на механические свойства стали

предел прочности σ_b достигается при содержании углерода около 0,9%. При дальнейшем увеличении количества углерода в структуре стали появляется вторичный цементит, располагающийся по границам зерен перлита в виде сетки. Из-за этого увеличивается твердость, но уменьшается прочность, так как цементит хрупок. Снижаются ударная вязкость КС (α_n), относительное удлинение δ и относительное сужение ϕ .

Сера попадает в сталь из чугуна, а в чугун — из руды и кокса. В железе она почти нерастворима, а в структуре стали образует химические соединения: с железом — сернистое железо (сульфид железа FeS) или с марганцем — сернистый марганец (сульфид марганца MnS). Эти сульфиды, а также соединения кислорода с железом и с марганцем (FeO, MnO) называют *неметаллическими включениями*. Их можно видеть под металлографическим микроскопом на нетравленном микрошлифе. Сульфид железа (FeS) располагается по границам зерен. Температура плавления его 985 °С. Температура горячей обработки давлением стали выше 1000 °С, поэтому каждое зерно находится в жидкой «рубашке» расплавленной эвтектики (сульфида железа), что служит причиной возникновения трещин.

Связь между зернами, разогретыми до температуры выше 1000 °С, ослабевает, и сталь разрушается. Такое явление называют *красноломкостью*, а сталь с повышенным содержанием серы — *красноломкой*. Это можно устранить путем введения в сталь марганца, который, соединяясь с серой, образует сернистый марганец (сульфид марганца MnS). Сульфид марганца плавится при 1620 °С, он пластичен и при горячей обработке давлением вытягивается в направлении деформации. Но все же и это включение (MnS) нежелательно, так как оно снижает динамическую и усталостную прочность, а также износостойкость.

Содержание серы строго регламентируется в зависимости от качества стали (0,025—0,06%), что обусловлено склонностью серы к зональной ликвации при затвердевании слитка (скапливание серы в отдельных участках слитка). Сера оказывает благоприятное влияние на сталь при ее обработке на станках-автоматах, так как способствует хорошему стружкообразованию.

Фосфор попадает в сталь так же, как и сера. Атомы фосфора, располагаясь в кристаллической решетке железа, сильно искажают ее, повышая твердость. Фосфор значительно снижает пластичность стали, делая ее хрупкой, особенно при температурах ниже нуля. Это явление называют *хладноломкостью*. Кроме того, фосфор, как и сера, склонен к образованию ликвационных зон, что отрицательно сказывается на свойствах стали. Содержание фосфора в зависимо-

сти от качества стали должно находиться в пределах 0,025—0,07%. Как и сера, фосфор улучшает обрабатываемость стали резанием.

Кремний и марганец в тех количествах, в которых они содержатся в углеродистых сталях (кремний — до 0,4%, марганец — до 0,08%), не оказывают заметного влияния на их свойства.

В сталях присутствуют газы (кислород, азот, водород), которые частично растворены и находятся в виде неметаллических включений (оксиды и нитриды). Оксиды — соединения металла с кислородом, нитриды — соединения металла с азотом.

Контрольные вопросы

1. На какие группы делятся конструкционные стали универсального применения?
2. Содержание какого элемента определяет комплекс механических, физических и технологических свойств сталей?
3. Назовите марки углеродистых кипящих сталей обыкновенного качества.
4. Перечислите марки качественных углеродистых сталей. Что обозначает цифра марки стали?
5. Дайте характеристику инструментальным углеродистым сталям. Что обозначает цифра марки?
6. Назовите марки инструментальных углеродистых качественных и высококачественных сталей.
7. Как изменяется структура и свойства сталей при увеличении содержания углерода?
8. Какое влияние на свойства стали оказывают сера, фосфор, кремний и марганец?

Основы термической обработки

7.1. Общие сведения

Термическая обработка — один из важнейших технологических процессов, используемый во всех отраслях машиностроения. Этот вид обработки металлов использовался еще несколько веков назад. Тогда металл разогревали в костре или горне. Наблюдения за изменением свойств металла в процессе обработки веками накапливались и передавались из поколения в поколение. Этот опыт часто смешивался с суеверными выдумками, которые сопровождались «технологическими рецептами». В летописи древнего храма в Балгале (Малая Азия) нашли рецепт закалки кинжала: «Нагреть до тех пор, пока он не засветится, как восходящее в пустыне солнце, затем охладить его до цвета царского пурпура, погружая в тело мускулистого раба. Сила раба перейдет в кинжал и придаст ему необходимую твердость». Высокоуглеродистую сталь рекомендовали закаливать в масле. А для закалки низкоуглеродистой стали советовали разогреть ее до цвета спелой вишни и охладить в моче резвого скакуна. Возможно, соляной раствор, увеличивающий критическую скорость закалки, было использовать неэкономно, поскольку тогда соль ценилась очень дорого. Известно, что деревенские кузнецы до середины XX в. пользовались конской уриной вместо соляного раствора.

Термической обработкой называется тепловая обработка металлов и сплавов, при которой происходит изменение их строения, а следовательно, и свойств. Механические свойства стали при этом могут изменяться в очень широком диапазоне. Так твердость стали, содержащей 0,8% углерода, после такой обработки возрастает от 160 до 600 НВ.

Термическая обработка состоит из трех переходов, следующих один за другим:

- нагрев до определенной температуры;
- выдержка при заданной температуре;
- охлаждение с различной скоростью от заданной температуры до комнатной.

Таким образом, процесс термической обработки зависит, прежде всего, от температуры и времени. Следовательно, любой процесс термической обработки можно изобразить в виде графика, на котором по оси ординат указывают температуру, а по оси абсцисс — время (рис. 7.1). Регулируя температуру и время, можно осуществлять следующие виды термической обработки стали: *отжиг, нормализацию, закалку, отпуск и старение*.



Рис. 7.1. График термической обработки

Структуры стали — *феррит, перлит и цементит* — устойчивы при комнатной температуре (их называют равновесными структурами). Однако они могут значительно изменяться в зависимости от условий нагрева и охлаждения. При определенном режиме тепловой обработки стали можно сохранить структурные составляющие, изменить форму или размеры зерен и таким путем получить зернистый перлит вместо пластинчатого или мелкопластинчатый перлит вместо крупнопластинчатого. С помощью термической обработки могут быть получены неустойчивые или неравновесные структуры.

7.2. Оборудование термических цехов

Оборудование термических цехов делится на основное, дополнительное и вспомогательное.

Основное оборудование предназначено для выполнения технологических процессов термической обработки. Оно включает печи, ванны, установки токов высокой частоты (в том числе для нагрева в электролите и пламенной закалки), закалочные баки и машины, оборудование для обработки холодом и др.

Дополнительное оборудование — моечные машины, дробеструйные и пескоструйные аппараты, травильные установки, правильные прессы и т. п. — используют после выполнения операций закалки и отпуска.

К *вспомогательному оборудованию* относятся различные подъемно-транспортные средства: ручные тали, электротали, мостовые краны, поворотные и передвижные краны, электрические и пневматические подъемники, роликовые и цепные конвейеры, тележки для загрузки и разгрузки печей, манипуляторы, бункеры для непрерывной загрузки конвейерных печей и печей с пульсирующим

подом, а также вентиляторы, воздуходувки, маслоохладительные и другие установки. По технологическому назначению печи и нагревательные установки делятся на отжигательные, закалочные, отпускные, цементационные. По конструкции различают печи периодического действия (камерные, шахтные, колпаковые, вакуумные) и печи непрерывного действия (карусельные, барабанные, конвейерные, толкательные, с пульсирующим подом и др.). По виду применяемого топлива печи делятся на мазутные, газовые и электрические, по тепловой энергии — на низкотемпературные, среднетемпературные и высокотемпературные.

После нагрева и выдержки изделия из стали подвергают охлаждению. Для охлаждения используют закалочные баки — немеханизированные, механизированные, бесконвейерные и конвейерные, без охлаждения закалочной среды и с охлаждением.

Закалка зубчатых колес осуществляется с помощью пневматических и гидравлических закалочных прессов и машин. При таком способе закалки уменьшается возможность деформации зубчатых колес. Рессорные листы закаляются на гибочно-закалочных машинах, позволяющих совместить операции закалки и гибки. В закалочных машинах детали обычно зажимаются между штампами, плитами или роликами. Закалка осевых деталей (кулачковых валов, полуосей и др.) производится при их вращении в закалочной жидкости.

Для охлаждения деталей созданы специальные установки, работающие с использованием сухого льда (твердой углекислоты), жидкого кислорода, азота или воздуха, а также холодильные машины каскадного типа с охлаждением за счет поглощения теплоты при испарении метана, фреонов и других холодильных агентов (хладагентов).

Термически обработанные изделия необходимо очистить от окалины и ржавчины. Очистка производится химическим травлением и механическими методами (с помощью дробеструйных и других аппаратов). Травление позволяет также выявить на изделиях поверхностные дефекты (трещины, волосовины, закаты, плены и др.).

Для химического травления созданы специальные травильные баки. Химическому травлению подвергают поковки после термической обработки.

На заводах с большим объемом термически обрабатываемых изделий для промывки после очистки используют моечные машины различных типов: конвейерные с наклонно-замкнутым транспортом типа МКП, барабанные со шнековым транспортом, двухсекционные типа ММБ, машины с горизонтальным толкателем и шаговым транспортом типа ММТ, рольганговые типа ММР с подвесным конвейером. После моечной машины устанавливают

сушильную камеру, так как до подачи из машины в отпускную печь поверхность изделий окисляется.

Правку стержней, осей и валов выполняют с помощью ручных, механических и гидравлических прессов. Наибольшее применение получили гидравлические прессы усилием от 49 до 1960 кН.

7.3. Контролируемые атмосферы

В целях предохранения стальных изделий от окисления и обезуглероживания в процессе нагрева, а также для их химико-термической обработки используют контролируемые атмосферы, при которых взаимодействие с металлом в процессе нагрева регулируется в требуемом направлении. Наличие в печах контролируемых атмосфер позволяет снизить потери металла, отказаться от трудоемкой операции очистки металлов от окалины, увеличить долговечность деталей машин. Для получения контролируемых атмосфер необходимы продукты диссоциации аммиака или частичного его сжигания, генераторный газ, предварительно очищенный от углекислого газа и просушенный для предупреждения обезуглероживания, и смесь газов, полученная при частичном сжигании природного, светильного, коксового и других углеводородных газов.

Продукты неполного сжигания углеводородных газов при коэффициенте расхода воздуха $a = 0,2-0,30$ получили название *эндотермической контролируемой атмосферы* (эндогаз). Такая атмосфера приемлема для всех термических и химико-термических процессов. Состав ее можно регулировать по точке росы (*точкой росы* называется температура начала конденсации водяных паров из газовой смеси). Достоинства эндотермической атмосферы — простота получения и универсальность применения, недостаток — взрывоопасность, особенно при низких температурах.

Из природного, коксового и нефтяного газов, а также сжиженных пропано-бутановых смесей и других углеводородов, очищенных от сернистых соединений, может быть приготовлена экзотермическая контролируемая атмосфера (экзогаз). Экзогаз с высоким содержанием окиси углерода и водорода называют богатым, с низким их содержанием — бедным. Богатый экзогаз при высоких температурах обладает восстановительными свойствами по отношению к окислам железа, меди и другим металлам. Для получения светлой поверхности металла при длительных процессах термической обработки (отжиг с медленным охлаждением) газ подвергают глубокой сушке. При термической обработке средне- и высокоуглеродистых сталей, которые могут обезуглероживаться в богатом эндогазе, из

него удаляют водяные пары и двуокись углерода. Бедный экзогаз имеет низкое содержание окиси углерода и водорода и практически инертен по отношению к окислам металлов.

Для светлого отжига и закалки коррозионно-стойких сталей, отжига малоуглеродистой и трансформаторной сталей и медно-никелевых сплавов применяют контролируемую атмосферу из диссоциированного аммиака, получаемую путем диссоциации жидкого безводного аммиака, часто с последующим дожиганием водорода и глубокой сушкой полученного газа.

7.4. Контроль температурного режима

При термической обработке необходимо соблюдать температурный режим, так как нарушение его может привести к браку. Для точного определения температурного режима используют различные приборы. Без приборов температуры устанавливают приблизительно. Обычно это делает опытный термист. Температуру определяют по цвету побежалости и излучению (цвету каления). Цвета побежалости — радужные цвета, возникающие в результате появления тонкого слоя окислов на чистой поверхности углеродистой стали при нагреве от 220 до 330 °С (табл. 7.1). Ими можно пользоваться при низком отпуске и закалке с самоотпуском.

Таблица 7.1. Цвета побежалости

Цвет	Температура, К (°С)	Толщина слоя окалины, мм
Соломенно-желтый	493—513 (220—240)	0,045
Оранжевый	513—533 (240—260)	0,05
Красно-фиолетовый	533—553 (260—280)	0,065
Синий	563—598 (290—325)	0,07
Серый	603 (330)	—

С изменением температуры нагрева металла изменяется интенсивность излучения (каления), металл меняет цвет, яркость которого увеличивается с повышением температуры от темно-вишневого до белого (табл. 7.2). Контроль температуры по цвету металла допускается только для изделий неотвеченного назначения при отсутствии соответствующих приборов.

Таблица 7.2. Цвета излучения (каления)

Цвет	Температура, К (°С)
Темно-вишневый	823—923 (550—650)
Темно-красный	923—1023 (650—750)
Красный	1023—1123 (750—850)
Светло-красный	1123—1223 (850—950)
Оранжевый	1223—1323 (950—1050)
Желтый	1323—1423 (1050—1150)
Ярко-желтый	1423—1523 (1150—1250)
Белый	1523—1623 (1250—1350)

Для измерения температуры в диапазоне от 100 до 650 °С применяют стеклянные жидкостные термометры расширения. Их недостатками являются большая тепловая инерционность, отсутствие дистанционной передачи и автоматической записи показаний. Температуры в диапазоне от -60 до +400 °С измеряют с помощью манометрических термометров — газовых или паровых. Преимущества данных приборов — малая стоимость, простота монтажа; недостатки — инерционность, сложность ремонта термосистемы, ограниченное рабочее давление измеряемой среды.

Для автоматического контроля и управления температурными режимами технологических процессов используют термопары и термометры сопротивления. Эти приборы позволяют измерять температуры в диапазоне от 200 до 1800 °С.

Термопара представляет собой спай двух разнородных металлических проводников (термоэлектродов). С одной стороны концы этих проводников сварены между собой (горячий спай), свободные (холодные) концы подключены к приборам. При нагреве места спая на свободных концах термопары возникает термоэлектродвижущая сила постоянного тока, которая возрастает по мере увеличения температуры. Термопары изготовляют из различных металлов и сплавов (табл. 7.3). В термопарах типов ТВР, ТПР и ТПП применена проволока диаметром от 0,1 до 1 мм, в термопарах типов ТХА и ТХК — проволока диаметром от 0,2 до 5 мм. Для предохранения от механических повреждений термопары заключают в защитную арматуру. Свободные концы термопар помещают в специальные коробки, где автоматически поддерживается необходимая температура.

Таблица 7.3. Стандартные термопары

Тип термопары	Материал термоэлектродов	Условное обозначение градуировочной характеристики	Диапазон измеряемых температур, К (°С)	Предельная температура измерений при кратковременных замерах, К (°С)
ТВР	Вольфрам — рений	ВР 5/20 ₆₈₋₁ ; ВР 5/20 ₆₈₋₂ ; ВР 5/20 ₆₈₋₃	До 2023 (0—1800)	2773 (2500)
ТПР	Платина — родий	ПР 30/6 ₆₈	573—1873 (300—1600)	2023 (1800)
ТПП	Платина — родий	ПП ₆₈	1573 (0—1300)	1873 (1600)
ТХА	Хромель — алюмель	ХА ₆₈	223—1273 (50—1000)	1573 (1300)
ТХК	Хромель — копель	ХК ₆₈	223—873 (50—600)	1023 (800)

Термометры сопротивления бывают платиновые (ТСП) и медные (ТСМ). Их изготавливают путем намотки платиновой или

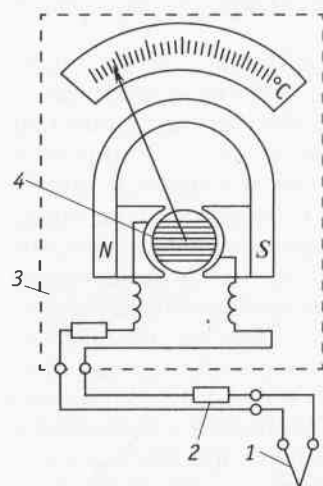


Рис. 7.2. Схема термопары с милливольтметром

медной изолированной проволоки на изоляционный каркас. Медные термометры сопротивления позволяют измерять температуры в диапазоне от -50 до $+180$ °С, платиновые — в диапазоне от 200 до 650 °С. Изменение электрического сопротивления термометров пропорционально температуре: чем выше температура, тем больше электрическое сопротивление.

Для измерения, записи и регулирования температуры применяют милливольтметры и потенциометры. Они относятся к вторичным приборам, так как одним из основных элементов их является термопара. Милливольтметр — прибор магнитоэлектрической системы, характеризующийся высокой точ-

ностью и чувствительностью. Принцип измерения температуры милливольтметром 3 (рис. 7.2) заключается в следующем. Под действием термоэлектродвижущей силы, развиваемой термопарой 1, в цепи возникает электрический ток, который, проходя через рамку 4, создает магнитное поле. В результате взаимодействия магнитного поля с полем постоянного магнита образуется вращающий момент рамки с указательной стрелкой, пропорциональный термоэлектродвижущей силе. Подгонка сопротивления линии осуществляется катушкой 2 в соответствии с внешним сопротивлением прибора.

В тех случаях, когда необходимо знать не только температуру в данный момент, но и весь режим нагрева за длительный период, используют *самопишущие милливольтметры*.

В термических цехах применяют показывающие, самопишущие и регулирующие температуру *электронные потенциометры*. Автоматические потенциометры работают в комплекте с термопарами и телескопами радиационных пирометров суммарного излучения.

Для непрерывного измерения и контроля температуры нагретых изделий служит *фотодиодный пирометр излучения* ФИТ-028М. Он имеет пылебрызгозащищенное исполнение. Пределы измерения температур этим прибором от 773 до 1873 К (500 — 1600 °С).

Радиационный пирометр РАПИР — прибор полного излучения — предназначен для измерения температур в диапазоне 673 — 2773 К (400 — 2500 °С).

Фотоэлектрический пирометр ФЭП-4 позволяет измерять температуры в диапазоне 773 — 4273 К (500 — 4000 °С). Погрешность измерения составляет ± 1 — $1,5\%$.

При нагревании деталей контроль и регулирование температуры производится с помощью *фотопирометра* ФЭП-60 и автоматического регулятора температуры (АРТ). Температура нагрева токами высокой частоты контролируется термопарами, приваренными к поверхности детали или зачеканенными горячим спаем в деталь. Для этих же целей служат оптические и фотоэлектрические пирометры. Объективы этих приборов при замере температуры направляют в зазор между витками индуктора, в зону изделия, выходящую из индуктора, или в специальные отверстия в активном витке индуктора.

При измерении температуры используют *термокарандаши*, *специальные лаки* и *таблетки*. Эти средства выпускаются фирмой «Геллинг» (Германия). В России термокарандаши применяют для измерения температур в пределах до 873 К (до 600 °С).

В настоящее время в плавильных и термических цехах при термообработке изделий и плавке металла для более точного определения температуры применяют компьютеры.

7.5. Критические температуры стали и чугуна

Нагрев стали и чугуна под заливку и термическую обработку, а также нагрев стали для обработки давлением производят с учетом так называемых особых температур или критических точек этих сплавов. Критические точки свойственны не только стали и чугуну — они имеются у всех сплавов, а также у ряда веществ. Например, всем известно, что вода, если ее охлаждать, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ превращается в твердое тело — лед, а если нагревать лед, то он при той же температуре ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) превратится в жидкость. При $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении вода закипает и начинает бурно превращаться в пар. Температуры 0 и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ для воды являются критическими точками. Таким образом, *критическими точками* называются те вполне определенные температуры, при которых в процессе нагрева или охлаждения начинается (заканчивается) резко, скачкообразно изменяться состояние (твердое или жидкое) и свойства сплава (или какого-нибудь вещества). У сталей и чугунов в процессе нагрева и охлаждения наблюдается несколько критических точек. В качестве примера рассмотрим критические температуры стали, содержащей $0,2\%$ углерода (сплав I рис. 7.3).

При температуре около $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$ эта сталь находится в жидком состоянии. При охлаждении до температуры, соответствующей точке I, лежащей на линии AC (которая характеризует начало затвердевания всех сплавов с содержанием углерода от 0 до $4,3\%$), указанная сталь начнет кристаллизироваться. При данной температуре в жидкой стали появится новое вещество (новая фаза) — твердые кристаллы аустенита. Этот момент и будет первым критическим моментом, характеризующим изменение состояния стали при ее охлаждении, а точка I будет первой критической точкой (точкой начала кристаллизации). При температуре, соответствующей точке 2, затвердевание стали полностью закончится, жидкое вещество (жидкая фаза) исчезнет, вся сталь перейдет в твердое состояние, при котором она будет состоять из кристаллов одной твердой структурной составляющей (фазы) — кристаллов аустенита. Это будет вторым критическим моментом изменения состояния стали при охлаждении — моментом исчезновения жидкой части, а точка 2 будет второй критической точкой (точкой конца затвердевания). В довольно обширном интервале температур — от точки 2 до точки 3 — однородная структура аустенита совершенно устойчива. В этом интервале температур он не подвергается структурным изменениям. Но при температуре, соответствующей точке 3, аустенит оказывается перенасыщенным железом. При этой температуре он начинает распадаться, выделяя

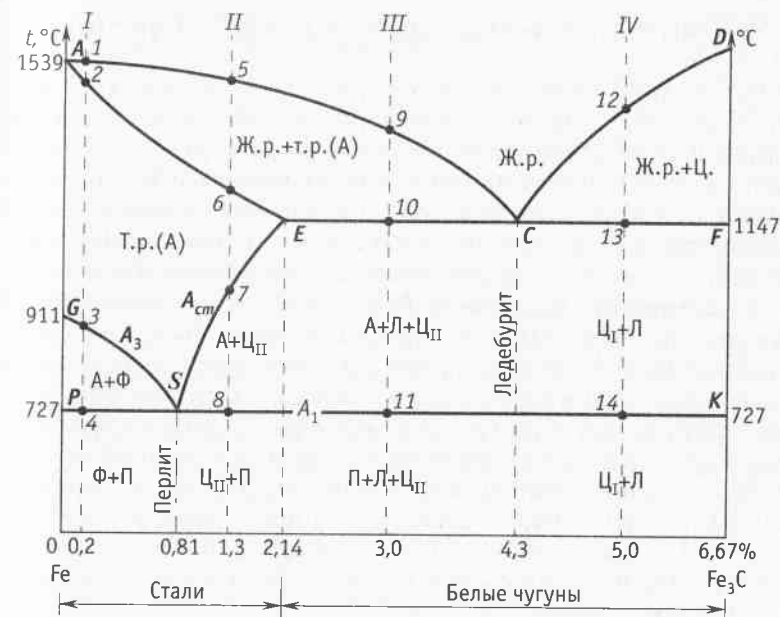


Рис. 7.3. Критические точки на диаграмме состояния Fe—Fe₃C в сплавах: I — 1, 2, 3, 4; II — 5, 6, 7, 8; III — 9, 10, 11; IV — 12, 13, 14; ж. р. — жидкий раствор; т. р. — твердый раствор; А — аустенит; П — перлит; Ц — цементит (Ц_I — первичный; Ц_{II} — вторичный); Ф — феррит

по границам своих зерен новую твердую структурную составляющую (новую фазу) — феррит (железо), обладающий по сравнению с аустенитом, из которого он выделился, совершенно иными свойствами.

Следовательно, твердая сталь при температуре, соответствующей точке 3, из однородной (гомогенной) по своей структуре превращается в неоднородную (гетерогенную), состоящую не из одних кристаллов аустенита, а из смеси кристаллов аустенита и кристаллов феррита. Этот момент будет третьим критическим моментом изменения состояния структуры стали при ее охлаждении, а точка 3 будет третьей критической точкой данной стали (точкой начала распада твердого раствора — аустенита).

При температуре, соответствующей точке 4, аустенит стали, выделивший весь избыток феррита в интервале температур от точки 3 до точки 4 и содержащий $0,8\%$ углерода, перестанет существовать и полностью превратится в *перлит*. Следовательно, при температуре, соответствующей точке 4 ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$), в структуре стали, содержащей

0,2 % углерода, произойдут коренные изменения. Полностью исчезнет аустенит (немагнитная структурная составляющая), а на его месте и из него образуется новая структурная составляющая сложного строения — *перлит*, состоящий из пластинчатых кристаллов феррита и таких же кристаллов новой твердой фазы — карбида железа Fe_3C , или цементита. Поэтому точка 4 также будет критической (перлитной) точкой данной стали. Дальнейшее охлаждение стали, содержащей 0,2% углерода (от 727 °С до комнатных температур), не приведет к видимым под микроскопом изменениям ее структуры.

Для стали, содержащей 1,3% углерода (заэвтектоидная сталь), критическими точками при охлаждении будут: точка 5, соответствующая началу кристаллизации (она характеризует начало появления твердых кристаллов аустенита); точка 6, характеризующая конец затвердевания стали (при температуре, соответствующей этой точке, исчезнет жидкая фаза, вся сталь будет состоять только из кристаллов аустенита); точка 7 — начало распада аустенита (из аустенита выделяется новая структурная составляющая — цементит); точка 8 — конец распада аустенита (при температуре, соответствующей этой точке, аустенит в структуре стали полностью исчезает, из него образуется новая структурная составляющая — перлит). Таким образом, в точке 8 в стали, содержащей 1,3% углерода, происходит то же самое, что и в стали, содержащей 0,2% углерода, в точке 4 (при одной и той же температуре 727 °С). При дальнейшем охлаждении стали, содержащей 1,3 % углерода (ниже температуры точки 8), изменений в структуре не происходит.

В чугунах наблюдаются аналогичные явления. Покажем это на примере доэвтектического чугуна, содержащего 3% углерода (сплав III). В точке 9 чугун начинает затвердевать — в жидком чугуне появляются твердые кристаллы аустенита. В точке 10 заканчивается кристаллизация — жидкость исчезает, образуется новая твердая структурная составляющая сложного строения — ледебурит (эвтектика), состоящий из смеси мелких кристаллов аустенита и цементита. В точке 11 из аустенита чугуна в процессе его охлаждения (от 1147 до 727 °С) выделяется весь избыток цементита. При достижении содержания углерода 0,81% при температуре 727 °С аустенит полностью исчезает, превращаясь в новую структурную составляющую — *перлит*. Следовательно, и в чугуне при температуре 727 °С наблюдаются те же явления, что и во всех сталях, — образование перлита. Дальнейшее охлаждение (ниже температуры точки 11) не вызывает изменений в структуре чугуна. Таким образом, при температурах, соответствующих критическим точкам, в процессе охлаждения сталей

и чугунов происходят весьма существенные структурные превращения, резко изменяющие все их свойства.

Критические точки важно знать при отливке и ковке металлов. При термической обработке особое значение имеют те критические точки, которые характеризуют начало или конец структурных превращений, совершающихся в стали и чугуне при нагреве и охлаждении в твердом состоянии.

Критические точки тесно связаны с линиями диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов, более того, эти линии соединяют критические точки, лежащие в пределах диаграммы, весьма большого числа сплавов. На линии *GS* из аустенита доэвтектоидных сталей при охлаждении начинает выделяться феррит. Чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем ниже температура начала распада аустенита. В заэвтектоидных сталях, содержащих больше углерода (от 0,81 до 2,14%), на наклонной линии *ES* начинается распад аустенита (при этом из аустенита выделяется не феррит, а цементит). Он начинается при тем более низкой температуре, чем меньше углерода содержится в заэвтектоидных сталях. В эвтектоидной стали, соответствующей по своему составу (0,81% углерода) точке *S*, в которой пересекаются наклонные линии *GS* и *ES*, распад аустенита начинается при самой низкой температуре (727 °С) с одновременным выделением из аустенита мелких кристаллов (пластинок) феррита и цементита (смесь этих пластинок образует сложную структурную составляющую — перлит). Критические точки, характеризующие начало распада аустенита сталей при охлаждении, называются верхними критическими точками (A_3 , A_{cm}). Они лежат на линиях *GS* и *ES* диаграммы. Критические точки, которые при медленном охлаждении стали и чугуна характеризуют момент полного распада аустенита, т. е. момент образования *перлита*, для всех сталей и всех чугунов при одной и той же температуре лежат на линии *PSK* диаграммы. При медленном охлаждении эта температура равна 727 °С. Критические точки, характеризующие при охлаждении полный распад аустенита и образование перлита из аустенита, называются нижними критическими точками или точками перлитного превращения (A_1).

Для эвтектоидной стали, содержащей 0,81% углерода, верхняя и нижняя критические точки совпадают в точке *S*, поэтому температура начала и конца распада аустенита у этой стали будет одна и та же (727 °С). Все другие стали (за исключением стали, содержащей 0,81% углерода) между верхней и нижней критическими точками имеют определенный температурный интервал. В этом интервале, начинающемся при температуре верхней критической точки и за-

канчивающемся при температуре нижней критической точки, и совершаются структурные превращения в твердой стали при ее охлаждении. Этот температурный интервал называется *критическим интервалом*.

При нагреве железоуглеродистых сплавов все процессы структурных изменений осуществляются в обратном порядке. Так, в доэвтектоидных сталях в процессе их нагрева при температуре нижней критической точки (727°C) перлит переходит в аустенит, при этом температура стали не повышается до тех пор, пока весь перлит не превратится в аустенит. При нагреве стали от нижней до верхней критической точки (в критическом интервале) происходит постепенное растворение феррита стали в аустените. В верхней критической точке (линия GS) растворение феррита полностью заканчивается: феррит в структуре стали исчезает, образуется однородная структура — аустенит.

В заэвтектоидных сталях при нагреве наблюдается то же самое, но с некоторой разницей: при температуре нижней критической точки (727°C), как и в доэвтектоидных сталях, перлит превращается в аустенит, но при дальнейшем нагреве в критическом интервале (между нижней и верхней критическими точками) в аустените происходит растворение не феррита, как у доэвтектоидных сталей, а цементита. При температуре, соответствующей верхней критической точке (линия ES), растворение цементита в аустените полностью заканчивается (при медленном нагреве) и заэвтектоидная сталь становится однородной по структуре, состоящей из кристаллов одного аустенита.

Чугуны в твердом состоянии имеют только одну, нижнюю критическую точку при температуре 727°C (линия PSK). При этой температуре в чугунах, как и во всех сталях, при нагреве перлит переходит в аустенит. При дальнейшем нагреве твердого чугуна (линия ECF диаграммы — линия начала плавления чугуна) в аустените происходит постепенное растворение углерода (цементита), выпавшего из него при охлаждении (наклонная линия CD). Однако растворение цементита в аустените твердого чугуна полностью не завершается, так как прежде чем твердый чугун достигнет этого критического состояния (полного растворения в аустените цементита), он начнет плавиться. Таким образом, в твердом чугуне невозможно существование верхней критической точки.

Положение критических точек у железоуглеродистых сплавов зависит не только от содержания в них углерода, но и от скорости их охлаждения, а у специальных сталей и чугунов — также и от содержания в них легирующих элементов. Чем больше скорость охлажде-

ния, тем ниже температуры критических точек чугуна и стали. Поэтому для каждой марки стали температуры критических точек устанавливаются при определенной скорости охлаждения. Скорость же нагрева на положение критических точек практически не оказывает влияния, за исключением весьма больших скоростей (например, при нагреве стали под поверхностную закатку токами высокой частоты весьма большие скорости нагрева приводят к сильному повышению температуры критических точек).

Критические точки нагрева и охлаждения для стали и чугуна в твердом состоянии принято обозначать особыми символами. Критические точки доэвтектоидных сталей, содержащих меньше 0,81% углерода, обозначают: нижнюю точку — A_{c1} при нагреве и A_{r1} при охлаждении; верхнюю — A_{c3} при нагреве и A_{r3} при охлаждении. Верхние критические точки заэвтектоидных сталей, содержащих больше 0,81% углерода, обозначают: A_{cm} при нагреве и A_{cm} при охлаждении. Верхняя и нижняя критические точки эвтектоидной стали, содержащей 0,81% углерода, совпадают, и их обозначают: $A_{c1,3}$ при нагреве и $A_{r3,1}$ при охлаждении. Нижнюю критическую точку чугунов в твердом состоянии обозначают: A_{c1} при нагреве и A_{r1} при охлаждении.

Знание механизма образования и изменения структуры железоуглеродистых сплавов в процессе их медленного нагрева и охлаждения, а также важнейших положений об их критических температурах имеет большое значение при изучении основ термической обработки стали.

7.6. Превращения, происходящие в стали при нагреве и охлаждении

Структура доэвтектоидной стали при нагреве ее до критической точки A_{c1} (см. рис. 7.3) представляет собой смесь перлита и феррита. В точке A_{c1} начинается *фазовая перекристаллизация перлита*, т. е. превращение его в мелкозернистый аустенит. При дальнейшем нагреве (от точки A_{c1} до точки A_{c3}) избыточный феррит растворяется в аустените, при достижении точки A_{c3} (линия GS) этот процесс заканчивается. Выше точки A_{c3} структура стали становится аустенитной.

При нагреве заэвтектоидной стали выше температуры точки A_{c1} в аустените начинает растворяться избыточный цементит. Выше точки A_{cm} (линия ES) сталь состоит только из аустенита, неод-

нородного по химическому составу. В тех местах, где был цементит, аустенит богаче углеродом, а там, где был феррит, — беднее. Поэтому при термической обработке для выравнивания химического состава аустенита сталь нагревают до температуры, немного выше верхней критической точки A_{c3} и выдерживают при этой температуре.

При повышении температуры выше точки A_{c3} мелкие зерна аустенита соединяются между собой, размеры их увеличиваются.

Весьма ответственной характеристикой структуры стали является *размер зерна аустенита*. При охлаждении стали аустенит испытывает превращения и формирование новой структуры, что существенно зависит от размера зерна аустенита. Чем меньше зерна аустенита, тем меньше будут размеры зерен феррита и перлита, а в закаленных сталях меньше размеры кристаллов мартенсита. Мелкозернистый аустенит способствует улучшению механических свойств стали. Увеличивается сопротивление хрупкому разрушению. Снижается температурный порог хрупкости T_{50} . В закаленных сталях со структурой мартенсита сопротивление хрупкому разрушению увеличивается при уменьшении размеров кристаллов мартенсита. Размер зерна аустенита в сталях может быть от миллиметра до микронов. Его определяют различными способами, но в основном металлографическим анализом. ГОСТ 5639—82 регламентирует размеры зерен, которые характеризуются его номером: $-3, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, 14$. Чем больше номер, тем мельче зерно. Например: средний диаметр зерна номера -3 составляет $1,000$ мм, номера 7 — $0,031$ мм, номера 14 — $0,0027$ мм. Крупными считаются зерна с номерами от -3 до 5 , мелкими — с номерами от 6 до 14 .

При скорости нагрева в промышленных термических печах начальное зерно аустенита имеет номера $8-10$. При нагреве концентрированными потоками энергии (лазер, электронный луч, ТВЧ и др.) начальное зерно получается более мелким — вплоть до номера 14 .

Аустенит устойчив только при температурах выше 727°C (см. рис. 7.3, точка A_{r1}). При охлаждении стали, нагретой до аустенитного состояния, ниже точки A_{r1} начинается распад аустенита. Как уже было сказано (см. диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов), при медленном охлаждении эвтектоидной углеродистой стали ($0,81\%$ углерода) при температуре, соответствующей линии PSK , происходит превращение аустенита в перлит. Кристаллическая решетка γ -железа перестраивается в α -железо, выделяется цементит (см. рис. 1.8). Изучение процесса превращения аустенита в перлит проводится при постоянной температуре (в изотермических условиях) и непрерывном охлаждении.

На рис. 7.4 показана диаграмма изотермического превращения аустенита при постоянной температуре. По оси ординат указана температура, по оси абсцисс — время. Для удобства построения диаграммы время распада обычно дают по логарифмической шкале, так как оно может колебаться в широких пределах — от долей секунды до десятков минут и даже часов.

Для изучения изотермического превращения аустенита небольшие образцы стали нагревают до температур, соответствующих существованию стабильного аустенита, т. е. выше критической точки, а затем быстро охлаждают, например до $700, 600, 500, 400, 300^\circ\text{C}$ и т. д., и выдерживают при этих температурах до полного распада аустенита. Изотермическое превращение аустенита эвтектоидной стали происходит в интервале температур от 727 до 250°C (температуры начала мартенситного превращения M_n).

На диаграмме видны две С-образные кривые. Кривая I указывает время начала превращения, кривая II — время конца превращения переохлажденного аустенита. Период времени до начала распада аустенита называют *инкубационным*. При 700°C превращение

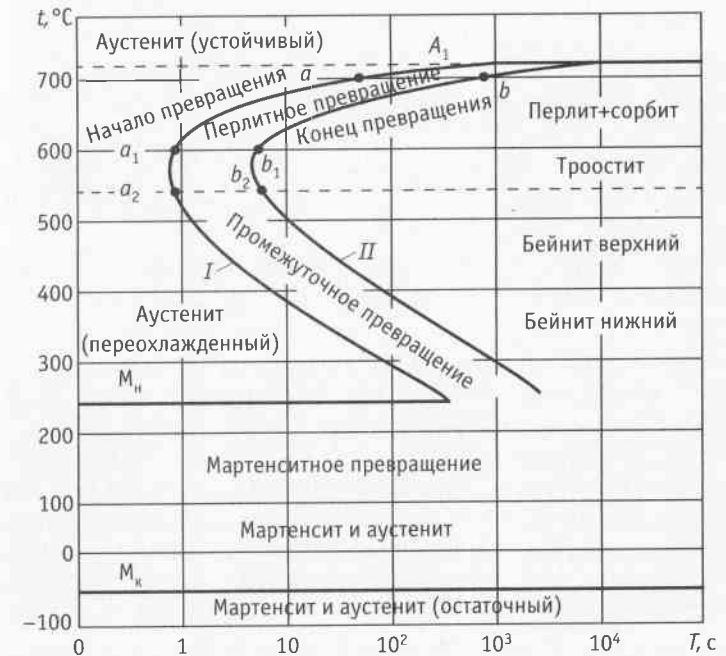


Рис. 7.4. Диаграмма изотермического превращения аустенита стали, содержащей $0,8\%$ углерода

аустенита начинается в точке a и заканчивается в точке b , в результате этого процесса образуется перлит (рис. 7.5, a). При 650°C распад аустенита происходит между точками a_1 и b_1 . В этом случае образуется сорбит — тонкая (дисперсная) механическая смесь феррита и цементита (рис. 7.5, b). Сталь, в которой доминирует структура сорбита, имеет твердость $30\text{--}40\text{ HRC}_3$. Такая сталь обладает высокой прочностью и пластичностью.

Устойчивость аустенита в значительной мере зависит от степени переохлаждения. Наименьшую устойчивость аустенит имеет при температурах, близких к 550°C . Для эвтектоидной стали время устойчивости аустенита при $550\text{--}560^\circ\text{C}$ — около 1 с. По мере удаления от температуры 550°C устойчивость аустенита возрастает. Время устойчивости при 700°C составляет 10 с, а при 300°C — около 1 мин. При охлаждении стали до 550°C (точки начала и конца распада — a_2 и b_2 соответственно, см. рис. 7.4) аустенит превращается в троостит — смесь феррита и цементита (рис. 7.5, $в$), которая отличается от перлита и сорбита высокой степенью дисперсности составляющих и обладает повышенной твердостью ($40\text{--}45\text{ HRC}_3$), прочностью, умеренной вязкостью и пластичностью. Ниже температуры 550°C в результате промежуточного превращения аустенита (в температурном интервале, расположенном ниже перлитного, но выше мартенситного превращения) образуется структура бейнита, состоящая из смеси перенасыщенного углеродом феррита и карбидов (цементита). Различают верхний бейнит перистого строения, появляющийся при $500\text{--}350^\circ\text{C}$, и нижний (пластинчатого, игольчатого строения), образующийся при $350\text{--}250^\circ\text{C}$.

Верхний бейнит имеет пониженную прочность, невысокую пластичность и вязкость, твердость его $43\text{--}46\text{ HRC}_3$. У нижнего

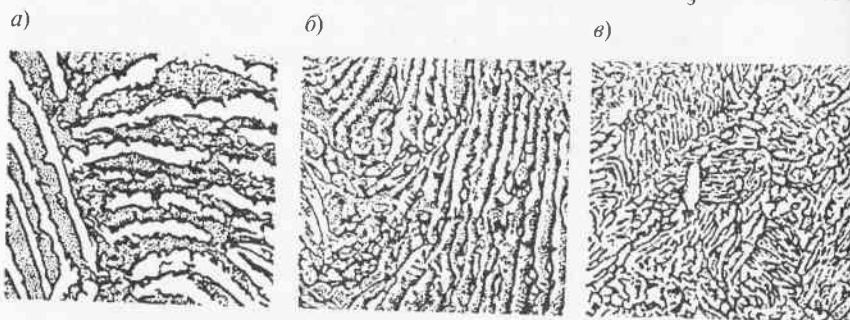


Рис 7.5. Микроструктура, полученная с помощью электронного микроскопа ($\times 7500$):
 a — перлит; b — сорбит; $в$ — троостит

бейнита показатели прочности, пластичности и вязкости более высокие, твердость $52\text{--}55\text{ HRC}_3$. Превращения аустенита при температурах A_1 , 550°C называют перлитными, при температурах 550°C — M_n — промежуточными и при температурах M_n — M_k — мартенситными. Если на диаграмму изотермического распада переохлажденного аустенита нанести кривые охлаждения, то можно проследить превращение аустенита при непрерывном охлаждении. При медленном охлаждении аустенит превратится в перлит. При большей скорости охлаждения переохлажденный аустенит полностью перейдет в сорбит.

При еще больших скоростях охлаждения образуется новая структура — троостит. По мере ускорения охлаждения лучи будут становиться все круче, поэтому превращение аустенита в троостит не закончится. Кроме троостита в структуре стали появится мартенсит.

При наибольших скоростях охлаждения образуется только мартенсит (рис. 7.6), т. е. пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. При образовании мартенсита происходит перестройка градиентированной решетки аустенита в объемно-центрированную решетку α -железа. Избыточное количество углерода, находящегося в α -железе, искажает эту решетку и превращает ее в тетрагональную, в которой отношение параметров c/a не равно единице (рис. 7.7), как у куба. Степень тетрагональности тем выше, чем больше углерода в стали. Скорость охлаждения, при которой из аустенита образуется только мартенсит, называют критической скоростью закали. При закалке стали ее охлаждают со скоростью больше критической.

Мартенситное превращение протекает при непрерывном охлаждении аустенита ниже точки M_n . По достижении определенной температуры (точка превращения аустенита в мартенсит заканчивается). Температуры в точках M_n и M_k зависят от химического состава стали. Углерод и легирующие элементы (за исключением кобальта и алюминия) понижают эти температуры. Мартенсит

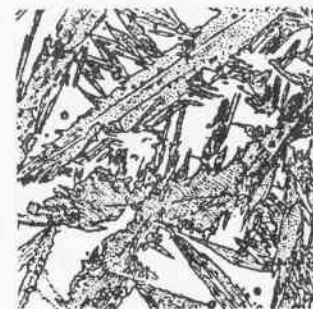


Рис. 7.6. Микроструктура мартенсита

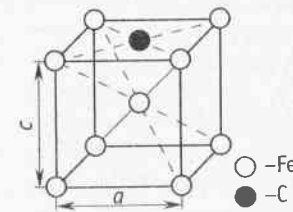


Рис. 7.7. Элементарная ячейка кристаллической решетки мартенсита

обладает самой высокой твердостью наряду со значительной хрупкостью. Он имеет пластинчатое строение, но в плоскости микрошлифа пластинки приобретают вид игл, поэтому мартенсит часто называют *игольчатым*.

У многих сталей температура в точке M_s ниже комнатной, поэтому распад аустенита не заканчивается, если сталь охлаждается только до комнатной температуры. Аустенит, который сохраняется в структуре стали при комнатной температуре, наряду с мартенситом называют *остаточным*. Закаленные высоколегированные стали содержат остаточный аустенит в больших количествах, а низкоуглеродистые его почти не имеют.

Мартенсит, получаемый при закалке стали, представляет собой неустойчивую структуру, стремящуюся к превращению в более равновесное состояние. Нагрев ускоряет этот переход, так как подвижность атомов при этом сильно возрастает.

7.7. Отжиг

Отжигом называется процесс термической обработки, при котором металл сначала нагревают до определенной температуры, выдерживают при этой температуре, а затем медленно охлаждают, чаще всего вместе с печью. В результате отжига в стали образуются равновесные структурные составляющие (см. диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов, рис. 7.3).

Отжиг чаще всего является предварительной операцией термической обработки, осуществляемой в целях устранения дефектов предыдущих операций (литья,ковки и др.) либо подготовки структуры для последующей обработки резанием или закалки. Путем отжига можно изменить форму и размеры зерен структуры стали, уменьшить вредные внутренние напряжения, устранить неоднородность ее химического состава, а также наклеп и таким образом значительно улучшить свойства стали. В зависимости от того, с какой целью проводится отжиг, устанавливают его режим, температуру нагрева, время выдержки и скорость охлаждения.

Для получения мелкозернистой структуры проводят *полный отжиг*. Отжигу подвергают изделия (чаще всего из конструкционной стали), перегретые при обработке давлением или при термической обработке, а также с полосчатой структурой (поковки, прокат, фасонное литье). При измельчении зерна снижается твердость стали, повышаются ее вязкость и пластичность, снимаются внутренние напряжения, улучшается обрабатываемость резанием. Изделия из такой стали реже выходят из строя при эксплуатации. Мелкое зерно

образуется при перекристаллизации стали, т. е. при получении аустенита мелкозернистой структуры в процессе нагрева стали. Скорость нагрева в среднем составляет $100\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$, продолжительность выдержки — от 0,5 до 1 ч на 1 т нагреваемого металла. Из предыдущего известно, что в стали, нагретой выше критической температуры A_{c3} , мелкозернистый аустенит получается даже в том случае, если исходная структура крупнозернистая.

Отжиг осуществляют следующим образом. Изделие нагревают до температуры $A_{c3} + 30\div 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, с тем чтобы иметь однородный по составу аустенит. После определенной выдержки при указанной температуре изделие охлаждают вместе с печью до $200\div 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Дальнейшее охлаждение до комнатной температуры можно производить на воздухе. Температурные интервалы различных видов отжига и нормализации представлены на рис. 7.8.

У стальных отливок процесс перекристаллизации протекает труднее, чем у ковanej и катаной стали, поэтому выдержка стальных отливок при температуре отжига должна быть более длительной. Охлаждение их производится со скоростью $80\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$, т. е. несколько медленнее, чем кованых и катаных изделий, которые

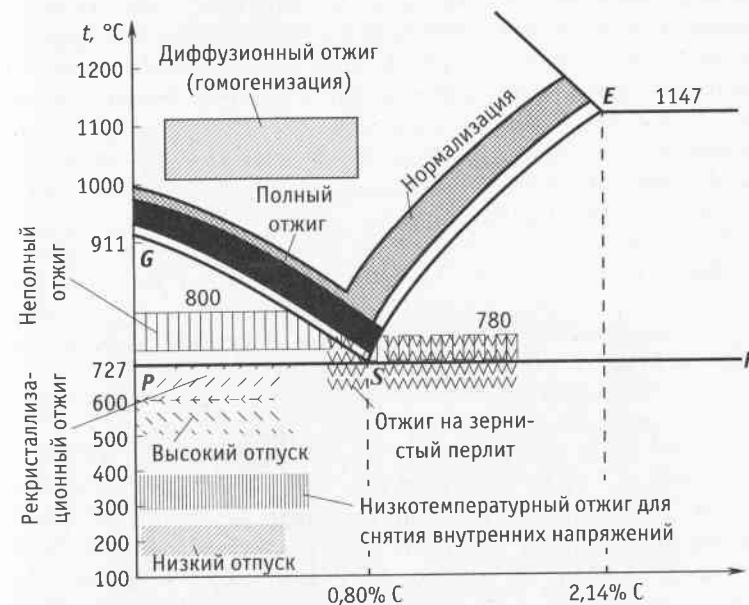


Рис. 7.8. Температурный интервал отжига и нормализации углеродистой стали

можно охлаждать со скоростью 100—200 °С/ч. Если при таких условиях не удастся получить мелкозернистую структуру, применяют двойной отжиг, причем первый отжиг выполняют при повышенной температуре (950 °С), а второй — при температуре $A_{c3} + 30 \div 40$ °С. Особенно благоприятное влияние отжиг оказывает на ударную вязкость стали.

На рис. 7.9 представлена микроструктура стали 35Л до и после отжига.

При *неполном отжиге* (см. рис. 7.3, 7.8) сталь нагревают до температуры выше точки A_{c1} и ниже точки A_{c3} или A_{cm} , выдерживают при этой температуре и затем медленно охлаждают вместе с печью. В процессе такого отжига происходит в основном перекристаллизация перлита, избыточные фазы (феррит в доэвтектоидных и цементит в заэвтектоидных сталях) распадаются лишь частично. Неполный отжиг применяют преимущественно для заэвтектоидных сталей. Для доэвтектоидных сталей его используют реже (для снятия внутренних напряжений и улучшения обрабатываемости резанием).

Изотермический отжиг, основанный на способности переохлажденного аустенита претерпевать превращения при постоянной температуре, дает возможность в три раза ускорить процесс получения мелкозернистой структуры. При таком отжиге изделия нагревают до требуемой температуры ($A_{c3} + 20 \div 30$ °С) и после некоторой выдержки охлаждают с печью до 680—700 °С либо переносят в другую печь (или соляную ванну) с той же температурой. При температуре 680—700 °С изделия выдерживают столько времени, сколько необходимо для полного превращения аустенита в перлит.

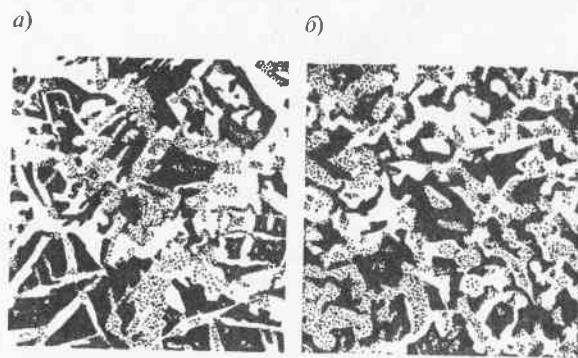


Рис. 7.9. Микроструктура литой стали 35Л: а — до отжига; б — после отжига

Время выдержки устанавливают по диаграмме изотермического превращения аустенита. Обычно оно составляет от 2 до 5 ч. По окончании выдержки изделия вынимают из печи и охлаждают на воздухе.

Изотермический отжиг позволяет снять напряжение, снизить твердость стали, обеспечивает однородность ее структуры, хорошую обрабатываемость резанием.

Стали (в основном инструментальные) подвергают отжигу для получения зернистого цементита (сфероидизация). За счет изменения формы цементита (создание зернистой формы вместо пластинчатой) удастся уменьшить твердость стали и, следовательно, облегчить ее обработку на станках, повысить режущую способность инструмента из этой стали, так как при зернистой форме цементит более равномерно распределяется в структуре закаленной стали.

Сталь с зернистым цементитом менее склонна к перегреву, трещинам и короблению при закалке (табл. 7.4).

Таблица 7.4. Механические свойства эвтектоидной стали

Строение перлита	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа (кгс/мм ²)	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение φ , %	Твердость НВ
Пластинчатый	820 (82)	15	30	228
Зернистый	630 (63)	20	40	163

Отжиг в целях получения зернистого цементита осуществляют по следующему режиму: сталь нагревают до температуры $A_{c1} + 20 \div 40$ °С (примерно 770 °С), выдерживают при этой температуре в течение 4—10 ч, а затем очень медленно (со скоростью не более 40—50 °С/ч) охлаждают вместе с печью до 600—650 °С. Дальнейшее охлаждение стали до комнатной температуры можно производить на воздухе.

Значительную экономию времени дает *маятниковый*, или *циклический*, отжиг. Сталь нагревают до 750 °С, после небольшой выдержки медленно охлаждают вместе с печью до 680—700 °С, затем снова нагревают до 750 °С и опять охлаждают до 680—700 °С. Так повторяют три-четыре раза. Процесс маятникового отжига сложнее обычного, но экономичнее.

При термической обработке вследствие неравномерного нагрева и охлаждения изделий, а также при других процессах могут возник-

кать внутренние напряжения (напряжения, образующиеся без воздействия на изделия внешних сил). При неравномерном охлаждении изделия наружные слои, охлаждающиеся быстрее, уменьшаются в объеме и сжимают внутренние слои, которые еще не успели остыть и поэтому препятствуют сжатию наружных слоев, — так появляются внутренние напряжения. Особенно значительными они могут быть у изделий крупных сечений и сложной формы.

Такое напряженное состояние металла нежелательно, так как достаточно внутренним напряжениям в какой-либо небольшой зоне превысить предел прочности, как образуется трещина. Чтобы этого не случилось, проводят *отжиг для снятия вредных внутренних напряжений*. Такой отжиг не требует высокой температуры. Изделия достаточно нагреть до температуры, при которой проявляются пластические свойства стали, т. е. до 500—600 °С, выдержав при этой температуре некоторое время и затем медленно охладить вместе с печью (чтобы снова не возникли внутренние напряжения). Для сокращения времени выдержки практически отжиг ведут при 650—680 °С, т. е. при температурах, ниже критической (727 °С), следовательно, структурные превращения при таком отжиге не происходят. Этот вид отжига называют еще и *низким отжигом* или *высоким отпуском*. При низком отжиге вследствие снятия внутренних напряжений достигается некоторое снижение твердости изделия. Поэтому таким видом отжига иногда пользуются для уменьшения твердости изделий в целях улучшения их обрабатываемости на станках. Следует иметь в виду, что если сталь подвергается отжигу для получения мелкозернистой структуры или зернистого цементита, то для устранения внутренних напряжений специальный отжиг не требуется. В процессе проведения указанного отжига попутно снимутся и внутренние напряжения.

Стальные заготовки и изделия тонкого сечения часто изготавливают путем штамповки, прокатки или волочения в холодном состоянии. При обработке стали давлением в холодном состоянии происходит ее наклеп. В стали образуются значительные внутренние напряжения, она становится весьма прочной и твердой и в то же время хрупкой. Структура наклепанной стали представляет собой вытянутые в одном направлении зерна, кристаллическая решетка ее искажена. Для того чтобы исключить вредное состояние наклепа, необходимо изменить структуру стали, устранить искажение кристаллической решетки и вместо вытянутых зерен получить равноосные зерна (примерно с одинаковыми осями вдоль и поперек зерна). Такой процесс восстановления структуры стали называется *рекристаллизацией*, а вид термической обработки, при помощи которой этот процесс осуществляется, — *рекристаллизационным отжи-*

гом. Такого рода отжиг выполняют при температурах 450—700 °С. После непродолжительной выдержки при указанных температурах (для прогрева по всему сечению) изделие охлаждается на воздухе. В результате отжига уменьшаются твердость и прочность стали, но вместе с тем повышаются ее вязкость и пластичность.

Крупные слитки легированной стали, претерпевающие при затвердевании значительную ликвацию, подвергают *отжигу для устранения химической неоднородности*. Ликвация — неоднородность стали по химическому составу — может быть зональной (в отдельных частях слитка) и внутрикристаллической, или дендритной (внутри отдельных кристаллов). Она неблагоприятно сказывается на свойствах стали, особенно ударной вязкости в поперечных сечениях. Зональную ликвацию практически устранить невозможно.

Внутрикристаллическая ликвация может быть значительно ослаблена путем отжига. Сталь нагревают до 1100—1200 °С, выдерживают при этой температуре 10—15 ч, после чего медленно охлаждают вместе с печью до 200 °С. Дальнейшее охлаждение производят на воздухе. На весь процесс затрачивается 80—100 ч.

При высокой температуре атомы серы, углерода и других элементов медленно перемещаются от зон, где они содержатся в большом количестве, к зонам, где их меньше. Таким образом, происходит процесс диффузии, в результате чего и выравнивается химический состав стали. Поэтому такой отжиг называют еще и *диффузионным*. В результате длительной выдержки при высокой температуре сталь приобретает крупнозернистое строение, что легко устраняется в процессе дальнейшейковки или прокатки слитка. Если химическая неоднородность стали не очень значительна, она может быть устранена при горячей обработке слитка давлением без предварительного его отжига.

Диффузионный отжиг применяют в основном на металлургических заводах, выпускающих стальные слитки. Такому отжигу подвергаются также некоторые стальные отливки. Однако после диффузионного отжига они должны непременно пройти повторный отжиг для получения мелкозернистой структуры.

7.8. Нормализация

Нормализация — один из видов термической обработки. При нормализации стали нагревают до температур, на 30—50 °С превышающих верхние критические температуры A_{c1} или A_{cm} (см. рис. 7.3, 7.8), выдерживают при этих температурах и затем охлаждают на спокойном воздухе для получения тонкопластинчатой перлитной

структуры. От отжига нормализация отличается более быстрым охлаждением (примерно в два раза быстрее, а значит, и дешевле). Кроме того, этот процесс более экономичный, так как изделия при нормализации охлаждают вне печи. Однако применять нормализацию вместо отжига не всегда можно, поскольку у некоторых сталей после нее значительно возрастает твердость (например, у сталей, содержащих свыше 0,4% углерода). Такие стали лучше отжигать, хотя на практике их часто подвергают нормализации, а затем высокому отпуску при 650—700 °С для уменьшения твердости.

Нормализацию применяют для получения мелкозернистой структуры в отливках и поковках, устранения наклепа, подготовки стали к закалке. Рекомендуется подвергать нормализации малоуглеродистые стали, так как у них практически отсутствует разница в свойствах после отжига и нормализации. Для некоторых изделий нормализация является не предварительной, а окончательной операцией термической обработки. В этом случае после нормализации изделия должны пройти высокий отпуск для снятия внутренних напряжений, образующихся при охлаждении на воздухе. Для заэвтектоидной стали нормализацию используют в целях устранения цементитной сетки, так как ускоренное охлаждение препятствует выделению цементита по границам зерен.

7.9. Закалка

Закалка — самый распространенный и в то же время наиболее сложный вид термической обработки, так как она протекает при очень больших скоростях охлаждения, что приводит к образованию значительных внутренних напряжений. При закалке стали нагревают до температуры получения структуры аустенита (выше критических точек A_{c3} или A_{c1}), выдерживают некоторое время при этой температуре, а затем быстро охлаждают в воде, масле, растворах солей, кислот, щелочей, на воздухе и в других средах, а также с помощью металлических плит. Охлаждение чаще всего применяют в целях повышения твердости и прочности стальных изделий. Максимальная твердость при этом достигается за счет получения структуры мартенсита. Закаливанию подвергают валы, шестерни, пружины, штампы, зубила, резцы, сверла, фрезы и др. Закалка с последующим отпуском позволяет изменять свойства стали в широком диапазоне.

Для того чтобы закалить сталь, ее необходимо нагреть до определенной температуры. Если углеродистую сталь нагреть до температуры ниже критической (A_{c1}), то твердость ее по сравнению с ис-

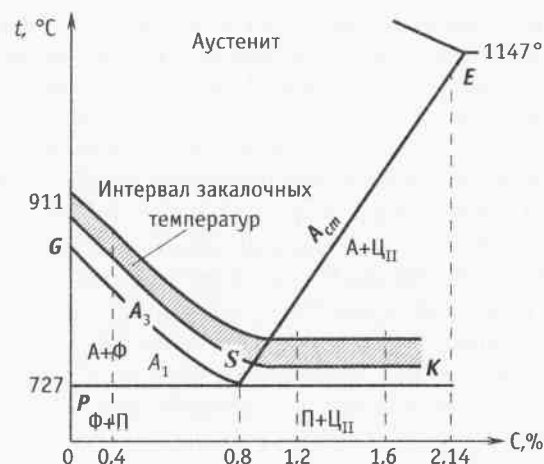


Рис. 7.10. Температурный интервал закалки углеродистых сталей

ходным состоянием мало изменится, в структуре такой стали не будет мартенсита. Структуру мартенсита можно получить только в результате распада аустенита.

Температура нагрева стали при закалке зависит, прежде всего, от содержания в ней углерода (рис. 7.10). Доэвтектоидные стали при закалке нагревают до температур, на 40—50 °С превышающих критическую A_{c3} . При таком нагреве структура стали становится аустенитной. Последующее быстрое охлаждение приводит к превращению аустенита в мартенсит. Такая закалка называется *полной*. Заэвтектоидные стали при закалке нагревают до температур, на 40—50 °С превышающих критическую A_{c1} , т. е. до 760—780 °С. При данной температуре структура стали будет состоять из аустенита и цементита. В результате быстрого охлаждения аустенит перейдет в мартенсит, а цементит сохранится в структуре закаленной стали, так как он не претерпевает превращений при охлаждении. Следовательно, после закалки сталь будет иметь структуру мартенсита и цементита. Такая закалка называется *неполной*.

Если доэвтектоидную сталь подвергнуть неполной закалке, т. е. нагреть до температуры выше точки A_{c1} , но ниже точки A_{c3} , в ее структуре наряду с аустенитом появится феррит. После закалки структура такой стали будет состоять из мартенсита и мягкого феррита. Наличие в закаленной стали феррита приведет к снижению не только ее твердости и прочности, но и пластических свойств. Заэв-

тектоидная сталь после неполной закалки имеет в своей структуре твердый цементит, который не только не снижает ее твердость, но даже не снижает износостойкость. Полная же закалка этой стали, т. е. нагрев ее до температуры выше точки A_{cm} , не только не требуется, но и опасна. Твердость стали при этом не увеличится, зато создадутся благоприятные условия для перегрева, возникновения закалочных трещин и обезуглероживания стали.

Время выдержки стальных изделий при температуре закалки зависит от химического состава стали и вида нагревающей среды. Оно должно быть достаточным для того, чтобы обеспечить образование однородного аустенита по всему сечению изделия. Чем больше толщина и масса изделия, тем продолжительнее должна быть выдержка. Однако чрезмерно большая выдержка может привести к росту зерен аустенита.

Охлаждение при закалке. Скорость охлаждения оказывает решающее влияние на результаты закалки. Для каждой стали существует *критическая скорость закалки*, под которой понимается наименьшая скорость охлаждения, необходимая для переохлаждения аустенита до температуры мартенситного превращения. Чем ниже критическая скорость закалки, тем легче закалить сталь.

Фактическая скорость охлаждения при закалке должна быть не меньше критической, иначе *мартенсит* в структуре стали либо не образуется совсем, либо образуется частично, тогда структура стали будет состоять в основном из *троостита* или *сорбита*. Однако не следует охлаждать сталь и со скоростью, значительно превышающей критическую. Хотя при таком охлаждении сталь и будет иметь структуру мартенсита, но чрезмерно резкая закалка может привести к весьма значительным внутренним напряжениям и трещинам. В зависимости от химического состава сталей критическая скорость закалки может колебаться в очень широких пределах. У одних сталей она составляет 2—3 °C/с, у других — 1200 °C/с. У всех углеродистых сталей критическая скорость закалки очень велика.

Для того чтобы установить скорость охлаждения при закалке, кроме критической скорости необходимо учитывать форму и размеры закаливаемого изделия. Изделия, изготовленные из стали одного и того же состава и имеющие одинаковую критическую скорость закалки, будут охлаждаться с различной скоростью, если у них разные размеры и форма. Скорость охлаждения в значительной мере зависит от размеров изделия. Чем меньше толщина изделия и больше отношение охлаждаемой поверхности к его объему, тем быстрее происходит охлаждение.

Различная скорость охлаждения изделий при закалке достигается за счет применения охлаждающих (закалочных) жидкостей: воды, масла, растворов солей в воде и др. При охлаждении в жидкости изделие отдает часть своей теплоты соприкасающейся с ним жидкости, превращающейся в пар. Теплота, расходуемая на образование пара, называется *скрытой теплотой парообразования*. Закалывающая способность охлаждающей среды зависит от многих факторов, и прежде всего от скрытой теплоты парообразования, а также температуры жидкости. У различных жидкостей скрытая теплота парообразования неодинакова. Чем выше теплота парообразования, тем больше закаливающая способность жидкости, так как изделие, отдавая большое количество теплоты на образование пара, будет быстрее охлаждаться. При охлаждении стали в закаливающей жидкости происходят некоторые явления, которые могут заметно снизить интенсивность охлаждения. Когда раскаленное стальное изделие погружают в жидкость, вокруг него образуется плотное кольцо пара, называемое *паровой рубашкой*. Она изолирует изделие от охлаждающей жидкости и тем самым замедляет процесс охлаждения. Длительность существования паровой рубашки у разных охлаждающих сред различна. Паровая рубашка, образующаяся при закалке в масле, сохраняется более длительное время, чем паровая рубашка при закалке в воде. Это объясняется тем, что масло обладает гораздо большей вязкостью, чем вода.

Вредное влияние паровой рубашки можно уменьшить, ускорив ее разрушение путем перемещения изделий в закалочном баке вертикально (по оси) или горизонтально — в зависимости от их формы. Однако перемещать крупные изделия в жидкости трудно. В этом случае приводят в движение не изделие, а жидкость. Образование паровой рубашки можно предупредить, если использовать некоторые охлаждающие среды, в частности растворы солей в воде. Чтобы правильно выбрать охлаждающие среды, необходимо знать их основные особенности.

Самая распространенная закалочная среда — вода. Ее охлаждающая способность зависит от температуры. Чем выше температура воды, тем меньше ее закалочная способность, поэтому при работе рекомендуется систематически следить за температурой воды. Обычно при закалке применяют воду с температурой 20—30 °C. Закалывающая способность воды может быть уменьшена путем добавления в нее мела, извести, мыла, глицерина и других подобных веществ или увеличена при введении в нее хлористого натрия (поваренной соли) или едкого натра (каустической соды). Вода, в которой растворены хлористый натрий или едкий натр, имеет более высокую скрытую теплоту парообразования. Частицы соли, соприка-

саясь с раскаленным металлом, взрываются и разрушают паровую рубашку, тем самым увеличивая закаливающую способность воды.

Широкое распространение в качестве охлаждающей среды получило минеральное масло, преимущественно индустриальное. Масло должно быть чистым и иметь высокую температуру вспышки. Оно не должно густеть, иначе расход его сильно возрастет. Масло, подогретое до 50—60 °С, обладает более высокой закаливающей способностью, чем холодное. Это объясняется тем, что при нагреве масло становится менее вязким, его паровая рубашка разрушается быстрее. Недостатки масла — огнеопасность (температура вспышки 150—200 °С) и способность к загустеванию с течением времени.

При выборе закаливающей среды необходимо знать, как она охлаждает изделие в различных интервалах температур. Особенно важно знать, с какой скоростью охлаждаются изделия в интервалах температур 550—650 и 200—300 °С. Наилучшей является такая закаливающая среда, которая в интервале температур от 550 до 650 °С охлаждает изделия со скоростью выше критической скорости закали, а при температурах 200—300 °С обеспечивает медленное, спокойное их охлаждение. Это обусловлено тем, что при температурах 550—650 °С устойчивость аустенита очень мала, особенно у углеродистой стали. Поэтому в этом интервале температур охлаждающая способность среды должна быть большой, иначе не получить структуру мартенсита. При температурах 200—300 °С, наоборот, желательно медленное охлаждение, что уменьшает опасность коробления изделий и появления трещин, так как в этих условиях переход аустенита в мартенсит протекает более равномерно.

Данные о скорости охлаждения стали в различных закалочных средах при температурах 550—650 и 200—300 °С приведены в табл. 7.5. Из этих данных следует, что вода и растворы солей в воде при температурах 550—650 °С обладают большой закаливающей способностью.

Недостаток этих охлаждающих сред — высокая скорость охлаждения в интервале температур от 200 до 300 °С.

Закалочная способность масла при 550—650 ° в четыре-пять раз меньше, чем холодной воды, однако при 200—300 °С масло охлаждает изделия в десять раз медленнее, чем вода, поэтому при закалке изделий в масле значительно уменьшается опасность их коробления и появления трещин. Углеродистые стали, у которых критическая скорость закали составляет 400—600 °С/с, для получения мартенсита следует закалывать только в воде при комнатной температуре и в водных растворах солей. Большинство легированных сталей можно закалывать в масле.

Таблица 7.5. Скорость охлаждения стали при использовании различных средств закаливания

Средство закаливания	Температура закалочной среды, °С	Скорость охлаждения, °С/с, в интервалах температур	
		550—650°	200—300°
Вода	18 50	600 100	270 170
Вода дистиллированная	20 80	250 30	200
10%-й водный раствор: поваренной соли едкого натра сода	18	1100 1200 800	300 300 270
Индустриальное масло	20	150	30
Эмульсия (смесь масла и воды)	—	70	200
Трансформаторное масло	—	120	25
Медные плиты	—	60	30
Железные плиты	—	35	15
Воздух: спокойный под давлением	—	3 30	1 10

Примечание. Перевод температуры Цельсия в температуру Кельвина может быть выполнен по формуле $^{\circ}\text{C} = (n + 273,16)\text{K}$.

Важное значение при закалке имеет способ погружения изделий в охлаждающую среду. Неправильное погружение приводит к неравномерному распределению в стали внутренних напряжений, что может вызвать коробление изделия, а также недостаточную твердость отдельных его частей. Изделия, имеющие длинную, вытянутую форму (метчики, сверла, развертки), погружают в строго вертикальном положении. Так же погружают концевые фрезы. Изделия с сквозными отверстиями необходимо погружать закрытой стороной так, чтобы воздух и пар могли выйти из отверстий, а вода проникла бы в них. Изделия с вогнутой поверхностью нельзя опускать вогнутой поверхностью вниз, так как образующаяся паровая рубашка не даст этой поверхности закалиться. При закалке изделий с неодинаковыми сечениями сначала погружают наиболее массивную их часть. Изделия плоской формы следует погружать ребром.

Соблюдение указанных условий позволяет значительно снизить образование закалочных трещин и коробление изделий при закалке (рис. 7.11).

Закаливаемость и прокаливаемость стали — важнейшие характеристики стали, подвергаемой закалке. Эти характеристики не следует «смешивать».

Закаливаемость — это способность стали к повышению твердости при закалке. Некоторые стали обладают плохой закаливаемостью (имеют недостаточную твердость после закалки). О таких сталях говорят, что они не принимают закалку. Для того чтобы определить закаливаемость той или иной стали, необходимо измерить твердость поверхности стального изделия после закалки. Чем выше твердость, тем лучше закаливаемость стали. Закаливаемость стали определяется в основном содержанием в ней углерода. Это объясняется тем, что твердость мартенсита зависит от степени искажения его кристаллической решетки. Чем меньше в мартенсите углерода, тем меньше искажается его кристаллическая решетка, тем ниже твердость стали. Стали, содержащие менее 0,3% углерода, имеют низкую закаливаемость. Такие стали закалке не подвергают.

При закалке массивных изделий важно знать не только закаливаемость стали, но и ее **прокаливаемость** — глубину проникновения закалки. Различные слои изделия при закалке охлаждаются неодинаково. Поверхностный слой, который непосредственно соприкасается с закалочной жидкостью, охлаждается с большей скоростью, чем внутренние слои. Наименьшая скорость охлаждения — в центре изделия. Чем выше критическая скорость закалки стали, тем ниже ее прокаливаемость. Углеродистые стали имеют высокую критическую скорость закалки, поэтому у них низкая прокалива-

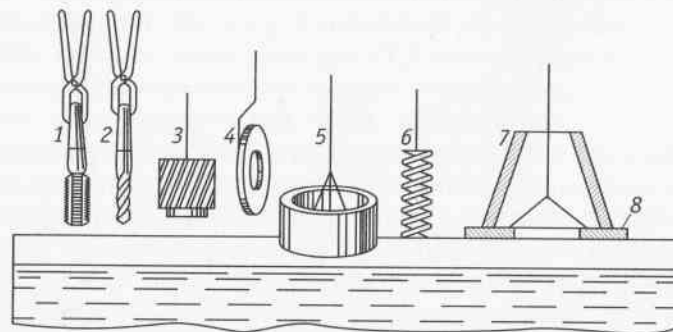


Рис. 7.11. Погружение деталей в закалочную среду с учетом их формы: 1 — метчик; 2 — сверло; 3 — фреза; 4 — диск; 5 — кольцо; 6 — пружина; 7 — деталь с тонкими стенками; 8 — приспособление

емость. Из углеродистой стали не изготавливают массивные изделия, у которых должны быть высокие механические свойства по всему сечению. Такие изделия обычно выполняют из легированной стали, имеющей более высокую прокаливаемость. На прокаливаемость стали, кроме химического состава, оказывают влияние и другие факторы, например размер зерна аустенита и охлаждающая среда. Под **глубиной закалки** условно понимают расстояние от поверхности изделия до того слоя, где структура состоит из 50% мартенсита и 50% троостита, или слоя, содержащего не менее 95% мартенсита. Прокаливаемость характеризуется **критическим диаметром** (диаметр прутка, прокаливаемого насквозь). Для определения прокаливаемости исследуют микроструктуру или измеряют твердость специальных образцов, подвергнутых закалке.

Способы закалки. Закалка бывает непрерывная, прерывистая, ступенчатая, изотермическая и светлая. Наиболее простой способ термической обработки — **непрерывная закалка**. Ее применяют для несложных по форме изделий. Изделие, нагретое до заданной температуры, охлаждают в воде или в масле до выравнивания его температуры с температурой ванны. Недостаток данного способа состоит в том, что при закалке изделий сложной формы в воде у них могут появиться трещины и коробление.

При **прерывистой закалке** охлаждение производят в двух средах — в воде (до 300—400 °С) и в масле. За счет этого уменьшаются внутренние напряжения в стали в момент перехода аустенита в мартенсит. Используя данный способ, необходимо точно выдерживать время пребывания изделия в воде, что требует большого практического опыта от работников, производящих закалку.

Ступенчатую закалку применяют для изделий диаметром не более 10—12 мм из углеродистой стали и диаметром до 20—30 мм из легированных сталей. Нагретые до температуры закалки изделия охлаждают в расплавленных солях или щелочах, температура которых немного выше температуры начала мартенситного превращения для данной стали (150—350 °С). В указанной среде изделия выдерживают до выравнивания температуры по всему их сечению (3—5 мин). Затем охлаждают на воздухе. При этом происходит превращение аустенита в мартенсит. Такой способ закалки позволяет значительно уменьшить внутренние напряжения в стали, так как превращение аустенита в мартенсит начинается одновременно по всему сечению изделия и протекает при медленном охлаждении его на воздухе. Недостаток способа — трудность использования его для изделий круп-

ных сечений, критическая скорость закалки которых нелегко достигается в горячих средах.

Изотермическая закалка — наиболее прогрессивный метод термической обработки, обеспечивающий получение однородной структуры изделий с минимальными внутренними напряжениями. Она основана на превращениях переохлажденного аустенита при постоянной температуре. Изотермическая закалка осуществляется так же, как и ступенчатая, только изделия выдерживают в ванне более длительное время (30—60 мин и более), пока не закончится распад аустенита. Температуру и время выдержки в горячей ванне устанавливают по диаграмме изотермического превращения аустенита данной стали. Окончательно изделия охлаждают на воздухе. В это время структура стали уже не изменяется. При изотермической закалке удается устранить большое различие в скоростях охлаждения поверхности и сердцевины изделий, что является основной причиной образования напряжений, возникновения деформаций и закалочных трещин. После нее изделия приобретают высокую вязкость и хорошую сопротивляемость ударным нагрузкам. Изотермической закалке часто подвергают изделия из легированных сталей марок 9ХС, ХВГ и др. В качестве охлаждающих сред при ступенчатой и изотермической закалке применяют расплавленные соли (50% KNO_3 + 50% NaNO_3 ; 100% NaNO_3 ; 100% NaOH ; 100% KNO_3) или щелочь (20% NaOH + 80% KOH).

Во время применения охлаждающих сред следует закрывать глаза защитными очками и надевать перчатки. При переносе заготовки из ванны в воду необходимо ее держать на вытянутой руке.

В целях получения чистой поверхности светло-серого цвета, не требующей дополнительной очистки, изделия подвергают светлой закалке. После нагрева в жидких солях (в безокислительной среде) их охлаждают в расплавах едких щелочей, которые полностью растворяют тонкую пленку окислов, образующуюся на изделиях при нагреве. Это позволяет произвести тонкое шлифование или не производить шлифования после закалки.

7.10. Отпуск и старение

Отпуском называется процесс термической обработки, при котором закаленная сталь нагревается ниже критической точки A_{c1} , выдерживается при этой температуре и затем охлаждается. В процессе отпуска уменьшаются или устраняются внутренние напряжения,

повышаются вязкость и пластичность стали, снижается ее твердость, улучшается структура.

При отпуске в стали происходят определенные структурные превращения. Первое превращение совершается при температурах 80—200 °С. Из раствора выделяется углерод, при этом исчезает искажение кристаллической решетки. Образующийся в процессе отпуска мартенсит, имеющий кубическую решетку, называют *отпущенным*. Второе превращение происходит при температурах 200—300 °С. Остаточный аустенит переходит в отпущенный мартенсит, который является менее напряженной структурой, чем мартенсит закалки. И, наконец, третье превращение происходит при температурах 300—400 °С. В этот период завершается процесс выделения углерода из раствора, образуется цементит Fe_3C , одновременно уменьшаются внутренние напряжения в стали. При 400 °С сталь состоит из феррито-цементитной смеси (троостит отпуска). При дальнейшем повышении температуры начинается коагуляция — частицы феррита и цементита разрастаются и приобретают округлую форму. Отпущенная при 350—500 °С сталь имеет структуру троостита, при 500—600 °С — структуру сорбита и при 600—700 °С — структуру перлита.

В зависимости от температуры нагрева различают три вида отпуска — низкотемпературный, среднетемпературный и высокотемпературный.

Низкотемпературный (низкий) отпуск проводят с нагревом до 150—300 °С. Этот отпуск снижает внутренние напряжения в стали при сохранении высокой твердости (58—63 HRC₃). Его применяют преимущественно для инструмента из углеродистых и низколегированных сталей, а также для деталей, подвергаемых поверхностной закалке, цементации и нитроцементации, к которым предъявляются высокие требования по твердости и износостойкости.

Среднетемпературный (средний) отпуск осуществляют при температурах 350—500 °С. Целью этого отпуска является получение структуры троостита. Твердость закаленной стали при этом снижается до 40—50 HRC, предел упругости достигает максимального значения. Среднему отпуску подвергают рессоры и пружины.

Высокотемпературный (высокий) отпуск проводят при температурах 550—680 °С. Сталь при этом приобретает структуру сорбита (сорбит отпуска). Твердость закаленной стали снижается до 250—350 НВ, прочность уменьшается в 1,5—2 раза, пластичность и вязкость увеличиваются в несколько раз, внутренние напряжения

полностью снимаются. Закалка с высоким отпуском называется *улучшением*. Улучшенная сталь по сравнению с отожженной или нормализованной имеет более высокие показатели прочности, пластичности и вязкости. Улучшению подвергают изделия из конструкционных сталей марок 40, 45, 40Х, 40ХНМ, 40ХМФ и др. (полуоси, коленчатые валы, шатуны, поворотные кулаки, рычаги, балки передних осей грузовых автомобилей, а также болты, гайки, винты и др.), испытывающие большие нагрузки.

При отпуске некоторых легированных сталей в определенном интервале температур наблюдается резкое снижение ударной вязкости, возникает отпускная хрупкость. Чтобы избежать развития отпускной хрупкости, изделия, изготовленные из хромоникелевых и марганцовистых сталей, после высокого отпуска быстро охлаждаются в масле или воде. С этой же целью сталь легируют молибденом или вольфрамом (не более 0,6%).

Температура отпуска и время выдержки зависят от марки стали, требований, предъявляемых к свойствам изделий из этой стали, и их массы. Отпуск закаленных изделий, особенно инструмента, рекомендуется проводить непосредственно после закалки в целях предотвращения образования трещин из-за возникших внутренних напряжений. При заниженных температурах отпуска или сокращении времени выдержки в стали сохраняется повышенная хрупкость, для устранения которой производят повторный отпуск. Повышенная температура отпуска приводит к снижению твердости и прочности. Эти недостатки устраняют отжигом изделий и повторной их закалкой с последующим отпуском. Температуру отпуска можно определить по цветам побежалости.

На рис. 7.12 показана зависимость механических свойств Стали 40 от температуры отпуска.

Старение — изменение свойств стали с течением времени без заметного изменения микроструктуры. В результате старения прочность и твердость повышаются, а пластичность и вязкость снижаются. Старение исключает изменение размеров и коробление изделий. Если старение производят при комнатной температуре, его называют *естественным*, если при повышенной температуре — *искусственным*. Старению подвергают станины станков, плунжеры, калибры, скобы и другие изделия, размеры и геометрическая форма которых не должны изменяться в процессе их эксплуатации.

Искусственное старение закаленных и отпущенных при низкой температуре изделий производят после предварительной механиче-

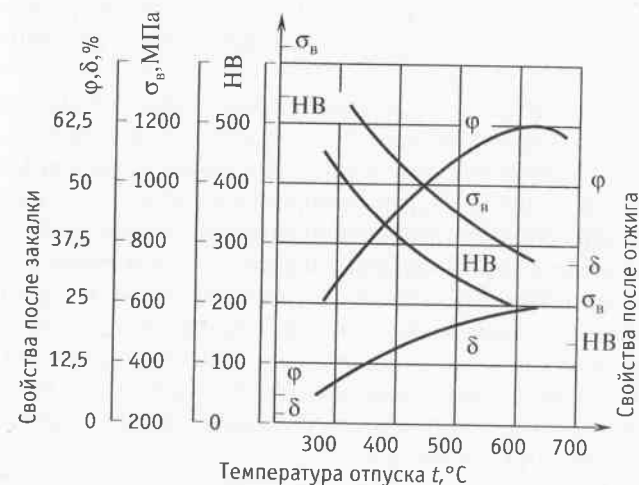


Рис. 7.12. Зависимость механических свойств Стали 40 от температуры отпуска

ской обработки при 100—180 °С с выдержкой в течение 18—35 ч и медленным охлаждением.

Естественное старение осуществляется на открытом воздухе под навесом, где на изделия воздействуют температурные изменения, влажность и давление воздуха. Оно длится от 3 месяцев до 2 лет. Естественному старению подвергают станины прецизионных станков, корпусные детали весьма ответственного назначения, рамы роялей и пианино. Его результатом является снижение внутреннего напряжения, стабилизация размеров и геометрической формы изделий.

7.11. Обработка стали холодом

Воздействию низких температур подвергаются очень многие материалы и изделия, например трубы для газо- и нефтепродуктов, мосты, железные дороги, автомобили, летательные аппараты и т. д.

В северных районах охлаждение материалов может достигать до -60 °С, корпуса самолетов и космических аппаратов могут охлаждаться до температуры жидкого кислорода (-183 °С). Детали и отдельные узлы криогенной техники, которые используются для получения, хранения, транспортировки сжиженных газов, охлаждаются до температуры жидкого гелия (-269 °С). При низких температурах у металлов наблюдаются потеря пластичности, вязкости и

повышенная склонность к хрупкому разрушению. Основное требование к материалам, работающим в условиях низких температур, — это отсутствие хладноломкости.

Для надежной работы материала необходимо, чтобы температурный порог хладноломкости был ниже рабочей температуры. На склонность к хрупкому разрушению, как и при нормальных температурах, влияют концентраторы напряжений и масса деталей.

Остаточный аустенит в закаленной стали снижает ее твердость и при постепенном самопроизвольном распаде вызывает изменение размеров изделий из этой стали. Закаленные стали, в структуре которых имеется остаточный аустенит, подвергают охлаждению до температур ниже 0°C . Такой процесс называют *обработкой холодом*. Под действием отрицательных температур остаточный аустенит превращается в мартенсит. Увеличение количества мартенсита способствует повышению твердости, улучшению магнитных характеристик стали, стабилизации размеров, повышению стойкости и усталостной прочности изделий из такой стали. Твердость после обработки холодом возрастает на 1—5 HRC₃ и более.

Обработку холодом производят в специальных камерах с хорошей тепловой изоляцией немедленно после закалки, так как выдержка стабилизирует аустенит и, следовательно, снижает эффект обработки. Необходимую температуру получают с помощью сухого льда (твердая углекислота), жидкого кислорода или жидкого воздуха. Выдержка при низких температурах должна быть непродолжительной. Термообработку с применением холода осуществляют по схеме: закалка — обработка холодом — низкий отпуск.

7.12. Понятие о термомеханической обработке стали

Термомеханической обработкой называется процесс, при котором термическая обработка совмещается с обработкой давлением.

Поиски путей совершенствования дислокационной структуры, получаемой у стали в результате термической обработки, привели к появлению нового вида обработки, сочетающего пластическую деформацию аустенита с проводимой сразу после нее закалкой и последующим низким отпуском. Этот вид обработки получил название термомеханической обработки (ТМО).

ТМО позволяет получить у стали более высокие прочностные и вязкостно-пластические свойства, чем после обычной закалки и низкого отпуска. Положительный дополнительный эффект при

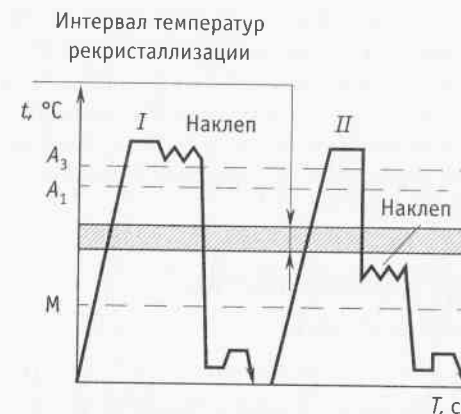


Рис. 7.13. Диаграмма ТМО: I — ВТМО; II — НТМО

ТМО объясняется предварительным наклепом аустенита во время пластической деформации. Последствия этого наклепа передаются мартенситу в виде дополнительных, возникших при наклепе дислокаций, которые, складываясь с дислокациями, возникающими при последующем мартенситном превращении, создают более плотную (до 10^{13} см^{-2}) дислокационную структуру.

Поскольку формирование дислокации первого и второго поколений происходит одновременно, такая высокая плотность дислокаций не порождает возникновения трещин при закалке. Образовавшийся таким путем мартенсит из-за повышенной плотности дислокации приобретает благоприятное напряженно-деформированное состояние, обеспечивающее ему при последующем низком отпуске более скоротечный начальный этап распада. Образующийся к концу упомянутого этапа мартенсит отпуска имеет более высокую, чем обычно, плотность дислокации при меньшем уровне остаточных напряжений. Такие особенности внутреннего строения прошедшей ТМО стали обеспечивают ей, с одной стороны, более высокую прочность, а с другой — повышенные значения пластичности и вязкости.

Применяя ТМО, можно повысить у стали σ_b до 3000 МПа при $\delta = 8\%$, в то время как при обычной закалке и низком отпуске эти показатели составляют соответственно около 2000 МПа и 3—4%.

Существуют две разновидности ТМО (рис. 7.13): высокотемпературная — ВТМО, низкотемпературная — НТМО. При ВТМО аустенит деформируют при температуре несколько выше A_{c3} до степени деформации 20—30%. При НТМО производится деформация пе-

реохлажденного до 400—600 °С аустенита. Степень деформации 75—90%. Более предпочтительна ВТМО. При ней, в дополнение к сказанному, сталь приобретает более высокие значения вязкости разрушения K_{Ic} (трещиностойкости), работы распространения трещины КСТ и сопротивления усталости при пониженной критической температуре, хрупкости t_{50} и меньшей чувствительности к концентраторам напряжений.

7.13. Термическая обработка быстрорежущей стали

Основное свойство быстрорежущей стали — повышенная красностойкость. Для достижения красностойкости сталь подвергают термической обработке по специальному режиму.

После горячейковки или прокатки заготовки из быстрорежущей стали отжигают при температурах 800—900 °С (в зависимости от марки). В результате отжига сталь приобретает структуру сорбита и карбидов. Из отожженных заготовок изготавливают инструмент, при этом оставляют припуски по режущим кромкам и посадочным поверхностям. Инструмент подвергают закалке при температурах 1270—1300 °С и многократному отпуску при 550—560 °С. Схема термической обработки быстрорежущей стали показана на рис. 7.14.

Высокая температура нагрева способствует растворению в аустените большого количества карбидов — таким путем получается высоколегированный аустенит. При охлаждении аустенита образуется высоколегированный мартенсит, содержащий значительное количество вольфрама, а также ванадия и хром. Такой мартенсит не терпит распада при нагреве до 600 °С, что и обуславливает красностойкость быстрорежущей стали. Необходимо отметить, что даже при максимальной температуре нагрева (1300 °С) полного растворения карбидов в аустените не происходит. Если быстрорежущую сталь при закалке нагреть до 850—900 °С или даже до 1100 °С, она будет достаточно твердой, но не будет обладать необходимой красностойкостью. Оптимальную температуру закалки инструмента из быстрорежущей стали выбирают в зависимости от марки стали, а также формы и размеров инструмента. При закалке резцов из стали Р18, которые в дальнейшем подвергаются заточке, оплавление кромок не представляет большой опасности. Поэтому такой инструмент можно нагревать до 1290 °С. Закалка фасонных резцов, фрез и сверл из этой же стали требует нагрева до 1260—1280 °С, так как оплавление кромок в данном случае недопустимо. Красностойкость

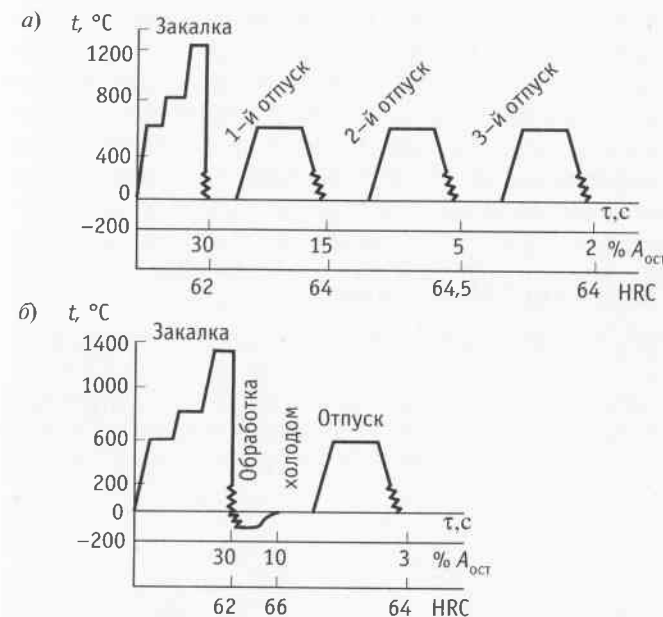


Рис. 7.14. Диаграмма термической обработки быстрорежущей стали: а — закалка с трехкратным отпуском; б — закалка с обработкой холодом и отпуском

инструмента при этом будет несколько ниже. Инструмент из стали марки Р9 при закалке нагревают до температуры на 40—50 °С ниже, чем температура нагрева инструмента из стали Р18.

Режущие свойства инструмента из быстрорежущей стали зависят от метода нагрева при закалке. Ввиду низкой теплопроводности быстрорежущей стали инструмент из нее нагревают постепенно — в два, а иногда и в три приема, сначала нагревают медленно до 820—850 °С, а затем переносят в другое нагревательное устройство, где быстро нагревают до температуры закалки.

На некоторых предприятиях применяют двойной нагрев инструмента до 850 °С с промежуточной выдержкой при температурах 620—650 °С, что обеспечивает равномерный нагрев и вместе с тем уменьшает опасность появления вредных внутренних напряжений. Мелкий инструмент нагревают в соляной ванне, состоящей из 78% хлористого бария и 22% хлористого натрия. Для массивного инструмента используют обычные камерные, электрические или пламенные печи. Второй (окончательный) нагрев до температуры закалки производят в соляной ванне — расплавленном хлористом барии.

На свойства инструмента из быстрорежущей стали большое влияние оказывает продолжительность выдержки при закалочной температуре. Чрезмерно длительная выдержка приводит к появлению крупнокристаллического излома и хрупкости. Недостаточная выдержка может вызвать понижение красностойкости стали, так как в твердый раствор перейдет меньшее количество карбидов вольфрама. Чем выше температура закалки, тем меньше должна быть выдержка. При первом подогреве в соляной ванне (до 820—850 °С) выдержку определяют из расчета 15—20 с на 1 мм толщины изделия, а при температуре закалки — 6—7 с на 1 мм.

Охлаждение при закалке осуществляют различными способами. Обычно инструмент охлаждают в масле до 150—200 °С, а затем — на спокойном воздухе. Необходимую твердость и красностойкость инструмента из быстрорежущей стали можно получить и при охлаждении его на воздухе. Однако, как показывает практика, режущие свойства инструмента в этом случае будут хуже, чем при закалке в масле. Хорошие результаты дает ступенчатая закалка, способствующая уменьшению деформации инструмента.

Структура закаленной быстрорежущей стали содержит около 50% легированного мартенсита, 30—40% легированного остаточного аустенита и некоторое количество карбидов, которые при нагреве не перешли в аустенит. Твердость стали после правильной закалки должна составлять 60—64 HRC₃.

После закалки быстрорежущую сталь обязательно подвергают отпуску. Инструменты из такой стали отпускают при температурах 550—560 °С, причем отпуск производят многократно (несколько раз) с выдержкой по одному часу. Это объясняется тем, что в структуре закаленной быстрорежущей стали имеется 30—40% остаточного аустенита. Целью отпуска является превращение этого аустенита в мартенсит. Так как аустенит быстрорежущей стали очень устойчив, отпуск необходимо повторить несколько раз, с тем чтобы большая часть остаточного аустенита перешла в мартенсит.

При отпуске в быстрорежущей стали протекают два процесса. Первый происходит при ее нагреве и выдержке при температуре отпуска и заключается в выделении из остаточного аустенита карбидов в измельченном состоянии. Вследствие этого аустенит становится менее легированным, что облегчает его превращение в мартенсит. При втором процессе, протекающем при 200—100 °С (т. е. при охлаждении стали), аустенит превращается в мартенсит. В процессе отпуска снимаются внутренние напряжения, полученные сталью при закалке. После отпуска структура стали состоит из

мелкоиглочатого мартенсита и карбидов. Твердость составляет 62—65 HRC₃.

Превращение остаточного аустенита в мартенсит достигается также обработкой инструмента сразу после закалки холодом при температурах от —75 до —80 °С. После такой обработки осуществляют однократный отпуск при 550—560 °С. Для улучшения режущих свойств инструмент из быстрорежущей стали после окончательной термической и механической обработки иногда подвергают низкотемпературному цианированию.

7.14. Понятие о лазерной термической обработке

Лазерная технология повышает производительность труда, точность и качество обработки, представляет практически безотходную технологию, удовлетворяющую требованиям по защите окружающей среды.

Лазеры — оптические квантовые генераторы (ОКГ), позволяющие получать электромагнитные излучения чрезвычайно высокой концентрации энергии. Длина волн, генерируемых ОКГ, находится в световом диапазоне от ультрафиолетовой области спектра до инфракрасной ($\alpha = 0,1—70$ мкм).

Применение лазеров для термической обработки основано на трансформации световой энергии в тепловую. Высокая концентрация энергии в световом потоке ОКГ позволяет нагреть поверхность до температурного диапазона термообработки за очень короткое время.

Лазерную термическую обработку (ЛТО) производят при удельной мощности $10^3—5 \cdot 10^4$ Вт/см², при времени воздействия на поверхность 10^{-2} с. При увеличении плотности мощности до $10^6—10^7$ Вт/см² и времени воздействия $10^3—1^{-1}$ с осуществляют сварку, плавление, лазерную химико-термическую обработку (ЛХТО).

Процессы ЛТО определяются взаимодействием лазерного облучения с материалом, которое зависит от оптических и теплофизических свойств обрабатываемых материалов: коэффициента отражения поверхности, теплопроводности, температур плавления и испарения и др.

Снижение отражающей способности поверхности и, следовательно, повышение эффективности ЛТО обеспечиваются увеличением шероховатости поверхности, нанесением светопоглощающих покрытий. Увеличение поглощения излучения достигается шлифованием поверхности, нанесением неметаллических пленок [сульфидных (Fe₂S₃), оксидных, фосфатных Mg₃(PO₄)₂, Zn₃(PO₄)₂].

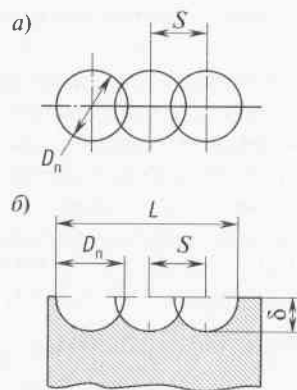


Рис. 7.15. Схема расположения зоны термического воздействия в плане (а) и в продольном сечении (б) при линейном упрочнении

K_n — коэффициент перекрытия, представляющий отношение шага расположения последовательных зон лазерного воздействия к диаметру единичной зоны при фокусировании с помощью сферической оптики: $K_n = S/D_n$ (рис. 7.15).

Геометрические характеристики зоны термического воздействия (ЗТВ) зависят от энергетических параметров лазерного излучения. При обработке импульсными лазерами с повышением плотности мощности увеличиваются диаметр и глубина зоны упрочнения.

Лазеры непрерывного излучения обеспечивают высокую производительность обработки, высокую равномерность упрочнения и позволяют обрабатывать любой профиль поверхности со скоростью от 100 до 10 000 мм/мин. При постоянной скорости обработки непрерывными лазерами глубина и ширина зоны термического воздействия (ЗТВ) зависят от плотности мощности излучения, с ростом которой глубина ЗТВ растет, а ширина — уменьшается. При постоянной плотности мощности с увеличением скорости перемещения деталей уменьшаются как ширина, так и глубина ЗТВ, что связано со снижением удельной энергии излучения в зоне лазерного воздействия.

Глубина упрочненного слоя при нагреве на CO_2 -лазере (5 кВт) колеблется от 0,3 до 1,0 мм, а на импульсном лазере — 0,1–0,15 мм.

Для лазерной обработки используют технологические лазеры импульсного и непрерывного действия. Особенностью лазерного упрочнения является его локальность. При импульсном излучении воздействие осуществляется в точке, при непрерывном — в полосе шириной до 3 мм. В связи с этим для обработки поверхности необходимо сканировать луч с взаимным перекрытием или без перекрытия зон упрочнения. Основными геометрическими характеристиками упрочнения являются:

- D_n — диаметр зоны лазерного воздействия с перекрытием;
- L — длина упрочненного участка;
- S — шаг обработки (шаг следования импульсов);
- δ — глубина упрочненного слоя;

Механизм ЛТО заключается в фазовом превращении материала после его скоростного нагрева до температур выше температур фазовой перекристаллизации (вплоть до температур плавления) с последующим быстрым охлаждением обработанной зоны путем отвода теплоты за счет теплопроводности материала изделия. Скорость охлаждения при температуре нагрева ниже температуры плавления составляет $(5-10) \cdot 10^3$ °C/с, при кристаллизации из жидкого слоя — 10^6 °C/с (что в 10^3 раз больше скорости обычной закалки).

В зависимости от температуры нагрева упрочненная зона может в общем случае состоять из трех или двух слоев. Первый слой с температурой нагрева выше температуры плавления имеет явно выраженную дендритную структуру. Оси дендритов при этом растут перпендикулярно к границе раздела в направлении отвода теплоты в тело детали. Между оплавленным слоем и следующей за ним зоной термического влияния существует четкая граница. Зона термического влияния обычно состоит из белого и переходного слоев. Белый слой представляет собой светлую нетравящуюся полосу. Предполагают, что этот слой имеет высокую концентрацию азота за счет высокотемпературного насыщения азотом воздуха. Вследствие высокой скорости охлаждения эта зона имеет закаленную структуру, строение которой зависит от концентрации углерода. В закаленном слое технически чистого железа происходит измельчение зерна феррита (от 50 до 10–15 мкм), а в отдельных зернах образуется пакетный мартенсит с развитой блочной структурой, имеющей невысокую твердость. В малоуглеродистой стали эта зона состоит из пакетного мартенсита, а в среднеуглеродистых сталях — из пакетного и пластинчатого мартенсита с небольшим количеством остаточного аустенита, в эвтектоидной стали эта зона представляет пластинчатый высокодисперсный мартенсит с 20% остаточного аустенита. С увеличением концентрации углерода в стали содержание остаточного аустенита возрастает, что вызывает снижение твердости этой зоны. Второй слой зоны термического влияния является переходным к исходной структуре. У доэвтектоидной стали он состоит из феррита и мартенсита.

Электронно-микроскопическим анализом установлено повышение плотности дислокации в зоне термического влияния. При плотности мощности $1,6 \cdot 10^4$ Вт/см² плотность дислокации достигает 10^9 см⁻², при плотности мощности $2,7 \cdot 10^4$ Вт/см² плотность дислокации возрастает до 10^{10} см/см⁻².

ЛТО позволяет повысить твердость и износостойкость упрочняемых материалов. Твердость зависит от концентрации углерода и легирующих элементов в стали (при постоянном режиме обработ-

ки). Методом ЛТО хорошо упрочняют средне- и высоколегированные углеродистые и инструментальные стали. Стали с низким содержанием углерода и высокопрочные низколегированные стали при лазерной термической обработке упрочняются плохо. ЛТО практически не влияет на предел прочности и предел текучести сталей.

7.15. Понятие о радиационном облучении стали

Радиационное облучение материалов связано с огромным радиационным полем вокруг Земли. Это и корпускулярная радиация — электроны и протоны, попавшие в магнитное поле Земли, космические лучи — частицы высоких энергий, приходящие из различных областей Вселенной, и солнечные космические лучи.

В настоящее время воздействие электронного и протонного излучений на металлы еще недостаточно исследовано. Радиационное воздействие сильнее сказывается на металлах с гранецентрированной кристаллической решеткой, чем на металлах с объемно-центрированной и гексагональной кристаллическими решетками.

Из всех частиц наибольшее влияние на свойства конструкционных материалов оказывают нейтроны, способные из-за отсутствия заряда проникать далеко в глубь кристаллической решетки металла и вызывать в ней следующие существенные изменения:

- образование «пар Френкеля» вследствие упругого столкновения частиц с ядрами атомов металла;
- нарушение электронной структуры (ионизационные эффекты) в результате столкновения частиц с орбитальными электронами;
- местное повышение температуры (термический пик), связанное с упругими колебаниями решетки на пути прохождения частиц;
- образование атомов новых элементов в процессе ядерного распада, а также при захвате ядром частиц;
- радиационная эрозия в результате отрыва атомов с поверхности под влиянием ударов высокоскоростных пылевидных частиц окружающей среды.

Соударения частиц с атомами в узлах кристаллической решетки смещают и возбуждают другие атомы. Вследствие упругого соударения частицы с атомами она теряет часть своей кинетической энергии, зависящую от целого ряда факторов этого взаимодействия. Если при этом соударении атом приобретает дополнительную энергию и она становится больше энергии, необходимой для его смещения, то атом из узла кристаллической решетки перемещается в междоуз-

лие. За счет такого перемещения атома из узла решетки в междоузлие и наличия вакансии образуется «пара Френкеля».

Возникающие дефекты строения приводят к изменению структурно-чувствительных свойств сплавов: снижаются пластичность, вязкость; повышается удельное электросопротивление и прочность, а главным образом — сопротивление малой пластической деформации ($\sigma_{0,2}$).

Наиболее опасное явление, наблюдаемое при радиационном облучении, — охрупчивание материалов. Это явление наиболее сильно проявляется у металлов с объемно-центрированной решеткой; так, критическая температура хрупкости молибдена после нейтронного облучения повышается от -30 до $+70$ °С.

Вследствие радиационного облучения у металлов и сплавов повышается вязкость, пластичность, сопротивление отрыву, а прочность и электросопротивление повышаются, т. е. растет вероятность хрупких разрушений.

7.16. Дефекты термической обработки и меры их предупреждения

Несоблюдение технологического режима при термической обработке стали может привести к браку. Брак бывает исправимым и неисправимым.

Недогрев — дефект, образующийся при нагреве стали до температуры ниже критической, что приводит к снижению ее прочности, твердости и пластических свойств. Этот дефект устраняется отжигом или нормализацией с последующей повторной термической обработкой.

Перегрев — дефект, являющийся следствием нагрева стали до температуры намного выше критической или чрезмерно большой выдержки при заданной температуре. Из-за перегрева получается крупноиглочатый мартенсит (структура в изломе крупнозернистая), механические свойства которого ниже мелкоиглочатого. Перегретую сталь отжигают и вновь подвергают закалке.

Пережог — этот дефект возникает, если сталь нагревают до температуры, близкой к началу плавления. Пережженное изделие — очень хрупкое, так как оно имеет оплавленные кромки и по границам зерен окислено. Пережог — неисправимый брак.

Окисление и обезуглероживание — дефекты, являющиеся результатом химических реакций, происходящих при нагреве стали

между поверхностным слоем металла и кислородом окружающей среды. Эти процессы оказывают отрицательное влияние на конструктивную прочность изделий, приводят к потерям металла на угар, обуславливают необходимость увеличения припусков для последующей механической обработки. В результате увеличивается себестоимость изделий. Особенно опасно обезуглероживание для инструмента, штампов, пружин.

Разработано несколько способов предохранения стальных изделий от окисления и обезуглероживания при высоких температурах:

- на под печи возле загрузочного окна бросают древесный уголь, который, соединяясь с кислородом воздуха, находящегося в печи, образует окись углерода, тем самым количество кислорода в печи уменьшается; этот простой способ можно применять лишь при быстром нагреве;
- мелкие изделия нагревают в ящиках, наполненных чугушной стружкой;
- длинные тонкие изделия при нагреве закладывают в трубы, отверстия которых замазывают глиной; предварительно нагретые стальные изделия погружают в горячий насыщенный раствор буры; при дальнейшем нагреве бура оплавляется; на поверхности изделий образуется тонкий плотный слой буры, предохраняющий их от взаимодействия с кислородом; этот способ используют только при нагреве до высоких температур (более 1000 °C), так как при более низких температурах бура не плавится;
- производят нагрев в расплавленных солях; соль подбирают такую, чтобы температура ее полного расплавления была ниже заданной температуры обработки;
- осуществляют нагрев в печах с контролируемой атмосферой — это наиболее прогрессивный способ защиты металлов от окисления и обезуглероживания;
- в печи создается газовая среда (контролируемая атмосфера) определенного состава, которая позволяет при нагреве регулировать взаимодействие ее со сталью в нужном направлении; в качестве контролируемых атмосфер используют продукты неполного сжигания аммиака, а также смесь газов, получаемых в результате частичного сжигания природного, светильного и других углеводородных газов.

Коробление и образование трещин — наиболее распространенные дефекты, являющиеся следствием возникновения в деталях больших внутренних напряжений, связанных с изменением их объема при закалке. Объемные изменения и сопровождающие их внут-

ренние напряжения обусловлены двумя причинами. Первая причина — быстрое и резкое охлаждение изделий при закалке, в результате чего объем их различных слоев изменяется неравномерно. Чем больше поперечное сечение изделия, тем неравномернее происходит изменение объема в различных его слоях и, следовательно, тем выше внутренние напряжения. Другая причина появления закалочных трещин и коробления — изменение объема изделий при превращении аустенита в мартенсит. Как уже говорилось ранее, аустенит имеет наименьший объем из всех структурных составляющих стали, а мартенсит — наибольший. При переходе аустенита в мартенсит объем стали увеличивается. Так как при закалке аустенит переходит в мартенсит не одновременно по всему сечению изделия, в нем возникают внутренние напряжения. В тех местах изделия, где внутренние напряжения выше предела прочности стали, появляются трещины. Если внутренние напряжения значительны, но не достигают предела прочности стали, происходит коробление изделия, т. е. искажение его формы.

Возникновению опасных внутренних напряжений способствуют неблагоприятная форма изделия, резкие переходы по толщине, острые подрезы, канавки и др. Закалочные трещины могут образоваться из-за неудовлетворительной подготовки стали к закалке. Следует иметь в виду, что иногда закалочные трещины появляются значительное время спустя после закалки детали. Поэтому отпуск рекомендуется производить сразу после закалки.

Существует много способов, с помощью которых можно ослабить внутренние напряжения при закалке и свести к минимуму образование закалочных трещин и коробление деталей. Один из них — подготовка изделия к закалке путем отжига, нормализации или высокого отпуска. Это позволяет освободить изделие от вредных внутренних напряжений, образовавшихся при всех предыдущих видах обработки. Если эти напряжения своевременно не снять, они усилятся напряжениями, возникающими при закалке, и приведут к короблению изделий или к трещинам. Весьма эффективный способ уменьшения внутренних напряжений — медленное охлаждение изделий при температурах превращения аустенита в мартенсит (для углеродистой стали — это 300 °C и ниже). Как известно, непосредственный переход аустенита в мартенсит не требует больших скоростей охлаждения. Если превращение аустенита в мартенсит происходит при медленном охлаждении, то изменение объема изделия по сечению протекает более равномерно. Таким образом достигается уменьшение внутренних напряжений.

Недостаточная твердость — такой дефект получается в результате недогрева или недостаточно быстрого охлаждения изделия при закалке. Причину этого дефекта можно легко установить по микроструктуре стали. Так, если структура закаленной конструкционной стали содержит кроме мартенсита феррит, то недостаточная твердость является следствием недогрева. Если же в стали после закалки наряду с мартенситом имеется троостит, значит, охлаждение было недостаточно быстрым. Этот дефект исправляется повторной, правильной закалкой.

До повторной закалки отжигом, нормализацией или высоким отпускком снимаются внутренние напряжения. Неравномерное охлаждение поверхности изделия во время закалки, наличие окалины и загрязнений, соприкосновение изделий друг с другом в процессе охлаждения приводят к пятнистой закалке — неравномерной твердости по всей поверхности изделия. Поэтому в процессе нагрева изделия необходимо защищать от образования окалины, перед закалкой их следует очищать. Способ охлаждения должен быть оптимальным.

Контрольные вопросы

1. Из каких переходов состоит термическая обработка?
2. Какими видами оборудования укомплектованы термические цеха?
3. Для чего и какие газы применяются в качестве контролируемой атмосферы?
4. Каким образом производится контроль нагреваемых изделий под термическую обработку?
5. Что такое критические температуры?
6. Какие превращения происходят со сталями, содержащими до 2% углерода на линиях A_{c1} , A_{c3} и A_{cm} ?
7. Объясните превращения, происходящие со сталями ($C < 2\%$) на линиях A_{r1} , A_{c3} и A_{cm} (при охлаждении).
8. Какие превращения происходят в белых чугунах при охлаждении на линиях AC , CD , ECF , PSK (см. рис. 7.3)?
9. Из каких структурных составляющих состоит доэвтектический, эвтектический и заэвтектический чугун при комнатной температуре?
10. Что такое сорбит, троостит, мартенсит и бейнит?
11. Для чего нужна С-образная диаграмма?
12. Какой процесс термической обработки называется отжигом?
13. Для чего нужен зернистый цементит, маятниковый и неполный отжиг?

14. Чем отжиг отличается от нормализации?
15. Какой интервал критических температур у неполного, рекристаллизационного и низкотемпературного отжига?
16. Укажите на диаграмме $Fe - Fe_3C$ (см. рис. 7.3) в области стали зону нормализации и интервал закалочных температур для стали.
17. Почему интервал закалочных температур у доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей различный?
18. Что такое критическая скорость закалки, влияние на нее охлаждающих сред?
19. Дайте определения закаливаемости, прокаливаемости и ступенчатой закалки.
20. Расскажите о способах закалки для получения чистой поверхности изделия.
21. Назовите виды отпуска, их микроструктуру и температурный режим.
22. Охарактеризуйте процесс старения стали.
23. Для чего сталь обрабатывают холодом?
24. Что такое ТМО, НТМО и ВТМО, расскажите об их значении и температурных режимах.
25. В чем особенность закалки быстрорежущей стали?
26. Перечислите способы термообработки быстрорежущей стали.
27. Какое практическое значение имеют ОКГ, ЛТО, ЛХТО?
28. В чем суть лазерной термообработки?
29. Для чего применяют радиационное облучение стали?
30. Какие дефекты термообработки могут встречаться в практике и как их предупредить?

Конструкционные легированные стали

8.1. Цементуемые стали

В механизмах передачи и распределения энергии зубчатые колеса, кулачки и другие детали подвергаются многократному циклическому воздействию переменных нагрузок. Рабочие участки деталей, находящиеся в контакте с другими деталями, воспринимают и передают значительные силы и поэтому должны иметь высокую прочность при контактном нагружении и стойкость по отношению к контактной усталости. Кроме того, эти участки должны быть износостойкими. Сердцевина деталей, кроме высоких прочности и вязкости, для того чтобы противостоять динамическим нагрузкам, должна иметь высокое сопротивление усталости. Надежная работа таких деталей обеспечивается рациональным выбором сталей и режимов обработки деталей. Для упрочнения поверхности стальных деталей используют химико-термическую обработку (цементацию, нитроцементацию, азотирование), а также поверхностную закалку. Цементация и нитроцементация обеспечивают максимальную несущую способность деталей.

Оптимальное сочетание прочности и износостойкости упрочненных слоев, а также прочности и вязкости сердцевины имеют цементуемые стали с содержанием углерода 0,10–0,25% (табл. 8.1). После насыщения поверхности углеродом или одновременно углеродом и азотом детали подвергают закалке и низкому отпуску. Упрочненный слой должен иметь толщину не менее 0,5–0,6 мм. Толщиной слоя принято считать сумму толщин заэвтектоидной, эвтектоидной и переходной зон. Несущая способность детали определяется эффективной толщиной слоя, в которой $C > 0,4\%$. На внутренней границе этой зоны твердость равна 50 HRC, а на поверхности детали твердость должна быть равна 56–63 HRC. Для того чтобы в упрочненном слое распределение углерода по толщине было равномерным, используют диффузионное выравнивание. В заэвтектоидной зоне слоя на глубине 0,1–0,25 мм от поверхности располагаются карбиды в виде мелких округлых частиц. Эти карбиды увеличивают сопротивление деталей изнашиванию. Остаточный

аустенит ускоряет приработку зубчатых пар. В этом отношении особенно эффективен азотистый аустенит, получаемый при нитроцементации. Допустимое количество остаточного аустенита определяется условиями эксплуатации деталей: при 10–15% он не сказывается существенно на долговечности зубчатых колес, при количестве около 40% — снижает контактную выносливость тяжело нагруженных зубчатых колес.

Отдельную группу образуют теплопрочные комплексно-легированные стали. Они сохраняют высокую твердость и прочность при температуре выше 200 °С благодаря повышенному содержанию хрома и легированию молибденом, вольфрамом и ванадием.

Таблица 8.1. Марки и твердость легированных сталей в состоянии поставки

Марка стали	Твердость отожженной или высокоотпущенной стали HB, не более	Марка стали	Твердость отожженной или высокоотпущенной стали HB, не более
15X	179	12XH3A	217
20X	179	20XH3A	255
18XГТ	217	12X2H4A	269
20XCГР	197	20X2H4A	269
25XГТ	217	15XГН2ТГ	255
25XГМ	207	20XГНР	269
20XM	179	20XГНТР	197
15XФ	187	20XH2M	229
20XH	197	20XH4ФА	269
20XНР	207	18X2H4M	269

Марки теплопрочных цементуемых сталей: 14XГСН2МА, 12X2НВФМА, 20X3МВФА, 16X3НВФМБ, 13X3НВМ2Ф.

Чем сложнее термическая обработка цементованных деталей, тем больше их деформация и трудоемкость шлифования для получения точных размеров. Для автомобильных зубчатых передач благодаря нитроцементации с непосредственной закалкой в масле можно или обойтись без шлифования, или существенно уменьшить припуски на шлифование. Деформация нитроцементованных колес

меньше, чем цементованных, благодаря более низкой температуре процесса, меньшей толщине упрочненного слоя и меньшему содержанию в нем углерода (обычно $C = 0,7\%$ и $N = 0,15-0,30\%$).

Механические свойства цементуемых сталей после закалки и низкого отпуска — высокая прочность в сочетании с высоким сопротивлением удару, поэтому они могут использоваться как конструкционные материалы без химико-термической обработки. Теплопрочные стали используют для тяжело нагруженных шестерен летательных аппаратов. Несмотря на минимальные потери энергии в зубчатых передачах, благодаря повышению точности изготовления зубчатых колес температура на рабочих поверхностях достигает $200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$ при работе в масляных ваннах. Зубчатые колеса из этих сталей содержат повышенное количество карбидов в рабочем слое, так как при цементации содержание углерода доводят до $1,2-1,6\%$. Карбиды в слое обеспечивают повышение износостойкости и предела контактной выносливости. Термическое упрочнение предусматривает высокий отпуск перед закалкой детали. Образовавшиеся во время отпуска карбиды не растворяются полностью при нагревании под закалку. Для предварительных расчетов зубчатых колес на долговечность регламентированы пределы контактной выносливости и пределы выносливости зубьев при изгибе (ГОСТ 21354—87) с учетом условий обработки колес.

8.2. Улучшаемые стали

Улучшаемые стали представляют собой группу легированных сталей с содержанием углерода $0,35-0,50\%$. Оптимальные свойства эти стали приобретают после закалки и высокого отпуска при $500-650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Они характеризуются сочетанием повышенной прочности и достаточно высоких пластичности и вязкости.

К улучшаемым сталям относятся следующие марки:

- хромистые — 30X, 35X, 38XA, 40X, 45X, 50X;
- марганцовистые — 30Г2, 35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2;
- хромомарганцевые — 27ХГ7, 40ХГТР;
- хромокремнистые — 33ХС, 38ХС, 40ХС;
- хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые — 30ХМ, 35ХМ, 38ХМ, 30ХЗМФ, 40ХМФА;
- хромованадиевая — 40ХФА;
- хромоникелевые — 40ХН, 45ХН, 50ХН;
- хромокремнемарганцевые, хромомарганцевоникелевые и хромокремнемарганцевоникелевые — 30ХГС, 30ХГСА, 30ХГСН2А;
- хромоникельмолибденовые — 38Х2Н2МА, 40ХН2МА, 38ХНЗМА;

- хромоникельмолибденованадиевые — 38ХНЗМФА, 45ХН2МФА;
- хромомолибденоалюминиевая — 38Х2МЮА.

По сравнению с нормализацией термическое улучшение обеспечивает более высокие значения $\sigma_{0,2}$ и снижение температурного порога хрупкости T_{50} . Особое значение имеет структура сорбита отпуска для повышения долговечности деталей при переменных нагрузках. При твердости, меньшей 350 НВ, сорбит отпуска характеризуется высоким сопротивлением распространению трещин.

Улучшаемые стали используют для изготовления зубчатых колес, хотя предел выносливости зубьев при изгибе у них меньше, чем у цементованных или нитроцементованных зубьев (табл. 8.2).

Азотируемые стали являются разновидностью улучшаемых сталей. Они используются для изготовления коленчатых валов, шпинделей точных станков, гильз цилиндров, плунжеров топливных насосов, червяков и других деталей, которые должны иметь высокие сопротивление изнашиванию и предел выносливости. Необходимые свойства достигаются при азотировании легированных сталей, содержащих хром, алюминий и молибден, а также титан и ванадий.

Таблица 8.2. Критический диаметр $d_{кр}$ (мм) при закалке улучшаемых сталей

Марка стали	В воде	В масле	Марка стали	В воде	В масле
30	15	8	30ХГСА	—	40
40	15—20	10—15	38ХГН	—	—
45	15—22	8—15	30ХГТ	—	40—45
50	15—20	8—12	30ХМА	50—60	30—40
55	15—20	8—12	40ХФА	—	35—38
60	20—30	12—20	40ХН	—	50—60
35X	—	25	40ХН2МА	100—120	70—80
40X	40—50	25—30	40Х2Н2МА	200	150
—	—	—	38Х2МЮА	100	60

Часто применяют азотируемую сталь 38Х2МЮА. При газовом азотировании в среде аммиака после выдержки в течение 50 ч при 500—525 °С получается диффузионный слой толщиной около 0,5 мм. Твердость его достигает 1200 НВ, в нем создаются напряжения сжатия, нейтрализующие влияние концентраторов напряжений. Недостатком печного азотирования является его большая продолжительность.

При ионном азотировании насыщение деталей азотом осуществляется в поле тлеющего разряда при напряжении около 1000 В и температуре 400—550 °С. Время обработки деталей в десятки раз меньше, чем при газовом азотировании.

Ионное азотирование применяют для деталей, изготовленных из хромистых, хромомолибденовых и других легированных сталей, содержащих достаточное количество элементов, которые обеспечивают повышение прочности и твердости диффузионного слоя при азотировании.

Наиболее важными характеристиками улучшаемых сталей являются прокаливаемость и сопротивление усталости. Глубина прокаливаемого слоя у легированной стали 40Х составляет 40 мм, а у сложнолегированных сталей 40ХНМ и 38ХНЗМА — 100 мм. Этого достаточно для термического улучшения деталей широкой номенклатуры, а для ряда осесимметричных деталей не требуется сквозная прокаливаемость.

8.3. Пружинные стали

К механическим свойствам пружинных сталей предъявляют те же требования, что и к механическим свойствам конструкционных сталей — высокие прочность и сопротивление разрушению. Кроме того, они должны обладать сопротивлением малым остаточным деформациям в условиях кратковременного и длительного нагружения, которое характеризуется в первом случае пределом упругости, а во втором — релаксационной¹ стойкостью. Эти последние свойства зависят от состава и структуры стали, а также от воздействия внешней среды — температуры, коррозионной активности и др. При выборе состава пружинных сталей и режимов их упрочняющей обработки (деформационной, термической и термомеханической) основное внимание уделяют получению максимального сопротивления малым пластическим деформациям (предел упругости).

¹ Релаксация — самопроизвольное затухающее падение напряжений при заданной постоянной деформации.

Пружинные стали классифицируют по основным способам упрочнения и назначению. В зависимости от основных способов упрочнения различают две группы сталей (могут использоваться и другие способы).

1. *Стали, упрочняемые холодным пластическим деформированием* с последующей термической обработкой, заключающейся обычно в отпуске или старении. После холодного пластического деформирования стали подвергают низкотемпературному отпуску при 150—350 °С, что повышает пределы упругости и выносливости, а также сопротивления релаксации. Характерной особенностью этих сталей является различие значений показателей свойств вдоль или поперек направления деформирования (анизотропия свойств).

2. *Стали, упрочняемые закалкой*. К этой группе относятся в первую очередь углеродистые и легированные стали перлитного класса с $C = 0,4—1,0\%$, после закалки которых обычно проводят среднетемпературный отпуск (300—450 °С), который обеспечивает максимальный уровень предела упругости при повышенных пределах выносливости и сопротивлении разрушению. По назначению пружинные стали разделяют на два класса — стали общего и специального (или функционального) назначения.

Пружинные стали общего назначения в первую очередь должны обладать теми же свойствами, что и общие машиностроительные конструкционные стали, т. е. высокими показателями прочности (временное сопротивление, предел текучести, предел выносливости), высокими значениями сопротивления разрушению, а также, что особенно важно для их применения, высокими значениями предела упругости и релаксационной стойкости.

Прокат стальной горячекатаный для рессор, сортамент регламентирует ГОСТ 7419—90.

Для изготовления пружин применяют стали:

- нелегированные — У7Д, У8А, У9А, У10А, У11А и У12А, 65, 70, 75, 80 (ГОСТ 1435—90);
- легированные — 60Г, 65Г, 70Г, 50С2, 55С2А, 60С2, 60С2А, 70С3А, 60С2Г, 50ХГ, 50ХГА, 55ХГР, 50ХФА, 50ХГФА, 55С2ГФ, 60С2ХА, 60С2ХФА, 65С2ВА, 60С2Н2АЮ, 70С2ХА, 45ХН2МФА (ГОСТ 14959—79).

В результате термообработки значительно улучшаются механические свойства сталей.

Наибольшие значения предела упругости достигаются после закалки и отпуска при 350 °С, особенно у сталей с повышенным содержанием углерода (0,6—0,65%) и дополнительно легированных кремнием и содержащих, кроме того, карбидообразующие элемен-

ты — вольфрам или хром (60С2ХА, 65С2ВА). Высокими свойствами также характеризуются хромованадиевые стали — 50ХФА и 50ХГФА.

Свойства пружинных сталей могут быть существенно улучшены изотермической закалкой и отпуском.

Коррозионно-стойкие пружины изготавливают из *коррозионно-стойких сталей* следующих классов:

- мартенситного — 20Х13, 30Х13, 40Х13, 20Х17Н2;
- аустенитного — 12Х18Н9, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 17Х18Н9, 37Х12Н8Г8МФБ, 12Х8Н9СМФ (ЭП414);
- аустенитно-мартенситного — 09Х15Н8Ю, 08Х17Н5М3, 09Х15Н7Ю1, 06Х16Н7М2Ю (ЭИ65), Х17Н4МД (ЭП587), 17ХНГТ (ЭИ814), 0Х13Н7ГТ.

Наиболее широко применяют мартенситные стали с $Cr = 12\text{—}18\%$, упрочняемые закалкой и отпуском. Пружины из сталей 30Х13 и 40Х13 подвергают закалке начиная с $1000\text{—}1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ с охлаждением в масле, отпуску при $300\text{—}350\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в случае эксплуатации пружин при нагреве температура отпуска составляет $500\text{—}550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При изготовлении пружин обычно прибегают к холодному пластическому деформированию сталей после закалки, что дополнительно повышает характеристики прочности.

8.4. Конструкционные стали высокой обрабатываемости резанием (автоматные)

Применение конструкционных сталей высокой обрабатываемости резанием в машиностроении экономически целесообразно благодаря повышению стойкости металлорежущего инструмента, хорошему стружкообразованию, сокращению затрат энергии на обработку — уменьшению шероховатости поверхности и повышению точности размеров.

Высокая обрабатываемость резанием достигается специально вводимыми присадками серы, свинца, кальция. По химическому составу автоматные стали разделяют на *углеродистые сернистые, углеродистые и легированные свинецсодержащие, углеродистые и легированные кальцийсодержащие, легированные кальцийсвинцовсодержащие*.

В зависимости от вида обработки автоматные стали подразделяют на горячекатаные, калиброванные, прокат круглого сечения со

специальной отделкой поверхности или с обточенной поверхностью. В зависимости от назначения производят горячекатаные стали для последующей горячей обработки давлением, а также для обработки резанием и волочения (подкат). Эти стали производятся без термической обработки, термически обработанными (Т) и нагартованными (Н).

При обработке резанием стойкость инструмента повышается благодаря уменьшению трения между инструментом и обрабатываемой сталью и образованию сыпучей, легко отделяющейся стружки. Решающую роль для повышения стойкости играют включения сульфидов, свинца (он не растворяется в железе) и сложных оксидов, в которые входит СаО. Под влиянием теплоты, выделяющейся в зоне резания, включения размягчаются и выполняют роль смазочного материала. Чрезмерный разогрев при высоких скоростях резания сопровождается быстрым испарением свинца и снижением стойкости инструментов. Рекомендуются свинецсодержащие автоматные стали не обрабатывать со скоростью резания выше 100 м/мин . Кальцийсодержащие стали наиболее легко обрабатываются твердосплавными инструментами со скоростью резания $150\text{—}300\text{ м/мин}$, так как для размягчения сложных оксидов с СаО необходим нагрев при высокой температуре. Путем увеличения количества включений достигают образования сыпучей стружки. С этой же целью в некоторых марках автоматных сталей предусматривают повышенное содержание фосфора для уменьшения пластичности феррита.

8.5. Технологические особенности конструкционных сталей

Важнейшими технологическими свойствами сталей являются обрабатываемость резанием, свариваемость, литейные свойства, штампуемость, закаливаемость и прокаливаемость.

Обрабатываемость стали резанием влияет не только на стоимость обработки, но и в значительной степени на деформирование деталей при окончательной термической обработке. Деформации возрастают при увеличении наклепа, полученного при резании. Минимальный наклеп обеспечивается, когда сталь имеет мелкозернистую структуру с твердостью $160\text{—}220\text{ НВ}$. Для большинства конструкционных сталей наилучшая обрабатываемость достигается в том случае, когда соотношение содержания зернистого и пластинчатого перлита составляет $1 : 1$.

Обрабатываемость резанием оценивают по скорости резания v_{60} , соответствующей 60-минутной стойкости резцов, и выражают коэффициентами K_v и K'_v , где K_v — отношение скоростей резания твердосплавным инструментом при обработке стали данной марки и Стали 45, принятой за эталон; K'_v — отношение скоростей резания инструментов из быстрорежущей стали при обработке стали данной марки и Стали 45.

Обрабатываемость сталей резанием определяется химическим составом и видом предварительной термической обработки. При предварительной термической обработке должны быть полностью сняты внутренние напряжения, полученные при ковке и штамповке.

Для образования качественного сварного соединения следует предупредить возникновение в сварном шве различных дефектов: пор, непроваров и главным образом трещин. *Свариваемость* стали тем лучше, чем меньше в ней углерода и легирующих элементов. Влияние углерода является определяющим. Углерод расширяет интервал кристаллизации и увеличивает склонность к образованию горячих трещин, которая проявляется тем в большей степени, чем дольше металл шва находится в жидком состоянии.

Штампуемость в холодном состоянии (листы толщиной до 14 мм) зависит от запаса технологической пластичности, обусловленной химическим составом стали и ее структурным состоянием. В сталях для глубокой вытяжки содержание углерода ограничивают 0,1%; при $C = 0,2-0,3\%$ возможны только гибка и незначительная вытяжка. При $C = 0,35-0,45\%$ допускается изгиб с определенными радиусами. Контроль параметров механических свойств характеризует штампуемость при относительном удлинении σ_T/σ_B . Чем меньше это отношение, тем лучше штампуемость. Рекомендуется $\sigma_T/\sigma_B = 0,55-0,66$.

Способность конструкционных сталей к холодной высадке и выдавливанию оценивается и контролируется в соответствии с ГОСТом 10702—78 осадкой прутков диаметром до 30 мм.

Размер зерна также является значительным фактором, влияющим на холодное деформирование. *Номер зерна* должен быть не более пяти.

Наибольшее влияние на сопротивление пластическому деформированию оказывают углерод, а затем (в порядке уменьшения влияния) кремний, никель, марганец, хром. По степени влияния на деформационное упрочнение элементы располагаются в такой последовательности: углерод, кремний, хром, никель, марганец. Это соответствует рекомендациям ГОСТа 10702—78.

8.6. Литейные стали

Стальные отливки требуемой конфигурации получают заливкой жидкой стали в песчаные или реже в чугунные формы, а иногда в стальные формы-изложницы (центробежное литье) и др. При этом удается получать изделия по прочности, пластичности и надежности, как из деформированных сталей. Расходы на механическую обработку и потери металла минимальны, поэтому изготовление стальных отливок является экономичным и прогрессивным способом. Однако применение литейных сталей ограничено из-за химической неоднородности отливок и наличия дефектов — микропор, раковин, трещин и др.

Химическая неоднородность проявляется в виде дендритной или зональной ликвации. Литейная сталь имеет более крупное первичное зерно, чем деформированная, и его измельчение сложно. Разнозернистость литой структуры также более выражена.

Термическая обработка отливок по обычным режимам не устраняет в полной мере структурные особенности литейной стали. Для снижения химической неоднородности целесообразно проведение высокотемпературной гомогенизации с последующей нормализацией для подготовки стали к окончательной термической обработке.

В процессе термической обработки размер зерна первичной кристаллизации может изменяться, но полного разрушения пограничных зон практически не происходит. Уменьшить размер зерна литейной стали можно также легированием.

Области применения конструкционных легированных сталей разнообразны. Из сталей марок 20ГЛ и 35ГЛ изготавливают диски, звездочки, зубчатые венцы, барабаны и другие детали, к прочности и вязкости которых предъявляют высокие требования, и работающие под действием статических и динамических нагрузок; сталь 35ГЛ может применяться для тяжело нагруженных деталей экскаваторов, крышек, подшипников, цапф.

Из 20ГСЛ, 20ГСФЛ — корпусные детали гидротурбин, лопасти гидротурбин с облицовкой листами из коррозионно-стойкой стали, детали повышенной прочности и детали, работающие при температуре до 450 °С.

30ГСЛ — зубчатые колеса, ролики обоймы, зубчатые венцы, фланцы, шкивы, сектора, колонны, ходовые колеса и др.

20Г1ФЛ, 20ФЛ — детали вагонов, металлургического и горнодобывающего оборудования.

30ХГСФЛ — литые детали экскаваторов.

45ФЛ, 40ХЛ — износостойкие литые детали.

32Х06Л — кронштейны, балансиры, катки, другие ответственные детали со стенкой толщиной до 50 мм и общей массой до 80 кг.

20ХМФЛ — детали арматуры, корпусные детали, цилиндры, работающие при температуре до 540 °С.

20ГНМФЛ — сварные конструкции больших сечений, бандаж цементных печей.

35ХМЛ, 20ХМЛ — шестерни, крестовины, втулки, зубчатые колеса, печные и другие ответственные детали, от которых требуются высокие прочность и вязкость и которые работают под действием статических и динамических нагрузок; сталь 20ХМЛ может работать при температуре 500 °С.

35ХГСЛ — зубчатые колеса, звездочки, оси, муфты и другие ответственные детали, от которых требуется повышенная износостойкость.

30ХНМЛ может работать при температуре до 400 °С.

08ГДНФЛ, 13ХНДФТЛ, 12ДН2ФЛ — детали для судостроения и сварные конструкции, ответственные нагруженные детали, от которых требуются достаточные прочность и вязкость и которые работают под действием статических и динамических нагрузок при температуре соответственно маркам до 350, 500 и 400 °С.

12ХГЗСЛ, 25Х2ГНМФЛ — ответственные высоконагруженные детали со стенкой толщиной соответственно маркам до 100 и 50 мм, работающие под действием статических и динамических нагрузок.

27Х5ГСМЛ — высоконагруженные детали ответственного назначения со стенкой толщиной до 50 мм, работающие в условиях ударных нагрузок и ударно-абразивного изнашивания.

30ХЗСЗГМЛ, 03Н12Х5МЗТЛ, 03Н12Х5МЗТЮЛ — высоконагруженные детали ответственного назначения со стенкой толщиной соответственно маркам до 300, 200 и 200 мм, от которых требуются высокая прочность и достаточная вязкость.

8.7. Хладостойкие стали

В России требования к хладостойким литейным сталям регламентированы ГОСТом 21357—87. В табл. 8.3 указаны их области применения. Содержание серы и фосфора не должно превышать по 0,02%. При обеспечении заданных механических характеристик допускается содержание в этих сталях серы и фосфора до 0,03% каждого.

Таблица 8.3. Области применения литейных хладостойких сталей

Марка стали	Область применения
08Г2ДНФЛ	Крупногабаритные корпусные отливки, верхние части рам картеров, постели подшипников, литые детали экскаваторов большой грузоподъемности и другие свариваемые детали повышенной прочности
12ХГФЛ	Ответственные литые детали тракторов, сварнолитые несущие конструкции
20ГЛ, 20ФТЛ	Ответственные литые детали автосцепного устройства и тележек грузовых вагонов
14Х2ГМРЛ, 20ХГСФЛ, 25Х2НМЛ	Ответственные сварнолитые конструкции больших сечений карьерных и шагающих экскаваторов
35ХМФЛ, 35ХМЛ	Ответственные литые детали горнометаллургического оборудования
27ХН2МФЛ	Цельнолитые зубья и элементы их крепления (скобы, клинья) одноковшовых экскаваторов
30ГЛ, 30ХЛ	Корпуса поглощающих аппаратов грузовых вагонов
30ХГ2СТЛ	Башмаки гусеничных машин, угловые ножи бульдозеров, кремальерные шестерни экскаваторов, опорные ролики дражных цепей, рабочие органы шахтных машин, рычаги, зубчатые колеса
110Г13Л, 110Г13ХБРЛ	Зубья ковшей экскаваторов, гусеничные звенья, рабочие органы дробильного оборудования

ГОСТ 21357—87 предусматривает проведение испытаний на ударную вязкость для определения КСЧ при температуре –60 °С, что позволяет оценивать качество отливок и их надежность при отрицательных температурах во время эксплуатации.

8.8. Стальная проволока, свойства и применение

В России в машиностроении применяют значительную часть (около 50%) выпускаемой проволоки. Из нее изготовляют детали: пружины, винты, болты, заклепки, тяги, комплектующие изделия или их составные части (канаты, подшипники, шины, конвейерные ленты,

армированные специальными канатами). Проволокой армируют клиновые и плоскозубчатые ремни. В связи с этим сортамент изделий из проволоки широк, а свойства проволоки значительно различаются. Наиболее распространенным видом проволоки является проволока общего назначения по ГОСТу 3282—74, изготовленная из низкоуглеродистой стали. Она выпускается в отожженном и наклепанном состояниях, может быть оцинкованной горячим способом после отжига или волочения. Сортамент проволоки предусматривает ее диаметр — 0,16—10 мм. По точности изготовления различают проволоку нормальной и повышенной точности.

Чем меньше диаметр проволоки, тем меньше допустимое отклонение диаметра. При повышенной точности изготовления проволоки допустимые отклонения составляют 0,02—0,10 мм для диаметров 0,16—10 мм, а при нормальной точности соответственно — 0,02—0,20 мм.

Низкоуглеродистую проволоку повышенного качества диаметром 0,5—6,0 мм выпускают по ГОСТу 792—67. Проволоку поставляют в отожженном, отожженном и оцинкованном состояниях.

Низкоуглеродистую проволоку, в том числе оцинкованную, выпускают по ГОСТу 7480—73, диаметром 0,36—1,2 мм. Проволоку применяют для сшивки полиграфической продукции. Низкоуглеродистую отожженную проволоку высокой точности изготавливают по ГОСТу 5437—85.

Пружинную проволоку подразделяют на несколько видов. Стальную углеродистую пружинную проволоку наиболее массового применения выпускают по ГОСТу 9389—75. Точность изготовления пружинной проволоки выше, чем проволоки общего назначения. Для проволоки повышенной точности изготовления допустимые отклонения диаметра должны быть +0,005—0,003 мм для диаметров 0,14—0,40 мм и $\pm 0,040$ мм для диаметров 7,5—8 мм. Более высокие требования к точности и механическим свойствам предъявляет ГОСТ 16135—70 на стальную проволоку для средств вычислительной техники. Стальную проволоку для изготовления музыкальных инструментов (ГОСТ 15598—70) также применяют для производства пружин наиболее ответственного назначения. Пружины ответственного назначения, работающие при повышенных температурах, изготавливают из проволоки специальных марок по ГОСТу 1071—81. Эта проволока после волочения термообрабатывается, подвергается закалке и отпуску, что позволяет обеспечить высокие упругие свойства и хорошую релаксационную стойкость.

Технология производства закаленно-отпущенной проволоки по ГОСТу 1071—81 предусматривает применение высококачественных

сталей 65ГА, 70ХГФА, 51ХФА и др., а также тщательную зачистку заготовки.

Проволоку для холодной высадки по ГОСТу 5663-79 применяют для изготовления наиболее сложных изделий, подвергаемых значительному деформированию. Проволоку из низкоуглеродистых, легированных и высоколегированных сталей применяют для сварки и изготовления электродов и выпускают по ГОСТу 2246—70 диаметром 0,3—8,0 мм. Основные требования к проволоке, применяемой для наплавки деталей, определены ГОСТу 10543—82.

Широкий сортамент канатной проволоки в зависимости от диаметра (0,20—5,5 мм), прочности, качества цинкового покрытия, пластичности, оцениваемой числом перегибов и скручиваний до разрушения, приведен в ГОСТе 7372—79. Несмотря на специальное назначение, ее широко применяют в машиностроении для изготовления всевозможных изделий.

Основным видом проволоки, используемой для армирования резинотехнических изделий, является бортовая проволока по ГОСТу 26366—84. Для того чтобы обеспечить адгезию проволоки к резине при производстве шин, поверхность ее покрывают латунью с медью (60—75%).

Кроме перечисленных видов проволоки выпускают проволоку, используемую в электротехнике и строительстве. К ней относятся проволока с высоким электрическим сопротивлением для нагревательных элементов (ГОСТ 12766.1—90), предварительно напряженных конструкций (ГОСТ 7348—81), арматурная для железобетона (ГОСТ 6727—80), оцинкованная для сердечников проводов (ГОСТ 9850—72), для воздушных линий связи (ГОСТ 1668—73), биметаллическая сталемедная (ГОСТ 3822—79).

8.9. Строительные стали

8.9.1. Применение, свойства, разновидности

Строительные стальные конструкции используют в строительных сооружениях, магистральных трубопроводах, подъемных кранах и т. д.

При изготовлении и монтаже этих конструкций на специализированных заводах их подвергают различным видам обработки: сварке, резке, обработке резанием, правке, гибке, вальцовке. Как правило, термическую обработку не проводят. При этом сталь должна сопротивляться образованию трещин, сохранять структуру и механические свойства. Стальные конструкции при эксплуатации должны длительное время выдерживать статические, динамические и пе-

ременные нагрузки, часто при низких температурах. Стоимость стальных конструкций не должна быть высокой.

Строительная сталь должна обладать высокими свойствами: прочностью, свариваемостью, сопротивлением хрупкому разрушению, сопротивлением вязкому разрушению. Применение конструкций из нее должно характеризоваться высокой технико-экономической эффективностью. Для отдельных специальных областей применения сталь должна иметь также особые свойства.

Недостаточная прочность ранее применявшегося проката из углеродистой стали обыкновенного качества и проката из низколегированной стали приводила к ее излишнему расходу и удорожала конструкции. Повышение прочности стали — наиболее действенное средство снижения металлоемкости и стоимости таких конструкций. Размеры поперечных сечений многих элементов металлоконструкций, а следовательно, и их массу определяют расчетом, при котором исходят из предела текучести и временного сопротивления материалов.

В России установлены семь основных классов прочности, которым соответствует предел текучести не менее 225, 285, 325, 390, 440, 590 и 735 МПа. Сталь первого класса 225 условно называют сталью нормальной прочности, трех следующих классов 285 — сталью повышенной прочности и остальных трех классов 440 — сталью высокой прочности.

Высокая надежность соблюдения норм прочности с вероятностью не ниже 95% обеспечивается по ГОСТу 27772—88 проведением специальных приемки и контроля.

Повышение содержания углерода и легирующих элементов увеличивает опасность появления в околошовной зоне закалочных микроструктур, хрупких холодных трещин и трещин задержанного хрупкого разрушения. Этому особенно способствует повышенное содержание углерода. Влияние содержания углерода, легирующих элементов и примесей характеризуется углеродным эквивалентом СЕ. Существует много формул для определения СЕ.

Согласно ГОСТу 27772—88 углеродный эквивалент определяют по формуле

$$CE = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Mo/4 + \\ + Ni/40 + Cu/13 + V/14 + P/2,$$

где символы элементов выражают массовые доли этих элементов в %.

При определении СЕ по разным формулам получаются разные, но достаточно близкие результаты. Практика изготовления сварных конструкций показала, что при СЕ = 0,35 сварка не вызывает за-

труднений, а при СЕ = 0,35—0,60 сварка должна проводиться с соблюдением мер предосторожности. При СЕ > 0,60 вероятность образования трещин возрастает и необходимы специальные меры предосторожности. Чем больше легирующих элементов содержит строительная сталь, тем выше класс прочности и больше СЕ. По ГОСТу 27772—88 по требованию потребителя для сталей класса прочности 390 необходимо, чтобы СЕ < 0,49, а для класса прочности 440 — СЕ < 0,51.

Для проката из свариваемых сталей достаточной гарантией свариваемости является соответствие химического состава и механических свойств нормам технических условий и стандартов.

8.9.2. Низколегированные стали повышенной прочности

Легированные стали с относительно небольшой массовой долей элементов обычно в сумме, не превышающей 2—3%, и с низким содержанием углерода, используемые для сварных металлоконструкций, называют *низколегированными*. Прокат из низколегированных сталей для строительных конструкций поставляют по ГОСТам 19281—89; 6713—91; 27772—88 и ТУ. В ГОСТе 27772—88 приведены такие стали, в обозначениях марок которых буква указывает на значение стали или принадлежность ее к стандартной системе, цифры — предел текучести (нижний гарантированный или средний, МПа). Например: С345, С375, где С — строительная сталь, цифры 345, 375 — σ_T , МПа. Высокий уровень легирования сдерживается ухудшением свариваемости, снижением сопротивления хрупкому разрушению и экономической эффективности.

В целях унификации сокращено число марок низколегированной стали, применяемых в строительстве. Основным материалом для всех металлоконструкций массового применения является сталь 09Г2С, так как она обладает оптимальным сочетанием свариваемости, хладостойкости и технико-экономической эффективности.

Для конструкций автодорожных и железнодорожных мостов основным материалом являются низколегированные стали 15ХСНД и 10ХСНД по ГОСТу 6713—91 с повышенным сопротивлением атмосферной коррозии. В зависимости от хладостойкости эти стали разделяют на три категории. Прокат из низколегированной стали повышенной прочности поставляют после горячей прокатки. Он имеет ферритно-перлитную структуру, но возможна также поставка части листового проката после термической обработки — нормализации или термического улучшения.

8.9.3. Стали повышенной прочности с карбонитридным упрочнением

Дополнительное повышение прочности строительной стали достигается введением в нее небольших добавок активных карбидо- и нитридообразующих элементов с обязательной термической обработкой, обеспечивающей образование дисперсных частиц карбонитридов и измельчение зерна стали. Это позволяет сохранить и даже существенно повысить сопротивление хрупкому разрушению.

Из экономических и технологических соображений в России для этой цели используют карбонитриды ванадия и нитриды алюминия. Небольшие добавки ванадия, алюминия и азота (в сумме массовая доля не превышает 0,2%) вводят в низколегированную сталь типа 14Г2. Готовый прокат подвергают нормализации с нагревом до 890—950 °С, в результате чего в стали формируются дисперсные частицы карбонитридов диаметром 10—100 мкм. Это позволяет получать стали с $\sigma_T = 400\text{—}500$ МПа и низкой температурой хрупкости.

Сталь с карбонитридным упрочнением пригодна для всех видов холодной формовки, а также горячей гибки, вальцовки, штамповки. Увеличение температуры нагрева или скорости охлаждения повышает прочность, но снижает пластичность, вязкость и хладостойкость вследствие образования неблагоприятной микроструктуры. Изменения температуры ниже точки A_1 , включая кратковременные нагревы до 700 °С, дополнительный отпуск при 550—650 °С в течение 3—5 ч, выдержку до 1000 ч при 400—500 °С, мало влияют на механические свойства стали.

При соблюдении основных требований к технологии и соответствующем подборе присадочных материалов, флюсов и электродных покрытий сварку сталей 14Г2АФ(Д), 15Г2АФДпс и 16Г2АФ можно производить всеми способами, принятыми при изготовлении и монтаже стальных строительных конструкций. Оптимальные механические свойства достигаются при скорости охлаждения 10—20 °С/с.

8.10. Судостроительные стали

Судостроительные стали производят в виде тонколистового (0,9—3,9 мм) и толстолистового (4—130 мм) проката, широкополосного, полосового и фасонного проката, поковок и отливок.

По основным признакам различают судостроительные стали нормальной прочности, повышенной прочности и хладостойкие.

Стали нормальной прочности по классификации Регистра и Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО) обозначаются марками А, В, D и Е и имеют минимальный предел текучести 230 МПа. *Стали повышенной прочности* выпускают следующих марок: А32, D32, Е32, А36, D36, Е36, А40, D40, Е40. Их поставка осуществляется по ГОСТу 5521—93.

Область применения сталей нормальной и повышенной прочности — корпуса судов и кораблей всех типов и назначений, а также корпусные конструкции плавающих буровых установок и других морских сооружений, постоянно эксплуатируемых в нормальных климатических условиях. Не рекомендуется применять эти стали для изготовления наиболее нагруженных (специальных) сварных конструкций (III категории по правилам Регистра), арктических судов и буровых платформ, когда расчетная температура ниже —30÷40 °С. Под расчетной температурой понимают минимальную среднесуточную температуру воздуха за пять лет эксплуатации.

Для наиболее ответственных конструкций, используемых в арктических условиях, применяют специальные *хладостойкие стали* (повышенной прочности) 10ГНБ-СШ (10ГНБ-Ш), 10ХНДМ-СШ (10ХНДМ-Ш) с минимальным пределом текучести 355—390 МПа. Эти стали отвечают требованиям правил Регистра для категорий F36, E40S, F40Z, E40SZ. Для специальных и основных несущих конструкций плавающих буровых установок и морских сооружений арктического назначения, а также ледового пояса атомных ледоколов применяют высокопрочные хладостойкие стали 12ХН2МД и 12ХН2МД-Ш, 12ХН3МДФ-Ш, 12ХН4МДБ-Ш.

Сварные конструкции из указанных хладостойких сталей надежно эксплуатируют при температурах до —30÷40 °С (стали открытых методов выплавки) и при температурах до —50÷60 °С (стали электрошлакового переплава). Они пригодны для резервуаров хранения и транспортировки сжиженных газов класса LPG (пропан-бутан). Для резервуаров хранения и транспортировки сжиженных природных газов класса LNG (—150 °С) применяют хладостойкие стали 0Н9-СШ и 0Н9-Ш.

8.11. Хладостойкие стали криогенной техники

Стали для криогенной техники должны иметь необходимую прочность в сочетании с высокими вязкостью и пластичностью, обладать низкой чувствительностью к концентрации напряжений и низкой склонностью к хрупкому разрушению.

При снижении температуры показатели прочности стали повышаются, а ударная вязкость снижается. Одним из критериев хладостойкости является температура, при которой ударная вязкость стали достигает $0,3 \text{ МДж/м}^2$. Лучшими хладостойкими сталями являются аустенитные и мартенситно-старееющие. Эти стали сохраняют достаточную вязкость при рабочих температурах до $-253 \div 269^\circ\text{C}$. Для менее вязких сталей нижняя граница рабочих температур может составлять -120°C .

Наиболее важными технологическими свойствами хладостойких сталей являются свариваемость и пластичность, необходимые для изготовления герметичной аппаратуры, труб и тонкостенных конструкций.

В криогенной технике применяют *низкоуглеродистые никелевые стали* 0Н6 и 0Н9.

Термическая обработка этих сталей обычно производится в режиме двойной нормализации с нагревом при первой — до 900°C , при второй — до 790°C , далее в режиме отпуска при $560\text{—}590^\circ\text{C}$ с охлаждением на воздухе. Первая нормализация проводится в целях гомогенизации стали в области γ -твердого раствора, вторая — для получения мелкозернистой структуры. В некоторых случаях вторую нормализацию заменяют закалкой в воде, начиная с 830°C . Увеличение скорости охлаждения из аустенитной области увеличивает ударную вязкость при низких температурах.

Никелевые стали имеют хорошие технологические свойства. Они удовлетворительно штампуются в горячем и холодном состояниях, хорошо свариваются и обрабатываются резанием. После сварки термообработка необязательна. Работоспособность сварных конструкций при криогенных температурах достигается применением присадочной проволоки, содержащей до 80% никеля (типа инконель), проволоки Св-06Х15Н60М15, электродов из стали 10Х20Н70Г2Б2В на базе проволоки Св-ХН78Т. При сварке листов малой толщины (до 4 мм) допустимо применение проволоки, содержащей до 25% никеля, например Св-10Х16Н25АМ6.

Стали 0Н6 и 0Н9 по сравнению с аустенитными хромоникелевыми сталями имеют в три-четыре раза более высокую теплопроводность и меньший (на 30%) коэффициент линейного расширения.

Никелевые низкоуглеродистые стали имеют недостаточную стойкость против атмосферной коррозии. Для защиты от коррозии в морском воздухе и в среде промышленных районов поверхности емкостей и трубопроводов, не контактирующие с жидким криогенным продуктом, покрывают хладостойкими эмалями типа АС-730.

Сталь 0Н6 используют для изготовления обечаек, днищ, патрубков статически нагруженных аппаратов и сосудов, работающих под давлением при температуре до -160°C . Сталь 0Н9 применяют для изготовления статически нагруженного оборудования, работающего при температуре до -196°C . Из нее изготавливают емкости и резервуары, предназначенные для хранения и транспортировки жидкого кислорода, азота и сжиженного природного газа, а также регенераторы воздухоразделительных установок.

Для деталей, работающих при криогенных температурах, применяют два вида термообработки:

- горячее деформирование и старение при температуре $720\text{—}750^\circ\text{C}$ в течение 16 ч;
- закалку и старение.

Эти стали применяют для изготовления нагруженных несварных деталей: подвесок внутренних сосудов криогенных емкостей, штоков арматуры, крепежных деталей, фланцевых соединений, пружин.

Сталь 03Х9К14Н6МЗД применяют для изготовления высоконагруженных деталей, в том числе седел клапанов, а также элементов турбодетандеров — валков, подпятников, лопаток, у которых должны сочетаться высокие твердость и эрозионная стойкость.

Сталь 03Х14К14Н4МЗТФ широко используют для изготовления тонколистовых конструкций сложной конфигурации и деталей арматуры, работающих при температурах до -196°C (золотники, втулки, штоки, опоры, стаканы, клапаны, тарелки и др.).

Сталь 03Х14К14Н4МЗТФ мартенсито-старееющая, сварные соединения из нее имеют высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях при повышенной температуре и относительной влажности 96—98%.

В криогенной технике основным конструкционным материалом являются коррозионно-стойкие *аустенитные* стали. Эти стали отличаются от хладостойких сплавов и сталей особо высокими пластичностью и вязкостью, их применяют при температурах (до -269°C). Благодаря технологическим свойствам из этих сталей можно изготавливать криогенное оборудование с применением любых способов холодной обработки давлением и сварки.

Сохранение высокой пластичности и вязкости (вплоть до -269°C), коррозионная стойкость и хорошие технологические свойства делают *аустенитные хромоникелевые стали* основным конструкционным материалом для криогенной техники. Стабильность аустенитной структуры зависит от химического состава, тем-

пературы и деформации стали. В первую группу входят стали 12X18H9, 08X18H10, 12X18H10T и др.

Хорошая коррозионная стойкость хромоникелевых аустенитных сталей обусловлена высоким содержанием хрома. Вместе с тем при сварке или пайке из-за образования по границам зерен карбидов хрома и обеднения пограничного слоя хромом у этих сталей появляется склонность к межкристаллитной коррозии.

Стали этого типа характеризуются высокой технологичностью. Они хорошо деформируются в горячем и холодном состояниях, хорошо подвергаются пайке и свариваются. После сварки термообработка обычно не требуется. Лишь в отдельных случаях при сложной форме свариваемых элементов рекомендуется термообработка после сварки. Пайку производят серебряными, оловянно-свинцовыми и свинцово-кадмиевыми припоями. Последние обладают наиболее высокой прочностью из всех применяемых припоев при большом запасе пластичности при низких температурах. Наиболее широко применяют сталь 12X18H10T.

Для статически нагруженных конструкций и принятого уровня рабочих напряжений ползучесть стали 12X18H10T при низких температурах не препятствует нормальной эксплуатации. Сталь 12X18H10T характеризуется относительно малой чувствительностью к многократно повторяемым сменам температуры под нагрузкой. Хромоникелевые аустенитные стали этого типа и стали с большим содержанием никеля применяют для изготовления сварных элементов аппаратов, емкостей, трубопроводов (обечаек, днищ, патрубков, фланцев), деталей арматуры (штоков, клапанов, седел и т. п.). Рекомендуемая температура эксплуатации сварных соединений от -269°C до $+600^{\circ}\text{C}$.

К недостаткам аустенитных хромоникелевых сталей относятся низкий предел текучести при 20°C , а также сравнительно высокая стоимость изделий из них, обусловленная высоким содержанием дорогого и дефицитного никеля.

По комплексу механических свойств оптимальными являются *аустенитные хромомарганцевые* стали с $\text{Cr} = 12\text{--}14\%$ и $\text{Mn} = 17\text{--}20\%$. Дополнительное упрочнение достигается за счет введения азота.

В России наибольшее применение получила сталь 03X13AG19, рекомендуемая к применению до температуры -196°C для статически нагруженных сварных конструкций.

С понижением температуры у стали 03X13AG19 происходит более интенсивный рост предела текучести, чем у хромоникелевых

сталей. При снижении температуры с $+20^{\circ}\text{C}$ до -78°C пластичность несколько повышается, а затем она начинает плавно снижаться.

Сталь 03X13AG19 достаточно технологична. Она хорошо деформируется в горячем и удовлетворительно в холодном состоянии. Термическая обработка представляет собой закалку начиная с температуры 980°C и охлаждение в воде. Сталь удовлетворительно обрабатывается резанием и хорошо сваривается всеми видами сварки. Вязкость сварных соединений удовлетворяет требованиям криогенной техники. Сталь 03X13AG19 является коррозионно-стойкой в промышленной атмосфере и неагрессивных средах. Ее применяют для изготовления элементов сварных конструкций обечаек, днищ, патрубков, фланцев. Минимальная температура эксплуатации статически нагруженных конструкций составляет -196°C , при динамических нагрузках до -120°C .

В криогенной технике нашла применение экономнолегированная никелем коррозионно-стойкая хромоникельмарганцевая аустенитная сталь 10X14G14H4T. Она удовлетворительно обрабатывается давлением и резанием, хорошо сваривается. Ее применяют в криогенной технике для изготовления сварных элементов сосудов (обечаек, днищ, фланцев патрубков) и трубопроводов, работающих при температуре от -196°C до $+500^{\circ}\text{C}$, а также сосудов, работающих под давлением.

В криогенной технике наибольшее применение нашли хромоникельмарганцевые стали с азотом: 07X21G7AH5, 07X13H4AG20 и 03X20H16AG6.

Сталь 07X21G7AH5 применяют для изготовления несварных крепежных деталей типа подвесок, шпилек, гаек, болтов, работающих при температурах до -253°C . Сталь удовлетворительно обрабатывается давлением, резанием.

Сталь 07X13H4AG20 используют для изготовления сварных элементов сосудов и аппаратов обечаек, днищ, патрубков. Рекомендуемые температуры эксплуатации до -196°C . Применяют для изготовления сосудов, работающих под давлением. Сталь удовлетворительно деформируется в горячем, холодном состояниях и обрабатывается резанием, хорошо сваривается.

Сталь 03X20H16AG6 применяют для изготовления криогенных сосудов, работающих под давлением, оболочек теплообменных аппаратов, трубопроводов и арматуры. Минимальная температура эксплуатации и максимальное давление не ограничены. Сталь удовлетворительно обрабатывается давлением и резанием, хорошо сваривается с применением всех видов сварки.

Сталь 04X20H16AG8M2Ф имеет удовлетворительную обрабатываемость давлением и резанием, хорошо сваривается с применением всех видов сварки. Сварку проводят с использованием проволоки Св-03X19H15Г6M2AB2. Эту сталь рекомендуется использовать для силовых элементов сверхпроводящих устройств и других криогенных установок, работающих при температурах до -269°C .

Существует ряд деталей и узлов, стабильности структуры которых в процессе эксплуатации не требуется. Для их изготовления применяют *аустенитные метастабильные стали*. Широкому их использованию в криогенной технике препятствует то, что образующийся в процессе низкотемпературного деформирования мартенсит может оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие на механические свойства. Сталь применяют для изготовления топливных баков, сосудов для жидкого водорода и природного газа. Сталь обладает хорошей свариваемостью, механические свойства сварных соединений близки к свойствам основного металла. Давление в момент разрушения при -196°C сварных баков из стали 03X15H9AG4 с толщиной стенки 2,5 мм составляет 18–21 МПа, а из стали 12X18H10T — 9,8–13,2 МПа.

Контрольные вопросы

1. Чем цементуемые стали отличаются от других углеродистых и легированных сталей?
2. Подвергаются ли термической обработке цементуемые стали, если да, то какой?
3. В чем главное достоинство улучшаемых сталей и чем оно достигается?
4. Чем отличаются нормализация и улучшение?
5. Что такое критический диаметр и каков он у углеродистых, цементуемых и улучшаемых сталей?
6. Назовите несколько марок пружинных нелегированных и легированных сталей.
7. Назовите несколько марок сталей мартенситного и аустенитного классов.
8. Какими способами повышают качество пружинных сталей?
9. На какие группы разделяют стали высокой обрабатываемости резанием по химическому составу?
10. Какие химические реагенты оказывают положительное влияние на процесс резания?
11. Какими технологическими возможностями обладают конструкционные стали?
12. Назовите несколько марок конструкционных литейных сталей.

13. Назовите несколько марок хладостойких сталей и область их применения.
14. Какие марки стали применяются для проволоки различных диаметров?
15. Что такое классы прочности для строительных сталей?
16. Назовите несколько марок строительных низколегированных сталей повышенной прочности.
17. Расскажите о строительных сталях повышенной прочности с карбонитридным упрочнением.
18. Как обозначаются судостроительные стали повышенной прочности?
19. Какие требования предъявляются к хладостойким сталям криогенной техники?

Поверхностное упрочнение стали и других материалов

9.1. Поверхностное упрочнение металлорежущих материалов

Поверхностное упрочнение стали широко применяется в современном машиностроении. Оно позволяет получить высокую твердость и износостойкость поверхностного слоя при сохранении достаточно вязкой сердцевины, способствует повышению долговечности и усталостной прочности. Некоторые методы поверхностного упрочнения отличаются высокой производительностью. В ряде случаев они с большой эффективностью используются вместо обычных методов термической обработки. Возможная классификация современных методов упрочнения инструмента приведена на рис. 9.1.

Объемные методы упрочнения улучшают свойства инструмента за счет получения более совершенной микроструктуры упрочняемого материала по всему объему режущей части.

При *поверхностной упрочняющей обработке* происходят процессы взаимодействия наносимого покрытия с основой инструментального материала. Выбор метода упрочнения производится по марке упрочняемого инструментального материала (углеродистая, инструментальная, быстрорежущая стали, твердый сплав, керамика и др.).

Различают следующие *способы упрочнения*: поверхностное покрытие другим материалом; обработка поверхностного слоя основного материала (дробеструйный наклеп, лазерная поверхностная закалка, ионная бомбардировка); объемная обработка (стандартная термическая обработка сталей, микролегирование, ультразвуковая обработка) и др.

Эффективным методом повышения стойкости инструмента является модификация его поверхности на основе соединений типа карбидов, нитридов, карбонитридов, оксидов и др. Эти материалы обладают высокой твердостью, износо- и теплостойкостью. *Стойкость инструмента*, в зависимости от метода упрочнения, может быть увеличена в 1,5—6 раз.

В зависимости от вида поверхностной обработки оптимальные скорости резания упрочненным инструментом на 25—100% превышают соответствующий показатель для инструмента без обработки.



Рис. 9.1. Классификация способов упрочнения инструментальных материалов

Изменяя состав поверхности инструментального материала, можно полностью исключить процесс наростообразования, который возникает при обработке относительно мягких металлов инструментами из быстрорежущих сталей и отрицательно влияет на точность и качество поверхностного слоя обработанных изделий.

Для сложнопрофильного инструмента (червячные фрезы, долбяки, протяжки, метчики и т. п.) упрочняющая обработка позволяет на 30% сократить его расход за счет уменьшения количества переточек.

9.2. Термические методы

К термическим методам относятся пайка-закалка быстрорежущего инструмента в соляных ваннах и в вакууме, вакуумная и обычная термообработка.

В ОАО «ВНИИ инструмент» разработаны припой и технология пайки быстрорежущего инструмента, совмещенная с его термообработкой.

Пайка-закалка припоями марки ПЖ60НХБ может производиться в соляных ваннах, имеющих почти на всех предприятиях, и в вакуумных печах и имеет следующие преимущества:

- экономится быстрорежущая сталь на 80—90%;
- повышается стойкость инструмента;
- пайка, совмещенная с закалкой, проводится на обычном для термической обработки оборудовании;
- обеспечивается необходимая прочность соединения;
- инструмент эксплуатируется до предельного износа напаянных элементов.

Широкое применение получила *вакуумная термообработка* из-за высокого качества состояния поверхности и товарного вида инструмента, отсутствия науглероживания и безуглероживания. Она экономична, экологически чиста и не требует механизмов для нейтрализации вредных отходов.

9.3. Поверхностная закалка стали

Поверхностной называется такая закалка (ПЗ), при которой высокую твердость приобретает лишь поверхностный слой изделия. Она отличается от всех рассмотренных ранее способов закалки методом нагрева. При такой обработке до температуры закалки нагревают только поверхностный слой изделия. При быстром охлаждении лишь этот слой подвергается закалке. Остальная часть не закаливается и сохраняет структуру и свойства, которые были до закалки. Наибольшее распространение получила поверхностная закалка с

индукционным нагревом токами высокой частоты. Этот высокопроизводительный, прогрессивный метод термической обработки повышает механические свойства стали, в том числе предела текучести, усталость и твердость, исключает возможность обезуглероживания, уменьшает опасность окисления поверхности изделий и их деформации, создает предпосылки для комплексной механизации и автоматизации процесса закалки. По данным автомобильного завода, высокочастотная закалка обходится в два—шесть раз дешевле, чем другие процессы поверхностного упрочнения.

Индукционный нагрев металла достигается путем индуцирования вихревых токов. Электромагнитное поле создается индуктором, подключенным через трансформатор напряжения к источнику переменного тока. Источниками питания током могут служить машинные генераторы и тиристорные преобразователи (до 10 000 Гц). Чем больше частота тока, тем меньше глубина проникновения его в проводник и, следовательно, тем меньше глубина закалки. Распределение тока по сечению проводника зависит от его природы и свойств. Нагрев токами высокой частоты осуществляется следующим образом. Изделие, подлежащее нагреву, помещают внутри спирали из медной трубки (рис. 9.2), т. е. в индуктор. Через индуктор

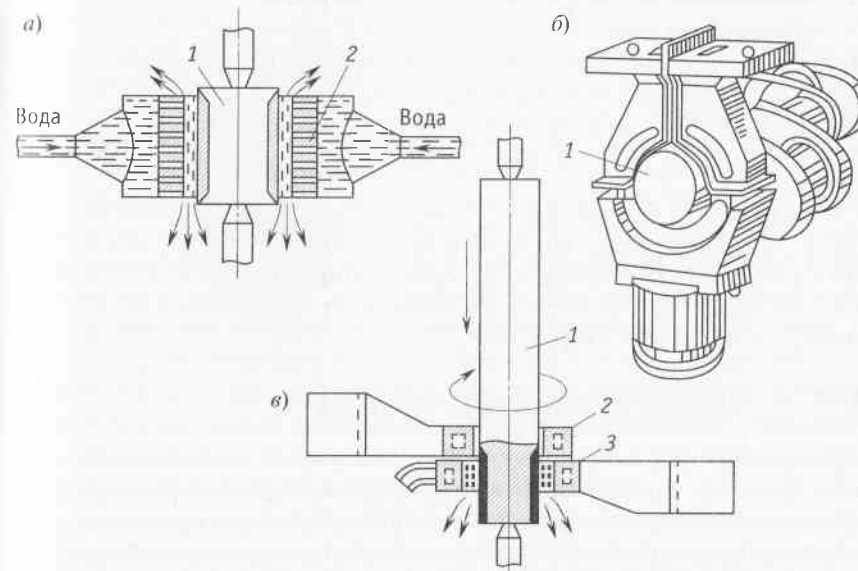


Рис. 9.2. Поверхностная закалка деталей токами высокой частоты: а — одновременный нагрев и охлаждение; б — непрерывно-последовательный нагрев вдоль оси вала; в — последовательный нагрев и охлаждение каждой шейки коленчатого вала

пропускают ток высокой частоты большой силы, который создает вокруг изделия мощное переменное магнитное поле, в результате чего изделие перемagnичивается много раз в секунду, в нем возникают короткозамкнутые вихревые токи. Вследствие явления поверхностного эффекта токи сосредоточиваются в поверхностном слое изделия и нагревают его на определенную глубину. Продолжительность нагрева токами высокой частоты весьма мала — она исчисляется секундами. Таким образом, изделие нагревается находящимися в нем электрическими токами, роль индуктора — возбудить эти токи.

Способ поверхностной закалки с использованием токов высокой частоты выбирают в зависимости от размеров и формы изделия, а также предъявляемых к изделию требований. При закалке небольших изделий производят нагрев и охлаждение всей их поверхности. Изделие 1 (рис. 9.2, а) помещают в индуктор 2 и сначала нагревают, а затем охлаждают всю поверхность, подлежащую обработке. Охлаждение может быть душевым. Для этой цели применяют индукторы, на внутренней поверхности которых имеются многочисленные отверстия (спреер). После окончания нагрева через эти отверстия на поверхность изделия поступает вода и охлаждает его.

Закалку изделий значительной длины проводят непрерывно-последовательным нагревом. Изделие 1 (рис. 9.2, б) устанавливают в центрах и для равномерности нагрева непрерывно вращают с определенной скоростью. Закалка происходит при вертикальном перемещении изделия сверху вниз. При таком перемещении в магнитное поле индуктора 2 последовательно поступает один участок изделия за другим и нагревается до температуры закалки. Под индуктором расположено охлаждающее устройство 3, представляющее собой согнутую кольцом трубку с многочисленными отверстиями на внутренней поверхности. Через отверстия на нагретые участки изделия поступает вода и охлаждает его. Так непрерывно-последовательно нагревается и охлаждается вся поверхность изделия.

При необходимости закалки отдельных частей изделия целесообразно применять последовательную закалку, при которой обрабатываемая поверхность нагревается и охлаждается по частям. Таким образом осуществляется, например, закалка шейки коленчатого вала 1 (рис. 9.2, в), зуба крупномодульного зубчатого колеса, отдельных поверхностей шпинделя и др. После закалки для уменьшения внутренних напряжений изделия подвергают низкому отпуску (при 160—200 °С). Глубина закалки — 3—5 мм. Для точной установки изделий в индукторе, обеспечения равномерного нагрева и охлаждения используют специальные приспособления, установки, станки-полуавтоматы и автоматы различных конструкций.



Рис. 9.3. Схемы способов поверхностной закалки при нагреве пламенем: а — стационарный; б — вращательный; в — поступательный; г — комбинированный; 1 — зона нагрева; 2 — зона охлаждения

Для поверхностной закалки крупных изделий в единичном и мелкосерийном производствах, а также при ремонтных работах применяют нагрев пламенем, чаще всего ацетилено-кислородным, температура которого составляет 3150 °С. На рис. 9.3 приведены схемы основных способов закалки при нагреве пламенем: стационарного, вращательного, поступательного и комбинированного. Стационарный и вращательный способы закалки включают две операции: одновременный нагрев всей закаливаемой поверхности и охлаждение всей нагретой поверхности. При поступательном и комбинированном способах поверхность подвергается закалке при непрерывном перемещении через зону нагрева и охлаждения. Для нагрева пламенем служат обычные сварочные горелки, в которых вместо мундштука используют специальные наконечники — щелевые и многопламенные. Толщина закаленного слоя составляет 2—5 мм, твердость его такая же, как при обычной закалке.

В крупносерийном и массовом производствах при установившемся технологическом процессе, когда длительное время изготавливаются одни и те же изделия из стали определенных марок, например ведущие колеса гусеничных тракторов, используют *поверхностную закалку в электролите* — 14—16%-м водном растворе кальцинированной соды.

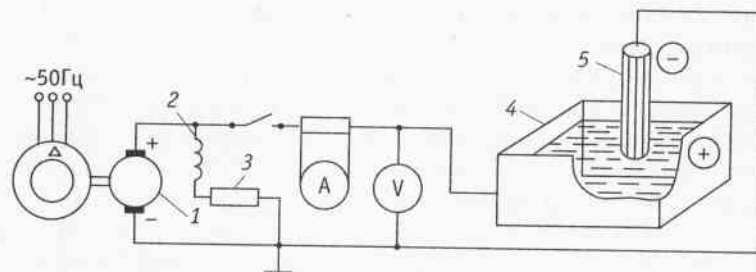


Рис. 9.4. Схема заковки детали в электролите:

1 — генератор постоянного тока; 2 — обмотка возбуждения генератора; 3 — регулирующийся реостат; 4 — ванна с электролитом (анод); 5 — деталь (катод)

Закаливаемое изделие (рис. 9.4) присоединяют к отрицательному полюсу генератора постоянного тока и опускают в ванну с электролитом. Погруженное на заданную глубину изделие нагревается за несколько секунд, после чего ток выключают. Как правило, тот же электролит является и охлаждающей средой. При нагреве в электролите происходят электролитические и электроэрозионные процессы, которые очищают нагреваемую поверхность изделий от окисных пленок, ухудшающих теплопередачу. Скорость нагрева в электролите до $150\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Детали сложной формы, ленточные пилы, режущий инструмент (фрезы, сверла), рычаги, оси подвергают импульсной поверхностной заковке. Закаливаемую часть детали за очень короткий промежуток времени нагревают до температуры, превышающей температуру обычного нагрева данного материала под заковку, и затем охлаждают с большой скоростью за счет отвода теплоты в остальную массу детали без применения охлаждающих сред. В результате импульсной заковки получают закаленный «белый» слой, устойчивый при отпуске до температуры $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, обладающий мелкозернистой структурой, высокой твердостью и износостойкостью.

При импульсной поверхностной заковке применяют высокочастотные генераторы, работающие в импульсном режиме, конденсаторы, аппаратуру для точечной сварки или лазерные установки. Такая заковка позволяет исключить деформации, трещины, повысить коррозионную стойкость изделий, заменить в некоторых случаях легированную сталь на углеродистую.

На промышленных предприятиях применяют заковку в псевдооживленной среде. Псевдооживленная среда (кипящий слой) представляет собой твердые частицы кварцевого песка или другого сы-

пучего материала, интенсивно перемешиваемого воздушным или газовым потоком.

Такую среду можно использовать как для заковки, так и для охлаждения. В камеру на газораспределительную решетку насыпают измельченный кварцевый песок, под решетку подводят нагретый воздух или газ. Под действием давления воздуха (газа) твердые частицы приходят в движение, напоминая кипящую жидкость. Детали помещают в «кипящий слой». При соприкосновении с твердыми частицами происходит теплоотдача. Интенсивность процесса теплоотдачи можно регулировать путем увеличения или уменьшения количества кварцевого песка и температуры воздуха (газа). Достоинства этого способа — высокая скорость и равномерность нагрева. Обработанные таким способом детали имеют чистую поверхность.

9.4. Химико-термическая обработка стали

Существует большое количество деталей, к свойствам поверхностного слоя металла которых предъявляются иные требования, нежели к свойствам внутренних слоев. Например, зубья шестерен в процессе работы испытывают сильное трение, поэтому они должны обладать большой твердостью. Однако ступица и внутренняя часть зубьев должны иметь небольшую твердость и хорошую вязкость, с тем чтобы зубья не разрушались от толчков и ударов. Следовательно, зубья шестерен должны быть твердыми на поверхности и вязкими в сердцевине. Если деталь работает в морской воде или в среде кислот и щелочей, ее поверхность должна хорошо сопротивляться коррозии. Для повышения устойчивости детали против коррозии требуется определенный химический состав ее поверхностного слоя. Вместе с тем внутренние слои металла не входят в соприкосновение с указанными средами, поэтому могут иметь обычный химический состав. Для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя деталей осуществляется их тепловая обработка в химически активной среде, называемая *химико-термической обработкой*.

При химико-термической обработке происходят следующие процессы:

- распад молекул и образование атомов диффундирующего элемента (диссоциация);
- поглощение атомов поверхностью (адсорбция);
- проникновение атомов в глубь металла (диффузия).

Основные виды химико-термической обработки стали: цементация, азотирование, цианирование, нитроцементация, сульфацирование, алитирование, хромирование, силицирование, борирование и др.

9.4.1. Цементация

Цементация — диффузионное насыщение поверхностного слоя детали углеродом. После цементации выполняют термическую обработку — закалку и низкий отпуск. Цементации подвергают детали, работающие на истирание, испытывающие при работе вибрацию и удары. Такие детали должны иметь твердую закаленную поверхность, хорошо сопротивляющуюся истиранию, и вязкую сердцевину, способную выдерживать динамические нагрузки. Если подобные детали изготовить из стали с высоким содержанием углерода, то после термической обработки поверхность их будет твердой и износоустойчивой, а сердцевина — твердой и хрупкой. В результате ударных нагрузок такие детали могут разрушиться. Детали из малоуглеродистой стали будут мягкими и вязкими, выдержат вибрацию и удары, но зато быстро изнашиваются при истирании. Оптимальные свойства достигаются в том случае, если детали изготавливаются из малоуглеродистой стали, а затем подвергают цементации с последующей закалкой.

Цементации подлежат детали из стали, содержащей до 0,3% углерода. Поверхность деталей насыщается углеродом в пределах 0,8—1%. Цементация осуществляется в твердых, газообразных и жидких средах (карбюризаторах). При цементации в твердом карбюризаторе используют металлический ящик. Детали располагают в ящике послойно в шахматном порядке. Вместе с деталями в ящик загружают цилиндрический образец — «свидетель», изготовленный из стали той же марки, из которой выполнены изделия. По «свидетелю» определяют глубину цементированного слоя (рис. 9.5). В качестве карбюризатора служит смесь древесного угля (60—90%) и углекислых солей ба-

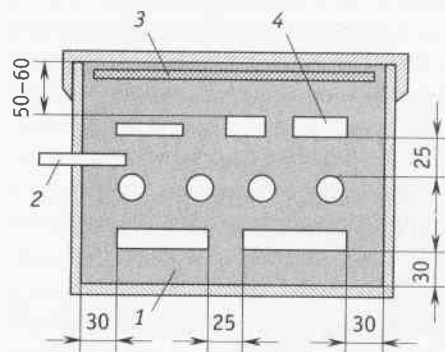


Рис. 9.5. Схема укладки деталей в цементационный ящик:

1 — карбюризатор; 2 — контрольный образец «свидетель»; 3 — асбест; 4 — детали

ри. Вместе с деталями в ящик загружают цилиндрический образец — «свидетель», изготовленный из стали той же марки, из которой выполнены изделия. По «свидетелю» определяют глубину цементированного слоя (рис. 9.5). В качестве карбюризатора служит смесь древесного угля (60—90%) и углекислых солей ба-

рия BaCO_3 и натрия NaCO_3 . Ящики закрывают крышкой, щель между крышкой и ящиком обмазывают шамотной глиной, просушивают, устанавливают в печь и выдерживают при температуре 900—950 °С.

При нагреве углерод древесного угля соединяется с кислородом воздуха, образуя окись углерода (CO), которая разлагается с образованием атомарного углерода, диффундирующего в деталь: $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$. Двуокись углерода взаимодействует с древесным углем и вновь образует окись углерода: $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$ и т. д.

Чаще всего карбюризатор имеет следующий состав: BaCO_3 (14—22%), Na_2CO_3 (4%), CaCO_3 (2%), патока или крахмал (6%), влага не более 5% и остальное — древесный уголь твердых пород с зерном 7—12 мм.

Углекислые соли катализируют карбюризатор, увеличивая количество окиси углерода в ящике. Углекислый кальций (CaCO_3) добавляют для предотвращения спекания карбюризатора. Рабочую смесь для цементации составляют из 1/3 свежего карбюризатора и 2/3 отработанного. При температуре цементации углекислые соли разлагаются на окиси данных солей и углекислый газ ($\text{BaCO}_3 \rightarrow \text{BaO} + \text{CO}_2$; $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2$).

На поверхности цементированной стали образуется заэвтектоидная зона (перлит и сетка цементита), далее располагается эвтектоидная зона (перлит) и при переходе к сердцевине — переходная доэвтектоидная зона (феррит и перлит).

За толщину цементированного слоя принимают сумму толщин заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной зон (рис. 9.6). С повышением температуры и времени выдержки толщина цементированного слоя увеличивается, глубина его достигает

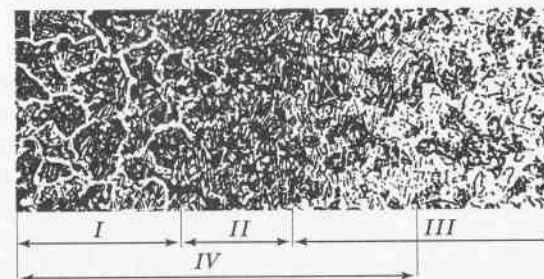


Рис. 9.6. Микроструктура цементированной стали по зонам:

I — заэвтектоидная; II — эвтектоидная; III — доэвтектоидная; IV — глубина цементированного слоя

0,5—2 мм. На каждые 0,1 мм толщины слоя требуется выдержка около 1 ч.

К недостаткам твердой цементации следует отнести большую трудоемкость и продолжительность процесса, сложность регулирования толщины цементированного слоя и содержания углерода в нем, загрязнение воздуха угольной пылью. Цементацию в твердом карбюризаторе применяют в мелкосерийном и единичном производствах.

В единичном производстве используют цементацию пастами. В состав паст входят: сажа, углекислый натрий или барий, желтая кровяная соль, шавелевокислый натрий, мазут, декстрин и разжижители. Компоненты разводят до сметанообразного состояния. Пасту наносят кистью или погружают в нее детали. Толщина слоя нанесенной пасты 3—4 мм. Детали укладывают в цементационный ящик. Цементацию осуществляют при температурах 920—930 °С. Цементация пастами позволяет ускорить процесс науглероживания, повысить объем использования печи и улучшить санитарное состояние рабочего места.

При массовом и крупносерийном производствах хорошие результаты дает газовая цементация в специальных герметически закрытых печах. По сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе газовая цементация повышает скорость процесса, увеличивает пропускную способность оборудования и производительность труда, улучшает санитарные условия работы, а также осуществляет автоматизацию и регулирование процесса насыщения металла углеродом.

В ходе газовой цементации атомарный углерод образуется при разложении углеводородов и оксида углерода. Основным углеводородом является метан CH_4 , разложение которого идет по реакции: $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$. Оксид углерода диссоциирует по формуле $2\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$.

Заданную концентрацию углерода в поверхностном слое получают путем автоматического регулирования состава газа (применяют газ-разбавитель, например, эндогаз). Обычно для цементации используют смесь природного газа с эндогазом, что повышает активность газовой среды, характеризуемой углеродным потенциалом (под углеродным потенциалом атмосферы понимают ее науглероживающую способность, обеспечивающую определенную концентрацию углерода на поверхности цементированного слоя). Для цементирования слоя глубиной 1 мм при газовой цементации требуется 3—4 ч (при цементации в твердом карбюризаторе — 10 ч).

Высокую скорость науглероживания (0,12—0,15 мм/ч) обеспечивает жидкостная цементация. Она осуществляется в соляной ван-

не следующего состава: Na_2CO_3 (75—80%), NaCl (10—15%) и SiC (6—10%) (карборунд). Процесс ведется при температуре 850—860 °С. Добавление в ванну хлористого аммония NH_4Cl интенсифицирует процесс. Жидкостная цементация создает возможность закалики зацементированных деталей прямо из соляной ванны и позволяет достигнуть равномерности нагрева.

Защита участков поверхности от цементации и нитроцементации производится путем гальванического меднения, забивкой отверстий и внутренних полостей смесью шамотного или кварцевого песка с порошком окалина. Наиболее трудоемким и сложным является способ гальванического меднения. Довольно успешно применяют антицементационную пасту АЗЛК.

До температуры 800 °С детали можно нагревать в обычной окислительной атмосфере. После достижения 800 °С в печи создают защитную или слабоцементирующую атмосферу. Дальнейший подъем температуры осуществляют по принятой технологии.

После цементации детали подвергают термической обработке для обеспечения высокой твердости поверхности, исправления структуры перегрева и устранения карбидной сетки в цементированном слое. Закалку производят при 780—850 °С с последующим отпуском при 150—200 °С. При этом происходит измельчение зерна цементированного слоя и частично зерна сердцевины. После цементации в твердом карбюризаторе в целях получения мелкозернистой структуры поверхностного слоя и сердцевины выполняют двойную закалку (рис. 9.7). В процессе первой заправки деталь нагревают выше температуры точки A_{c3} на 30—50 °С, в результате чего измельчается структура сердцевины и устраняется цементитная сетка в поверхностном слое. При второй заправке деталь нагревают выше температуры точки A_{c3} на 30—50 °С, вследствие чего измель-

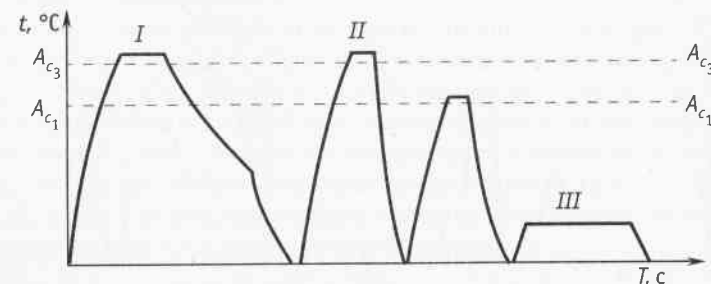


Рис. 9.7. Схема термической обработки деталей машин ответственного назначения после цементации:

I — цементация; II — двойная закалка; III — низкий отпуск

чается структура цементированного слоя, обеспечивается высокая твердость.

Двойная закалка способствует повышению механических свойств изделий, но увеличивает их коробление, окисление и обезуглероживание. Окончательной операцией термической обработки является низкий отпуск при 150—200 °С, уменьшающий остаточные напряжения и не снижающий твердости стали. После двойной закали поверхности слой имеет структуру мартенсита с равномерно распределенными карбидами и небольшим количеством остаточного аустенита. Двойную закалку применяют для тяжело нагруженных деталей машин, от которых требуются высокая твердость, прочность и ударная вязкость.

При газовой цементации детали из мелкозернистой стали подвергают закалке сразу из цементационной печи с предварительным подстуживанием до 840—860 °С (рис. 9.8), а затем отпуску. Подстуживание позволяет уменьшить коробление и количество остаточного аустенита, за счет чего повышается поверхностная твердость. Такой способ закалки исключает возможность окисления и обезуглероживания поверхностных слоев, уменьшает коробление, создает предпосылки для механизации и автоматизации процессов цементации, закалки и отпуска, снижает стоимость термообработки.

Для уменьшения количества остаточного аустенита в цементированном слое высоко- и среднелегированных сталей после закалки рекомендуется их обработать холодом (чаще проводят высокий отпуск при 600—640 °С). В целях уменьшения коробления цементированные детали (например, зубчатые колеса) следует закалывать в горячем масле при 160—180 °С либо в штампах.

В случае нарушения технологии цементации возможно появление брака — при чрезмерной глубине цементированного слоя, наличии мягких пятен на поверхности, возникновении цементиро-

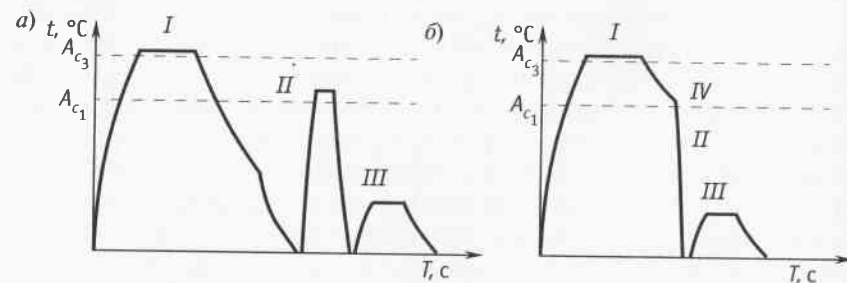


Рис. 9.8. Схема закалки стали после цементации:

а — после охлаждения с цементационной температуры до комнатной; б — с подстуживанием; I — цементация; II — закалка; III — отпуск; IV — подстуживание

ванного слоя на защищенных поверхностях. При недостаточной глубине цементированного слоя, его неравномерности, пониженном количестве углерода в слое или резком перепаде его концентрации проводят повторную цементацию. Повторная закалка цементированных деталей необходима при низкой твердости поверхности, большом количестве остаточного аустенита, феррита или троостомартенсита в их сердцевине.

В последние годы значительное распространение получили ионные азотирование и цементация. При ионной цементации требуется высокая температура нагрева поверхности (900—1050 °С), что достигается либо увеличением удельной мощности, либо применением дополнительного внешнего нагрева цементуемых деталей. При ионной цементации и ионном азотировании наблюдается ускорение диффузионных процессов, особенно в начальной стадии, и сокращается общая длительность насыщения по сравнению с традиционными способами цементации и азотирования.

9.4.2. Азотирование

Азотирование — химико-термическая обработка, при которой происходит диффузионное насыщение поверхностного слоя азотом. В результате азотирования обеспечиваются высокая твердость поверхностного слоя (до 72 HRC₃), высокие усталостная прочность, теплостойкость, минимальная деформация, большая устойчивость против изнашивания и коррозии. Азотирование проводят при температурах 500—520 °С в течение 8—90 ч. Глубина азотированного слоя — 0,1—0,8 мм. По окончании процесса азотирования детали охлаждают до 200—300 °С вместе с печью в потоке аммиака, а затем на воздухе. Повышение температуры ускоряет процесс, но снижает твердость азотированного слоя.

Для нагрева деталей используют специальные герметичные печи, в которые подают аммиак NH₃. При нагреве аммиак разлагается: $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}_{\text{ат}}$. Атомарный азот N поглощается поверхностью стали и проникает в нее. В поверхностном слое азот образует химические соединения — нитриды (железа Fe₂N, хрома CrN, молибдена MoN, алюминия AlN), которые придают стали большую твердость (до 1200 HV¹). Поверхностный слой не поддается травлению. Глубже него находится сорбитообразная структура.

¹ HV — твердость по Виккерсу путем вдавливания в испытуемую деталь (образец) четырехугольной алмазной пирамиды с углом при вершине 136°.

Азотирование проводят по одноступенчатому и двухступенчатому режимам. По одноступенчатому режиму азотируют инструмент из быстрорежущей стали (метчики, зенкеры, сверла, фрезы). Стойкость такого инструмента после обработки увеличивается в два-три раза. Двухступенчатое азотирование применяют для упрочнения штампов горячей штамповки и штамповых вставок. Стойкость штампового инструмента в результате азотирования повышается в 1,5—2 раза. Двухступенчатый режим азотирования позволяет сократить время обработки деталей в два раза. На первой ступени процесс ведут при 500—510 °С с выдержкой 8—10 ч, на второй ступени — при 570—590 °С в течение 18—20 ч. Детали охлаждают вместе с печью до 200 °С. При двухступенчатом режиме азотированный слой получается с меньшей хрупкостью.

Азотированию в целях повышения твердости поверхности подвергают зубчатые колеса, гильзы, валы и другие детали из сталей 38ХМЮА, 38ХВФЮА, 18Х2Н4ВА, 40ХНВА и др.

Азотирование — последняя операция в технологическом процессе изготовления изделий. Перед азотированием проводят полную термическую и механическую обработку (даже шлифование), после азотирования допускается только доводка со съемом металла до 0,02 мм на сторону. Антикоррозионное азотирование любых сталей выполняют на небольшую глубину при температурах 600—700 °С в течение 1—2 ч. Такое азотирование часто совмещают с закалкой при 770—850 °С (стали У8, У10 и др.) с выдержкой 10—15 мин и последующим охлаждением в воде или масле.

На промышленных предприятиях в основном производят *жидкостное азотирование в расплавленных цианистых солях* (40% KCN и 60% NaCN), через которые при 570 °С в течение 1—3 ч пропускают кислород. Толщина азотированного слоя 0,15—0,5 мм. В результате распада солей в сталь диффундирует азот, на поверхности деталей образуется тонкий слой карбонитрида $Fe_3(CN)$ с высоким сопротивлением изнашиванию и коррозии. Азотированный слой не склонен к хрупкому разрушению. Твердость азотированного слоя углеродистых сталей до 350 НВ, легированных — до 1100 НВ. Недостатки процесса — токсичность и высокая стоимость цианистых солей. Жидкостное азотирование рекомендуется для зубчатых колес, штампов, пресс-форм и других деталей. Защита участков поверхности от насыщения азотом производится нанесением олова (гальваническим методом или методом окунания; толщина слоя 10 мкм), обмазкой жидким стеклом с наполнителем (мел, тальк, асбест, окись хрома и др.), химическим никелированием и заделкой отверстий металлическими пробками.

В ряде отраслей промышленности используют *ионное азотирование*, ионитрирование или азотирование в плазме тлеющего разряда. Благодаря своим преимуществам эти виды азотирования постепенно вытесняют газовое азотирование.

Ионное азотирование осуществляют в герметичном контейнере, в котором создается разреженная азотосодержащая атмосфера. Для этой цели применяют чистый азот, аммиак или смесь азота и водорода. Размещенные внутри контейнера изделия подключают к отрицательному полюсу источника постоянной электродвижущей силы. Они выполняют роль катода. Анодом служит корпус контейнера. Между анодом и катодом включают высокое напряжение (500—1000 В) — происходит ионизация газа. Образующиеся положительно заряженные ионы азота устремляются к отрицательному полюсу — катоду. Электрическое сопротивление газовой среды вблизи катода резко возрастает, вследствие чего почти все напряжение, подаваемое между анодом и катодом, падает на сопротивление вблизи катода (на расстоянии нескольких миллиметров от него). Возле катода создается высокая напряженность электрического поля. Ионы азота, входя в эту зону высокой напряженности, приобретают большие скорости и, ударяясь о изделие (катод), внедряются в ее поверхность. Высокая кинетическая энергия, которой обладали ионы азота, переходит в тепловую. Изделие за короткое время (15—30 мин) разогревается до 470—580 °С, происходит диффузия азота в глубь металла, т. е. азотирование. При соударении ионов с поверхностью изделия ионы железа выбиваются с ее поверхности, за счет чего обеспечивается очистка поверхности от окисных пленок, препятствующих азотированию. Это особенно важно для азотирования коррозионно-стойких сталей, у которых пассивирующая пленка обычными способами удаляется с большим трудом.

Ионное азотирование по сравнению с азотированием в печах позволяет сократить общую продолжительность процесса в два-три раза, уменьшить деформацию деталей за счет равномерного нагрева, создает возможность регулирования процесса в целях получения азотированного слоя с заданными свойствами. Азотирование коррозионно-стойких сталей и сплавов достигается без дополнительной депассивирующей обработки. Достигается толщина азотированного слоя 1 мм и более, твердость поверхности — 500—1500 НВ. Ионному азотированию подвергают детали насосов, форсунок, ходовые винты станков, валы и многое другое.

Азотирование можно выполнять в магнитном поле. При сильном постоянном или импульсирующем электромагнитном поле происходит превращение аустенита в мартенсит. Обработываемые

изделия погружают в контейнер. Внутри контейнера, установленного в шахтной электропечи с электромагнитным нагревателем, подают аммиак. Азотирование осуществляют при температурах 550—560 °С. Степень диссоциации аммиака составляет 35—55%. Азотированием в магнитном поле за то же время, что и при обработке в обычных шахтных печах, можно закалить поверхность на значительно большую глубину.

Сравнивая цементацию и азотирование, приходим к следующим выводам:

- время продолжительности цементации больше, чем азотирования;
- упрочненный слой при цементации получается более глубоким и допускает большие удельные давления при эксплуатации детали;
- твердость цементированного слоя в 1,5—2 раза меньше азотированного и сохраняется при нагреве до 180—250 °С, в то время как азотированный слой сохраняет твердость до 600—650 °С.

9.4.3. Цианирование

Цианирование — процесс химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом в расплавленных цианистых солях. Результаты цианирования определяются глубиной слоя, а также концентрацией углерода и азота в поверхностном слое и зависят от температуры и продолжительности процесса. Повышение температуры приводит к увеличению содержания углерода в слое, снижение — к росту содержания азота. Глубина цианированного слоя с повышением температуры возрастает. В зависимости от температуры различают три вида цианирования: низко-, средне- и высокотемпературное.

Низкотемпературное цианирование производят при 550—570 °С в соляных ваннах, содержащих 40% цианистого калия (KCN) и 60% цианистого натрия (NaCN), через которые пропускают сухой воздух. Насыщение стали азотом в этом случае происходит в большей степени, чем углеродом. Низкотемпературное цианирование применяют в целях повышения твердости, износостойкости и теплостойкости инструмента из быстрорежущей стали, а также деталей из среднеуглеродистых сталей. Продолжительность процесса 0,5—3 ч. Глубина цианированного слоя 0,015—0,04 мм.

Среднетемпературное цианирование выполняют при 800—820 °С в расплавленных солях, содержащих 40% цианистого натрия

(NaCN), 40% хлористого натрия (NaCl) и 20% кальцинированной соды (Na_2CO_3). Продолжительность процесса 30—90 мин. Глубина цианированного слоя 0,15—0,35 мм. Детали закаливают прямо из цианистой ванны, а затем отпускают при 180—200 °С. Твердость цианированного слоя после термической обработки 52—62 HRC₃. Цианированный слой содержит 0,8—1,2% азота и 0,6—0,7% углерода.

Высокотемпературное цианирование проводят при 930—960 °С в расплавленных солях, содержащих 8% цианистого натрия, 10% хлористого натрия и 82% хлористого бария (BaCl_2). Продолжительность процесса 1,5—6 ч. Глубина цианированного слоя 0,15—2 мм. Поскольку высокая температура цианирования вызывает рост размеров зерна аустенита, непосредственную закалку не производят. Детали сначала охлаждают на воздухе, а затем подвергают закалке и низкому отпуску. Твердость цианированного слоя после термической обработки 63—65 HRC₃. Цианированный слой содержит 0,2—0,3% азота и 0,8—1,2% углерода. По сравнению с цементацией высокотемпературное планирование уменьшает возможность деформации и коробления деталей сложной формы, обеспечивает более высокое их сопротивление изнашиванию и коррозии, требует меньше времени для проведения процесса. Недостатки цианирования — сильная ядовитость цианистых солей (для каждой ванны необходимо иметь отдельное помещение и совершенные вентиляционные устройства) и относительно высокая стоимость процесса.

9.4.4. Нитроцементация

Нитроцементацией называется процесс химико-термической обработки, при котором происходит одновременное насыщение поверхностных слоев стальных изделий углеродом и азотом в газовой среде. Процесс осуществляют в газовой смеси из науглероживающего газа и диссоциированного аммиака при 850—870 °С, время выдержки 2—10 ч, толщина получаемого слоя 0,2—1 мм. После нитроцементации детали закаливают и затем подвергают низкому отпуску при 160—180 °С. Твердость поверхностного слоя 60—62 HRC₃, при нитроцементации совмещают процессы газовой цементации и азотирования. В газовую смесь входят эндогаз, до 13% природного газа и до 8% аммиака. В рабочее пространство шахтной печи вводят в виде капель жидкий карбюризатор — триэтаноламин.

При глубине слоя больше 1 мм трудно предотвратить его пере- насыщение азотом и образование дефектов структуры, снижающих усталостную прочность. Поэтому для легированных сталей процесс выполняют в атмосфере с минимальным количеством аммиака

(до 3%). В этом случае насыщение слоя углеродом происходит значительно интенсивней, чем азотом. Такой процесс называют *карбонитрированием*. Нитроцементации подвергают преимущественно малолегированные и углеродистые стали при повышенном содержании в них аммиака. По сравнению с газовой цементацией нитроцементацию проводят при более низкой температуре с меньшей продолжительностью процесса, что обеспечивает большую износостойкость деталей, меньшее их коробление, позволяет регулировать насыщение поверхностного слоя. Стоимость процесса нитроцементации ниже стоимости процессов газовой цементации и цианирования. Преимуществом нитроцементации является также безвредность процесса.

9.4.5. Сульфоцианирование

Сульфоцианирование — один из видов химико-термической обработки, при которой поверхность стальных деталей насыщается одновременно серой, углеродом и азотом. Процесс проводят при 580—590 °С в течение 3 ч в ваннах с расплавленными карбидами, поташом, желтой кровяной солью и гипосульфитом натрия. При разложении этих солей образуются атомарные углерод, азот и сера, которые адсорбируются на поверхности изделия и диффундируют в глубь металла. При этом создается наружный слой из сульфидов железа с нитридными включениями и графитом с малой твердостью. Далее располагается слой из карбонитридов. Внутренний слой представляет собой азотистый аустенит. Сульфоцианированные изделия имеют высокий коэффициент трения и очень хорошую износостойкость. Сульфоцианирование применяют для упрочнения металлических фрикционных деталей.

9.4.6. Алитирование, хромирование, силицирование, борирование

Диффузионное насыщение поверхностного слоя стали металлом (алюминием, хромом, кремнием, бором и др.) в целях изменения его состава и структуры называется *диффузионной металлизацией*. В зависимости от металла, используемого для диффузионной металлизации, различают алитирование, хромирование, силицирование, борирование и другие виды химико-термической обработки.

Алитирование — диффузионное насыщение поверхностного слоя стали алюминием в соответствующей среде. Основная цель процесса — получение высокой жаростойкости поверхностей стальных деталей. Алитирование осуществляют в порошкообразных сме-

сях, ваннах с расплавленным алюминием при температурах 700—800 °С в течение 45—90 мин, а также напылением с последующим диффузионным отжигом при 900—1000 °С. Толщина алитированного слоя 0,2—1 мм. Алитированию подлежат детали газогенераторных машин, чугунные колосники, цементационные ящики, чехлы термопар и другие детали из низко- и среднеуглеродистой стали, специальной стали и серого чугуна.

Хромирование — диффузионное насыщение поверхностного слоя стали хромом в соответствующей среде в целях повышения его коррозионной стойкости, жаростойкости, твердости и износостойкости. Для хромирования используют твердую, жидкую и газовую среды. Процесс ведут при 900—1100 °С в течение 5—20 ч. Толщина слоя 0,1—0,3 мм. Твердость хромированного слоя средне- и высокоуглеродистой стали 1200—1300 HV.

Отрицательное свойство хромированного слоя — неспособность удерживать смазочный материал, что компенсируется созданием условий при процессе хромирования для образования на поверхности слоя микротрещин или выполнением пористого хромирования, после чего обрабатывают тонким шлифованием или доводкой.

Силицирование — процесс диффузионного насыщения стали кремнием в соответствующей среде, обеспечивающий повышение коррозионной стойкости и жаростойкости поверхностей стальных изделий, а также резкое увеличение жаростойкости молибдена и некоторых других металлов и сплавов. Силицирование проводят в порошкообразных смесях, состоящих из 60% ферросилиция, 30% окиси алюминия и 1% хлористого аммония, а также в газовой среде во вращающихся ретортах, в которых происходит разложение хлорида кремния (SiCl_4), при 950—1050 °С с выдержкой 2—5 ч. Толщина силицированного слоя 0,5—1 мм. Твердость 200—300 HV.

Борирование — диффузионное насыщение поверхностного слоя стали бором при нагреве в соответствующей среде в целях повышения твердости, коррозионной стойкости, теплостойкости и жаростойкости поверхностей стальных деталей. Различают три способа борирования: электролизное, газовое и жидкое. При электролизном борировании в тигель с расплавленной бурой (950 °С) помещают графитовый стержень (анод) и обрабатываемое изделие (катод). Бура разлагается, образуя атомарный бор, диффундирующий в поверхность детали. Газовое борирование осуществляют при 850—900 °С в газовой смеси, состоящей из диборана B_2H_6 и водорода. Толщина борированных слоев не превышает 0,3 мм. Твердость 1800—2000 HV. Недостаток борированного слоя — высокая хрупкость. Борированию подвергают траки, втулки грязевых и нефтяных насосов и другие сильно изнашивающиеся детали. Жидкое бориро-

вание в соляных ваннах, разработанное ОАО «ВНИИ инструмент», позволяет проводить диффузионное насыщение штампового и резьбонакатного инструмента из легированных инструментальных сталей марок X12M, X6BF, 5XHM, 50XFA и др.

Процесс проходит при температурах, близких к закалочным для этих сталей (950—960 °C), с выдержкой в течение 30—60 мин, обеспечивая получение упрочненного слоя глубиной 15—30 мкм, твердостью 1200—1250 HV (72—73 HRC_{0,3}). Рекомендуемая толщина слоя 150—200 мкм. Детали и инструмент, работающие в условиях абразивного износа с воздействием высоких удельных давлений и ударных нагрузок, обрабатываются в среднетемпературном интервале с толщиной слоя 100 мкм. Для вырубного инструмента необходимая толщина боридного слоя не более 70 мкм.

Ученые России постоянно совершенствуют методы упрочнения металлов, создавая новые технологии.

В металле, находящемся в жидкости под высоким давлением, трещины и раковины исчезают, поры затягиваются, разрывы сглаживаются. Вода залечивает не только внутренние пороки металла. Она устраняет поверхностные раны и трещины, что значительно упрочняет металл.

Ученые заставили воду не только обрабатывать металлические листы, но и изготавливать из металлов различные сверхпрочные изделия и проволоку. Ими создана установка для получения прочной и в то же время весьма пластичной проволоки. В ней проволока выдавливается через небольшое отверстие в жидкость, сжатую до $78\,452,8 \cdot 10^4$ Па (8000 атм). Такая проволока вдвое прочнее полученной обычным волочением. При помощи той же установки можно получать сверла и шестерни, трубы и фасонные детали. Для этого надо лишь сменить рабочий наконечник установки.

Новые методы открывают небывалые возможности для техники XXI в. Академик Л. Ф. Верещагин писал: «Если удастся повысить давление, развиваемое гидравлическими компрессорами, то использование эффекта давления для улучшения пластичности и повышения прочности сталей станет более реальным». В Институте физики высоких давлений создали агрегат, имеющий производительность 25 л/ч при давлении в $156\,905,6 \cdot 10^4$ Па (16 000 атм). Мощную силу воды предполагается использовать для решения важной технической задачи — упрочнения металлических изделий высоким давлением.

Уральский инженер Б. Г. Козин изобрел способ обработки деталей, не имеющих правильной геометрической формы — хрупких и с чистой поверхностью. При обычных способах упрочнения поверхности ее наклепывают — создают в ней сжимающие напряжения.

Так, детали типа валов накатывают, обжимают их поверхность специальными твердыми роликами. Листовые рессоры автомобилей, пружины, штоки молотов, например, бомбардируют сильным потоком дробы. Все это повышает усталостную прочность металла. Инженер Б. Г. Козин предложил вместо роликов и дробы использовать воду. Плавнo меняя давление, можно получить и такую струю, которая бы детали не разрезала, но была бы достаточно сильной, чтобы уплотнить, наклепать их поверхность не хуже дробинok. Для деталей из углеродистых конструкционных сталей вполне достаточно ($39\,226,4—58\,839,6 \cdot 10^4$ Па (4000—6000 атм)). Таким оборудованием является специальное сопло.

9.5. Понятие о лазерной химико-термической обработке (ЛХТО)

Насыщение легирующими элементами при ЛХТО происходит путем диффузии и массопереноса в твердой фазе, из плазмы и жидкой фазы, при этом возможно конвективное и чисто механическое перемещение расплава в зоне воздействия лазерного импульса.

При ЛХТО на поверхность изделия предварительно наносят различными способами (накатка фольги из легирующего материала, электролитическое или химическое осаждение, напыление, электроискровое легирование, нанесение порошков или обмазок) легирующие элементы. ЛХТО обычно осуществляют в режиме расплавления.

Свойства зоны легирования зависят от концентрации легирующих элементов и получения фаз различной степени стабильности и дисперсности, образующихся в процессе охлаждения. Строение и состав зоны термического влияния определяются режимом лазерного облучения: плотностью мощности излучения, временем его действия, числом импульсов, а также концентрацией легирующих компонентов в обмазке.

В настоящее время получены положительные результаты по цементации, азотированию, борированию и диффузионной металлизации железа и стали, а также металлов, не имеющих полиморфных превращений (Al, Ni, Cu и др.).

При цементации железа образуется двухслойная зона, состоящая из белого слаботравящегося слоя с равномерной твердостью 1400 HV и расположенного за ним слоя с твердостью 1000 HV.

Диффузионная металлизация железа возможна при легировании различными металлами. Однако повышение твердости достигается только при растворении ванадия, ниобия, титана и вольфрама.

Высокая износостойкость и кавитационная стойкость (нарушение сплошности внутри) получены при лазерном азотировании из обмазок на сталях 38Х2МЮА и 15ХМФ.

После лазерного борирования деталь имеет твердость в зависимости от режима обработки 1100—2100 НВ. При таком упрочнении достигается высокое сопротивление изнашиванию при различных схемах приложения нагрузки и различных условиях трения. Легирование бором снижает коэффициент трения материала, повышает его износостойкость.

9.6. Способы улучшения свойств инструментальных материалов

В настоящее время более 80% твердосплавных пластин в мире выпускается с различными износостойкими покрытиями, полученными методом *химического осаждения покрытий* CVD (Chemical Vapour Deposition).

В общем случае процессы CVD основаны на протекании гетерогенных (создание в сплаве структуры, состоящей из нескольких фаз) химических реакций в парогазовой среде, окружающей инструмент, в результате которых образуется износостойкое покрытие. При химическом осаждении используются специальные установки, принципиальная схема которых представлена на рис. 9.9.

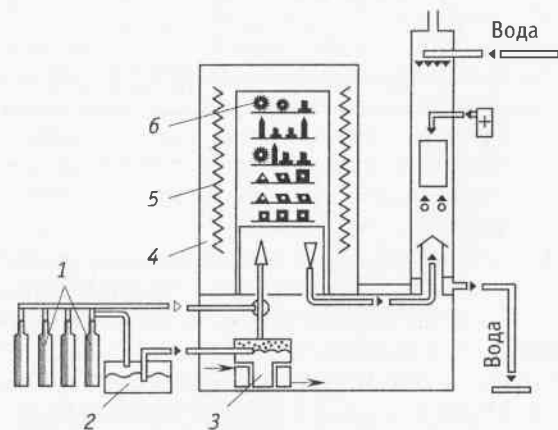


Рис. 9.9. Схема установки для химического осаждения покрытий из газовой фазы на твердосплавный инструмент:
1 — баллоны с газом; 2 — контейнер с галогенидом; 3 — испаритель; 4 — печь; 5 — нагреватель; 6 — режущие инструменты

Осаждение покрытий на твердосплавные инструменты производят в печи, в среде водорода при температуре 900—1100 °С, в которой газообразные галогениды типа $TiCl_4$, $AlCl_3$ взаимодействуют с составляющими смесей — азотом при осаждении нитридов тугоплавких металлов, метаном при осаждении карбонитридов и углекислым газом при осаждении оксидов. Такой метод обеспечивает равномерное нанесение покрытий на все рабочие поверхности инструмента и обладает высокой производительностью, особенно для массового производства. Процессы CVD реализуются при температуре 900—1100 °С, поэтому основной областью его применения является твердосплавный инструмент.

В настоящее время процессы CVD являются полностью контролируруемыми и автоматизированными, они позволяют наносить высокооднородные покрытия на любую основу — твердые сплавы, керамику и сверхтвердые материалы. При этом покрытия наносятся не только на многогранные твердосплавные пластины, но и на монокристаллический твердосплавный инструмент — сверла, концевые фрезы, метчики и др.

Методом химического осаждения покрытий получают соединения Al_2O_3 , TiN , TiC , ZrN , $TiCN$ и др. Основные характеристики некоторых соединений (выборочно) представлены в табл. 9.1.

Таблица 9.1. Некоторые характеристики химических соединений, применяемых для покрытия твердосплавных инструментов

Соединение	Твердость, ГПа	Температура плавления, °С
Al_2O_3	31	2050
TiN	21	2950
TiC	32	3250
VC	26	2850
ZrN	20	2980
ZrC	30	3340
HfN	26	3310

В табл. 9.2 приведены наиболее распространенные характеристики покрытий, наносимые на твердый сплав методом CVD.

Таблица 9.2. Некоторые характеристики соединений, наносимых на твердый сплав методом химического осаждения (CVD) из газовой фазы

Характеристика	Покрyтия в порядке убывания эффективности
Термостабильность, химическая инертность, стойкость к образованию лунки износа	Al_2O_3 , TiN, TiC
Твердость	TiC, Al_2O_3 , TiN
Стойкость к истиранию и изнашиванию по задней поверхности при точении углеродистой стали	Al_2O_3 , TiC, TiN

В настоящее время помимо традиционно используемых одно-слойных покрытий TiN, TiC, TiCN широко используются и многослойные сложно-композиционные покрытия, в которых каждый слой выполняет строго регламентированные функции. При больших температурах резания появилась возможность использования соединений Al_2O_3 , обладающего повышенной термодинамической устойчивостью.

Карбид титана обладает кристаллохимической совместимостью с твердосплавной подложкой, а карбонитрид титана — прекрасной связкой и используется для повышения прочности адгезионной связи между инструментальным материалом и наружным слоем покрытия.

В зависимости от вида процесса резания и типа обрабатываемого материала выбирают состав и толщину износостойких покрытий.

Поверхностно-активными веществами (ПАВ) наносится защитный слой на рабочую поверхность инструмента, что дает эффект износостойкости инструмента.

Обработке подвергают инструмент из инструментальных сталей и твердых сплавов. Размеры инструмента не ограничены. Условием эффективной работы инструмента, обработанного ПАВ, является подача обильной СОЖ с тем, чтобы температура на кромках инструмента не превышала 300 °С.

К термомеханическим относится *метод плазменного напыления*, когда в поток плазмы наносят материалы, которые не разлагаются при высоких рабочих температурах процесса (карбиды, нитриды металлов, металлы и сплавы, оксиды). Такие понятия имеют пористость (10—15%), слоистую структуру и низкую прочность, сцепленные основой. Фазовый состав этих покрытий отличается от состава исходного материала.

Таблица 9.3. Составы износостойких покрытий для нанесения на твердосплавный инструмент методом химического осаждения (CVD)

Обрабатываемый материал	Операция	Материал основы	Рекомендуемые покрытия	Общая толщина покрытия, мкм	$v - v_n^*$, м/мин	$K_{ст}^{**}$
Конструкционные стали типа 38ХС, 35ХГА, ШХ-15 и др.	Точение	T5K10	TiC—TiCN—TiN	8	150—200	3—5
		TT10K8B	TiN—TiCN—TiC	8	180—240	
		TT8K6	TiN— Al_2O_3 —TiCN	10	200—250	
	Фрезерование	TT7K12	TiC—TiCN—TiN	10	100—150	2,5—3
		T5K12	TiN—TiC—TiN	8	140—200	
Чугуны	Точение, фрезерование	BK6	TiC—TiCN—TiN	8	120—180	3—5
		BK10-XOM	TiC— Al_2O_3 —TiN	8	160—220	
		T8K7	TiC— Al_2O_3	6	160—220	
Коррозионно-стойкие, жаропрочные стали аустенитного класса X18H18, X15H5 и др.	Точение, фрезерование	BK6	TiC—TiCN—TiN	8	120—150	2—2,8
		TT8K6	TiN—TiC—TiN	8	150—180	
Жаропрочные деформируемые сплавы ХН60В, ХН77ТЮ, ХН35ВТЮ и др.	Точение	BK6	TiC—TiCN— Al_2O_3	8	25—60	1,8—2,5
		BK8	TiC—TiCN— Al_2O_3	10		
		TT10K8	TiC— Al_2O_3 —TiN	10		

* v — скорость резания инструмента без покрытия; v_n — с покрытием;

** $K_{ст}$ — коэффициент увеличения стойкости (отношение средних значений стойкости инструмента с покрытием и без покрытия).

В отечественной и мировой практике применяются универсальные установки для плазменного напыления, в основном действующие по схемам, представленным на рис. 9.10.

В России применяются универсальные плазменные напылительные установки моделей УПУ и УМП.

Сущность метода детонационного напыления покрытий заключается в нанесении на изделие мелкодисперсного (1–5 мкм) порошка карбида вольфрама или оксида алюминия детонационной волной от взрыва газовой смеси. При этом температура достигает 2000 °С. Толщина покрытия 5–50 мкм.

К достоинствам метода относятся:

- возможность нанесения покрытий на поверхности неограниченных размеров;
- возможность замены быстрорежущей стали углеродистой и одновременного получения эффекта самозатачивания режущих кромок;
- увеличение срока службы инструмента за счет многократного восстановления его оптимальных размеров.

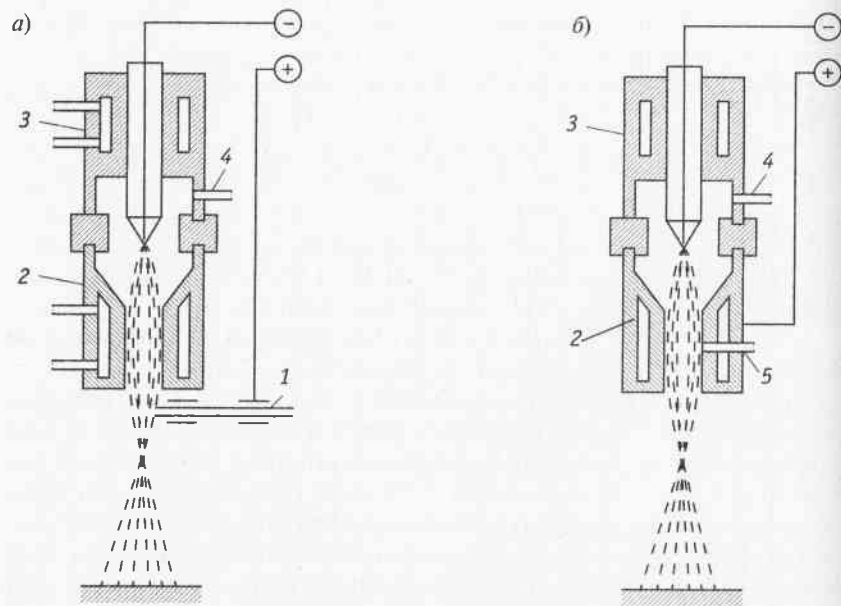


Рис. 9.10. Схема установки для плазменного нанесения покрытий с подачей проволоки (а) и порошка (б): 1 — расплавляемая проволока; 2 — водоохлаждаемый анод (сопло); 3 — водоохлаждаемый катод; 5 — ввод расплавляемого порошка

Схема устройства для детонационного нанесения покрытий приведена на рис. 9.11. В канал ствола 4 через смеситель 1 подается газовая смесь, способная детонировать при зажигании, с одновременной подачей через дозатор 3 порций порошкового материала покрытия. Взрыв газовой смеси при помощи запального устройства 2 концентрирует энергию в пространстве, ограниченном стенками ствола, что создает условия для ускорения и выброса порошка на напыляемую поверхность из открытого конца ствола. Процесс происходит циклически с нанесением за один цикл покрытия толщиной около 6 мкм.



Рис. 9.11. Схема устройства для детонационного нанесения покрытий: 1 — смеситель; 2 — запальное устройство; 3 — дозатор; 4 — канал ствола

Лазерные технологии упрочнения некоторых видов инструмента и оснастки из инструментальных и конструкционных сталей повышают их долговечность. По сравнению с другими видами нагрева лазерный нагрев отличается высокой концентрацией энергии, возможностью локального упрочнения и обработки труднодоступных мест, отсутствием коробления и деформации деталей, возможностью передачи энергии луча на большие расстояния (до 100 м). При лазерной термической обработке устраняется необходимость применения закалочных сред. Высокие скорости нагрева и охлаждения при лазерной обработке (10^6 – 10^7 К/с) позволяют получать измельченную структуру на обработанной поверхности.

Лазерную поверхностную закалку инструмента осуществляют на серийных импульсных установках «Квант-16», «Квант-18».

Методы физического осаждения покрытий PVD (Physical Vapour Deposition) универсальны с точки зрения получения гаммы монослойных, многослойных и композиционных покрытий на основе нитридов, карбидов, карбонитридов, оксидов, боридов тугоплавких металлов IV–VI групп периодической таблицы элементов и позволяют реализовывать процессы нанесения при температурах 300–800 °С, что обеспечивает возможность их применения как для твердых сплавов, так и для быстрорежущих сталей.

При обработке на повышенных скоростях резания PVD-покрытия имеют некоторое преимущество перед CVD-покрытиями. Это связано с тем, что по мере повышения скорости резания и темпера-

туры в зоне обработки PVD-покрытия значительно меньше теряют в твердости.

В настоящее время наиболее распространены покрытия TiN, (Ti, Al)N, TiCN, (Ti, Cr)N и ряд других. Их основные свойства представлены в табл. 9.4.

TiN — является покрытием, получившим наиболее широкое промышленное применение. Относительно простая технология его получения, невысокая стоимость исходных материалов, дешевый и безопасный азот, высокие служебные характеристики способствовали его внедрению в производство.

TiCN — покрытие, обладающее более высокой твердостью и низким коэффициентом трения по сравнению с нитридом титана. В то же время это покрытие является достаточно хрупким.

CrN — покрытие, обладающее высокой пластичностью, хорошими трибологическими свойствами (трибология занимается проблемами трения в прикладном плане, обеспечивая длительность работы машин и механизмов) и химической инертностью к цветным металлам и сплавам.

ZrN — покрытие, которое по свойствам и областям применения аналогично покрытию TiN, но имеет более высокую твердость и низкую пластичность. Оно используется при обработке вязких материалов без СОЖ.

Таблица 9.4. Характеристики покрытий, получаемых методом физического осаждения (PVD)

Покрытие	Цвет	Толщина, мкм	Микротвердость, ГПа	Рабочая температура, °С
TiN	Золотой	2—7	24	550—600
TiCN	Серо-голубой	1—5	37	400
(Ti, Al)N	Фиолетово-черный	1—4	35	800—850
(Ti, Al)CN	Фиолетово-красный	1—4	28	500
CrN	Серебристо-металлический	1—5	18	650
ZrN	Золотисто-белый	1—4	26	550
(Ti, Cr)N	Золотисто-серый	1—6	21	700
(Ti, Al, Cr)N	Бронзовый	1—6	28	850—900

Развитие технологии получения PVD-покрытий связано с получением многокомпонентных нитридных покрытий. Одним из наиболее эффективных покрытий сегодня является покрытие (Ti, Al)N, которое обладает повышенными стойкостью к окислительному износу, теплостойкостью и твердостью по сравнению с другими покрытиями. Также это покрытие показывает хорошие результаты при обработке твердых материалов (например, закаленных подшипниковых сталей), в том числе без применения СОЖ.

При обработке резанием жаропрочных железоникелевых сталей и сплавов, титановых сплавов, нержавеющей сталей и др., когда однокомпонентные покрытия неэффективны, хорошие результаты показывают покрытия (Ti, Nb, Al)N; (Ti, Cr)N; (Ti, Mo)N; (Ti, Hf)N и (Nb, Zr)N.

Наиболее распространены следующие способы осаждения PVD-покрытий: конденсация с ионной бомбардировкой; магнетронное распыление; электронно-лучевое напыление.

Все процессы испарения, плазмохимических реакций, ионной бомбардировки и конденсации покрытия протекают в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом. На рис. 9.12 представлена схема установки для нанесения покрытия методом конденсации с ионной бомбардировкой.

Нанесение покрытий происходит при температурах 300—800 °С в течение 20—80 мин. В качестве распыляемого материала (катода) используются тугоплавкие металлы IV—VI групп периодической таблицы элементов (Ti, Cr, Mo, Zr, Al и др.), а в качестве реакционных газов применяют азот (N₂), метан (CH₄) и кислород (O₂). В результате получают покрытия соответственно в виде нитридов, карбидов, карбонитридов или оксикарбидов тугоплавких металлов. Оптимальная толщина покрытия для быстрорежущего и твердосплавного инструмента составляет порядка 2—8 мкм.

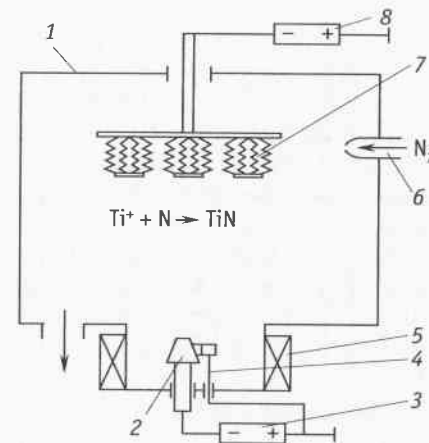


Рис. 9.12. Схема установки для нанесения покрытий на режущий инструмент методом конденсации с ионной бомбардировкой: 1 — корпус вакуумной камеры; 2 — катод; 3 — источник питания разряда; 4 — электрод поджига; 5 — магнитная катушка; 6 — ввод реакционного газа; 7 — режущий инструмент; 8 — источник опорного напряжения

Таблица 9.5. Рекомендации по применению PVD-покрытий

Обрабатываемый материал	Точение	Фрезерование, зенкерование	Сверление	Нарезание резьбы	Развертывание, протягивание
Сталь	TiN; (Ti, Al)N; (Ti, Al, Zr)N	(Ti, Cr)N; (Ti, Al)CN	TiN; TiCN; (Al, Ti)N	(Nb, Zr)N; TiCN; (Al, Ti)N	(Ti, Al)CN; (Al, Ti)N
Чугун	(Ti, Zr)N; (Ti, Al)N	(Ti, Cr)N; (Ti, Al)N	(Ti, Al)N; (Ti, Zr)N	(Al, Ti)N; (Nb, Zr)N	(Al, Ti)N
Алюминиевые сплавы	(Nb, Zr)N; TiCN; (Hf—Zr—Cr)N	Mo ₂ S; (Ti, Cr)N; (Ti, Cr)N + Mo ₂ S	TiN; TiCN; Mo ₂ S; (Ti, Cr)N; (Ti, Cr)N + Mo ₂ S	Mo ₂ S; (Ti, Cr)N + Mo ₂ S	(Ti, Mo)N; TiCN
Титановые сплавы	(Hf, Zr, Cr)N; (Al, Mo)N + + Al ₂ O ₃	(Hf, Zr, Cr)N; CrN	Mo ₂ S; (Al, Ti)N; (Cr, Al)N + Mo ₂ S; (Hf, Zr, Cr)N	Mo ₂ S; TiCN + Mo ₂ S	(Hf, Zr, Cr)N
Никелевые сплавы	(Ti, Nb, Al)N; (Hf, Zr, Cr)N; (Al, Ti)N + Al ₂ O ₃ ; (Ti—Cr)N	(Ti, Cr)N; (Hf, Zr, Cr)N	(Al, Ti)N	(Ti, Zr)N	(Ti, Nb, Al)N
Медь	CrN	CrN	CrN	CrN	(Ti, Cr)N
Латунь, бронза	TiCN; (Al, Ti)N; (Nb, Zr)N	TiCN; (Al, Ti)N; (Ti, Cr)N	TiCN; (Al, Ti)N; (Nb, Zr)N	TiCN	TiCN
Пластик	TiCN; (Ti, Al)N	TiCN; (Ti, Al)N	TiCN; (Ti, Al)N	TiCN; (Ti, Al)N	TiCN; (Ti, Al)N

В табл. 9.5 представлены рекомендации по применению различных покрытий, полученных физическим осаждением в зависимости от вида процесса резания.

Повышенный интерес вызывают разработки, связанные с получением алмазоподобных покрытий (Me-C:H, α-C:H и др.). Такой тип покрытий обусловлен сочетанием свойств, которыми они обладают: высокой микротвердостью; сверхнизким коэффициентом трения; прекрасными изоляционными свойствами; химической инертностью по отношению ко многим обрабатываемым материалам и др.

При осаждении алмазоподобных покрытий часто осуществляют их легирование алюминием, вольфрамом, хромом, титаном и другими металлами.

В табл. 9.6 приведены свойства и области применения некоторых алмазоподобных покрытий.

Таблица 9.6. Некоторые свойства алмазоподобных покрытий

Тип покрытия	Микротвердость, ГПа	Коэффициент трения по стали 45	Рабочая температура, °C	Цвет покрытия	Области применения
Алмазоподобная углеродная пленка (ta-C)	80—100	0,12	500	Черный	Режущий и штамповый инструмент для обработки цветных металлов и их сплавов, полимеров
Алмазоподобная углеродная пленка (ta-CN)	74—80	0,09	600	От черного до темно-коричневого	То же
Алмазоподобная углеродная пленка (ta-CAlN)	47—50	0,07	700	От черного до темно-серого	То же

Таблица 9.7. Сравнение свойств металлорежущих материалов износостойких покрытий, керамики, эльбора, алмаза и твердых сплавов

Материал	Твердость, HV	Теплостойкость, °C	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Методы нанесения покрытия
TiC	2300—2500	1100—1200	0,05	CVD
TiN	2200—2400	1100—1200	0,07	PVD
TiCN многослойное	—	1100—1200	0,04—0,06	CVD
Mo ₂ N	2400—2600	1000—1700	0,04—0,06	PVD
Керамика Al ₂ O ₃	2000—2300	1100—1200	0,01	—
Эльбор BN	8000—8500	1100—1200	0,10	—
Алмаз	9000—9500	700	0,35	—
BK8	1400—1500	1000	0,14	—
T15K6	1500—1600	1000	0,07	—

В табл. 9.7 приведено сравнение свойств различных металлорежущих материалов.

Многослойные покрытия из двух или трех соединений наиболее эффективно защищают от большинства видов износа.

Нанесение покрытий конденсацией с ионной бомбардировкой (КИБ) на быстрорежущий концевой инструмент позволяет значительно увеличить скорость резания и подачу.

В настоящее время 100% мирового производства СМП (сменные многогранные пластины) из твердых сплавов покрываются методами CVD. На быстрорежущий инструмент и детали машин сложной формы также наносят покрытия методами CVD.

Для уменьшения отрицательного влияния высокотемпературного нагрева на обрабатываемый инструмент при нанесении покрытий используют методы PVD.

Поскольку при производстве инструмента в России доминирующим материалом до сих пор остается быстрорежущая сталь, важно

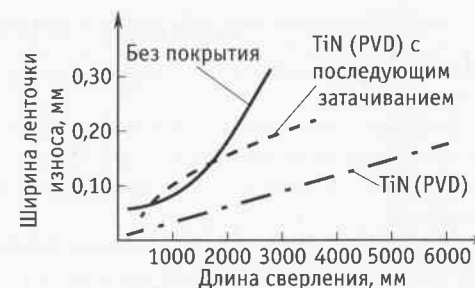


Рис. 9.13. Зависимость износа быстрорежущих сверл диаметром 8 мм с однослойным покрытием TiN (метод PVD) и без покрытия от общей длины сверления (материал: сталь; $v = 25$ м/мин; $s = 0,1$ мм)

представлять, какое влияние оказывают твердые покрытия, нанесенные методами PVD, на производительность обработки этими видами инструмента.

На рис. 9.13 показаны характеристики эксплуатационных свойств быстрорежущих сверл с однослойным покрытием TiN (PVD) в сравнении с такими же свойствами инструмента без покрытий. Производительность обработки сверлами без покрытия уменьшается не только при повышении подачи, но и при повышении скорости резания. Свойства же сверл с покрытием TiN остаются относительно постоянными в широком диапазоне.

На рис. 9.14 приведены характеристики износа быстрорежущих фрез без покрытия, с покрытием TiN и с покрытием TiN, но уже после переточки. Из приведенных зависимостей видно, что после затачивания сохраняется эффект покрытия.

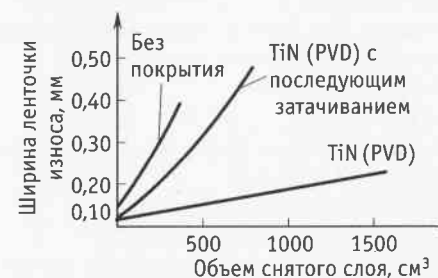


Рис. 9.14. Сравнительная зависимость износа быстрорежущих фрез с покрытиями TiN и без них (фрезерование Сталь 45 без СОЖ; режимы резания: сталь; $v = 70$ м/мин; $t = 2$ мм; $s = 0,1$ мм/з; процесс резания без СОЖ)

Контрольные вопросы

1. Для чего применяют поверхностное упрочнение металлорежущих инструментов?
2. Какие виды обработки относятся к термическим, химическим, химико-термическим и термо-механическим методам?
3. Какие виды обработки относятся к электро-физическим и механическим методам?
4. В чем суть термического метода «пайка-закалка» для быстрорежущего инструмента?
5. Для чего применяется поверхностная закалка стали? Перечислите ее способы.
6. Чем характерен индукционный нагрев металла?
7. В чем суть закалики изделий в электролите?
8. Расскажите о закалке в псевдооживленной среде.
9. Что такое химико-термическая обработка металлов? Перечислите входящие в нее методы.
10. Для чего нужна цементация и как ее произвести в твердом карбюризаторе?
11. Какие виды цементации, кроме как твердым карбюризатором, вы еще знаете?
12. Как определяют глубину цементированного слоя стали?
13. Как производят закалку деталей ответственного назначения после цементации?
14. Сравните цементацию и азотирование, их преимущества и недостатки.
15. Расскажите об одноступенчатом и двухступенчатом азотировании, и их практическом применении.
16. Что такое ионное азотирование?
17. Дайте характеристику низкотемпературного и высокотемпературного цианирования.
18. Сравните нитроцементацию и цементацию.
19. Для чего применяется сульфацианирование, алитирование, хромирование, силицирование и борирование?
20. В чем суть ЛХТО?
21. Что такое CVD и PVD?
22. Какие химические соединения применяются для покрытий твердо-сплавного инструмента CVD?
23. Охарактеризуйте метод плазменного напыления.
24. Опишите метод детонационного покрытия.
25. Что обозначает цвет различных покрытий, нанесенных методом PVD?
26. В чем суть метода PVD-покрытий?
27. В чем эффективность многослойных покрытий?

Инструментальные стали и сплавы**10.1. Классификация инструментальных сталей и сплавов, технические требования к ним**

Инструментальные стали разнообразны по химическому составу, структуре и свойствам после термической или специально упрочняющей обработок. Учитывая, что легированные стали в промышленном производстве являются расходными материалами, из которых изготавливается разнообразная техника и большинство потребительских промышленных товаров, при их выборе следует учитывать экономическую целесообразность.

В табл. 10.1 приведена сравнительная стоимость металлов по отношению к железу (железо принято за единицу).

Таблица 10.1. Относительная стоимость металлов

Металл	Относительная стоимость	Металл	Относительная стоимость
Железо	1	Титан	160
Свинец	2,5	Молибден	170
Цинк	3	Серебро	290
Алюминий	6	Ванадий	750
Сурьма	6,5	Тантал	800
Медь	7,5	Ниобий	800
Магний	8	Рубидий	2200
Марганец	10	Палладий	5000
Никель	17	Золото	11 000
Олово	22	Рений	12 000
Хром	25	Иридий	25 000
Кобальт	35	Осьмий	25 000
Висмут	50	Платина	27 000
Ртуть	65	Родий	45 000
Вольфрам	75		

Инструментальные стали обычно квалифицируют на три группы: нелегированные, легированные, быстрорежущие.

Технические требования для каждой группы определяются конкретными условиями эксплуатации инструмента. К основным условиям относятся высокое давление на поверхности инструмента и разогрев его поверхностей.

Требуемый уровень основных и технологических свойств инструментальной стали должен обеспечивать необходимые конструктивную прочность (надежность) и эксплуатационную стойкость (износостойкость, живучесть) инструментов, а также наименьшую трудоемкость их изготовления. Все это определяется ее химическим составом, технологией изготовления и термической обработкой. Кроме перечисленных к инструментальным сталям предъявляются определенные требования по твердости, прочности, ударной вязкости, теплостойкости (красностойкости), износостойкости, прокаливаемости, обрабатываемости резанием и давлением, шлифуемости, обезуглероживанию и окислению при их нагреве без применения защитных сред, деформируемости при термической обработке, закаливании, прокаливаемости и чувствительности к перегреву.

Свойства и марки нелегированных инструментальных сталей (ГОСТ 1435—90) были рассмотрены выше.

10.2. Инструментальные легированные стали (ГОСТ 5950—2000)

Легированные инструментальные стали разделяют на две группы. К группе I относятся стали для изготовления инструмента, используемого в основном для обработки материалов в холодном состоянии:

13X — для бритвенных ножей и лезвий, острого хирургического инструмента, шаберов, гравировального инструмента;

8XF — для штемпелей при холодной работе, ножей при холодной резке металла, обрезных матриц и пуансонов при холодной обрезке заусенцев, кернеров;

9XF — для рамных, ленточных, круглых строгальных пил: штемпелей при холодной работе, ножей при холодной резке металла, обрезных матриц и пуансонов при холодной обрезке заусенцев, кернеров;

11XF — для метчиков и другого режущего инструмента диаметром до 30 мм, закаливаемого с охлаждением в горячих средах;

X — для зубил, применяемых при насечке напильников, очень твердых кулачков эксцентров и пальцев, гладких цилиндриче-

ских калибров и калиберных колец, токарных, строгальных и долбежных резцов в лекальных и ремонтных мастерских;

9X1 — для валков холодной прокатки, дрессировочных валков, клейм, пробойников, холодновысадочных матриц и пуансонов, деревообрабатывающих инструментов;

12X1 — для измерительного инструмента (плиток, калибров, шаблонов);

6XC — для пневматических зубил и штампов небольших размеров для холодной штамповки, рубильных ножей;

9Г2Ф — для режущего и штамповочного инструмента (плашек, метчиков, ножей для ножниц, измерительного инструмента, штампов для прессования резины и пластмасс);

9XBG — для резьбовых калибров, лекал сложной формы, сложных высокоточных штампов для холодных работ, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению;

6XBG — для пуансонов сложной формы при холодной прошивке преимущественно фигурных отверстий в листовом и полосовом материале, небольших штампов для горячей штамповки, главным образом, когда требуется минимальное изменение размеров при закалке;

9XC — для сверл, разверток, метчиков, плашек, гребенок, фрез, машинных штемпелей, клейм для холодных работ;

B2Ф — для ленточных пил по металлу и ножовочных полотнам;

XGC — для валков холодной прокатки, холодновысадочных матриц и пуансонов, вырубных штампов небольших размеров (диаметром или толщиной до 70 мм) детали марки XGC не может заменить сталь марок XBG, 9XC, XBCGF при изготовлении режущих инструментов;

4XC — для зубил, обжимок, ножниц при холодной и горячей резке металла, штампов горячей вытяжки;

XBCGF — для круглых плашек, разверток и другого режущего инструмента;

XBG — для измерительных и режущих инструментов, для которых повышенное коробление при закалке недопустимо, резьбовых калибров, протяжек, длинных метчиков, длинных разверток, плашек и другого специального инструмента, холодновысадочных матриц и пуансонов, технологической оснастки;

6XB2C, 5XB2CF — для ножей при холодной резке металла, для резбонакатных плашек, пуансонов и обжимных матриц при холодной работе, деревообделочных инструментов при длительной работе;

6X3MFC — для пуансонов, работающих с повышенными динамическими нагрузками, для холодновысадочных штампов, штемпелей

лей, клейм, чеканочных штампов и некоторых слесарно-монтажных инструментов (взамен марок 7ХЗ и 6ХВ2С);

7ХГ2ВМФ — для штампов холодного объемного деформирования и вырубного инструмента сложной конфигурации, используемых при производстве изделий из цветных сплавов и низкопрочных конструкционных сталей;

9Х5ВФ, 8Х6НФТ — для ножей, применяемых при фрезеровании древесины, строгальных пил и других деревообрабатывающих инструментов подобного типа (например, цельных фрез);

6Х4М2ФС — для вырубного и высадочного инструмента (штампов, пуансонов, пневматических зубил и др.), накатного инструмента;

Х6ВФ — для резбонакатного инструмента (роликов и плашек), ручных ножовочных полотен, бритв, матриц, пуансонов, зубонакатников и других инструментов, предназначенных для холодной деформации, для дереворежущего фрезерного инструмента;

8Х4В2МФС2 — для матриц и пуансонов штампов холодного объемного деформирования, испытывающих в процессе эксплуатации давление до 2300 МПа; резбонакатных роликов;

11Х4В2МФС2 — для вырубных штампов, в том числе для обработки холоднокатаных электротехнических сталей марок Э412 и Э413 с покрытиями типа «Карлит», пуансонов и матриц холодновысадочных автоматов, пуансонов и выталкивателей для холодного выдавливания, эксплуатируемых с удельными давлениями до 2000 МПа в условиях повышенного изнашивания и нагрева рабочих поверхностей до 400 °С, шлице- и резбонакатного инструмента;

6Х6В3МФС — для резбонакатных роликов, зубонакатников, шлиценакатников, обрезающих матриц, пуансонов и других инструментов, предназначенных для холодной пластической деформации металлов повышенной твердости, ножей трубообразующих машин, ножей гильотинных ножниц для резки высокопрочных сталей и сплавов, рубильных ножей, применяемых в деревообрабатывающей промышленности, шарошек для разрушения горных пород и других аналогичных инструментов;

Х12, Х12ВМФ — для холодных штампов высокой устойчивости против истирания (преимущественно с рабочей частью округлой формы), не подвергающихся сильным ударам и толчкам, для волоочильных досок и волок, глазков для калибрования пруткового металла под накатку резьбы, гибочных и формовочных штампов, сложных секций кузовных штампов, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению, матриц и пуансонов вырубных и просечных штампов; штамповки активной части электрических машин и электромагнитных систем электрических аппаратов;

Х12МФ, Х12Ф1 — то же, что и для марки Х12, но при необходимости наличия большой вязкости, для профилировочных роликов сложных форм; секций кузовных штампов сложных форм, сложных дыропрошивочных матриц при формовке листового металла, эталонных шестерен, накатных плашек, валок и вырубных пуансонов, просечных штампов (в том числе совмещенных и последовательных) со сложной конфигурацией рабочих частей, штамповки активной части электрических машин.

К группе II относятся марки стали для изготовления инструмента, используемого в основном для обработки металлов давлением при температуре выше 300 °С:

5ХНМ — для молотовых штампов паровоздушных и пневматических молотов массой падающих частей свыше 3 т, прессовых штампов и штампов машинной скоростной штамповки при горячем деформировании легких цветных сплавов, блоков матриц для вставок горизонтальных машин;

5ХНВ, 5ХНВС — для молотовых штампов паровоздушных и пневматических молотов массой падающих частей до 3 т;

7ХЗ, 8ХЗ — для инструмента (пуансонов, матриц) горячей высадки крепежа и заготовок из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей на горизонтально-ковочных машинах, деталей штампов (матриц, пуансонов, выталкивателей) для горячего прессования и выдавливания этих материалов на кривошипных прессах при мелкосерийном производстве, гибочных, обрезающих и просечных штампов;

4ХМФС — для молотовых штампов паровоздушных и пневматических молотов массой падающих частей до 3 т при деформации легированных конструкционных и коррозионно-стойких сталей (вместо менее теплостойких сталей марок 5ХНМ, 5ХНВ), прессового инструмента для обработки алюминиевых сплавов;

5Х2МНФ — для цельных крупногабаритных штампов (со стороной квадрата или диаметром до 600 мм), для штамповки поковок из конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах и кривошипных прессах (вместо менее теплостойких сталей марок 5ХНМ, 4ХМФС), инструментов (зажимных и формующих вставок, наборных и формовочных пуансонов) для высадки конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ), ножей горячей резки;

4ХЗВМФ — для мелких молотовых штампов, молотовых и прессовых вставок (толщиной или диаметром от 300 до 400 мм), инструмента горизонтально-ковочных машин при горячем деформировании конструкционных сталей и жаропрочных сплавов, инструмента

для высокоскоростной машинной штамповки конструкционных сталей;

3Х3М3Ф — для инструмента горячего деформирования на кривошипных прессах и горизонтально-ковочных машинах, подвергающихся в процессе работы интенсивному охлаждению (как правило, мелкого инструмента), пресс-форм литья под давлением медных сплавов;

4Х5МФС — для мелких молотовых штампов, крупных (толщиной или диаметром более 200 мм) молотовых и прессовых вставок при горячем деформировании конструкционных сталей и цветных сплавов в условиях крупносерийного массового производства;

4Х4ВМФС — для инструмента высокоскоростной машинной штамповки, высадки на горизонтально-ковочных машинах, вставок штампов для горячего деформирования легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах и кривошипных прессах (вместо менее теплостойких сталей марок **4Х5В2ФС**, **4Х5МФ1С**, **4Х3ВМФ**), пресс-форм литья под давлением медных сплавов;

4Х5МФ1С, **4Х5В2ФС** — для пресс-форм литья под давлением цинковых, алюминиевых и магниевых сплавов, молотовых и прессовых вставок (толщиной или диаметром от 200 до 250 мм) при горячем деформировании конструкционных сталей, инструмента для высадки заготовок из легированных конструкционных и жаропрочных материалов на горизонтально-ковочных машинах;

4Х2В5МФ — для тяжелонагруженного прессового инструмента (мелких вставок окончательного штампового ручья, мелких вставных знаков, матриц и пуансонов для выдавливания и т. п.) при горячем деформировании легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов;

5Х3В3МФС — для тяжелонагруженного прессового инструмента (прошивных и формирующих пуансонов, матриц и т. п. инструмента для высадки на горизонтально-ковочных машинах и вставок штампов напряженных конструкций), для горячего объемного деформирования конструкционных сталей и жаропрочных сплавов (вместо менее теплостойких сталей марок **3Х2В8Ф** и **4Х2В5МФ**), наиболее высокие прокаливаемость и теплостойкость имеет сталь марки **5Х3В3МФС**;

05Х12Н6Д2МФСГТ — для инструмента формообразующих деталей пресс-форм формования резинотехнических и пластмассовых изделий.

Для получения необходимой твердости следует учесть, что каждая из перечисленных инструментальных легированных сталей имеет оптимальную температуру закалки и охлаждающую среду.

10.3. Быстрорежущие стали

Инструментальные быстрорежущие стали получили такое название потому, что в период их внедрения они работали на значительно больших скоростях резания, не утрачивая своих свойств, чем инструментальные углеродистые и легированные стали. С повышением скорости резания повышается температура нагрева режущей части инструмента. Углеродистые, а также большинство легированных инструментальных сталей при температурах 250—300 °С теряют свою твердость вследствие изменения структуры, поэтому не могут использоваться в качестве инструмента, работающего при больших скоростях резания.

Замечательное свойство быстрорежущих сталей — высокая теплостойкость, т. е. способность сохранять высокую твердость и режущую способность при нагреве до 600—650 °С. Это свойство выделяет быстрорежущие стали из числа всех других инструментальных сталей. Теплостойкость определяется в основном двумя факторами: химическим составом и термической обработкой. Быстрорежущие стали имеют сложный химический состав. Наиболее важным легирующим элементом их является вольфрам (6—18%). Они содержат также ванадий (1—5%). Вольфрам и ванадий почти целиком находятся в виде карбидов, которые, растворяясь в кристаллической решетке железа, обеспечивают теплостойкость сталей. Во все быстрорежущие стали входит хром (3—4,5%), большая часть которого растворяется в кристаллической решетке железа. Содержащиеся в быстрорежущих сталях легирующие элементы уменьшают критическую скорость закалки, в результате чего стали становятся самозакаливаться — они закаляются даже при охлаждении на воздухе. Некоторые быстрорежущие стали содержат кобальт, который повышает их теплостойкость, так как препятствует разрастанию карбидов при нагреве. Однако с увеличением содержания кобальта и ванадия шлифуемость сталей ухудшается, повышается их чувствительность к обезуглероживанию. Для того чтобы придать быстрорежущим сталям высокие режущие свойства, их подвергают термической обработке по специальному режиму, который отличается от термической обработки других инструментальных сталей (см. гл. «Основы термической обработки»).

Для быстрорежущих сталей принят следующий принцип маркировки: в начале марки стоит буква Р, следующая за ней цифра указывает среднюю массовую долю карбидов вольфрама в процентах, массовую долю карбидов ванадия (в процентах) показывает цифра, стоящая за буквой Ф, молибдена — цифра за буквой М, кобальта —

цифра за буквой К. Массовую долю хрома в марке не указывают, так как она примерно одинакова у сталей всех марок. Если массовая доля ванадия менее 2%, ее также не указывают. Быстрорежущие стали имеют в своем составе массовую долю углерода от 0,7 до 1,20% (тем выше, чем больше содержится ванадия). Например, в стали марки P18K5Ф2 содержится в массовых долях 18% карбидов вольфрама, 5% кобальта, 2% карбидов ванадия, углерода до 0,95%, хрома до 4,4%, молибдена менее 1%.

ГОСТ 19265—73 регламентирует быстрорежущие стали, которые условно можно разделить на две группы: первая группа — стали, не содержащие кобальта, вторая группа — стали, содержащие повышенное количество кобальта и ванадия (см. табл. 10.2).

Стоимость быстрорежущих сталей примерно в пять раз выше стоимости других легированных инструментальных сталей, поэтому ее следует применять в конкретных условиях, исходя из экономической целесообразности.

Таблица 10.2. Твердость и теплостойкость часто применяемых марок быстрорежущих сталей, для изготовления режущих инструментов

Группа быстрорежущих сталей (стандарт ИСО 4957)	Марка (ГОСТ 19265—73)	Твердость, HRC ₃	Теплостойкость, °С, при твердости 59 HRC ₃
Базовая	P6M5	64—66	650
	P18	64—65	620
С увеличенным содержанием С и V	P6M5Ф3	64—66	630
Содержащие Со	P6M5K5	64—66	630
	P9M4K8	64—67	630
	P18K5Ф2	67—68	635
	P9K5	65—67	630
	P2AM9K5	65—66	630
	P12Ф3	65—67	630
	11P3AM3Ф2	64—65	620

Таблица 10.3. Твердость и красностойкость порошковых быстрорежущих сталей

Марка стали	Твердость, HRC ₃	Красностойкость при 59 HRC ₃ , °С
6M5Ф3-МП	66—67	630
P6M5K5-МП	67—68	635
P12MФ5-МП		
P9M4K8-МП	66—68	640
P12M3K5Ф2-МП		635
P7M2Ф6-МП	65—66	625

Структура и свойства быстрорежущих сталей повышенной теплостойкости резко улучшаются при изготовлении их методом порошковой металлургии. Этот метод обеспечивает равномерное распределение дисперсных (диаметром не более 1,0 мкм) эвтектических карбидов по сечению заготовки любого размера и улучшает шлифуемость стали. Порошковые быстрорежущие стали отличаются от аналогичных по химическому составу сталей, изготовленных по традиционной технологии, повышенными массовыми долями углерода и ванадия и более высокой объемной долей дисперсных высокотвердых карбидов типа MC в структуре. Благодаря чему порошковые быстрорежущие стали после термической обработки по оптимальным режимам приобретают повышенные значения вторичной твердости (на 1—3 HRC₃). Повышаются теплостойкость и сопротивление изнашиванию при трении (табл. 10.3). Их применяют при изготовлении тяжелонагруженных и высокопроизводительных режущих инструментов. Например, сталь P7M2Ф6-МП с наиболее высокими массовыми долями углерода и ванадия изготавливают только методом порошковой металлургии. Ее применяют взамен кобальтосодержащих сталей на чистовых операциях резания жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов.

Порошковые быстрорежущие стали позволяют повысить стойкость инструмента в 1,3—2 раза по сравнению с аналогичными марками, полученными обычной технологией. Например: P6M5Ф3-МП и P6M5Ф3; P6M5K5-МП и P6M5K5; P9M4K8-МП и P9M4K8.

При выборе режущего инструмента необходимо знать свойства материала, из которого он изготовлен. Для сопоставления свойств инструментальных материалов приведена табл. 10.4.

Таблица 10.4. Некоторые характеристики инструментальных материалов (выборочно)

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Твердость, HRA, не менее	Теплостойкость (красностойкость), °C
Быстрорежущая сталь	7,9—8,75	До 80	До 700
Твердые сплавы	11,1—14,8	87—92	800—1000
Керамика:			
оксидная	3,6—4,0	До 94	2000
смешанная (керметы)	4,4—4,7	До 95,3	1400
Кубический нитрид бора	3,45	—	1500
Алмазы искусственные	3,48—3,56	—	800

В процессе обработки различных материалов лезвие инструмента из быстрорежущей стали подвергается износу, рациональное значение которого обозначено в табл. 10.5.

Таблица 10.5. Значения износа инструментов из быстрорежущей стали по задней поверхности

Инструмент	Величина износа, мм	
	при обработке сталей	при обработке чугунов
Резцы проходные, расточные, резбовые:		
для черновой обработки	1,5—2	—
для чистовой обработки	0,8—1,2	—
Резцы фасонные:		
для черновой обработки	0,8—1,0	—
для чистовой обработки	0,3—0,5	—
Сверла спиральные диаметром, мм:		
до 6	0,4—0,6	0,4—0,6
7—20	0,6—0,8	0,6—0,8
свыше 20	0,8—1,2	0,8—1,2
Зенкеры	1,2—1,5	1,2—1,5

Окончание табл.

Инструмент	Величина износа, мм	
	при обработке сталей	при обработке чугунов
Развертки	0,6—0,8	0,6—0,8
Метчики:		
машинные	0,7P	P
гаечные	0,5P	—
Плашки круглые	0,25P	—
Гребенки:		
круглые	P	—
тангенциальные	1,2P	—
Гребенчатые фрезы, диаметром, мм:		
8—20	0,2P	—
30—100	0,3P	—
Фрезы червячные	0,2—6,7	0,2—0,7
Долбяки зуборезные	0,2—0,5	—
Резцы зуборезные для обработки конических колес:		
для черновой обработки	0,8—1,0	—
для чистовой обработки	0,3—0,4	—
Фрезы торцевые	1,2—1,5	1,5—2
Фрезы дисковые, концевые	0,3—0,5	0,4—0,6
Фрезы прорезные и отрезные	0,1—0,2	0,4—0,5
Протяжки:		
для черновой обработки	1,5—2	1,5—2
для чистовой обработки	0,2—0,3	0,2—0,3

Примечание. P — шаг резьбы.

Несмотря на стремление специалистов и организаций разных стран к созданию и неукоснительному введению в практику комплекса международных стандартов, своеобразие и особенности национальных стандартов служат серьезным препятствием на пути интернационализации знаний в различных областях науки и техники.

Известно, что стандарты, правила и нормы разных стран имеют значительные различия в оформлении конструкторской, машиностроительной и проектной строительной документации, в наименованиях, маркировке и классификации сталей, сплавов, пластических масс и резин. Это затрудняет совместную работу специалистов из разных стран мира, создает препятствия в работе по выполнению заказов зарубежных фирм, тормозит освоение зарубежной техники. Первой попыткой создания справочно-методического пособия для отыскания и выявления аналогов сталей и сплавов в национальных стандартах является «Международный Транслятор современных сталей и сплавов». В качестве основы сопоставления принимались: стандарты СССР — ГОСТы, США — ASME и AISI, ФРГ — DIN, Япония — JIS. В табл. 10.6 приведены марки быстрорежущих сталей, применяемых за рубежом и в России.

Таблица 10.6. Марки быстрорежущих сталей, применяемых за рубежом и их аналоги в России

Нормативный документ	Марка стали	Аналог по ГОСТу 19265—73
ATM; AISI (США)	M2	P6M5
	T1	P18
	M3	P6M5Ф3
DIN 17350—80 (Германия)	S6—5—2	P6M5
	S6—5—3	P6M5Ф3
	S6—5—2—5	P6M5K5
NFA 35—590—78 (Франция)	6—5—2	P6M5
	18—0—1	P18
	6—5—2—5	P6M5K5
JIS 4403—83 (Япония)	КН-9	P6M5
	КН-52	P6M5Ф3
	КН-2	P18
	КН-55	P6M5K5

10.4. Твердые сплавы

В инструментальном производстве широко распространены твердые спеченные сплавы (ГОСТ 3882—74). Они состоят из смеси порошков карбида вольфрама (основа) с массовой долей 66—97% и кобальта (3—25%). В зависимости от марки сплава в него добавляют такие компоненты, как карбид титана с массовой долей 3—30% и карбид тантала (2—12%). Физико-механические свойства сплавов: $\sigma_{изг} = 1176—2156$ МПа ($120—220$ кгс/мл²), плотность $\gamma = 9,6—15,3$ г/см³, твердость 79—92 HRA. По массовой доле компонентов порошков в смеси твердые спеченные сплавы подразделяют на три группы: вольфрамовые, титановольфрамовые и титанотанталовольфрамовые; по области применения — на сплавы для обработки материалов резанием, для оснащения горного инструмента, для бесстружковой обработки металлов, для деталей и наплавки быстро изнашивающихся деталей машин, приборов и приспособлений.

В зависимости от обрабатываемого материала и характера обрабатываемой стружки твердые сплавы подразделяются на шесть групп по областям применения: Р, М, К, N, S и H (табл. 10.7).

Таблица 10.7. Группы резания твердых сплавов

Группа резания	Основная область применения
Р (синий)	Обработка материалов, дающих сливную стружку (в основном стали)
М (желтый)	Обработка материалов, дающих как сливную стружку, так и стружку скалывания (коррозионно-стойкие стали и сплавы)
К (красный)	Обработка чугунов, дающих стружку скалывания
N (зеленый)	Обработка алюминиевых и медных сплавов
S (коричневый)	Обработка труднообрабатываемых материалов (жаропрочные стали и сплавы, титан и его сплавы)
H (серый)	Обработка закаленных и литейных чугунов

Группы резания подразделяются на группы применения, которые обозначаются числовым индексом, группа резания обозначается буквой. Чем выше число индекса в обозначении группы при-

менения, тем ниже износостойкость твердого сплава и допускаемая скорость среза (подача и глубина резания) (табл. 10.8).

Крупные производители стремятся создать сплавы, максимально сочетающие преимущества универсальных и специализированных марок. На сегодня в производстве твердосплавного инструмента в России сохраняется специализация марок для узкой области применения. Основными изготовителями отечественных марок твердых сплавов являются ОАО «Кировоградский завод твердых сплавов» (КЗТС), ФГУП «ВНИИТС» и ОАО «Сандвик — МКТС» (см. табл. 10.8).

Таблица 10.8. Распределение отечественных марок твердых сплавов без покрытия по группам применения

Основная группа применения	Марки твердых сплавов		
	КЗТС	ВНИИТС	Сандвик — МКТС
P01	T30K4	BT 100	MP1
P10	T15K6	BT 110	MP1
P20	T14K8	BT 120	MP2
P25	TT20K9	BT 120	MP3
P30	T5K10, TT10K8Б	BT 130, BT 141	MP3
P40	TT7K12	BT 142	MP4
M10	TT8K6	BT 310	TK15
M20	TT10K8-Б	BT 220	TK20
M30	BK100M	BT 332	TK25
M40	TT7K12	BT 142	MP4
K01	RK3M	BT 301	TK10
K05	BK60M	BT 210	TK10
K10	BK6M, TT8K6	BT 310	TK15
K15	T8K7	BM 315	TK20
K20	BK6	BT 323	TK20
K30	BK8, BK100M	BT 331	TK25

ГОСТ 19042—80 предусматривает классификацию и систему обозначений сменных многогранных пластин, которые классифицируются по форме, наличию заднего угла, классу допуска, наличию отверстия и стружколомающих канавок (табл. 10.9).

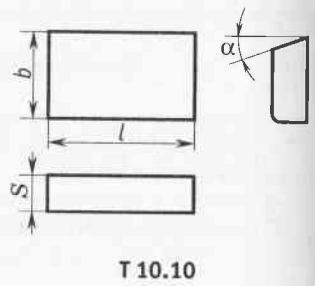
Таблица 10.9. Обозначение режущей пластины
TNUM 16 04 08 TR

№	Конструкция пластин	Буквенно-цифровое обозначение	Цифровое обозначение
1	Буква (цифра), обозначающая форму пластины	T	01
2	Буква (цифра), обозначающая задний угол	N	1
3	Буква (цифра), обозначающая класс доступа	U	1
4	Буква (цифра), обозначающая конструктивные особенности пластин	M	4
5	Цифра, обозначающая размер пластины	16	16
6	Цифра, обозначающая рабочую толщину пластины	04	04
7	Цифра и буква, обозначающие радиус при вершине	08	08
8	Буква, обозначающая исполнение режущей кромки	T	—
9	Буква, обозначающая направление резания	R	—
10	Особые обозначения изготовителя

Для примера ниже приведены (выборочно) некоторые ГОСТы, регламентирующие наплавляемые твердосплавные пластины для различного металлообрабатывающего инструмента (см. таблицы 10.10—10.19), выборочно.

Таблица 10.10. Напайаемые твердосплавные пластины для токарного инструмента по ГОСТу 25395—90

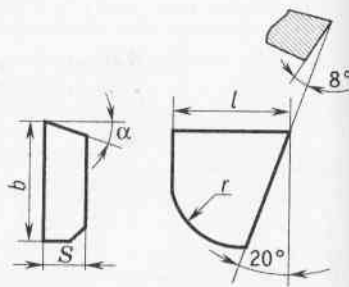
ГОСТ	Обозначение		Размеры, мм			
	ISO		l	b	S	α°
	Тип 01, исполнение 1					
01311	C6		6	4	2,5	0
01371	C12		12	8	5	18
01391	C16		16	10	6	18
01151	C20		20	12	5	18
01411	C25		25	14	8	18
01431	C32		32	18	10	18



Т 10.10

Таблица 10.11. Напайаемые твердосплавные пластины для токарного инструмента по ГОСТу 25397—90

Обозначение пластин		Размеры, мм					
ГОСТ	ISO	l	b	S	r	α°	
		Тип 06, левая					
06100	—	16	14	5	8	18	



Т 10.10

Таблица 10.12. Напайаемые твердосплавные пластины для токарного инструмента по ГОСТу 25426—90

Обозначение пластин		Размеры, мм				
ГОСТ	ISO	l	b	S	r	α°
		Тип 07,67, правая				
07070	AB12	12	8	5	5	18
07090	GB16	16	10	4	6	18



Т 10.10

Таблица 10.13. Напайаемые твердосплавные пластины для токарного инструмента по ГОСТу 25396—90

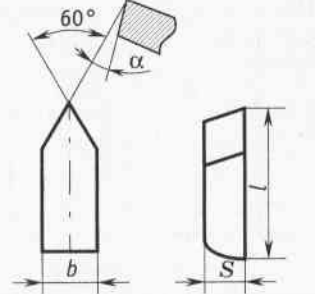
Обозначение пластин		Размеры, мм				
ГОСТ	ISO	l	b	S	r	α°
		Тип 10, исполнение 1, левая				
10061	—	10	6	3,5	4	18
10161	B20	20	12	7	7	18
10541	B25	25	14	8	8	18



Т 10.10

Таблица 10.14. Напайаемые твердосплавные пластины для токарного инструмента по ГОСТу 25398—90

Обозначение пластин		Размеры, мм			
ГОСТ	ISO	l	b	S	α°
		Тип 11			
11130	EA3	3	10	2,5	6
11150	EA4	4	12	3	6
11170	EA5	5	14	3,5	6



Т 10.10

Таблица 10.15. Напайаемые твердосплавные пластины для токарного инструмента по ГОСТу 17163—90

Обозначение пластин		Размеры, мм				
		l	b	S	α°	
ГОСТ	ISO	Тип 13, исполнение 2				
13492	—	3	10	3	0	
13532	—	4	12	4	18	
13572	—	5	14	5	18	
13592	—	6	16	6	18	

Таблица 10.16. Напайаемые твердосплавные пластины для токарного инструмента по ГОСТу 25404—90

Обозначение пластин		Размеры, мм				
		l	b	S	α°	
ГОСТ	ISO	Тип 15, левая т				
1504	—	16	10	4	15	

Таблица 10.17. Напайаемые твердосплавные пластины для фрезерного инструмента по ГОСТу 25408—90

Обозначение пластин		Размеры, мм					
		l	b	S	r	α°	
ГОСТ	ISO	Тип 20, левая					
20100	—	25	20	4	20	15	

Таблица 10.18. Напайаемые твердосплавные пластины, для сверл глубокого сверления по ГОСТу 25415—90

Обозначение пластин		Размеры, мм						
		l	b	b_1	S	r	α°	
ГОСТ	ISO	Тип 38, исполнение 2						
38212	38212	40	40	23	6	10	20	

Таблица 10.19. Напайаемые твердосплавные пластины для нарезания трапецидальной резьбы по ГОСТу 25422—90

Обозначение пластин		Размеры, мм				
		l	b	b_1	r	
ГОСТ	ISO	Тип 48				
48050	—	16	5,5	2,1	4	
48070	—	18	8,5	3,4	6	

Выделяют следующие марки сплавов для обработки материалов резанием:

ВКЗ — чистовое точение с малым сечением среза, окончательное нарезание резьбы, развертывание отверстий и других аналогичных видов обработки серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов (резины, фибры, пластмассы, стекла, стеклопластиков и т. д.); резка листового стекла;

ВКЗ-М — чистовая обработка (точение, растачивание, нарезание резьбы, развертывание) твердых, легированных и отбеленных чугунов, цементированных и закаленных сталей, а также высокоабразивных неметаллических материалов;

ВК6-ОМ — чистовая и получистовая обработка твердых, легированных и отбеленных чугунов, закаленных сталей и некоторых

марок коррозионно-стойких высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена (точение, растачивание, развертывание, нарезание резьбы, шабрение);

БК6-М — получистовая обработка жаропрочных сталей и сплавов, коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, специальных твердых чугунов, закаленного чугуна, твердой бронзы, сплавов легких металлов, абразивных неметаллических материалов, пластмасс, бумаги, стекла; обработка закаленных сталей, а также сырых углеродистых и легированных сталей при тонких сечениях среза на весьма малых скоростях резания;

ТТ8К6 — чистовое и получистовое точение, растачивание, фрезерование и сверление серого, ковкого и отбеленного чугуна; непрерывное точение с небольшими сечениями среза стального литья, высокопрочных, коррозионно-стойких и закаленных сталей; обработка сплавов цветных металлов и некоторых марок титановых сплавов при резании с небольшими сечениями среза;

БК6 — черновое и получерновое точение, предварительное нарезание резьбы токарными резцами, получистовое фрезерование сплошных поверхностей, рассверливание и растачивание отверстий, зенкерование серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов;

БК8 — черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, строгание, черновое фрезерование, сверление, черновое рассверливание, черновое зенкерование серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов; обработка коррозионно-стойких, высокопрочных и жаропрочных труднообрабатываемых сталей и сплавов, в том числе сплавов титана;

БК10-ХОМ — сверление, зенкерование, развертывание, фрезерование и зубофрезерование стали, чугуна, некоторых труднообрабатываемых материалов и металлов цельнотвердосплавным, мелкокоразмерным инструментом;

БК15 — режущий инструмент для обработки дерева;

Т30К4 — чистовое точение с малым сечением среза (типа алмазной обработки), нарезание резьбы и развертывание отверстий незакаленных и закаленных углеродистых сталей;

Т15К6 — получерновое точение при непрерывном резании, чистовое точение при прерывистом резании; нарезание резьбы токарными резцами и вращающимися головками; получистовое и чистовое фрезерование сплошных поверхностей; рассверливание и растачивание предварительно обработанных отверстий, чистовое

зенкерование, развертывание и другие аналогичные виды обработки углеродистых и легированных сталей;

Т14К8 — черновое точение при неравномерном сечении среза и непрерывном резании, получистовое и чистовое точение при прерывистом резании; черновое фрезерование сплошных поверхностей; рассверливание литых и кованых отверстий, черновое зенкерование и другие подобные виды обработки углеродистых и легированных сталей;

Т5К10 — черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании; фасонное точение, отрезка токарными резцами, чистовое строгание; черновое фрезерование прерывистых поверхностей и другие виды обработки углеродистых и легированных сталей, преимущественно в виде поковок, штамповок и отливок по корке и окалине;

ТТ7К12 — тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке с раковинами при наличии песка, шлака и различных неметаллических включений при равномерном и неравномерном сечении среза и наличии ударов; все виды строгания углеродистых и легированных сталей; сверление отверстий в стали; черновое фрезерование углеродистых и легированных сталей;

ТТ10К8-Б — черновая и получистовая обработка некоторых марок труднообрабатываемых материалов, коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, маломагнитных и жаропрочных сталей и сплавов, в том числе титановых;

ТТ20К9 — фрезерование глубоких пазов и других видов обработки стали; сплав хорошо сопротивляется тепловым и механическим циклическим нагрузкам;

Т8К7 — фрезерование труднообрабатываемых чугунов.

10.5. Керамические материалы для обработки резанием

ГОСТ 25003—81 регламентирует многогранные сменные керамические пластины марок ВОК-60, ВОК-71 и В-3. Пластины имеют различную конфигурацию, размеры и массу, а также буквенные и цифровые обозначения. Основной частью металлокерамических материалов является оксид алюминия с добавкой вольфрама, титана, тантала и кобальта. Керамика отличается высокой теплостойкостью (1200 °С) и износостойкостью. При чистовом обтачивании чугуна скорость резания доходит до 3700 м/мин, что в два раза выше, чем у твердых сплавов.

Введение в состав минералокерамики металлов или карбидов металлов улучшает ее физико-механические свойства при уменьшении хрупкости.

ГОСТ 26630—85 предлагает керамические инструментальные материалы оксидного и оксидно-карбидного типов, предназначенные для оснащения режущего инструмента.

Основные марки керамики, применяемые в России и в зарубежных странах, приведены в табл. 10.20. В табл. 10.21 приведены группы резания, марки керамики и области их применения.

Таблица 10.20. Основные марки керамики, применяемые в России и в зарубежных странах

Марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав
SL500	CeramTec (Германия)	Si_3N_4 + покрытие
SL550		Si_3N_4 + многослойное покрытие (тонкое на основе Ti + толстое на основе Al_2O_3)
SL800		Si_3N_4 + покрытие
FX105	Toshiba Tungaloy (Япония)	Si_3N_4 + покрытие
WA1	NTK Cutting Tools (США)	Si_3N_4 + SiC_w
SP1		Si_3N_4 + покрытие CVD
HC1		Al_2O_3
HC2		Al_2O_3 + покрытие
HC5		
HC4		
HC6		
AC5	Kennametal (США)	Al_2O_3 + ZrO_2
KY1615		Al_2O_3 + TiCN
KY4400		Al_2O_3 + TiCN + покрытие PVD — TiN
KY4300		Al_2O_3 + SiC_w
KY2100		Si—Al—O—N (сиалон)
KY3400		Si_3N_4 + покрытие CVD Al_2O_3 + TiN
KY3500		Si_3N_4

Окончание табл.

Марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав
CC620	Sandvik Coromant (Швеция)	Al_2O_3 + ZrO_2
CC650		Al_2O_3 + TiC
CC670		Al_2O_3 + SiC_w
CC680		Si—Al—O—N (сиалон) S_3N_4 + $\text{Al}_2\text{O}_3\text{Y}_2\text{O}_3$
CC690		Si_3N_4
GC6090		Si_3N_4
CC1690 покрытие TiN		Si_3N_4 + покрытие TiN
WIDALOX G	WIDIA (Германия)	Al_2O_3 + ZrO_2
WIDALOX H		Al_2O_3 + Ti(C, N)
WIDALOX R		Al_2O_3 + ZrO_2 + TiC
WIDIANIT N2000		Si_3N_4
SZ200	Ssang Yong Cement Industrial (Республика Корея)	Al_2O_3 + ZrO_2 p
ST100		Al_2O_3 + TiC
ST300		Al_2O_3 + TiCN
SD200		TiC + Al_2O_3
SN26		Si_3N_4
SN300		Si_3N_4
SN400		Si_3N_4
SN500		Si_3N_4
SN700		Si_3N_4 + TiN
BO-100	Россия	Al_2O_3 + оксиды
ВОК-200		Al_2O_3 + TiC
ВОКС-300		Слоистый керамический материал на твердосплавной подложке
ГВИН-200		Si_3N_4 + оксиды
ГВИН-400		Al_2O_3 + SiC_w
ОНТ-20		Al_2O_3 + TiN

Примечание. PVD — метод физического осаждения покрытий; CVD — метод химического осаждения покрытий.

Таблица 10.21 представляет возможность выборочно определить по различным маркам керамики некоторых фирм области их применения.

Таблица 10.21. **Группа резания, марки керамики и области ее применения**

Марка	Группа резания	Область применения
<i>Ceram Tec SPK</i>		
SL500	—	Высокоскоростная черновая и чистовая обработка чугунов с пластинчатым, шарообразным и вермикулярным графитом
SL550	—	Высокоскоростная обработка чугунов
SL800	—	Высокоскоростная обработка чугунов; точение чугунов
<i>WIDIA Valenite Heinlein</i>		
WIDALOX G	CA-K10	Высокоскоростное точение серого чугуна и точение стали при благоприятных условиях
WIDALOX H	CM-K05	Точение закаленного чугуна и закаленных материалов
WIDALOX R	CM-K10	Точение закаленного чугуна и закаленных материалов
WIDIANIT N2000	CN-K15	Обработка серого чугуна ($a_p < 8$) и закаленного чугуна; пригоден для прерывистого резания с пониженной подачей и глубиной резания; может использоваться с охлаждающей жидкостью и без нее
<i>Sandvik Coromant</i>		
CC620	K01	Высокоскоростная обработка стали и чугунов
CC650	K01, M10	Чистовая обработка чугуна, закаленной стали, жаростойких специальных сплавов
CC670	K10, M10—M25	Обработка специальных жаростойких сплавов и материалов с высокой твердостью

Продолжение табл.

Марка	Группа резания	Область применения
CC680	K10	Тяжелое прерывистое резание серого чугуна; обработка жаростойких материалов
CC690	—	Черновая и получерновая обработка чугунов
CC6090	K10	Черновая обработка в хороших условиях; высокоскоростная получистовая и чистовая обработка серого чугуна
GC1690	K10	Легкая черновая, получерновая и чистовая обработка чугунов
<i>Kennametal</i>		
AC5	P05, K05	Широкое применение при резании чугунов и стали
KY1615	P10, K10	Черновая и чистовая обработка твердых материалов, валов из твердого чугуна; чистовая обработка серых чугунов
KY4400	P05, K01	Чистовая обработка твердых материалов до 65HRC; чистовая обработка серых чугунов
KY4300	M10, K10	Обработка жаропрочных сплавов; обработка чугунов высокой твердости
KY2100	M10	Обработка (черновая и чистовая) жаропрочных сплавов
KY3400	K10	Высокоскоростная обработка чугунов с шаровидным графитом, особенно в условиях тяжелого прерывистого резания
KY3500	K15	Высокоскоростная обработка серого чугуна, возможна обработка по корке при прерывистом резании
<i>ВНИИТС</i>		
BO-100	—	Высокоскоростное чистовое точение чугуна и стали в состоянии поставки без СОЖ
ВОК-200	—	Чистовая и получистовая обработка углеродистых и легированных сталей, серых ковких чугунов, графита без СОЖ или при обильном охлаждении

Окончание табл.

Марка	Группа резания	Область применения
ВОКС-300	—	Чистовая и получистовая токарная обработка углеродистых, легированных, закаленных сталей и различных чугунов, в том числе и при неравномерных припусках и ударах от абразивных включений
ТВИН-200	—	Черновое, получистовое и чистовое точение и фрезерование чугунов; обработка сплавов на основе кобальта и никеля
ТВИН-400	—	Обработка никелевых сплавов, закаленных высоколегированных и быстрорежущих сталей и чугунов твердостью > 250 НВ
ОНТ-20	—	Обработка закаленной стали, отбеленных чугунов, цветных металлов на основе меди, сплавов на основе никеля

10.6. Сверхтвердые материалы

Сверхтвердые материалы, используемые для лезвийного инструмента, являются плотными модификациями углерода и нитрида бора. Основными кристаллическими формами углерода являются графит и алмаз. Аналогами этих форм у нитрида бора являются графитоподобный нитрид бора и его плотные модификации cBN и wBN. Алмаз и плотные модификации нитрида бора являются самыми твердыми структурами.

Прежде чем синтезированные спеки поликристаллического алмаза (ПКА) и кубического нитрида бора (ПКНБ) могут быть использованы в качестве металлорежущего инструмента, они должны быть механически обработаны — разрезаны на многогранные пластины стандартных размеров или фрагменты произвольной формы (электроэрозионным или лазерным способом) и отшлифованы. Фрагменты запаиваются либо в вершину корпуса стандартных твердосплавных пластин, либо в напайной инструмент. Основные марки выпускаемых сверхтвердых материалов представлены в табл. 10.22 и 10.23, а области их применения — в табл. 10.24 и 10.25.

Таблица 10.22. Основные марки сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора (ПКНБ) в России и зарубежных странах (выборочно)

Материал, марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав
<i>Амборит</i>		
AMB90	De Beers Industrial Diamonds (Великобритания)	90% cBN + 10% AlN/AlB ₂
DBA 80		80% cBN + керамическая связка
DBC 80		80% cBN + керамическая связка
DBC 50		50% cBN + 40%TiC + 6%WC + + 4%AlN/AlB ₂
DBN45		45% cBN + связка TiN
DBW85		85% cBN + связка Co—W—Al, подложка WC
<i>Боразон (BZN)</i>		
BZN-6000	General Electric (США)	> 90% cBN + Co
BZN-8100		65% cBN + TiN
BZN-7000S		82% cBN + керамическая связка
BZNHTC2000		50% cBN + 50%TiC
<i>Q-Bonite</i>		
BX230		60% cBN + TiC
BX241		60% cBN + керамическая связка
BX310	Toshiba Tungaloy (Япония)	45% cBN + керамическая связка
BX330		< 75% cBN + керамическая связка
BX360		
BX380		75% cBN + керамическая связка
BX850		cBN

Продолжение табл.

Материал, марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав
<i>Sumiboron</i>	Sumitomo Electric (Япония)	сBN
BN100		
BN200		
BN300		сBN
BN500		
BNX10		сBN + покрытие TiN
BNC80		
BNC200		сBN + покрытие TiAlN
BNS800		сBN
PcBN		20—99% сBN + остальное Al_2O_3 ; покрытие Al_2O_3 толщиной 10—50 мкм
<i>Wurbon</i>	CeramTec (Германия)	сBN
WBN650		
WBN600		
WBN550		
WBN500		сBN (низкий %) + керамическая связка
KD050		
KD081		
KD120		
KB5625 покрытие PVD—TiAlN—N	Kennametal (США)	сBN (средний %) + керамическая связка + покрытие PVD—TiAlN
KD230 покрытие CVD—TiN		сBN (высокий %) + покрытие CVD—TiN
KB9640 покрытие CVD — многослойное		сBN (высокий %) + покрытие CVD — многослойное алюминиевое

Продолжение табл.

Материал, марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав
MB810	Mitsubishi Carbide (Япония)	сBN + TiN + Al_2O_3
MB820		
MB825		
MB835		
MB710		
MB730	SecoTools (Швеция)	сBN (высокий %) + Co — сплав
CBN100		сBN
CBN300		сBN + покрытие PVD
CBN100P		
CBN300P	Sandvik Coromant (Швеция)	сBN + покрытие PVD
CB20		сBN + TiN
CB7020		сBN + TiN + покрытие TiCN
CB50		сBN (без добавок)
CB7050	Kyocera (Япония)	сBN (без добавок) + покрытие TiCN
KBN10G		сBN
KBN10B		сBN + керамическая связка
KBN25B		
KBN60G	Becker (Германия)	сBN
KBN900 покрытие PVD		сBN + керамическая связка (активирующая добавка Al) + покрытие PVD
PBC-6		70—90% сBN
PBC-10		
PBC-15		
PBC-17		
PBC-20		
PBC-25		40—65% сBN
PBC-30		
PBC-40		

Окончание табл.

Материал, марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав
SBC-1	Becker (Германия)	70—90% cBN
SBC-10		
SBC-25		40—65% cBN
SBC-40		
PB250	WIDIA (Германия)	cBN + связка из керамики или металлокерамики
B-10	CITCO Diamond & CBN (Япония)	cBN + керамическая связка из TiN и WC
B-12		cBN
B-14		
B-15		
SB95	Diamond & CBN ILJIN Diamond Co	95% cBN + металлическая связка
SB90		90% cBN + керамическая связка
SB80		80% cBN + керамическая связка
SB70		70% cBN + мелкозернистая керамическая связка
KBN108	Ceratip (Австрия)	cBN
KBN258		
KBN900		
Композит 01	Россия	98% cBN
Петбор		cBN + керамическая связка
КПЗ		
СКИМ-ПК		cBN
Киборит	Украина	84% cBN + AlN
Композит 10		40—60% cBN + wBN

ГОСТ 13297—86 регламентирует резцы с алмазными вставками. Эти резцы предназначены для чистового точения и растачивания деталей из цветных металлов и сплавов, стеклопластиков, пластмасс, полуспеченной керамики, твердых сплавов с содержанием кобальта не менее 15%. Стандартом установлены типы и размеры резцов, на которых масса (размерность) алмаза указана в каратах.

ГОСТ 28762—86 регламентирует режущие сменные пластины из композитных сверхтвердых материалов (табл. 10.23). Они предназначены для токарной обработки выше перечисленных материалов.

Таблица 10.23. Периоды стойкости композитов

Марка композита	Период стойкости, мин	
	Средний	95%-й
01; 02	20	8
05	15	6
06	40	16
10Д	30	12
11 (киборит)	60	24
Томал-10	50	20

ГОСТ P5032—92 распространяется на перетачиваемые вставки, оснащенные режущим элементом из сверхтвердых материалов на основе нитрида бора для сборного инструмента и для закрепления в борштанге. Вставки предназначены для тонкого чистового и получистового точения и растачивания деталей из закаленных сталей твердостью до 62 HRC₃ и чугунов с точностью обработки по 6—9-му качествам.

В табл. 10.24 представлены (выборочно) марки поликристаллического алмаза (ПКА), выпускаемого фирмами разных стран; в табл. 10.25 приведены марки и области применения сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора (ПКНБ); в табл. 10.26 даны области применения сверхтвердых материалов на основе поликристаллического алмаза ПКА.

Таблица 10.24. Марки сверхтвердых материалов на основе поликристаллического алмаза (ПКА) в России и зарубежных странах

Материал, марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав
<i>Syndite</i> Syndite CTB 002	De Beers Industrial Diamonds (Великобритания)	Поликристаллический алмаз + Co
Syndite CTB 010		
Syndite CTB 025		
Syndite CTM 302		
CVDite CDM алмазное покрытие CVD 0,5 мм		
CVDite CDE алмазное покрытие CVD	Sumitomo Electric (Япония)	Чистый алмаз без связи
SumiDia NF-DA2200		
DA100		
DA150		
DA200		
KD100	Kennametal (США)	Поликристаллический алмаз CVD с алмазным покрытием толщиной 500 мкм, чистый алмаз без связи, зерна расположены в продольном направлении
KD1405 твердый сплав		
CD10	Sandvik Coromant (Швеция)	Поликристаллический алмаз CVD, алмазное покрытие толщиной 6—8 мкм на специальную основу
CD1810		
MD220	Mitsubishi Carbide (Япония)	Поликристаллический алмаз
PDC	Becker (Германия)	Поликристаллические алмазы
PDC-L		
PDC-S		
PDC-A		

Окончание табл.

Материал, марка	Фирма-изготовитель (страна)	Состав
Diарax	CITCO Diamond & CBN (Япония)	Поликристаллический алмаз
D3		
PD100	WIDIA (Германия)	
Карбонадо	Россия	
АТП	Украина	

Таблица 10.25. Марки и области применения сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора (ПКНБ)

Марка	Фирма-изготовитель	Область применения
AMB 90	De Beers Амборит	Получистовая обработка закаленных и легированных сталей, чугунов
DBA 80		Обработка закаленных сталей (45—70 HRC), обработка перлитного чугуна
DBC50		Чистовая обработка закаленных и легированных сталей, чугунов
DBN45		Суперчистовая (ультрапрецизионная) обработка; прерывистое резание
DBW85		Обработка закаленных сталей (> 45 HRC), серых чугунов (перлитных, шаровидных), суперсплавов на никелевой основе, спеченных твердых сплавов (Co > 17%)
BZN-6000	General Electric Боразон (BZN)	Обработка серых перлитных чугунов; точение поверхностно упрочненных сплавов; обработка сплавов из порошковых металлов; точение суперсплавов
BZN-8100		Высокоскоростная финишная обработка закаленной стали (> 45HRC); пригоден для непрерывной и прерывистой обработки закаленных сталей

Продолжение табл.

Марка	Фирма-изготовитель	Область применения
BZN-7000S	General Electric Боразон (BZN)	Точение и фрезерование серого чугуна Нихард (Ni-hard); точение валков из закаленной стали и серого чугуна; обработка перлитного серого чугуна; обработка сплавов из порошковых металлов; точение поверхностно упрочненных сплавов
BZH-HTC2000		Непрерывное точение закаленных сталей твердостью выше 45 HRC
BN100	Sumitomo Electric Sumiboron	Обработка сталей, серых и отбеленных чугунов, суперсплавов на основе Ni и Co
BN200		Непрерывное и прерывистое резание закаленных и легированных сталей и чугунов
BN300		Точение с ударом закаленных сталей, фрезерование композиционных материалов
BN500		Обработка ковкого и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом
BNC80 покрытие TiN		Точение закаленных сталей с СОЖ и без них с $R_z < 4$ мкм (скорость резания 140 м/мин; подача 0,03—0,13 мм/об; глубина резания 0,03—0,3 мм), HRC > 62
BNC200 покрытие TiAlN		Обработка прерывистых и непрерывных поверхностей деталей из закаленных сталей; рекомендуемые скорости резания 100—200 м/мин, подача 0,05—0,25 мм/об, глубина резания 0,05—0,5 мм
BNS800 двухслойный		Обработка закаленных сталей твердостью выше 45 HRC в условиях непрерывного процесса резания
BNX10		Высокоскоростное точение закаленных сталей (62—64 HRC)

Продолжение табл.

Марка	Фирма-изготовитель	Область применения
BX241	Toshiba Tungaloy Q-Boaite	Обработка сталей и чугунов в условиях прерывистого резания
BX310		Обработка закаленных сталей твердостью 50—65 HRC со скоростью резания до 300 м/мин
BX360		Обработка с ударом закаленных сталей
BX850		Обработка чугунов и спеченных материалов
KD050	Kennametal	Чистовая обработка закаленных сталей до 65 HRC
KD081		Обработка закаленных сталей 50—65 HRC с непостоянной глубиной резания и слегка прерывистым резанием
KD120		Высокопроизводительное резание перлитного серого чугуна; обработка порошковой стали, труднообрабатываемых и твердых материалов в сложных условиях резания
KB5625 покрытие PVD—TiAlN		Чистовая обработка закаленных сталей при прерывистом резании
KD230 покрытие CVD—TiN		Обработка твердых чугунов и твердых никелевых материалов; высокоскоростная обработка перлитного серого чугуна
KB9640 покрытие CVD, многослойное алюминиевое	Mitsubishi Carbide	Высокопроизводительная черновая и чистовая обработка перлитного серого чугуна, типовые детали, валки и тормозные диски; обработка закаленной стали, отбеленного чугуна и твердых покрытий
MB810		Высокоскоростная чистовая обработка закаленной стали
MB820		Чистовая и получистовая обработка закаленной стали
MB825		Чистовая и получистовая обработка закаленной стали (прерывистая)

Продолжение табл.

Марка	Фирма-изготовитель	Область применения
MB835	Mitsubishi Carbide	Получистовая обработка закаленной стали; тяжелое прерывистое резание
MB710		Чистовая и получистовая обработка чугуна (непрерывная), стали, спеченного твердого сплава
MB730		Высокоскоростная обработка теплостойких сплавов на основе Ni и Co
CB20	Sandvik Coromant	Чистовая обработка закаленной стали (непрерывное и прерывистое резание) и чугунов высокой твердости
CB7020 покрытые TiCN		Чистовая обработка закаленной стали (непрерывное точение) и чугунов высокой твердости
CB50		Точение чугунов и материалов высокой твердости при неблагоприятных условиях обработки; изготовление валков
CB7050 покрытие TiCN		Точение чугунов и материалов высокой твердости при неблагоприятных условиях обработки; изготовление валков
KBM10G	Kucera	Чистовое резание
KBN10B		Чистовая обработка закаленных сталей и чугунов; чистовая обработка мягких чугунов с повышенными скоростями резания; возможно использовать при прерывистом резании; может работать с охлаждением и без него
KBN25B		Обработка закаленных сталей; легкое или умеренное прерывистое резание
KBN60G		Высокоскоростная обработка серых чугунов, может работать по окалине; легкое или среднее прерывистое резание
KBN900 покрытие PVD		Черновая обработка закаленных материалов; высокоскоростная обработка серого чугуна; пригоден для прерывистого резания от умеренных до тяжелых условий

Продолжение табл.

Марка	Фирма-изготовитель	Область применения
WBN650	CeratTec Wurbon	Непрерывное точение деталей без СОЖ
WBN600		Обработка без СОЖ деталей с гладкой и прерывистой поверхностью
WBN550		Обработка с СОЖ деталей с гладкой и прерывистой поверхностью
WBN500		Обработка труднообрабатываемых материалов; обработка без СОЖ в тяжелых условиях резания с прерывистой поверхностью
PBC-6	Becker	Обработка со средней скоростью резания серого чугуна, закаленного серого чугуна, суперсплавов, спеченных порошковых сплавов
PBC-10		Высокоскоростная и чистовая обработка серого чугуна, чистовая обработка суперсплавов, обработка спеченных порошковых сплавов
PBC-15		Обработка серого чугуна, суперсплавов, спеченных порошковых сплавов
PBC-17		Обработка (в том числе чистовая) чугуна с шаровидным графитом; тяжелое резание закаленных сталей (48—54 HRC) с охлаждающей жидкостью; обработка спеченных порошковых сплавов
PBC-20		Тяжелое резание закаленных сталей (56—65 HRC) при высоких требованиях к качеству поверхности (Ra 0,2—0,8 мкм); непрерывное резание и прерывистое в тяжелых условиях
PBC-25		Тяжелое резание закаленных сталей (54—62 HRC) Ra 1,6—3,2 мкм; непрерывное и слабое прерывистое резание; чистовая обработка серого чугуна при очень низких скоростях резания
PBC-30		Тяжелое резание закаленных сталей (56—65 HRC) с применением охлаждающей жидкости; непрерывное и тяжелое прерывистое резание с Ra 0,8—1,6 мкм

Продолжение табл.

Марка	Фирма-изготовитель	Область применения
PBC-40	Becker	Тяжелое сухое резание закаленных сталей (56—62 HRC) при высоких подачах и малой глубине резания; непрерывное и легкое прерывистое резание
SBC-1		Черновая и чистовая обработка серого чугуна; обработка отбеленного чугуна, сплава Нихард (Ni-hard), суперсплавов, спеченных порошковых сплавов; высокоскоростное резание
SBC-10		Высокоскоростная и чистовая обработка серого чугуна; обработка суперсплавов и спеченных порошковых сплавов
SBC-25		Тяжелое сухое резание закаленных сталей (56—65 HRC) с большой глубиной резания (0,3—2,0 мм); непрерывное и тяжелое прерывистое резание; чистовая обработка серого чугуна при очень низких скоростях резания (250—350 м/мин)
SBC-40		Тяжелое сухое резание закаленных сталей (56—65 HRC) при высоких подачах и малой глубине резания; непрерывное и слегка прерывистое резание
CBN100	Seco Tools	Чистовое точение высокотвердых материалов
CBN100P покрытие PVD		Точение серых чугунов с перлитной структурой; черновое и чистовое точение термообработанных сталей и чугунов
CBN300		Обработка перлитного чугуна, отливок из отбеленного чугуна, спеченных материалов, закаленных сталей
B14	CGTCO Diamond & CBN	Обработка деталей, изготовленных методом порошковой металлургии, чистовая обработка серых чугунов
B15		Обработка твердых чугунов (в том числе черновая), обработка прерывистых поверхностей

Окончание табл.

Марка	Фирма-изготовитель	Область применения
PB250	WIDIA Valenite Heinlein	Обработка закаленных сталей, закаленного серого чугуна, высокотемпературных сплавов (на основе Ni/Co)
SB95	Diamond & CBN ILJIN Diamond Co. IBON	Обработка серых чугунов, отбеленных чугунов, сплава NiCr, суперсплавов на основе Ni, Cr
SB90		Обработка деталей из порошковых сталей; обработка WC твердых сплавов; серого и закаленного чугуна
SB80		Обработка суперсплавов на основе Ni, Cr; обработка закаленных сталей, деталей из порошковых сталей, WC твердых сплавов
SB70		Обработка закаленных сталей
KBH108	Ceratip	Чистовое точение
Композит 01	—	Чистовая обработка закаленных сталей и чугунов
Петбор	—	Обработка (непрерывная и прерывистая) закаленных сталей, отбеленных и серых перлитных чугунов, высокотвердых наплавленных материалов
СКИМ-ПК	—	Токарная и фрезерная обработка закаленных сталей (45—65 HRC); обработка серого, высокопрочного, ковкого чугуна, силумина, стеклопластика
КПЗ	—	Точение (в том числе с ударом) закаленных сталей, отбеленных и серых перлитных чугунов, наплавов твердым сплавом
Киборит	—	Непрерывное и прерывистое резание труднообрабатываемых термообработанных сталей и сплавов, чугунов любой твердости, высокотвердых наплавленных материалов
Композит 10	—	Непрерывное и прерывистое резание термообработанных сталей, чугунов, твердых сплавов с содержанием Co более 15%, наплавленных и напыленных покрытий

Таблица 10.26. **Области применения сверхтвердых материалов на основе поликристаллического алмаза (ПКА)**

Марка	Область применения
Sumitomo Electric SumiDia NF-DA2200	Черновое и чистовое фрезерование алюминиевых сплавов
Sandvik Coromant CD10	Чистовая обработка цветных металлов и неметаллических материалов, точение титановых сплавов
CD 1810 алмазное покрытие CVD 6—8 мкм	Чистовое точение цветных металлов, точение титановых сплавов
WIDIA Valenite Heinlein PD100	Обработка цветных металлов (Al, Cu, Mg сплавы), пластиков, упрочненных волокнами; материалов на основе резины
Kennametal Hertel KD100	Точение алюминия с высоким содержанием кремния; абразивных материалов; высокоскоростная обработка армированных пластмасс
KD1405 Твердый сплав с алмазным покрытием CVD 0,5 мм	Обработка цветных металлов в условиях непрерывного или слегка прерывистого резания
Mitsubishi Carbide MD220	Чистовая обработка цветных металлов и неметаллических материалов
CITCO Diamond & CBN Diapax	Фрезерование алюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния
Becker PDC	Обработка (в том числе чистовая) цветных металлов и неметаллических материалов с низким содержанием упрочняющих абразивов или кремния
PDC-L	Чистовая обработка цветных металлов и неметаллических материалов с очень низким содержанием упрочняющих абразивов или кремния
PDC-S	Обработка (в том числе чистовая и фрезерование) цветных металлов и неметаллических материалов со средним и выше среднего содержанием упрочняющих абразивов или кремния
PDC-A	Обработка (в том числе черновая и фрезерование) цветных металлов и неметаллических материалов с чрезвычайно высоким содержанием упрочняющих абразивов или кремния

Окончание табл.

Марка	Область применения
АТП (40 мкм)	Обработка гетинакса, текстолита, стеклопластиков, углеродсодержащих материалов, асбеста, полимерных и композиционных материалов
АТП (25 мкм)	Получистовая и чистовая обработка алюминия и алюминиевых сплавов, содержащих 12—22% Si; обработка меди, медных сплавов и других цветных металлов и сплавов
АТП (10 мкм)	Получистовая и чистовая обработка алюминия и алюминиевых сплавов, содержащих 12—22% Si; обработка меди, медных сплавов и других цветных металлов и сплавов

Твердость поликристаллического алмаза (ПКА) составляет 60—90 HV ГПа и кубического нитрида бора (ПКНБ) 30—40 ГПа, они являются самыми твердыми инструментальными материалами.

Контрольные вопросы

1. Назовите относительную стоимость трех-четырех дорогостоящих металлов по отношению к железу.
2. Как классифицируются инструментальные стали?
3. Назовите пять марок инструментальных легированных сталей и расскажите, для чего они применяются.
4. Расскажите о свойствах быстрорежущих сталей.
5. Назовите три марки порошковых быстрорежущих сталей и укажите их красностойкость и твердость.
6. Что такое твердые сплавы и где они применяются?
7. Как обозначаются твердые сплавы и какой цвет они имеют в обозначении по группе резания?
8. Какие составляющие улучшают свойства металлокерамики?
9. При каких скоростях резания можно обрабатывать металлы, пользуясь пластинами из металлокерамики?
10. Из табл. 10.21 выберите по своей специальности необходимые марки керамики.
11. Какие российские сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора (ПКНБ) вы знаете?
12. Назовите отечественный сверхтвердый материал на основе поликристаллического алмаза (ПКА)?
13. Для каких целей применяется сверхтвердый материал ПКА?

Чугуны

11.1. Характерные особенности чугунов

Чугун — самый распространенный железоуглеродистый нековкий литейный материал, содержащий свыше 2% углерода, до 4,5% кремния, до 1,5% марганца, до 1,8% фосфора и до 0,08% серы. В практике применяют чугуны, содержащие 3—3,5 % углерода.

Чугун обладает высокими литейными свойствами, поэтому широко используется в литейном производстве в качестве конструкционного материала. Он хорошо обрабатывается резанием. Из чугуна, имеющего невысокий коэффициент трения, изготавливают подшипники скольжения. Специально обработанный чугун (высокопрочный) по показателям качества успешно конкурирует со стальным литьем и кованой сталью. Чугун получают в доменных печах из железных руд.

В отечественном машиностроении 77% отливок изготавливают из чугуна, 21% — из стали и 2% — из цветных металлов. 80% выплавленного чугуна идет для передела в сталь.

Родственную связь чугуна и стали популярно изложил писатель Е. Пермяк в сказке «Чугун и сталь»:

Пролилась огневой струей из жаркой печи горячая Сталь. Засверкала золотыми звездами, остыла дорогими слитками и зазналась. Перед серым Чугуном так стала себя выхвалять, что тот чуть не изоржавел от стыда.

— Я, — говорит Сталь, — нержавеющая, нетемнеющая, хитро сваренная! Как алмаз крепка, как змея гибка. Закалюсь — не отколюсь! Пилить, сверлить, резать — все могу; на все пригодна! Хочешь — булатом стану, хочешь — иглой! Мостом лягу. Рельсами побегу. Машиной заработаю. Пружиной соволюсь. А ты что, Чугун? На сковородки, на утюги только и годен. Ну да разве еще на станины второсортные да на шестерни молотильные! Ни ковок, ни ловок, хрупок, как лед. Немодный металл.

Говорит так Сталь, на весь цех себя славит. И самолетом-то она полетит, и кораблем-то поплывет, и чем только она не станет. Даже перо писчее не забыла. Часовую стрелку и ту не пропустила. Все перебрала. Столько говорила про себя, что в семи коробах не свезти. Но ничего лишнего не прибавила. Была в ее стальном звоне правда.

Конечно, Чугуну далеко до Стали. Только об одном ей забывать не надо бы: о том, что Чугуну она родной дочерью доводится, что она ему своей жизнью обязана... Ну, а в остальном все правильно, если, конечно, совесть во внимание не принимать.

В наши дни эти утверждения не полностью соответствуют истине. Технология получения стали из чугуна принята пока во всем мире, однако уже разработана новая технология, которая исключит доменный процесс и позволит выплавлять сталь прямым восстановлением железа из руд.

Недостаточная прочность и большая хрупкость чугуна объясняются наличием в нем крупных включений углерода в виде графита. Попытки размельчить его и распределить равномерно по всему объему металла долгое время не давали положительных результатов. Тогда в чугун добавили немного ферросилиция (сплав железа с кремнием) и получили размельченный графит. Прочность чугуна увеличилась, даже стала близка к малоуглеродистым сталям обыкновенного качества, но хрупкость осталась та же. Последующие поиски убедили в необходимости введения в жидкий чугун небольшого количества магния, а позже церия, в результате чего изменилась форма графита, он стал шаровидным. Чугун приобрел прочность и утратил хрупкость. Такой чугун (его называют высокопрочным) по своему качеству не уступает конструкционным углеродистым сталям. Стойкость деталей, изготовленных из чугуна, увеличилась почти в три раза. Увеличить прочность чугуна, придать ему специальные свойства можно за счет введения в него легирующих элементов и термической обработки.

Углерод в чугунах может находиться в виде химического соединения — цементита (такие чугуны называют *белыми*) или в свободном состоянии в виде графита — частично или полностью (в этом случае чугуны называют *серыми*). Получение того или иного вида чугуна зависит в основном от его химического состава и скорости охлаждения. Такие элементы, как кремний, титан, никель, медь и алюминий, способствующие выделению графита, называют *графитизирующими*. При введении таких элементов, как марганец, молибден, сера, хром, ванадий, вольфрам, углерод входит в химическое соединение с железом, образуя цементит (Fe_3C). Эти элементы называют *антиграфитизирующими* или тормозящими графитизацию.

Наибольшее влияние на структуру чугуна оказывает *кремний*. В серые чугуны его вводят в повышенных количествах (до 3,5%), так

как это способствует получению графита. Марганец образует с углеродом прочное химическое соединение, поэтому его содержание в серых чугунах ограничивается (до 1%). Соединясь с серой в MnS , он уменьшает ее отбеливающее действие. Сера относится к числу вредных примесей чугуна, поскольку ухудшает его литейные и механические свойства. Содержание ее в чугуне не должно превышать 0,1%. Фосфор оказывает благоприятное влияние на технологические свойства чугуна, в частности, он повышает жидкотекучесть и твердость отливки. В чугуне может содержаться до 0,4% фосфора.

Большое влияние на структуру чугуна оказывают условия заливки и охлаждения отливки. Быстрое охлаждение способствует получению белого чугуна, медленное — серого. Скорость охлаждения зависит от применяемой литейной формы (песчаная или металлическая), а также от толщины стенки отливки. В машиностроении используют отливки из серого, высокопрочного, с вермикулярным графитом и ковкого чугунов. Эти чугуны, как и сталь, состоят из металлической основы (перлита, феррита) и неметаллических включений графита. Они различаются главным образом формой графитовых включений. Белый чугун имеет ограниченное применение. Некоторые отливки, от которых требуется повышенная твердость поверхностного слоя, изготавливают из отбеленного чугуна. Поверхностный слой его состоит из белого чугуна, а сердцевина — из серого. Толщину и твердость отбеленного слоя регулируют путем изменения химического состава чугуна и скорости затвердевания отливки.

Чугун — наиболее дешевый конструкционный материал.

11.2. Классификация чугунов

Существуют различные классификации чугунов, что объясняется как разнообразием чугунов и их признаков, так и историческими причинами. Классификационные признаки не всегда совпадают друг с другом. Предлагаемая классификация чугунов представлена в табл. 11.1.

По цвету излома различают белые и серые половинчатые и отбеленные чугуны. Это первая, неполная классификация чугунов. Цвет излома чугунов зависит в серых чугунах от присутствия свободного углерода в форме графита, а в белых углерод присутствует только в связанной форме в виде цемента.

Таблица 11.1. Чугуны со свободным углеродом

Тип чугуна	Графит	Тип металлической матрицы	Показатели свойств			Способ получения
			литейных	технологических	σ_B , МПа	
Серый	Пластинчатый прямой; пластинчатый завитый; пластинчатый игольчатый; пластинчатый гнездообразный	Ф, Ф + П, П	Высокие	Высокие	150—480	Все виды плавки, модифицирование ферросилицием
С вермикулярным графитом	Вермикулярный извилистый; вермикулярный утолщенный	Ф, П, Ф + П	Высокие	Высокие или средние	320—500	Модифицирование лигатурами РЗМ
Ковкий или модифицированный	Нитевидный; хлопьевидный; компактный плотный	Ф или П	Пониженные	Высокие или средние	300—370 (ферритный), 450—600 (перлитный)	Графитизирующий отжиг белого чугуна, модифицирование РЗМ
С шаровидным графитом	Шаровидный разорванный; шаровидный звездообразный; шаровидный неправильный; шаровидный правильный	Ф, Ф + П, П	Высокие	Высокие или средние	380—1200	Модифицирование магнием, кальцием, РЗМ

Примечание. Ф — феррит, П — перлит.

11.3. Серые чугуны (СЧ)

Серый чугун широко применяют в машиностроении. Такое название он получил по серому цвету излома, обусловленному наличием в структуре чугуна свободного углерода в виде графита. По виду металлической основы различают серые чугуны перлитные, перлитно-ферритные и ферритные (рис. 11.1).

Графит обладает низкими механическими свойствами. Он нарушает сплошность металлической основы, располагаясь между ее зернами и ослабляя связь между ними. Поэтому серый чугун плохо сопротивляется растяжению и имеет очень низкие пластичность и вязкость. Чем крупнее и прямолинейнее графитовые включения, тем хуже механические свойства чугуна. Твердость серого чугуна, а также его сопротивление сжатию близки показателям стали, имеющей такую же структуру, как металлическая основа чугуна. Графит оказывает и некоторое положительное влияние на свойства чугуна, в частности, он повышает его износостойкость, действуя аналогично смазке, облегчает обрабатываемость резанием, так как делает стружку ломкой, способствует гашению вибраций изделий (поэтому станины станков, вплоть до заточного, изготавливают из серых чугунов), уменьшает усадку при изготовлении отливок.

Механические свойства серого чугуна можно улучшить, если обеспечить равномерное распределение мелкопластинчатого графита в отливке. Это достигается путем специальной обработки — *модифицирования*. Сущность ее состоит в том, что в жидкий чугун перед его разливкой в формы вводят небольшое количество силикокальция или ферросилиция (кремний в соединении с кальцием или железом). Эти добавки образуют дополнительные центры графитизации, в результате чего получается мелкопластинчатый графит. Чугун с таким графитом называют модифицированным. Он отличает-

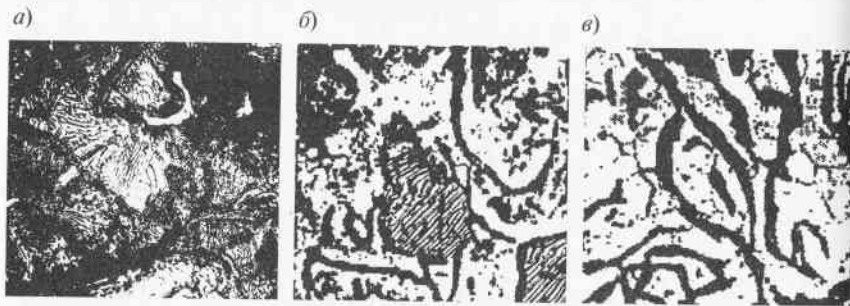


Рис. 11.1. Микроструктура серых чугунов:
а — перлитная; б — феррито-перлитная; в — ферритная

ся от обычного серого чугуна более высоким сопротивлением разрыву, однако пластичность и вязкость его при модифицировании не улучшаются.

Серые чугуны имеют очень хорошие литейные свойства, хорошо поддаются всем видам механической обработки. Белые чугуны обладают высокой твердостью, плохо обрабатываются, имеют более низкие технологические свойства.

По *технологии производства* различают чугуны ваграночной, индукционной, дуговой плавки, а также синтетические и модифицированные, подвергнутые внепечной обработке. Технология производства различных типов чугунов в значительной степени зависит от параметров чугуна, температуры плавления, наличия и состава примесей и неметаллических включений.

По *механическим и специальным свойствам* чугуны делят на серые, ковкие, высокопрочные и легированные со специальными свойствами.

Условное обозначение марки чугуна с пластинчатым графитом (ГОСТ 1412—85) включает буквы СЧ — серый чугун — и цифровое обозначение минимального временного сопротивления при растяжении ($\text{МПа} \cdot 10^{-1}$). Для изготовления отливок используют чугуны: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30 и СЧ35 (табл. 11.2).

По требованию потребителя допускается изготовление отливок из чугунов СЧ18, СЧ21 и СЧ24.

Прочность чугуна тем выше, чем меньше количество и длина включений графита.

Таблица 11.2. Химический состав серых чугунов с пластинчатым графитом

Марка чугуна	Массовая доля, %				
	C	Si	Mn	P	S
				не более	
СЧ10	3,5—3,7	2,2—2,6	0,5—0,8	0,3	0,15
СЧ15	3,5—3,7	2,0—2,4	0,5—0,8	0,2	
СЧ20	3,3—3,5	1,4—2,4	0,7—1,0		
СЧ25	3,2—3,4	1,4—2,2	0,7—1,0		
СЧ30	3,0—3,2	1,3—1,9	0,7—1,0		0,2
СЧ35	2,9—3,0	1,2—1,5	0,7—1,1		

Диапазон области применения серых чугунов расширяют за счет введения в них легирующих элементов. Например, хрома, кремния и алюминия (табл. 11.3).

Таблица 11.3. Эксплуатационные свойства и области применения жаростойких серых легированных чугунов

Марка	Эксплуатационные свойства	Область применения
ЧХ1	Коррозионная стойкость в газовой, воздушной и щелочной средах, жаростойкость в среде воздуха до 773 К	Холодильные плиты доменных печей, колосники, горелки, кокилы, стеклоформы, выхлопные коллекторы дизелей
ЧХ2	Коррозионная стойкость в газовой, воздушной и щелочной средах, жаростойкость в среде воздуха до 873 К	Колосники, решетки печей турбокомпрессора, детали термических печей, стеклоформы, облицовочные плиты сушильных вагонов, емкостей
ЧХ3	Повышенная коррозионная стойкость в газовой, воздушной и щелочной средах, жаростойкость в среде воздуха до 973 К	
ЧС5	Жаростойкость в воздушной среде и топочных газах до 973 К	Колосники, плиты печей обжига, подовые плиты термических печей
ЧЮ7Х2	Жаростойкость в воздушной среде до 1023 К	Детали печной арматуры, колосники агломерационных машин
ЧЮ6С5	Жаростойкость в воздушной среде до 1073 К	Печная арматура, колосники, стеклоформы, кокилы, детали турбокомпрессора

В зависимости от назначения и условий эксплуатации износостойкие серые чугуны разделяют на следующие основные группы: антифрикционные для подшипников скольжения; фрикционные для тормозных узлов механизмов; для гильз цилиндров дизельных двигателей; для поршневых колец; для седел и направляющих втулок клапанов; для направляющих металлорежущих станков.

Антифрикционные свойства серого чугуна обусловлены достаточной твердостью металлической матрицы, в которой равномерно распределены мягкие включения пластинчатого графита. Обладая смазывающим действием и способностью удерживать смазочный материал на поверхности, графитовые включения обеспечивают низкий коэффициент трения антифрикционного чугуна.

Износ гильз цилиндров двигателя ЗИЛ-130, изготовленных из низколегированного чугуна СЧ25 твердостью 187—207 НВ, составляет 1,5—2,5 мкм на 1000 км пробега автомобиля. Гильзы из среднелегированного фосфористого чугуна с $\text{Cr} = 0,5\text{—}0,6\%$, $\text{Ni} = 0,4\text{—}0,6\%$, $\text{Mo} = 0,5\text{—}0,6\%$, $\text{Cu} = 0,7\text{—}0,8\%$, $\text{P} = 0,4\%$ и твердостью 197—255 НВ имеют износ 1,0—1,5 мкм на 1000 км пробега.

Таблица 11.4. Режимы точения

Марка чугуна	v_p , м/мин	S , мм/об
СЧ15	$\frac{100\text{—}160}{130\text{—}200}$	0,5—1,5
СЧ20	$\frac{90\text{—}125}{110\text{—}145}$	0,4—1,2
СЧ25	$\frac{80\text{—}110}{100\text{—}130}$	0,4—1,1
СЧ30	$\frac{70\text{—}100}{90\text{—}120}$	0,3—1,0
СЧ35	$\frac{50\text{—}85}{70\text{—}110}$	0,3—1,0

Примечание. В числителе приведены значения для черновой, в знаменателе — для чистовой обработки.

Обрабатываемость резанием является одной из важнейших технологических характеристик серого чугуна. Она определяет оптимальные режимы механической обработки при минимальных энергозатратах и износе режущего инструмента. Обрабатываемость резанием является комплексной характеристикой, основными показателями которой являются сила резания R , скорость резания v_p , подача S , параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Таблица 11.5. Режимы фрезерования

Марка чугуна	v_f , м/мин	S , мм/об
СЧ15	80—130	0,2—0,8
СЧ20	60—110	0,2—0,7
СЧ25	60—110	0,2—0,7
СЧ30	55—100	0,2—0,6
СЧ35	45—75	0,2—0,6

Таблица 11.6. Режимы строгания

Марка чугуна	v_p , м/мин	S , мм/об
СЧ15	$\frac{30-45}{35-45}$	$\frac{1,0-1,2}{4,0-5,0}$
СЧ20	$\frac{30-45}{35-45}$	$\frac{1,0-1,2}{3,0-4,0}$
СЧ25	$\frac{30-40}{30-40}$	$\frac{0,8-1,2}{1,8-2,0}$
СЧ30	$\frac{30-40}{30-40}$	$\frac{0,8-1,2}{1,8-2,0}$
СЧ35	$\frac{25-30}{25-30}$	$\frac{0,5-0,8}{1,5-2,0}$

Примечание. В числителе приведены значения для черновой, в знаменатель — для чистовой обработки.

Обрабатываемость резанием и режим механической обработки серого чугуна в значительной степени зависят от марки чугуна, т. е. от микроструктуры, прочности и твердости (табл. 11.4—11.8). Наилучшей обрабатываемостью обладают чугуны с однородной ферритной или перлитной матрицей. Обрабатываемость серого чугуна резко ухудшается при формировании перлитно-цементитной структуры. Особенно ухудшает обрабатываемость чугуна наличие в структуре включений фосфидной эвтектики, свободного цементита, карбидов и неметаллических включений. Поэтому содержание

фосфора, серы и элементов, склонных к образованию карбидов (хром, ванадий, вольфрам, титан), должно быть минимальным. Очевидно, что при повышении склонности чугуна к отбелу обрабатываемость ухудшается.

Твердость следует выбирать исходя из условия обеспечения необходимых механических свойств и удовлетворительной обрабатываемости. Для этого максимальная твердость нелегированного серого чугуна не должна превышать 220 НВ, легированного чугуна — 270 НВ.

Таблица 11.7. Режимы протягивания

НВ	Удельная сила резания, Н/мм, при подаче на зуб S_z мм														
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
До 180	5,5	8,1	12,1	15,1	18,0	20,7	24,3	27,3	30,5	33,4	36,0	42,0	47,6	63,5	79,5
Св. 180	7,5	8,9	13,4	16,6	20,0	23,6	26,8	30,3	33,6	37,0	40,2	46,5	52,2	69,5	87,0

Таблица 11.8. Режимы сверления

Марка чугуна	v_p , м/мин	Подача s , мм/об, при диаметре сверла, мм						
		2	3	5	10	16	25	40
СЧ15	$\frac{25-35}{60-80}$	$\frac{0,05}{0,03}$	$\frac{0,08}{0,04}$	$\frac{0,13}{0,07}$	$\frac{0,24}{0,13}$	$\frac{0,32}{0,18}$	$\frac{0,40}{0,22}$	$\frac{0,50}{0,28}$
СЧ20	$\frac{20-30}{40-65}$	$\frac{0,05}{0,02}$	$\frac{0,08}{0,03}$	$\frac{0,13}{0,06}$	$\frac{0,24}{0,12}$	$\frac{0,30}{0,16}$	$\frac{0,40}{0,18}$	$\frac{0,50}{0,25}$
СЧ25	$\frac{20-30}{40-65}$	$\frac{0,05}{0,02}$	$\frac{0,08}{0,03}$	$\frac{0,13}{0,06}$	$\frac{0,24}{0,12}$	$\frac{0,30}{0,16}$	$\frac{0,40}{0,18}$	$\frac{0,50}{0,25}$
СЧ30	$\frac{20-30}{40-65}$	$\frac{0,05}{0,02}$	$\frac{0,08}{0,03}$	$\frac{0,13}{0,06}$	$\frac{0,24}{0,12}$	$\frac{0,30}{0,16}$	$\frac{0,40}{0,18}$	$\frac{0,50}{0,25}$
СЧ35	$\frac{15-25}{30-55}$	$\frac{0,05}{0,02}$	$\frac{0,06}{0,02}$	$\frac{0,10}{0,05}$	$\frac{0,22}{0,10}$	$\frac{0,28}{0,12}$	$\frac{0,35}{0,16}$	$\frac{0,45}{0,22}$

Примечание. В числителе даны значения для сверл из быстрорежущей стали, в знаменателе — из твердого сплава.

11.4. Ковкие чугуны (КЧ)

В структуре ковкого чугуна графит имеет хлопьевидную форму (рис. 11.2) — такой графит называют углеродом отжига. По сравнению с серым чугуном ковкий чугун обладает более высокой прочностью, пластичностью и вязкостью. Свое название он получил потому, что имеет повышенную пластичность по отношению к серому чугуну. Ковке в прямом значении этого слова чугун не подвергается.

Процесс получения отливок из ковкого чугуна включает две стадии: изготовление фасонных отливок из белого чугуна и отжиг полученных отливок в целях графитизации цементита. При отжиге происходит разложение цементита белого чугуна с образованием графита хлопьевидной формы. В результате этого хрупкие и твердые отливки становятся пластичными и более мягкими. В зависимости от условий и режима отжига структура чугуна может иметь ферритную (Ф), перлитную (П) и ферритно-перлитную металлическую матрицу. Наибольшее распространение получил пластичный ферритный ковкий чугун. Отжиг ковкого чугуна — весьма продолжительный процесс, занимающий 70—80 ч. Однако его можно ускорить путем закалки отливок из белого чугуна перед графитизацией, а также модифицированием чугуна алюминием, бором, висмутом или титаном. Существуют и другие способы ускорения процесса отжига. Использование указанных способов позволяет сократить продолжительность отжига до 35—40 ч.

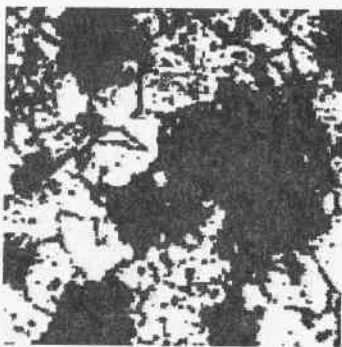


Рис. 11.2. Микроструктура ковкого чугуна на ферритной основе (темный фон — хлопьевидный графит)

Отливки из ковкого чугуна можно получить сечением до 55 мм. При большем сечении в сердцевине отливок образуется пластинчатый графит, и чугун становится непригодным для отжига. В машиностроении чаще применяют высокопрочный чугун или чугун с вермикулярным графитом, которые получают при менее сложных и более дешевых технологических процессах, чем получение ковкого чугуна. В маркировке ковкого чугуна первые две цифры обозначают временное сопротивление при растяжении, вторые — относительное удлинение в процентах.

ГОСТ 1215—79 регламентирует ковкий чугун. Чугуны ферритного класса КЧ35-10 и КЧ37-12 используют для производства деталей, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеров, редукторов, ступиц, крюков, скоб, задних мостов, кронштейнов), а чугуны марок КЧ30-6 и КЧ33-8 — для изготовления менее ответственных деталей (хомутов, гаек, вентилях, деталей сельскохозяйственных машин, глушителей, фланцев, муфт, тормозных деталей, педалей, гаечных ключей, колодок). Ковкие чугуны перлитного класса марок КЧ45-7, КЧ50-4, КЧ50-5, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5 обладают высокой прочностью, умеренной пластичностью и хорошими антифрикционными свойствами. Из них получают вилки карданных валов, шестерни, червячные колеса, поршни, подшипники, звенья и ролики конвейерных цепей, втулки, муфты, тормозные колодки, коленчатые валы.

Твердость ферритных ковких чугунов — до 16 НВ, перлитных — до 320 НВ.

11.5. Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ЧШГ)

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ЧШГ) характеризуется сочетанием высоких технологических, физико-механических и эксплуатационных свойств. Изделия из него широко применяют вместо стальных отливок, поковок, штамповок, отливок из серого и ковкого чугунов. Он отличается высокой надежностью при различных режимах эксплуатации. У ЧШГ по сравнению со сталью более высокое отношение предела текучести к пределу прочности при растяжении — 0,70—0,80 (у стали — 0,50—0,65), более низкая чувствительность к концентраторам напряжений, повышенная циклическая вязкость (в 1,5—3,5 раза). Поэтому применение его более эффективно, чем применение стали, особенно в условиях действия динамических нагрузок.

Технология получения ЧШГ состоит из следующих операций обработки расплава чугуна: десульфурации (обессеривание), сфероидизирующей обработки и вторичного, или позднего, модифицирования (рис. 11.3).

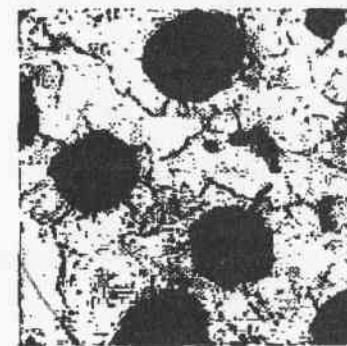


Рис. 11.3. Микроструктура высокопрочного чугуна (феррит с шаровидным графитом)

Международный стандарт ISO 1083 регламентирует типы литейного ЧШГ и классифицирует его на два класса.

К первому классу относятся чугуны, образцы из которых отлиты отдельно от отливки.

Ко второму классу относятся чугуны, образцы из которых отлиты вместе с отливкой (в марке добавляется буква А). Из них обычно изготавливают отливки толщиной 30—200 мм, имеющие массу более 2000 кг.

ГОСТ 7293—85 предусматривает восемь марок ЧШГ, их механические свойства приведены в табл. 11.9.

Таблица 11.9. Механические свойства (не менее)
ЧШГ (ГОСТ 7293—85)

Марка чугуна	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ
ВЧ35	350	220	22	140—170
ВЧ40	400	250	15	140—202
ВЧ45	450	310	10	140—225
ВЧ50	500	320	7	153—245
ВЧ60	600	370	3	192—277
ВЧ70	700	420	2	228—302
ВЧ80	800	480	2	248—351
ВЧ100	1000	700	2	270—360

Марки ЧШГ различают по временному сопротивлению при растяжении и условному пределу текучести. В обозначении марки буквы ВЧ означают, что чугун высокопрочный, цифры — минимальное значение временного сопротивления при растяжении (МПа $\cdot 10^{-1}$).

Влияние основных элементов на свойства чугуна. Химический состав ЧШГ является одним из основных факторов, в значительной мере определяющих его механические свойства.

Углерод. Содержание углерода не оказывает заметного влияния на механические свойства ЧШГ в отличие от ЧПГ.

Кремний. Содержание кремния оказывает значительное влияние на структурообразование и механические свойства.

Марганец. При повышении содержания марганца в чугуне в его структуре увеличивается количество перлита, в связи с чем повышается временное сопротивление при растяжении и уменьшается относительное удлинение.

Фосфор. Оказывает существенное влияние на структуру и свойства чугуна. Для получения чугуна с высокими пластическими свойствами содержание фосфора не должно превышать 0,08%.

Сера. Содержание серы в исходном чугуне должно быть ниже 0,02%, при более высоком ее содержании затрудняется процесс образования шаровидного графита и резко повышается расход модификатора (магния, церия и др.).

Влияние легирующих элементов. Медь. Уменьшает или предотвращает образование феррита и препятствует появлению структурно свободного цементита в тонких сечениях отливок.

Никель (0,5—2,5%). Неограниченно растворяется в железе и снижает растворимость углерода в чугуне, т. е. является графитизирующим элементом, однако в три раза более слабым, чем кремний.

Хром. Содержание хрома в ЧШГ ограничивают до 0,2%.

Олово. Легирование чугуна небольшими добавками олова (обычно не более 0,1%) широко применяют в практике производства ЧШГ с перлитной структурой металлической основы. Олово повышает износостойкость и коррозионную стойкость ЧШГ, способствует выравниванию механических свойств в различных по толщине сечениях отливок.

Молибден. Уже при небольших (0,15%) добавках молибдена наблюдается повышение показателей прочности высокопрочного чугуна в литом состоянии, а пластичность несколько снижается. Особенно улучшаются показатели прочности чугуна, легированного молибденом, после нормализации.

Технологические свойства ЧШГ. Обрабатываемость резанием. Оптимальные режимы резания стандартными резцами достигаются при $t/S = 2$, где t — глубина резания; S — подача. ЧШГ хорошо обрабатывается точением, фрезерованием и строганием, значительно хуже шлифованием, так как абразив «засаливается» графитом.

Наименьшая шероховатость поверхности получается при скорости резания 40—60 м/мин.

Сварка и резка. Сварку ЧШГ (как правило, газовую и электродугую) применяют для исправления дефектов отливок, восстановления изношенных деталей и соединения конструкций.

Для получения требуемой структуры и свойств чугуна в сварном шве без термообработки газовую сварку проводят с предварительным нагревом отливок до 700—750 °С и охлаждением после сварки со скоростью не более 1,5 К/мин.

Электродуговую сварку производят как в холодном состоянии, отливок из чугуна, так и с их подогревом.

Область применения ЧШГ. Изделия из ЧШГ, в отличие от изделий из других железоуглеродистых сплавов, находят все большее применение в различных отраслях промышленности. Сохраняется тенденция к расширению объемов их производства.

По экономическим показателям производства, технологическим и эксплуатационным характеристикам ЧШГ в значительной степени превосходит другие конструкционные материалы на основе железа. Его используют при производстве широкой номенклатуры деталей ответственного назначения в различных отраслях промышленности вместо серого и ковкого чугуна, литой и ковкой стали, проката.

При замене деталей из серого чугуна с пластинчатым графитом на ЧШГ достигается существенное снижение металлоемкости изделий при одновременном повышении надежности деталей.

При использовании ЧШГ вместо легированных чугунов дополнительно экономятся дорогостоящие легирующие элементы.

Применение ЧШГ вместо ковкого чугуна позволяет сокращать объем или полностью исключать термическую обработку при одновременном повышении уровня механических свойств и коррозионной стойкости изделий.

При использовании ЧШГ вместо сталей снижаются трудоемкость и энергозатраты производства, повышается износостойкость, на 7—8% снижается масса деталей за счет меньшей плотности ЧШГ.

11.6. Высокопрочные чугуны с вермикулярным графитом (ЧВГ)

К материалу ответственных литых деталей современных машин, работающих в условиях циклических нагрузок, предъявляются высокие требования. Уровень физико-механических свойств серых чугунов с пластинчатым графитом (ЧПГ) оказывается в ряде случаев недостаточным, что приводит к преждевременным поломкам деталей

в процессе их эксплуатации или требует увеличения толщины стенок, а следовательно, и массы отливок.

Для таких деталей широко применяется высокопрочный чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ), обладающий литейными свойствами, демпфирующей способностью и теплопроводностью, почти такими же, как у ЧПГ, и высокими прочностными характеристиками, сопоставимыми с прочностными характеристиками отдельных марок высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ЧШГ).

Структура и основные свойства (ЧВГ). По классификации форм графита в высокопрочном чугуне, принятой международным стандартом ISO 945, вермикулярная форма графита обозначается как графит типа III. В ГОСТе 3443—87 она обозначается эталонами ВГф1, ВГф2, ВГф3 (рис. 11.4).

Особенностью литой структуры ЧВГ является значительное содержание феррита (60—90%) в металлической основе. Нормализация нелегированного ЧВГ перлитизирует металлическую основу до 90%, но полностью не устраняет перлит.

Механические свойства ЧВГ определяются химическим составом, степенью легирования, структурой и условиями кристаллизации отливок.

В ГОСТе 28394—89 для изготовления отливок предусмотрены четыре марки ЧВГ (табл. 11.10).

Обозначение марки ЧВГ включает: буквы Ч — чугун, ВГ — форма графита (вермикулярный графит), цифры — минимальное значение временного сопротивления разрыву при растяжении ($\text{МПа} \cdot 10^{-1}$).

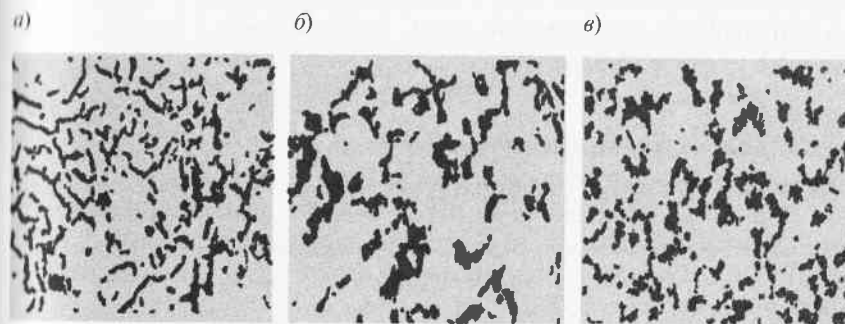


Рис. 11.4. Микроструктура чугуна с вермикулярным графитом: а — ВГф1; б — ВГф2; в — ВГф3

Таблица 11.10. Механические свойства ЧВГ

Марка чугуна	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %	НВ
		не менее		
ЧВГ30	300	240	3,0	130—180
ЧВГ35	350	260	2,0	140—190
ЧВГ40	400	320	1,5	170—220
ЧВГ45	450	380	0,8	190—250

Технологические свойства ЧВГ. Качество литых чугунных деталей зависит не только от механических, но в значительной степени и от технологических литейных свойств чугуна.

Данный чугун имеет хорошую *жидкотекучесть*, которая возрастает с повышением температуры заливки и практически не отличается от жидкотекучести чугунов с пластинчатым и шаровидным графитом.

ЧВГ имеет более низкую склонность к образованию усадочных дефектов, чем ЧШГ, и почти такую же, как ЧПГ.

Эксплуатационные свойства. *Износостойкость материала* зависит от условий трения и параметров испытаний. Скорость изнашивания при установившемся режиме у ЧВГ меньше, чем у ЧПГ, но несколько выше, чем у ЧШГ.

Чем больше количество шаровидного графита в структуре ЧВГ, тем выше его *герметичность*.

В результате сравнения экспериментальных значений относительной *термостойкости* установлено, что детали из высокопрочных чугунов с вермикулярным и шаровидным графитом при определенных условиях могут иметь более высокую эксплуатационную стойкость, чем детали из ЧПГ.

Обрабатываемость резанием. Параметры обработки резанием (точением, фрезерованием) отливок из ферритного и ферритно-перлитного чугунов ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40 те же, что и обработки резанием отливок из чугунов с пластинчатым графитом СЧ20, СЧ25, СЧ30. Образующаяся из ЧВГ стружка легко ломается и стойкость инструмента не изменяется.

Область применения. Благодаря высокому уровню физико-механических, эксплуатационных и литейных свойств ЧВГ широко при-

меняется для производства разнообразных деталей современных машин и оборудования (табл. 11.11).

Легированный перлитный ЧВГ, обладающий высокими антифрикционными свойствами, рекомендуется для изготовления деталей цилиндропоршневой группы форсированных дизелей, так как он обеспечивает существенное повышение ресурса двигателей.

Таблица 11.11. Область применения ЧВГ

Марка чугуна	Область применения	Примеры отливок
ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40	Детали общего машиностроения (вместо серого чугуна), работающие при повышенных циклических механических нагрузках. Детали двигателей внутреннего сгорания, работающие при переменных повышенных температурах и механических нагрузках (автомобилестроение и тракторостроение, дизелестроение, транспортное, энергетическое и металлургическое машиностроение)	Базовые детали станков, кузнечно-прессового оборудования, корпусные детали. Маслоприводы для тракторов, головки цилиндров, бандажные кольца шестерен автомобилей повышенной грузоподъемности, тормозные рычаги тракторов, тормозные кронштейны, соединительные фланцы, крышки коробок передач, корпуса, крышки и головки цилиндров, корпуса турбокомпрессоров, выхлопные патрубки, ступицы колес, балансиры, V-образные блоки 12-цилиндровых двигателей, блоки 6-цилиндровых двигателей. Тормозные диски для высокоскоростных поездов, корпуса выпускных клапанов. Корпуса газовых турбин, корпуса компрессоров
ЧВГ30	Металлургическая оснастка	Изложницы, поддоны, кокильная оснастка, шлаковни
ЧВГ45	Детали, работающие при значительных механических нагрузках, в условиях трения, изнашивания, гидрокавитации, повышенных термоциклических нагрузок	Корпуса винтовых передач, поршни и гильзы двигателей внутреннего сгорания, корпуса гидроаппаратуры высокого давления, эксцентриковые зубчатые колеса

11.7. Легированные чугуны

В современном машиностроении необходимо применять отливки из чугунов, обладающие наряду с конструкционной прочностью и другими специальными свойствами, которые обеспечивают их надежную и длительную эксплуатацию в различных агрессивных средах или специфических условиях.

Специальные свойства, как и структура, определяются главным образом степенью легированности чугуна.

40 марок легированных чугунов со специальными свойствами для производства отливок регламентируются ГОСТом 7769—82 и ГОСТом 1585—85, которые распространяются на все основные виды специальных чугунов, применяемых для изготовления жаростойких, жаропрочных, коррозионно-стойких, износостойких и немагнитных отливок:

ЧХ1; ЧХ2; ЧХ3; ЧХ3Т; ЧХ9Н5; ЧХ16М2; ЧХ16ЧХ22; ЧХ28Д2; ЧХ22С; ЧХ28; ЧХ32; 4С5; 4С5Ш; 4С4МШ; 4С13; 4С15; 4С17; 4С15М4; 4С17М3; ЧЮХШ; ЧЮ7Х2; ЧЮ6С5; ЧЮ22Ш; ЧЮ30; ЧГ6С3Ш; ЧГ7Х4; ЧГ8Д3; ЧНХТ; ЧНХМД; ЧН2Х; ЧНХМДШ; ЧН3ХМДШ; ЧНМШ; ЧН4Х2; ЧН15Д3Ш; ЧН15Д7; ЧН19Х3Ш; ЧН11Г7Ш; ЧН20Д2Ш.

Легированные чугуны подвергают термической обработке для обеспечения необходимых свойств и структуры. ГОСТ 7769—82 предусматривает отдельные виды термической обработки, регламентирует температурный режим, выдержку, способ охлаждения, показатели прочности при растяжении жаростойких чугунов при повышенных температурах, механические свойства и модуль нормальной упругости чугунов с шаровидным графитом при 873 К, значения длительной прочности и ползучести при высоких температурах чугунов марок ЧН19Х3Ш, ЧН11Г7Ш и ЧЮ22Ш.

В обозначении марок легированного чугуна буквы и цифры имеют такое же значение, как и в марках легированных сталей: буква Ч означает чугун, буква Ш — шаровидную форму графита.

Марки легированных чугунов из упомянутых стандартов, а также приведенных в ГОСТе 1585—85 обладают антифрикционными свойствами и применяются для деталей, работающих в узлах трения со смазочным материалом. Стандарт определяет шесть марок чугуна с пластинчатым графитом (АЧС) и по две марки соответственно высокопрочного (АЧВ) и ковкого (АЧК) чугуна.

Антифрикционные свойства чугунов в значительной степени зависят также от типа смазочного материала и температуры узла трения.

ГОСТ 7769—82 и ГОСТ 1585—85 регламентируют следующие марки антифрикционных чугунов:

АЧС-1; АЧС-2; АЧС-3; АЧС-4; АЧС-5; АЧС-6; АЧВ-1; АЧВ-2; АЧК-1; АЧК-2. Кроме того, в приложении к стандарту приведены 20 марок высоконикелевых чугунов с пластинчатым (L) и шаровидным (S) графитом, рекомендованных ISO 2892: L-NiMn137; L-NiCuCr1562; L-NiCuCr1563; L-NiCr202; L-NiCr203; L-NiSiCr2053; L-NiCr303; L-NiSiCr3053; L-Ni35; S-NiMn137; S-NiCr202; S-SiCr203; S-NiSiCr2052; S-Ni22; S-NiMn234; S-NiCr301; S-NiCr303; S-NiSiCr3055; S-Ni35; S-NiCr353.

В зависимости от содержания элемент в отдельности или в сочетании с другими придает чугуну одновременно несколько специальных свойств.

Контрольные вопросы

1. В чем главное различие чугуна и стали?
2. Чем отличаются микроструктуры чугунов: серого, ковкого, высокопрочного и с вермикулярным графитом?
3. Назовите графитизирующие и антиграфитизирующие элементы.
4. Какое значение имеет скорость охлаждения отливок?
5. Какие чугуны бывают со свободным углеродом, а какие находятся в химическом соединении с ним?
6. Как улучшить механические свойства серых чугунов?
7. Как маркируют серые чугуны?
8. Как получают ковкий чугун и в чем его основное отличие от других чугунов?
9. Как маркируется ковкий чугун?
10. Чем характеризуется высокопрочный чугун (ЧШГ) и где он применяется?
11. Назовите отличительные особенности чугуна с вермикулярным графитом. Как он маркируется?
12. Охарактеризуйте технологические свойства чугунов с вермикулярным графитом.
13. Назовите области применения чугунов с вермикулярным графитом.
14. Как маркируются легированные чугуны и где они применяются?

Цветные металлы и сплавы

12.1. Общие сведения

Ценные свойства цветных металлов обусловили их широкое применение в различных отраслях современного производства. Медь, алюминий, цинк, магний, титан и многие другие металлы и их сплавы являются незаменимыми материалами для машиностроительной, приборостроительной и электротехнической промышленности, самолетостроения и радиоэлектроники, ядерной и космической отраслей техники.

Маркировка элементов, входящих в сплавы цветных металлов, отличается от маркировки легированных сталей. Постепенно, входя в экономические контакты с зарубежными странами, Россия будет вынуждена ввести в маркировку легированных и цветных сплавов латинские знаки химических элементов, как в таблице Д. И. Менделеева.

Ниже предлагается обозначение элементов, входящих в сплавы цветных металлов, применяемых в России (табл. 12.1).

Таблица 12.1. Обозначение химических элементов, вводимых в сплавы на основе меди, и других цветных металлов в России

Элемент	Обозначение	Элемент	Обозначение
Алюминий	А (АЛ)	Галлий	Гл
Барий	Бр	Гафний	Гф (ГФМ, ГФИ)
Ванадий	Вам (ВнМ, Вэл)	Германий	Г
Висмут	Вн	Гольмий	ГОМ
Вольфрам	В	Диспрозий	ДИМ
Гадолиний	Гм	Европий	Ев

Окончание табл.

Элемент	Обозначение	Элемент	Обозначение
Железо	Ж	Рений	Ре
Золото	Зл	Родий	Рд
Индий	Ин	Ртуть	Р
Иридий	И	Рутиний	Ру
Иттербий	Итм	Самарий	С
Иттрий	Им (Ум)	Свинец	С
Кадмий	Кд	Селен	Ст
Кобальт	К (Ко)	Серебро	Ср
Кремний	Кр (К)	Скандий	Скм
Лантан	Ла	Сурьма	Су
Литий	Лэ	Таллий	Тл
Лютеций	Люм	Тантал	ТТ
Магний	Мг	Теллур	Т
Марганец	Мц (Мр)	Тербий	Тем
Медь	М	Титан	Ти
Мышьяк	Мш	Торий	То
Неодим	Нм	Тулий	ТУМ
Никель	Н	Фосфор	Ф
Ниобий	Нб	Хром	Х
Олово	О	Церий	(Хр)
Осмий	Ос	Цинк	Ц
Палладий	Пд	Цирконий	ЦЕВ
Платина	Пл	Эрбий	Эрм
Празеодим	П(Пр)		

12.2. Алюминий и его сплавы

Алюминий в промышленности России стали получать в 1932 г. Название его происходит от латинского слова *alumen* — так 500 лет до н. э. называли алюминиевые квасцы, которые использовались для протравливания при крашении тканей и дубления кож. По распространенности в природе алюминий занимает третье место после кислорода и кремния и первое место среди металлов. По использованию в технике он занимает второе место после железа. В настоящее время мировое производство алюминия составляет более 15 млн т в год.

В России над технологией получения алюминия во второй половине XIX в. работал известный ученый-химик Н. Н. Бекетов, трудами которого воспользовались немцы, построившие первый алюминиевый завод в Гмелингине. В начале XX в. над способами получения алюминия работали русские ученые А. Н. Кузнецов, Е. И. Жуковский, П. П. Федотьев и др. Первый алюминиевый завод в нашей стране был пущен в эксплуатацию в 1932 г. на базе Волховской гидроэлектростанции. Строительство Днепрогэса позволило запустить в 1933 г. второй алюминиевый завод. В настоящее время действует большое количество мощных алюминиевых комбинатов, оснащенных новейшей техникой.

Производство алюминия — сложный технологический процесс. В свободном виде алюминий вследствие своей активности не встречается. Его получают из минералов — бокситов, нефелинов и алунитов. При этом сначала производят глинозем, а затем из глинозема путем электролиза получают алюминий. Для производства алюминия требуется огромное количество электроэнергии. Поэтому только широкомасштабное строительство электростанций позволяет вырабатывать его в необходимом для промышленности количестве.

Алюминий представляет собой серебристо-белый пластичный металл. В воздушной среде он быстро покрывается окисной пленкой, которая надежно защищает его от коррозии. Алюминий химически стоек против воздействия азотной и органических кислот, но разрушается щелочами, а также соляной и серной кислотами. Важнейшее свойство алюминия — небольшая плотность ($2,7 \text{ г/см}^3$), т. е. он в три раза легче железа. Температура плавления 660°C , теплоемкость $0,222 \text{ кал/г}$, теплопроводность при 20°C — $0,52 \text{ кал/(см} \cdot \text{с}^\circ\text{C)}$, удельное электрическое сопротивление при 0°C — $0,286 \text{ Ом/(мм}^2 \cdot \text{м)}$. Механические свойства алюминия невысоки: сопротивление на разрыв $50\text{--}90 \text{ МПа}$ ($5\text{--}9 \text{ кгс/мм}^2$), относительное удлинение 25--

45% , твердость $13\text{--}28 \text{ НВ}$. Высокая пластичность (максимальная пластичность достигается отжигом при температурах $350\text{--}410^\circ\text{C}$) этого металла позволяет прокатывать его в очень тонкие листы (фольга имеет толщину до $0,003 \text{ мм}$). Алюминий хорошо сваривается, однако трудно обрабатывается резанием, имеет большую линейную усадку — $1,8\%$. Для повышения прочности в алюминий вводят кремний, марганец, медь и другие компоненты. Кристаллическая решетка алюминия — куб с центрированными гранями. Значительные природные запасы алюминия, его небольшая плотность, высокие антикоррозионные свойства, хорошая электропроводность способствовали широкому распространению этого металла в различных отраслях техники.

Алюминий и его сплавы необходимы для самолето- и машиностроения, строительства зданий, линий электропередач, подвижного состава железных дорог. В металлургии алюминий служит для получения чистых и редких металлов, а также для раскисления стали. Из него изготавливают различные емкости и арматуру для химической промышленности. В пищевой промышленности применяют упаковочную фольгу из алюминия и его сплавов (для обертки кондитерских и различных изделий). Широкое признание получила алюминиевая посуда. Алюминий хорошо подвергается различным тонким покрытиям и окраске, поэтому его используют как декоративный материал.

Исходным материалом для получения алюминиевых сплавов является первичный алюминий (иногда с добавками вторичного — металлолома).

Первичный алюминий нормируется ГОСТом 11069—74. Этот стандарт распространяется на алюминий, изготавливаемый в форме чушек, слитков, катанки и ленты. В зависимости от химического состава первичный алюминий подразделяют на алюминий особой, высокой и технической чистоты. Марки первичного алюминия:

- особой чистоты — А999;
- высокой чистоты — А995, А99, А97, А95;
- технической чистоты — А85, А8, А7, А7Е, А6, А5, А5Е, А0.

Алюминиевые сплавы подразделяют на литейные и деформируемые. *Литейные алюминиевые сплавы* в чушках (рафинированные и нерафинированные) предназначены для изготовления фасонного литья и подшихтовки. Они нормируются ГОСТом 583—93. Стандарт предусматривает химический состав сплавов, технические требования к ним, правила приемки, методы испытаний, маркировки, упаковки, транспортирования, хранения и определения газовой

пористости. Для получения определенных механических свойств стандарт рекомендует режимы термической обработки.

Стандарт представляет около 100 марок алюминиевых сплавов: АК12 (АЛ2); АК8л (АЛ34); АК9с (АК9с); (АЛ10Су); АК5М; АК21М2, 5Н2,5; АМ4,5Кд; АК7Ц9; АМг11; (АЛ22); АЦ4Мг; (АЛ24) и др. В том же ГОСТе приведены механические свойства алюминиевых сплавов и способы литья.

Алюминий и *алюминиевые деформируемые сплавы* (ГОСТ 4784—97) предназначены для изготовления полуфабрикатов (листов, лент, полос, плит, профилей, панелей, прутков, труб, проволоки, штамповок и поковок) методом горячей и холодной деформации.

Стандартом предусмотрены марки алюминия: АД000 (А1 99,8; 1080А); АД00, 1010 (А1 99,7; 1070А); АД00Е, 1010Е (ЕА1 99,7; 1370) и др. (буква Е — сплав с гарантированными электрическими характеристиками).

Далее регламентируются следующие сплавы:

- марки алюминиевых сплавов системы алюминий — медь — магний и алюминий — медь — марганец;
- марки алюминиевых сплавов системы алюминий — марганец;
- марки алюминиевых сплавов системы алюминий — магний;
- марки алюминиевых сплавов системы алюминий — магний — кремний;
- марки алюминиевых сплавов системы алюминий — цинк — магний;
- марки алюминиевых сплавов, предназначенных для изготовления проволоки при холодной высадке;
- марки алюминиевых сплавов, предназначенных для изготовления сварочной проволоки.

Алюминиевые антифрикционные сплавы (ГОСТ 14113—78) применяют для изготовления монометаллических и биметаллических подшипников методом литья, а также монометаллических и биметаллических лент и полос путем прокатки с последующей штамповкой из них вкладышей. В зависимости от химического состава стандартом предусмотрены марки сплавов с указанием назначения каждого сплава: АОЗ-7; АО9—2; АО6—1; АО9—1, АО20—1; АО12—1, АН2,5; АСМ; АМСТ; АМК. Также стандартом определены условия работы изделий, изготовленных из этих сплавов.

Механические свойства некоторых алюминиевых сплавов представлены в табл. 12.2.

Таблица 12.2. Механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	σ_b , МПа	δ , %
Деформируемые сплавы:		
АМц	170	10
АМг5	300	20
АМг6	400	10
Литейные сплавы:		
АЛ2	180	5,0
АЛ7	260	3,0
АЛ8	350	10,0
АЛ19	360	5,0
АЛ27	360	18
Дюралюмины:		
Д1	490	14
Д20	540	11
Высокопрочные сплавы:		
В95	560—600	8,0
В96	670	7,0
Жаропрочные сплавы:		
АЛ1	260	0,6
АЛ21	220	1,5
АЛ33	280	2,0

12.3. Медь и ее сплавы

Медь относится к числу металлов, известных с глубокой древности. Раннему знакомству человека с медью способствовало то, что она встречается в природе в свободном состоянии в виде самородков, которые иногда достигают значительных размеров. Медь и ее сплавы сыграли большую роль в развитии материальной культуры. В настоящее время медь широко используют в электромашиностроении, при строительстве линий электропередач, для изготовления оборудования телеграфной и телефонной связи, радио-, телевизи-

онной и электронной аппаратуры. Из меди изготавливают провода, кабели, шины и другие токопроводящие изделия. Большое количество меди идет на производство бронзы, латуни и других медных, а также алюминиевых и железных сплавов.

Медь обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, прочностью, вязкостью и коррозионной стойкостью. Физические свойства ее обусловлены структурой. Она имеет кубическую гранецентрированную пространственную решетку. Температура плавления ее 1083 °С, кипения — 2360 °С. Средний предел прочности зависит от вида обработки и составляет от 220 до 420 МПа (22—45 кгс/мм²). Относительное удлинение 4—60%, твердость 35—130 НВ, плотность 8,94 г/см³. При 20 °С удельная теплоемкость равна 0,092 кал/(г·°С), теплопроводность — 0,94 кал/(с·см·°С). Удельное электрическое сопротивление 0,0178 Ом/мм²·м, линейная усадка 2,1%. Прочность меди увеличивается в 1,5 раза после холодной деформации (наклепа), но при этом относительное удлинение ее снижается до 8—10%. В зависимости от степени чистоты и состояния поверхности цвет меди изменяется от светло-розового до красного. Относительно меди, которая взята за эталон (100%), сравниваются некоторые металлы (табл. 12.3).

Таблица 12.3. Сравнительные физические свойства некоторых металлов

Наименование свойства	Значения для металлов						
	Cu	Ag	Al	Mg	Zn	Ti	Fe
Электропроводность, %	100	106	62	39	29	25	17
Теплопроводность, %	100	108	56	41	29	15	17

Медь. По способам получения ГОСТ 859—78 предусматривает следующие марки меди:

- электролитическое рафинирование — М00к, М0к, М1к (из этих марок меди изготавливаются слитки и полуфабрикаты);
- огневое рафинирование — М00б, М0б;
- переплавка катодов — М00, М0; М1;
- переплавка с раскислением — М1р, М1ф, М2р, М3р;
- огневое рафинирование отходов меди — М2, М3 (эти марки предназначены для электротехнической промышленности (для раскисления в металлургии используют фосфористую медь)).

В обозначении меди марок М1, М1р, предназначенной для электротехнической промышленности, дополнительно включают букву Е.

Обладая замечательными свойствами, медь в то же время как конструкционный материал не удовлетворяет требованиям машиностроения, поэтому ее легируют, т. е. вводят в ее состав такие металлы, как цинк, олово, алюминий, никель и др., за счет чего улучшаются ее механические и технологические свойства.

По химическому составу медные сплавы подразделяют на латуни, бронзы и медно-никелевые; по технологическому назначению — на деформируемые, используемые для производства полуфабрикатов (проволоки, листа, полос, профиля), и литейные, применяемые для литья изделий.

Латуни. К ним относятся сплавы меди с цинком и другими компонентами. Латуни, содержащие кроме цинка другие легирующие элементы, называются *сложными*, или *специальными*, и именуются по вводимым, кроме цинка, легирующим компонентам. Например: железомарганцевая (ЛЖМц59-1-1), алюминиево-никель-кремнистомарганцевая (ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5) и др.

В обозначении марок латуней принята буквенно-цифровая система. Первая буква означает «латунь», остальные буквы соответствуют условным обозначениям химических элементов, входящих в латунь; первая цифра указывает на содержание меди, остальные цифры — на содержание других легирующих элементов. Содержание цинка в обозначении марки не указывается. Для того чтобы определить содержание цинка в латуни, необходимо от 100% вычесть процентное содержание меди и других химических элементов, входящих в данную латунь. Например: томпак Л90 — Л — латунь, содержащая 90% меди, остальное — цинк; латунь алюминиевая ЛА77-2 — 77% меди, 2% алюминия, остальное — цинк; латунь алюминиево-никель-кремнистомарганцевая ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 — 75% меди, 2% алюминия, 2,5% никеля, 0,5% кремния, 0,5% марганца, остальное — цинк. Для обозначения марок латуней по СТ СЭВ 379—76 приняты латинские буквы. За латинской буквой, соответствующей химическому элементу, следует цифра, определяющая его процентную долю. Например: CuZn40 — 40% цинка, остальное — медь; CuZn28Sn1 — 28% цинка, 1% олова, остальное — медь; CuZn40AlMn — 40% цинка, 1% алюминия, около 1% марганца, остальное — медь.

В советской России составляли ГОСТ на обозначение химических элементов в период повальной безграмотности. Не каждый рабочий умел читать латинские обозначения.

По сравнению с медью латуни обладают большей прочностью, коррозионной стойкостью и упругостью. Они обрабатываются литьем, давлением и резанием. По технологическому назначению их подразделяют на обрабатываемые давлением и литейные.

Латуни литейные в чушках (ГОСТ 1020—97) поставляются в виде чушек и служат сырьем для получения латуней определенных марок, а также фасонных отливок. На торцах чушек несмываемой краской наносят цветную маркировку в виде вертикальных полос и крестов для различных марок латуней. К ним относятся такие марки, как ЛС, ЛК, ЛКС, ЛМцС, ЛАЖМд, ЛМцСКА и др.

Из латуней, обрабатываемых давлением (ГОСТ 15527—70, СТ СЭВ 379—76 и СТ СЭВ 2621—80), изготавливают полуфабрикаты (листы, ленты, полосы, трубы конденсаторов и теплообменников, проволоку, прутки, фольгу, поковки, штамповки), медали и значки, художественные изделия, музыкальные инструменты, сильфоны, гибкие шланги, застежки-молнии, подшипники скольжения и разную фурнитуру. Стандарт приводит марки этих латуней, их основные свойства и области применения (в скобках приведены обозначения марок латуней по СТ СЭВ 379—76).

К латуням, обрабатываемым давлением, относятся следующие марки:

Л96 — томпак (CuZn5), Л90 — томпак (CuZn10), Л85 — полутомпак (CuZn15), Л80 — полутомпак (CuZn20) — очень хорошо деформируются в холодном состоянии, пригодны дляковки, чеканки, эмалирования, не склонны к коррозионному растрескиванию;

Л70 — латунь (CuZn30) — очень хорошо деформируется в холодном состоянии, пригодна для пайки и нанесения на сталь (плакирования);

Л68 — латунь (CuZn32) — хорошо деформируется в холодном состоянии холодной высадкой;

Л63 — латунь (CuZn37) — деформируется в холодном состоянии глубокой вытяжкой, волочением, прокаткой, чеканкой, изгибом, пригодна для пайки и сварки, хорошо полируется;

Л60 — латунь (CuZn40) — хорошо деформируется в горячем и холодном состоянии, пригодна дляковки и глубокой вытяжки;

ЛА77-2 — латунь (CuZn20Al2) — алюминиевая, обладает средней прочностью и хорошей коррозионной стойкостью;

ЛАЖ60-1-1 — латунь (CuZn38Al1, Mn2Fe1) — алюминисевожелезная, горячедеформируемая, обладает высокой прочностью, изно-

состойкостью, стойкостью к агрессивным средам, нечувствительна к масляной коррозии;

ЛАН59-3-2 — латунь — алюминисевоникелевая, предназначена для изготовления труб и прутков;

ЛЖМц59-1-1 — латунь — железомарганцевая, используется для производства полос, труб, прутков и проволоки;

ЛН65-5 — латунь — никелевая, применяется для изготовления листов, лент, труб и проволоки;

ЛМц58-2 — латунь (CuZn40Mn1) — марганцевая, высокой прочности, пригодна для пайки, коррозионно-стойкая;

ЛМцА57-3-1 — латунь (CuZn40AlMn) — марганцовоалюминиевая, обладает средней прочностью и высокой вязкостью, коррозионно-стойкая;

ЛО90-1 — томпак оловянный, применяется для производства лент, полос и проволоки;

ЛО70-1 — латунь (CuZn28Sn1) — оловянная, обладает очень хорошей коррозионной и эрозионной стойкостью;

ЛО62-1 — латунь (CuZn38Sn1) — имеет среднюю прочность и хорошую коррозионную стойкость;

ЛО60-1 — латунь — предназначена для изготовления проволоки;

ЛС63-3, ЛС74-3, ЛС64-2, ЛС60-1, ЛС59-1, ЛС59-1В — латуни — свинцовые, используются для производства лент, полос, прутков, проволоки и листов;

ЛЖС58-1-1 — латунь — железосвинцовая, предназначена для изготовления прутков;

ЛК80-3 — латунь — кремнистая, пригодна для производства поковок и штамповок;

ЛМш68-0,05 — латунь — мышьяковая, ЛАМш77-2-0,05 — латунь — алюминисевомышьяковая, ЛОМш70-1-0,05 — латунь — оловянномышьяковая, предназначены для изготовления труб;

ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 — латунь — алюминисевоникелькремнистомарганцевая, используется для производства полос и труб;

ЛС63-2 (CuZn35Pb2), ЛС60-2 (CuZn38Pb2), ЛС59-3 (CuZn39Pb2) — латуни — свинцовые, применяются для изготовления лент, полос, прутков, труб, проволоки, поволоков и листов.

Из литейной латуни (ГОСТ 17711—93) изготавливают различную арматуру, работающую при температуре до 250 °С и подвергающуюся гидравлическим испытаниям; детали, работающие в морской воде (при условиях их протекторной защиты) и подвергающиеся лужению или заливке баббитом; детали судового и автомобильного строения и др.

Марки литейных латуней (выборочно): ЛЦ40С (П, К, Ц); ЛЦ40Сд (Д, К); ЛЦ40Мц1,5 (П, К, Ц); ЛЦ40Мц3Ж (П, К, Д);

ЛЦ40Мц3А (К, Ц); ЛЦ38Мц2С2 (П, К); ЛЦ37Мц2С2К(К); ЛЦ14К3С3 (К, П); ЛЦ30А3 (П, К); ЛЦ23А6Ж3Мц2 (П, К); ЦЛЦ16К4 (П, К).

Буквы, стоящие после обозначения марки, указывают на способ литья: П — в песчаные формы, К — в кокиль, Д — под давлением, Ц — центробежное.

Механические свойства латуней приведены в табл. 12.4.

Таблица 12.4. Механические свойства латуней (выборочно)

Марка	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	Твердость НВ	Назначение
<i>Деформированные латуни</i>				
Л90 (томпак)	260	45	530	Ленты, листы, трубы
Л80	320	52	550	Ленты, проволока
Л63	330	50	560	Ленты, проволока, прутки
ЛС59-1	400	45	900	Полосы, прутки
ЛЖМц59-1-1	450	50	880	Проволока, трубы
ЛАЖ60-1-1	450	45	—	Трубы, прутки
<i>Литейные латуни</i>				
ЛЦ16К4	300	15	100	Арматура, детали приборов
ЛЦ40Мц3Ж	500	10	100	Детали ответственного назначения, гребные винты
ЛЦ23А6Ж3Мц2	700	7	160	Гайки нажимных винтов, червячные винты

Бронзы. К бронзам относят сплавы на основе меди, в которых в качестве добавок используют олово, алюминий, бериллий, кремний, свинец, хром и другие элементы. Как и латуни, бронзы подразделяют на литейные и обрабатываемые давлением. В обозначении марок бронз принята та же система, что и у латуней, только в начале проставляют буквы Бр, означающие — «бронза».

Безоловянные литейные бронзы в чушках применяют в качестве шихтового материала для получения бронз по ГОСТу 493—79. Этот стандарт полностью соответствует рекомендациям СЭВ (РС 1586—75).

ГОСТом 493—79 предусмотрены марки безоловянных бронз, а также изделия, изготавливаемые из этих бронз:

БрА9Мц2Л, БрА10Мц2Л — антифрикционные детали и арматура, работающая в пресной воде, жидком топливе и паре при температурах до 250 °С;

БрА9Ж3Л, БрА10Ж3Мц2 — антифрикционные детали и арматура;

БрА10Ж4Н4Л — детали для машин, используемых в химической и пищевой промышленности, а также детали, работающие при повышенных температурах;

БрА10Ж6Н6 — арматура и антифрикционные детали;

БрА9Ж4Н4Мц1 — арматура, работающая в морской воде;

БрС30, БрСу3Н3Ц3С20Ф, БрА7Мц15Ж3Н2Ц2 — антифрикционные детали.

Химический состав и механические свойства *оловянных литейных бронз* регламентированы ГОСТом 613—79. Эти бронзы получают литьем в песчаные формы или в кокиль. Стандартом предусмотрены марки оловянных бронз, а также изготавливаемые из них изделия:

БрО3Ц12С5 — арматура общего назначения;

БрО4Ц7С5 — арматура и антифрикционные детали;

БрО4Ц4С17 — антифрикционные детали;

БрО3Ц7С5Н1 — детали, работающие в масле, паре и пресной воде;

БрО5Ц5С5 — арматура, антифрикционные детали, вкладыши подшипников;

БрО5С25 — биметаллические подшипники скольжения;

БрО6Ц6С3 — арматура, антифрикционные детали, вкладыши подшипников;

БрО8Ц4 — арматура, фасонные части трубопроводов, насосы, работающие в морской воде;

БрО10Ф1 — узлы трения, высоконагруженные детали шнековых приводов, нажимные и шпindelные гайки, венцы червячных шестерен;

БрО10Ц2 — арматура, антифрикционные детали, вкладыши подшипников, детали трения, облицовка гребных валов;

БрО10С10 — подшипники скольжения, работающие в условиях высоких удельных давлений.

ГОСТ 5017—74 определяет химический состав оловянных бронз, обрабатываемых давлением, и их свойства, а также марки этих бронз и изготавливаемые из них изделия:

БрОФ8-0,3 — проволока для сеток, используемых в целлюлозно-бумажной промышленности;

БрОФ7-0,2 (CuSn8) — прутки для различных отраслей промышленности;

БрОФ6,5-0,4 — проволока для сеток, применяемых в целлюлозно-бумажной промышленности, пружины, ленты, полосы и детали для машиностроения и другие марки.

Все эти бронзы обладают высокой коррозионной стойкостью, бронзы БрОФ8-0,3, БрОФ7-0,2, Бр6,5-0,4 и БрОФ6,5-0,15, кроме того, имеют хорошую износостойкость, их пружинящие свойства делают их пригодными для пайки и сварки. Бронзы БрОФ4-0,25 и БрОФ2-0,25 хорошо обрабатываются резанием, поддаются пайке и сварке. Бронзы БрОЦ4-3 и БрОЦС4-4-2,5 обладают антифрикционными свойствами, обрабатываются резанием, пригодны для пайки.

Алюминиевые бронзы. Химический состав безоловянных бронз, обрабатываемых давлением, нормируется ГОСТом 18175—78. Стандарт устанавливает марки и назначение этих бронз (в скобках приведены обозначения марок бронз по СТ СЭВ 377—76):

БрА5 (CuAl5) — деформируется в холодном и горячем состояниях, коррозионно-стойкая, жаропрочная, стойкая к истиранию, предназначена для изготовления монет, деталей машин, работающих в морской воде и химических средах;

БрА7 (CuAl8) — деформируется в холодном состоянии, жаропрочная, стойкая к истиранию, коррозионно-стойкая к серной и уксусной кислотам; применяется для изготовления деталей химического машиностроения и скользящих контактов;

БрАЖМц-10-3-1,5 (CuAl10Fe3Mn1), БрАЖН10-4-4 (CuAl10Fe4Ni4), БрАЖНМц9-4-4-1 — деформируются в горячем состоянии, обладают высокой прочностью при повышенных температурах, хорошей эрозионной, кавитационной и коррозионной стойкостью; из этих бронз производят трубные доски конденсаторов и детали химической аппаратуры;

БрАМц9-2 (CuAl9Mn2) — характеризуется высоким сопротивлением при знакопеременной нагрузке; рекомендуется для изготовления износостойких деталей, винтов, валов, деталей гидравлических установок и трубных досок конденсаторов;

БрАМц10-2 — имеет высокое сопротивление при знакопеременной нагрузке; пригодна для выполнения заготовок и фасонного литья в судостроении;

БрАЖ9-4 (CuAl9Fe4) — обладает высокими механическими и антифрикционными свойствами, коррозионно-стойкая; рекомендуется для производства шестерен, втулок и седел клапанов для

авиапромышленности, отливки массивных деталей для машиностроения.

Бериллиевые бронзы. БрБ2 (CuBe2Ni[Co]), БрБНТ1,9 (CuBe2NiTi), БрБНТ1,9Мг — обладают высокой прочностью и износостойкостью, хорошими пружинящими и антифрикционными свойствами, средними электропроводностью и теплопроводностью, деформируются в закаленном состоянии. Из этих бронз изготавливают пружины и пружинящие детали ответственного назначения, износостойкие детали всех видов и неискрящий инструмент.

Кремниевые бронзы. БрКМц3-1 (CuSi3Mn1) — коррозионно-стойкая, жаропрочная бронза имеет высокое сопротивление сжатию, пригодна для сварки. Применяется для изготовления деталей химических аппаратов, пружин и пружинящих деталей, сварных конструкций и деталей для судостроения.

БрКН1-3 — обладает высокими механическими, технологическими и антифрикционными свойствами. Предназначена для производства ответственных деталей в моторостроении, а также направляющих втулок.

Марганцевая бронза. БрМц5 — имеет высокие механические свойства, хорошо деформируется в горячем и холодном состояниях, коррозионно-стойкая, жаропрочная. Из этой бронзы изготавливают детали, работающие при повышенных температурах.

Кадмиевая и магниевая бронзы. БрКд1 (CuCd1) и БрМгО,3 — отличаются высокой электропроводностью и жаропрочностью. Их используют при производстве коллекторов электродвигателей и деталей машин контактной сварки.

Серебряная бронза. БрСр0,1 (CuAg0,1) — предназначена для изготовления коммутаторов, коллекторных колец и обмотки роторов турбогенераторов.

Хромовая бронза (CuCr1) — предназначена для производства сварочных электродов, электродеталей и оборудования сварочных машин.

Теллуровая бронза (CuFeTe) — выполняют детали, обрабатываемые на автоматах, элементы телетехнических, радиотехнических, электротехнических и электронных устройств.

Из безоловянистых бронз, обрабатываемых давлением, изготавливают полуфабрикаты: листы, полосы, ленты, прутки, профили, трубы, проволоку и поковки. В табл. 12.5 приведены марки и механические свойства бронз.

Таблица 12.5. Марки и механические свойства бронз

Марка	Механические свойства		Назначение
	σ_B , МПа	δ , %	
Оловянные бронзы (деформируемые)			
БрОФ 6,5-0,15	300	38	Пружины, коробки барометров, мембраны, подшипники
БрОЦС 4-4-2,5	360	35	Антифрикционные детали
Оловянные бронзы (литейные)			
БрОЦСН 3-7-5-1	180—200	14—16	Арматура для пресной и морской воды, пара
БрОЦС 4-4-17	180—200	8—10	Антикоррозионные детали, антифрикционные детали (втулки, червячные колеса)
Алюминиевые бронзы			
БрАЖ 9-4	600 (850)	40(5)	Прутки, поковки
БрАЖ 9-4Л	550	15	Фасонное литье
БрАЖН 10-4-4	650 (800)	35(9)	Прутки, поковки, трубы
Кремнистая бронза			
БрКМц 3-1	380 (700)	35(7)	Прутки, проволока, лента для изготовления пружин, простые фасонные отливки
Бериллиевая бронза			
БрБ2	540 (1150)	25 (3—6)	Прутки, ленты, проволока для пружин
Свинцовая бронза			
БрСЗ	60—80	4—6	Для заливки вкладышей подшипников

Примечание. В скобках в деформированном или в закаленном состоянии (для БрБ2 после старения).

12.4. Цинк и его сплавы

Сплав цинка с медью — латунь — был известен еще древним грекам и египтянам. Однако получить чистый цинк долгое время не удавалось. Выплавка цинка в промышленных масштабах началась лишь в XVII в.

Цинк — металл светло-серо-голубоватого цвета, хрупкий при комнатной температуре и при 200 °С, при нагреве до 100—150 °С становится пластичным. В соответствии с ГОСТом 3640—94 цинк изготовляют и поставляют в виде чушек и блоков массой до 25 кг. Стандарт устанавливает марки цинка и области их применения:

ЦВ00 (содержание цинка 99,997%) — для научных целей, получения химических реактивов, изготовления изделий для электротехнической промышленности;

ЦВ0 (Zn99,995) — для полиграфической и автомобильной промышленности;

ЦВ (Zn99,99) — для производства отливок под давлением, предназначенных для изготовления деталей особо ответственного назначения, авиационных и автомобильных приборов, для получения окиси цинка, цинкового порошка и чистых реактивов;

Ц0А (Zn99,98), Ц0 (Zn99,975) — для изготовления цинковых листов, цинковых сплавов, обрабатываемых давлением, ответственных отливок, получаемых под давлением, порошков, белил, лигатуры, для горячего и гальванического цинкования;

Ц1 (Zn99,95), Ц2 (Zn98,7), Ц33 (Zn97,5) — для различных целей.

В промышленности широко применяют цинковые сплавы: латуни, цинковые бронзы, сплавы для покрытия стальных изделий, изготовления гальванических элементов, типографские и др.

Цинковые сплавы в чушках для литья под давлением нормируются ГОСТом 19424—74. Эти сплавы используют в автомобилестроении и других отраслях промышленности. Стандартом установлены марки сплавов, их химический состав, определены изготавливаемые из них изделия:

ЦАМ4-10 — особо ответственные детали;

ЦАДМ4-1 — ответственные детали;

ЦАМ4-1в — неответственные детали;

ЦА4о — ответственные детали с устойчивыми размерами;

ЦА4 — неответственные детали с устойчивыми размерами;

ZnAl4A, ZnAl4Cu1A, ZnAl4Cu3A, ZnAl4Cu3 — для деталей автомобильной, электротехнической и машиностроительной промышленности.

Цинковые антифрикционные сплавы, предназначенные для производства монометаллических и биметаллических изделий, а также полуфабрикатов методами литья и обработки давлением, они нормируются ГОСТом 21437—95. Стандарт устанавливает марки этих сплавов, области их применения и условия работы:

ЦАМ9-1,5Л — отливка монометаллических вкладышей, втулок и ползунов;

ЦАМ9-1,5 — получение биметаллической ленты (сплав цинка со сталью и дюралюминием) методом прокатки для изготовления вкладышей путем штамповки;

ЦАМ10-5Л — отливка подшипников и втулок;

ЦАМ10-5 — прокатка полос для направляющих скольжения металлорежущих станков и других изделий.

12.5. Магний и его сплавы

Магний был открыт в XIX в. Он широко распространен в природе (в земной коре его содержится около 2,1%), но в свободном виде не встречается. Мощные скопления образуют карбонаты магния — магнезит и доломит. Магний входит в состав карналлита, многих горных пород, в виде хлоридов и сульфатов он растворен в озерной и морской воде. Промышленный магний получают электролитическим способом из магнезита, доломита, карналлита, морской воды и отходов различного производства (особенно при извлечении титана из руд) по схеме: получение чистых безводных солей магния → электролиз этих солей в расплавленном состоянии → рафинирование магния.

Магний — пластичный металл серебристо-белого цвета. Это один из наиболее легких цветных металлов, его плотность составляет 1,74 г/см³. Температура плавления магния 651 °С. Он имеет компактную гексагональную кристаллическую решетку. Магний неустойчив против коррозии, особенно во влажной среде (поверхностная окисная пленка не защищает его). Растворим во многих минеральных и органических кислотах. Горюч (сгорая, дает ослепительное пламя), самовоспламеняем (однако магний в виде слитков неогнеопасен). Устойчив против щелочей, фтористых солей, плавиковой кислоты. Чистый магний как конструкционный материал не применяют. В промышленности используют магниевые сплавы. В металлургии с помощью магния осуществляют раскисление и обессеривание некоторых металлов и сплавов, модифицируют серый чугун в целях получения графита шаровидной формы, производят трудно восстанавливаемые металлы (например, титан). Смеси

порошка магния с окислителями служат для изготовления осветительных и зажигательных ракет в реактивной технике и пиротехнике. Соединения магния применяют в производстве строительных материалов (цемента, ксилолита, фибролита и др.).

ГОСТ 804—93 предусматривает три марки *первичного магния*: Мг98, Мг95 (Мг99,95), Мг90 (Мг99,9). Массовая доля примесей в каждом из этих металлов соответственно составляет 0,04, 0,05 и 0,1%. Цифра после запятой обозначает содержание магния в процентах.

Свойства магния значительно улучшаются за счет легирования. Алюминий и цинк с массовой долей до 7% повышают его механические свойства, марганец улучшает его сопротивление коррозии и свариваемость, цирконий, введенный в сплав вместе с цинком, измельчает зерно, повышает механические свойства и сопротивление коррозии, торий улучшает жаропрочность, бериллий уменьшает окисляемость при плавке, литье и термической обработке.

ГОСТ 2581—78 нормирует *магниевые сплавы*, применяемые для производства фасонного литья и слитков, обрабатываемых давлением. В зависимости от химического состава стандарт предусматривает следующие марки этих сплавов: ММ2, ММ2ч, МА8Ц, МА8Цч, МА8Цэ, МА8ЦБч, МА10Ц1, МЦр1Н3.

Содержание основных компонентов сплавов: алюминий — 3—10%, цинк — 0,2—3%, марганец — 0,2—1,5%, а в сплаве марки МЦр1Н3 — цирконий — 0,4—1,1% и неодим — 2,6—3,2%.

ГОСТом 2856—79 установлены марки *магниевых литейных сплавов*, предназначенных для изготовления фасонных отливок: МЛ3, МЛ4, МЛ4пч, МЛ5, МЛ5пч, МЛ5он, МЛ6, МЛ8, МЛ9, МЛ10, МЛН, МЛ12, МЛ15, МЛ19. Буквы «пч» означают повышенную чистоту, «он» — общее назначение. Содержание основных компонентов сплавов: алюминий — 2,5—10,2%, марганец — 0,1—0,5%, цинк — 0,1—6,6%, цирконий — 0,4—1,1%, кадмий — 0,2—0,8%, индий — 0,2—0,8%, лантан — 0,6—1,2%, неодим — 1,6—2,8%, иттрий — 8%, индий — 0,2—0,8%, лантан — 0,6—1,2%, неодим — 1,6—2,8%.

Стандарт регламентирует для каждой марки сплава способы литья и вид термической обработки.

ГОСТом 14957—76 (в зависимости от химического состава) установлены марки *магниевых деформируемых сплавов*. Они предназначены для изготовления полуфабрикатов (листов, плит, прутков, профилей, полос, труб, проволоки, штамповок и поковок) методом горячей деформации, а также слитков и слябов: МД1, МА2, МА2-1, МА2-1пч, МА5, МА8, МА8пч, МА11, МА12, МА14, МА15, МА17, МА18, МА19, МА20, МА21 (ИМБ2).

В табл. 12.6 дан химический состав и механические свойства магниевых сплавов.

Таблица 12.6. Химический состав и механические свойства магниевых сплавов (выборочно)

Сплав	Массовая доля элементов, %				Механические свойства		
	Al	Zn	Mn	Другие элементы	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
<i>Литейные сплавы</i>							
МЛ5	7,5—9,0	0,2—0,8	0,15—0,5	—	226	85	5
МЛ6	9—10,2	0,6—1,2	0,1—0,15	—	216	137	1
МЛ10	—	0,1—0,7	—	0,4—1,0,2 Zr	230	140	
				2,2—2,8 Nd	225		3
МЛ12	—	4—5	—	0,6—1,1 Zr	225	130	5
<i>Деформируемые сплавы</i>							
МД1	—		1,3—2,5	—	190—220	120—140	5—10
МА21	3,8—5,0	0,8—1,5	0,3—0,7	—	270—330	160—230	8—20
МА14	—	5—6	—	0,2—0,9 Zr	320—340	220—290	6—14

12.6. Титан и его сплавы

Титан — металл серебристо-белого цвета. Это один из наиболее распространенных в природе элементов. Среди других элементов по распространенности в земной коре (0,61%) он занимает десятое место. Титан легок (плотность его 4,5 г/см³), тугоплавок (температура плавления 1665 °С), весьма прочен и пластичен. На поверхности

его образуется стойкая окисная пленка, за счет которой он хорошо сопротивляется коррозии в пресной и морской воде, а также в некоторых кислотах. При температурах до 882 °С он имеет гексагональную плотно упакованную решетку, при более высоких температурах — объемно-центрированный куб. Механические свойства листового титана зависят от химического состава и способа термической обработки (табл. 12.7).

Таблица 12.7. Химический состав и свойства титановых сплавов (выборочно) в закаленном и состаренном состоянии

Марка сплава	Свойства			
	σ МПа	δ , %	КСУ, МДж/м ²	Массовая доля легирующих элементов, %
<i>Технический титан</i>				
BT1-0	390—540	20	1,0	—
BT5	700—950	10—15	0,5	4,3—6,2 Al
BT5-1	750—950	10—15	0,4	4,3—6,0 Al; 2,0—3,0 Sn
OT4	700—900	12—20	0,4	3,5—5,0 Al; 0,8—2,0 Mn
BT6C	850—1050	10	0,3	5,3—6,8 Al; 3,5—5,0 V
BT3-1	980—1170	6	0,2	5,5—7,0 Al; 0,8—2,3 Cr; 2,0—3,0 Mo; 0,2—0,7 Fe; 0,15—0,4 Si
BT15	1300—1500	6	—	3,0 Al; 11,0 Cr; 8,0 Mo

Вредными примесями титана являются азот, углерод, кислород и водород. Они снижают его пластичность и свариваемость, повышают твердость и прочность, ухудшают сопротивление коррозии. При температурах свыше 500 °С титан и его сплавы легко окисляются, поглощая водород, который вызывает охрупчивание (водородная хрупкость). При нагреве до температуры выше 800 °С титан энергично поглощает кислород, азот и водород — эта способность его используется в металлургии для раскисления стали. Титан хорошо обрабатывается давлением и сваривается, но плохо поддается

резанию. Он служит легирующим элементом для других цветных металлов и сплавов стали. Благодаря своим замечательным свойствам титан и его сплавы нашли широкое применение в самолето-, ракето- и судостроении. Из титана и его сплавов изготавливают полуфабрикаты, листы, трубы, прутки и проволоку. Двухокись титана применяют при производстве белил и эмалей.

Основными промышленными минералами для получения титана являются: ильменит, рутил, неровскит и сфен (титанит). Промышленный титан — один из «молодых» конструкционных материалов. В нашей стране его производство начато в 1954 г. Технология получения титана сложна, трудоемка и длительна: сначала вырабатывают титановую губку, затем путем переплавки в вакуумных печах из нее производят ковкий титан.

Губчатый титан, получаемый магниетермическим способом (ГОСТ 17746—79), служит исходным материалом для производства титановых сплавов и других целей. В зависимости от химического состава и механических свойств стандартом установлены следующие марки *губчатого титана*: ТГ-90, ТГ-100, ТГ-110, ТГ-120, ТГ-130, ТГ-150, ТГ-Тв. Буквы ТГ обозначают титан губчатый, Тв — твердый; цифры означают твердость по Бринеллю.

Для изготовления полуфабрикатов предназначены титан и титановые сплавы, обрабатываемые давлением (ГОСТ 19807—91). В зависимости от химического состава стандарт предусматривает следующие марки (выборочно): ВТ1-00, ВТ1-0, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ1-2, ВТ5, ВТ5-1, ВТ6, ВТ6с, ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ14, ВТ20, ВТ22, ПТ-7М, ПТ-3В, АТ3.

12.7. Благородные металлы

Благородные металлы — золото, серебро и металлы платиновой группы (платина, рутений, родий, палладий, осмий, иридий) — имеют высокую температуру плавления, стойки против окисления и воздействия кислот. Эти качества, дополненные красивым внешним видом и хорошей обрабатываемостью давлением, определили область их использования как драгоценных материалов, обеспечивающих высокие характеристики изделий разнообразного назначения в электронике, приборостроении, в химической промышленности, в фотокинопроизводстве, в изготовлении ювелирных изделий.

Основная доля производимых благородных металлов идет в радиоэлектронику, на изготовление ювелирных изделий и обеспечение валюты.

Благородные металлы применяют как в чистом виде, так и в виде сплавов. Содержание примесей в сплавах обозначается в их марке, в которой буквами указываются элементы, входящие в сплав: золото — Зл, серебро — Ср, медь — М, никель — Н, кобальт — К, платина — Пл, палладий — Пд, иридий — И, родий — Рд, рутений — Ру. Цифры, стоящие после букв, связаны с количественным содержанием этого элемента. В сплавах золота и серебра цифры обозначают тысячную долю (пробу) благородного компонента. Остальные компоненты определяются по разности от 1000. Например, в сплаве ЗлСрМ 583-20 содержится 583 части золота, 20 частей серебра и 397 частей меди. В переводе на проценты это составит 58,3% Au, 2% Ag и 39,7% Cu.

В марках сплавов на основе металлов платиновой группы содержание элементов указывается в процентах (а не тысячных долях, как в случае сплавов золота и серебра). К примеру, в марке ПлПдРу 4-3,5 содержится 4% палладия и 3,5% рутения, остальное платина. Массовая доля основного элемента — платины — равна 92,5%.

Содержание золота, серебра и платины в ювелирных изделиях оценивается пробами, которые классифицируют на тысячные, золотниковые, каратные и унцевые. В тысячной пробе — за 100% принимают 1000 частей. Это означает, что, к примеру, в золотом сплаве 583-й пробы золото составляет 58,3%. В золотниковой пробе за основу количественной оценки приняты золотники. Золотником раньше в России называли 1/96 часть русского фунта (русский фунт равен 409,5 г). Поэтому в золотниковой пробе за 100% принято 96 золотников. На старых ювелирных изделиях могут стоять именно золотниковые пробы, которые сейчас не применяются. Каратная проба в основе оценки состава сплава предполагает весовую характеристику. Карат равен 0,2 г, за 100% применяется 24 карата. Аналогично в унцевой пробе за 100% берется 480 унций (ювелирная или аптекарская унция равна 31,103 г).

Золото плавится при температуре 1063 °С, имеет плотность 19 320 кг/м³, кристаллизуется в гранецентрированную кубическую решетку без полиморфных превращений, обладает хорошей тепло- и электропроводностью, не растворяется в кислотах и щелочах, стойко против температурного воздействия. Растворяется в ртути, «царской водке», в цианистых солях калия и натрия, реагирует с бромом и хлором. Прекрасно деформируется и может быть раскатано до прозрачной фольги толщиной, измеряемой долями микрона.

Имеет ярко-желтый цвет, который может приобретать разные оттенки в зависимости от примесей: медь придает красноватый оттенок, кадмий — зеленый, железо — синий, серебро и платина — светлый.

Предел прочности золота равен 100—120 МПа, относительное удлинение 40—50%. Валютное золото обычно соответствует 995-й пробе, русское золото — 999-й пробе.

Сплавы золота легируют серебром и медью, а также цинком, никелем, кадмием, железом. Стандартными пробами ювелирных сплавов являются 375, 583, 750 и 958. Содержание лигатуры в этих сплавах приведено в табл. 12.8.

Технические сплавы золота могут иметь многоатомный химический состав и поставляются в виде готовых изделий как полуфабрикаты (прутки, листы, проволока и др.). Одним из низкопробных составов является сплав марки ЗлСрМ333-333. Сплавы золота используют в стоматологии (сплав 916-й пробы), для декоративного и антикоррозионного золочения, в точном приборостроении. Золочение на поверхности изделия производят электролитически, амальгированием и механической накладкой. В последнем случае применяют тончайшие листы сусального золота, получаемого из марок Зл999,9, ЗлСр900-40, ЗлСр750-250 и некоторых других.

Таблица 12.8. Химический состав и твердость золотых сплавов различных проб

Проба сплава	Содержание лигатуры, %		Твердость, НВ
	Серебро	Медь	
1000	—	—	25
750	25,0	—	45
750	—	25,0	265
583	41,7	—	53
583	—	41,7	113
375	62,5	—	34
375	—	62,5	70

Из золота изготавливают припои, им расписывают фарфоро-фаянсовые изделия и окрашивают стекла в рубиновый цвет.

Серебро имеет температуру плавления 960 °С, кристаллизуется в гранецентрированную кубическую решетку, не претерпевает полиморфных превращений. Серебро имеет самое низкое удельное электрическое сопротивление $\rho = 0,016 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ (у меди оно равно $0,0172 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$).

Другой выдающейся характеристикой серебра является высокая отражательная способность его полированной поверхности (световые и тепловые лучи отражаются на 95—97%). Плотность серебра 1050 кг/м^3 , временное сопротивление 150—160 МПа. Чистое серебро коррозионно-стойкое и высокопластичное. Его можно раскатать до толщины прозрачной фольги. Серебро растворяется в азотной и серной кислотах, реагирует с бромом, сероводородом, хлором.

Серебро находит применение как в чистом виде, так и в виде сплавов. Значительное количество серебра расходуется для производства светочувствительной бумаги и пленки. В химической промышленности его применяют в качестве катализаторов, в медицине — в качестве бактерицидного средства, в быту — для кухонной утвари (столовые приборы и другая посуда). Серебром покрывают зеркала и поверхности колб термосов. Много серебра расходуется на изготовление портативных источников электропитания. Аккумуляторы, в которых батареи сделаны из серебра и цинка, имеют больший запас энергии, меньший вес и габариты, чем обычные аккумуляторные батареи, в которых применен свинец. Химическая стойкость серебра способствует использованию его для декоративных и антикоррозионных покрытий, из него изготавливается сусальное серебро.

Из сплавов серебра наиболее известны сплавы с медью, добавление которой повышает твердость и полируемость изделий. Большое распространение получили припои, сделанные на основе серебра, легированного медью, кадмием, свинцом, оловом, цинком и фосфором. Эти материалы используют в тех случаях, когда надо получить неразъемное соединение с высокой электропроводностью, коррозионной стойкостью и вибрационной устойчивостью (холодильная техника, автоматика, электроника). Наиболее ходовыми ювелирными сплавами серебра являются пробы 800, 875 и 916.

Металлы платиновой группы имеют белый цвет с различными оттенками; кристаллизуются в гранецентрированную кубическую решетку (платина, палладий, родий и иридий) или в гексагональную плотноупакованную (рутений и осмий). Плотность и температура плавления этих металлов приведены в табл. 12.9.

Таблица 12.9. Плотность и температура плавления металлов платиновой группы

Металл	Символ	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С	Металл	Символ	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, °С
Тяжелые металлы				Легкие металлы			
Платина	Pt	21450	1769	Палладий	Pd	12000	1552
Иридий	Ir	22400	2454	Родий	Rh	12400	1966
Осмий	Os	22500	3030	Рутений	Ru	12200	2310

Металлы платиновой группы не окисляются при комнатной и повышенной температурах и кислотоупорны.

Родий обладает высокой отражательной способностью (80%). Это несколько ниже, чем у серебра, но родий не тускнеет.

Платиноиды обычно производят в виде слитков, порошка и различных полуфабрикатов. Содержание случайных примесей в платиноидах очень низкое, в их сплавах лигатурой служат благородные металлы.

Платина помимо ювелирных изделий (обычно в качестве оправы драгоценных камней) используется в химической промышленности как химически пассивный материал и катализатор, а в измерительной технике — для изготовления образцовых термометров для определения высоких температур (до 1600 °С), а иридиево-рутениевая — до 1800 °С. Родий применяют для специальных зеркал и рефлекторов, сплав платины с иридием — для наплавки износостойких наконечников перьев авторучек, а также для хирургических инструментов и точных научных приборов.

Слабая релаксионная способность (ослабление, уменьшение) характеризует родий и иридий — на них не действует даже «царская водка» (смесь азотной и соляной кислот).

12.8. Припой и флюсы

Припоями называются сплавы, используемые при пайке металлов, обеспечивающие необходимую прочность соединения и небольшое переходное сопротивление контакта. В отличие от сварки, при которой расплавляют кромки соединяемых деталей, при пайке метал-

лы нагревают лишь до температуры плавления припоя. Паяемые металлы при пайке не плавятся. Прочность соединения обеспечивается за счет взаимной диффузии атомов. Для получения качественного соединения припой в расплавленном состоянии должен хорошо «смачивать» поверхность, иметь более низкую температуру плавления, чем припаяемые металлы. Для этих целей используют припой на основе Ag, Cu, Pb, Sn, Zn, имеющие высокую электрическую проводимость. Сплавы этих металлов мало отличаются от электросопротивления чистых металлов.

Различают припой двух типов: мягкие (низкотемпературные), имеющие температуру плавления до 400 °С, и твердые (высокотемпературные) — с температурой плавления до 1083 °С.

В приборостроении для низкотемпературной пайки меди и сплавов на ее основе обычно применяют *мягкие* — оловянно-свинцовые припои (ПОС-10 — ПОС-90). Цифра в марке означает процентное содержание меди, остальное — свинец. Температура плавления этих припоев составляет соответственно 299—220 °С.

В тех случаях, когда важнейшим критерием является низкая температура плавления, например при пайке электронных компонентов, не допускающих перегрева, применяют сплав Вуда, имеющий температуру плавления 60,5 °С. Он представляет собой сложный эвтектический сплав, содержащий 12,5% Sn, 25% Pb, 12,5% Cd и 50% Bi. Для пайки алюминия и его сплавов применяют оловянно-цинковые припои (ПОЦ-60 — ПОЦ-90), где цифра в марке означает процентное содержание олова, остальное — цинк. Наименьшую температуру плавления 199 °С имеет припой ПОЦ-90.

Твердые припои обеспечивают более прочное и надежное соединение с меньшим переходным сопротивлением вследствие более развитой взаимной диффузии элементов основного металла и припоя. В качестве твердых припоев используют медь, медно-цинковые (ПМЦ-65 — ПМЦ-36) и медно-фосфористые (МФ-7 — МФ10) сплавы, а также припой, содержащие серебро (ПСр-10 — ПСр-70). Цифра в конце марки показывает массовую долю в процентах меди, фосфора и серебра соответственно. Припои, содержащие серебро, наиболее технологичны, обладают наиболее высокими механическими свойствами, низким переходным сопротивлением и пригодны для пайки любых металлов и сплавов.

Перед пайкой соединяемые поверхности очищают и обезжиривают, а затем наносят флюс.

Флюсы — это вещества, предназначенные для растворения и удаления окислов с поверхности места пайки. Флюс должен надежно защищать поверхности деталей и припоя от окисления в процес-

се пайки. Выбор флюса зависит от соединяемых пайкой металлов или сплавов, применяемого припоя, а также от вида монтажно-сборочных работ. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя. Флюсы разделяют на активные (кислотные), бескислотные, активированные и антикоррозионные.

Активные флюсы изготавливают на основе хлористого цинка, добавляя туда соляную кислоту, канифоль, вазелин, этиловый спирт и другие вещества. Активные флюсы интенсивно растворяют оксидные пленки на поверхности металла. Такие флюсы используют для получения наиболее прочных соединений черных, цветных металлов и их сплавов, но при условии, что схватки флюса можно будет полностью удалить с места пайки. При монтаже радиоэлектронной аппаратуры применение таких флюсов недопустимо.

Бескислотные флюсы изготавливают из канифоли, добавляя туда при необходимости этиловый спирт и глицерин. Именно эти флюсы чаще всего применяют при монтаже радиоэлектронной аппаратуры. Удаление таких флюсов после пайки необязательно.

Активированные флюсы также изготавливают на основе канифоли и этилового спирта путем добавления триэтаноламина и солянокислого анилина или диэтиламина. Эти флюсы применяют при пайке большинства металлов и сплавов, в том числе и плохо поддающихся пайке (сталь, никель, нихром и др.).

Антикоррозионные флюсы не вызывают коррозии после пайки, поэтому они могут применяться при соединении отдельных деталей электро- и радиоэлектронного оборудования. В их состав могут входить триэтаноламин, салициловая и ортофосфорная кислота, солянокислый анилин, вазелин, глицерин и другие вещества.

При пайке твердыми припоями в качестве флюса обычно применяют буру, борную кислоту и их смеси.

При пайке алюминия и его сплавов в качестве флюса используют 30%-й спиртовой раствор смеси, состоящей из 90% $ZnCl_2$, 2% $NaCl$ и 8% $AlCl_3$.

12.9. Антифрикционные (подшипниковые) и тормозные материалы

Антифрикционные материалы используют для изготовления деталей, работающих в условиях трения (скольжения): подшипников, втулок, направляющих, вкладышей. Условно эти материалы делят: на сплавы на основе олова, свинца, меди, железа, цинка и алюминия; спеченные сплавы — бронзографит, железографит; пла-

стмассы — текстолит, фторопласт, древесно-слоистые пластики; сложенные композиции — металл — пластмасса и др. Такие материалы должны обладать хорошей прирабатываемостью, износостойкостью, низким коэффициентом трения при работе в паре с материалом изделия, малой склонностью к заеданию (схватыванию), способностью удерживать равномерную смазку трущихся поверхностей.

Баббиты. Они являются широко распространенным антифрикционным легкоплавким материалом. Особенность баббитов — не оставляют надир на поверхностях сопрягаемых деталей. Их основные компоненты — пластичные олово и свинец, в которые добавляют более твердые материалы — медь, сурьму и никель.

Кальциевые баббиты в чушках (ГОСТ 1209—78) применяют для заливки подшипников скольжения. Их основу составляет свинец, в который добавляют кальций (0,3—1,15%), натрий (0,2—0,9%), магний (0,01—0,09%), олово (1,5—2,1%) и алюминий (до 0,2%). Масса чушек 24—28 кг. В зависимости от химического состава стандарт определяет марки баббитов и области их применения: БКА, БК2, БК2Ш, Б88, Б83, Б83С, БН, Б16, БС6.

Баббиты марок Б88, Б83 и Б83С имеют оловянную, а Б16, БН и БС6 — свинцовую основу. Основные компоненты сплавов: олово (5,5—17%), свинец (1—1,5%), сурьма (5,5—17%), медь (0,1—6,5%), кадмий (0,1—1,2%), никель (0,1—0,5%) и мышьяк (0,5—0,9%).

Механические и физические свойства баббитов зависят от марки сплавов. Плотность их 7,35—10,05 г/см³, твердость по Бриннелю 5/60 НВ, 5/62 НВ, 2,5/15 НВ, при 20 °С — 27—30 НВ, в сплаве — БС6 15—17 НВ. Предел текучести при сжатии 7—86 кгс/мм², предел прочности при сжатии 11—14,7 кгс/мм². Температура начала расплавления 240—247 °С. Температура плавления 320—410 °С, для сплава БС6 — 280 °С. Температура заливки 380—500 °С.

Химический состав и назначение некоторых марок приведены в табл. 12.10.

Антифрикционные латуни и бронзы. Для изготовления монометаллических подшипников применяются антифрикционные латуни (ГОСТ 17711—93, 17711—72 и 15527—70) следующих марок: ЛЦ40С (ЛС59-1Л), ЛЦ40Сд (ЛС59-1ЛД) — свинцовые; ЛЦ40Мц1,5 (ЛМЦ58-2Л) — марганцевая; ЛЦ38Мц2С2 (ЛМцС58-2-2) — марганцево-свинцовая; ЛЦ25С2, (ЛВОС) — оловянно-свинцовая, ЛЦ23А6Ж3Мц2, (ЛАЖМц66-6-3-2) — алюминий-железо-марганцевая; ЛЦ16К4 (ЛК80-3Л) — кремнистая.

Таблица 12.10. **Марка и назначение баббитов (выборочно) (ГОСТ 1320—74)**

Сплав	Массовая доля элементов, %					Область применения
	Sb	Cu	Cd	Sn	Другие элементы	
Б88 Б83	7,3—7,8 10—12	2,5—3,5 5,5—6,5	0,8—1,2	Остальное	0,15—0,25 Ni	Тяжелонагруженные машины, паровые турбины, турбонасосы
БН	13—15	1,5—2,0	0,1—0,7	9—11	0,1—0,5 Ni; 0,5—0,9 As	Машины средней нагруженности
Б16	15—17	1,5—2,0	—	15—17	—	Автомобильные моторы
БС6	5,5—6,5	0,1—0,3	—	5,5—6,5	—	То же

Примечание. В сплавах БН, Б16, БС6 основа — свинец.

Оловянные бронзы (ГОСТ 614—73) марок БрОЗЦ8С4Н1, БрОЗЦ3С4, БрО4Ц7С5 и БрО5Ц6С5 предназначены для изготовления различных антифрикционных деталей.

Для изготовления антифрикционных монометаллических деталей и вкладышей, в том числе высоконагруженных подшипников скольжения, служат оловянные литейные бронзы (ГОСТ 613—79) БрО4Ц7С5, БрО4Ц4С17, БрО5Ц5С5, БрО5С25, БрО6Ц6С3, БрО10Ф1, БрО10Ц2 и БрО10С10.

Антифрикционные углеродные (углеграфитные) материалы. Они предназначены для изготовления деталей (подшипников скольжения, уплотнительных устройств, поршневых колец и др.), работающих в узлах трения без смазочного материала при температурах от —200 до 2000 °С и скоростях скольжения до 100 м/с, а также в агрессивных средах. Свойства их зависят от химического состава и способа получения.

К углеродным антифрикционным материалам относятся:

- *углеродные обожженные материалы* (ТУ 48—20—4—72) марок АО-1500 и АО-600 (цифра означает усилие (кгс/см²) прессования, при котором получен материал); после пропитки сплавом СО5, содержащим 95% свинца и 5% олова, или баббитом Б83 этим материалам присваивают марки: АО-1500-СО5, АО-600-СО5, АО—1500-Б83 и АО-600-Б83;
- *углеродные графитизированные материалы* (ТУ 48—20—4—72) марок АГ-1500, АГ-600 и ЭГО (после пропитки сплавом СО5, баббитом Б83 и бронзой БрС30 — АГ500-СО5, АГ600-СО5, АГ1500-Б83, АГ600-Б83, АГ1500-БрС30, ЭГО-Б83);
- *графитофторопластовые антифрикционные материалы* марок 7В-2А (ЦМТУ 01-57-69), АФГМ (ЦМТУ 01-45-69) и АФГ-60ВС (ЦМТУ 01-46-69), состоящие из композиций на основе фторопласта-4 и углеродистых наполнителей;
- *графитопластовые антифрикционные материалы* марок АМС-1 (ТУ 48—20—7—72), АМС-3 (ЦМТУ 01—53—69) и АМС-5 на эпоксидно-кремнийорганической связующей основе; эти материалы предназначены для изготовления деталей, работающих в узлах трения при 180—200 °С, а кратковременно — при температурах до 320 °С;
- *антифрикционные частично графитизированные материалы* (ТУ 48—01—05—71) марок НИГРАН и НИГРАН-В; в них сочетаются свойства обожженных графитизированных материалов, подвергнутых дополнительной пропитке полимерными связующими; детали из этих материалов могут работать в узлах сухого трения и агрессивных средах при температурах до 300 °С.

Антифрикционные твердые покрытия (твердые смазочные материалы). К ним относятся материалы, обладающие малым коэффициентом трения, свойства которых не изменяются при высоких и низких температурах, при работе в вакууме, а также при воздействии агрессивных сред. Это — графит, дисульфид молибдена, нитрид бора, флотацианин меди, фторопласт-4 и др. В чистом виде они обладают невысокой износостойкостью и недостаточной прочностью.

Антифрикционные твердые покрытия выпускают в виде порошков, пластичных смазочных материалов и высыхающих композиций. Антифрикционные порошки втирают в поверхности трения. Такой способ не обеспечивает длительной работы узла трения, поэтому втирание приходится повторять через определенные промежутки времени.

Антифрикционные полимерные и пластмассовые материалы. Для изготовления различных деталей, работающих в механизмах трения (скольжения) с небольшими нагрузками и скоростями, применяют антифрикционные полимерные и пластмассовые материалы. Эти материалы обладают небольшим коэффициентом трения, высокими износостойкостью, химической стойкостью, могут работать без смазочного материала. Однако низкая (в сотни раз ниже, чем у металлов) теплопроводность, значительный (в десятки раз больше, чем у металлов) коэффициент термического расширения, небольшая твердость и высокая податливость ограничивают возможность их широкого использования. Более эффективно они применяются в комбинации с другими материалами, металлами и пластмассами.

Предельные режимы работы полимерных и пластмассовых материалов приведены в табл. 12.11.

Текстолит (ГОСТ 5—78) — слоистый пластмассовый материал, состоящий из хлопчатобумажного наполнителя и связующей термореактивной фенолформальдегидной (крезолоальдегидной, ксилолоальдегидной) или другой (из смеси фенольного сырья) смолы. Текстолит служит хорошим заменителем дорогостоящих цветных металлов. Его используют при изготовлении подшипников скольжения и накладок для направляющих различных профилей. Как конструкционный материал он применяется в самолето- и приборостроении, в автомобильной и электротехнической промышленности. Текстолитовые подшипники могут работать со смазочным материалом и без него, их можно смачивать водой. Детали из текстолита противостоят многим активным средам: органическим растворителям, маслам, бензину, слабым кислотам.

ПТК и ПТ — текстолит первого и второго сортов, предназначенный для изготовления подшипников скольжения общего назначения.

ПТМ-1, ПТМ-2 — предназначен для изготовления вкладышей подшипников прокатных станов.

ПТК-С — антифрикционный текстолит, имеющий плотность 1,4 г/см³ и предел прочности при сжатии 250 МПа (2500 кгс/см²), рекомендуется для изготовления вкладышей судовых дейдвудных подшипников.

¹ Дейдвуд — от англ. deadwood — труба с подшипником, через которую гребной вал выходит наружу.

Таблица 12.11. Предельные режимы работы полимерных и пластмассовых материалов

Материал	Работа без смазочного материала				Работа со смазочным материалом			
	Коэффициент трения	Давление, МПа (кгс/см ²)	Скорость скольжения, м/с	Температура, °С	Коэффициент трения	Давление, МПа (кгс/см ²)	Скорость скольжения, м/с	Температура, °С
Фторопласт-4	0,04—0,08	0,5—0,7 (5—7)	0,5	—	0,02—0,03	1,5(15)	5	—
Фторопласт-4 с наполнителями (Ф-4К20)	0,08—0,1	1—2,5 (10—25)	1	120	0,03	3,5—4 (35—40)	8—10	200
Фторопласт-40	0,5—0,6	0,6—0,8 (6—8)	0,5	100	0,06—0,08	5,5(55)	4	160
Фторопласт-40 с наполнителями (Ф40С15М1,5)	0,25—0,35	1—1,2 (10—12)	1	100	0,025—0,08	8(80)	7	160—180
Фторопласт-3	0,07—0,08	0,35 (3,5)	0,5	50	0,04—0,05	1(10)	3	125
Полиамидные смолы АК-7, П-610	0,17—0,2	2—3 (20—30)	0,5	75	0,08—0,14	2,5—3 (25—30)	0,5	100
Капрон	0,15—0,34	1,5—2,5 (15—25)	0,2	80—90	0,08—0,16	2,5—3 (25—30)	0,5	90—100
Капрон с наполнителями (АТМ-2)	0,1—0,2	2—2,5 (20—25)	2,5—3	140	0,08—0,12	8—10 (80—100)	6—8	175
Текстолит	0,2—0,3	5(50)	1	80	0,06—0,1	10(100)	5—10	100

Контрольные вопросы

1. Дайте полную характеристику меди.
2. Как маркируется медь по способам получения?
3. Какие медные сплавы выделяют по химическому составу и технологическим свойствам?
4. Что такое латунь и какие марки вам известны?
5. Как обозначаются наиболее распространенные химические элементы, входящие в медные сплавы?
6. Назовите несколько марок литейных латуней и обрабатываемых давлением.
7. Как обозначаются алюминий-железная, алюминий-никелевая, железомарганцевая, железосвинцовая, алюминий-никель-кремний-марганцевая латуни?
8. В чем разница в маркировке бронз и латуней? Приведите пример.
9. Приведите примеры нескольких марок безоловянных и оловянных бронз, расшифруйте их.
10. Назовите несколько марок коррозионно-стойких и антифрикционных бронз.
11. Дайте физико-механическую характеристику алюминию.
12. Как маркируется и расшифровывается первичный алюминий?
13. Приведите примеры нескольких марок алюминиевых сплавов. Расшифруйте их.
14. Дайте характеристику цинка. Где он применяется?
15. Назовите характерные особенности магниевых сплавов.
16. Дайте технологическую и физико-механическую характеристику титановым сплавам.
17. В каких отраслях промышленности применяют титановые сплавы? Расшифруйте несколько марок антифрикционных латуней и бронз.
18. Какие металлы относят к благородным?
19. Какие сплавы называют припоями?
20. Какое отличие существует между сваркой и пайкой металлов?
21. Что такое баббиты и где они применяются?
22. Назовите и расшифруйте несколько марок антифрикционных латуней и бронз.
23. Где применяются и как маркируются антифрикционные неметаллические материалы?

Неметаллические материалы**13.1. Керамика, стекло, графит**

Керамика. К керамике относят неорганические вещества, как правило, получаемые путем формовки и спекания минеральных смесей. Основным компонентом промышленных керамик служат минералы. В керамике между атомами существуют прочные химические связи, что обуславливает ее химическую устойчивость и высокую температуру плавления.

Минералы, входящие в состав керамики, делят на оксидные и не содержащие кислорода. О свойствах керамики, изготовленной на основе чистых оксидов и бескислородных соединений подробнее можно узнать в специальных справочниках.

Подавляющее большинство керамик предназначены для работы при высоких температурах. Поэтому в процессе эксплуатации они испытывают термические удары, которые приводят к возникновению больших внутренних напряжений, способных вызвать разрушение керамического изделия. Особенно опасно резкое охлаждение керамики, когда создаются благоприятные условия для возникновения и развития трещин на поверхности изделия (поверхностные слои изделия при охлаждении сжимаются, а внутренние — более нагретые — препятствуют их сжатию).

В зависимости от состава керамика подразделяется на традиционную и новую. *Традиционные (классические) керамики* преимущественно состоят из трех компонентов: глины, кремня и полевого шпата. Глина состоит из соединений оксидов Al_2O_3 , SiO_2 , и H_2O . Наличие воды в глине обеспечивает формуемость изделия до обжига. Кремень (кварц) представляет собой кристаллическое соединение SiO_2 , а полевого шпата — соединения K_2O , Al_2O_3 и SiO_2 с довольно низкой температурой плавления. Во время обжига эти соединения образуют стекловидную фазу, связывающую кристаллические компоненты.

К *новой керамике* обычно относят чистые соединения, такие, как карбиды, нитриды, оксиды, а также керметы, стеклокерамику и

др. Помимо изготовления посуды, строительных и огнеупорных кирпичей, цемента керамическая промышленность освоила производство материалов для электроники, ядерной и космической техники, для машиностроения, химической и лазерной технологии, для инструмента.

Широко применяемым видом керамики является *глинозем*, который существует в нескольких кристаллических формах. Чистый корунд имеет белый цвет и полупрозрачен, примеси придают ему тот или иной оттенок: окись титана окрашивает в голубой цвет (сапфир), окись хрома — красный (рубин). Промышленный глинозем содержит примесей меньше 1%, а высокоглиноземная керамика — до 15%. Эти материалы обладают высокой твердостью и электрическим сопротивлением, малой пористостью, мелким зерном, хорошим сопротивлением абразивному износу и способностью сохранять размеры. Подобное сочетание свойств керамики существенно расширяет область ее использования. Из-за малых диэлектрических потерь и высокой механической прочности при высоких температурах глиноземы нашли применение при изготовлении колб микроволновых ламп, обтекателей антенн радиолокаторов, оболочек мощных радарных ламп, свечей зажигания. Наиболее характерные области применения и свойства некоторых видов керамики приведены в табл. 13.1.

Таблица 13.1. Свойства и области применения некоторых видов керамики (выборочно)

Вид керамики	Плотность, кг/м ³	Огнеупорность, °С	Область применения
Фарфор: мягкий твердый	2300—2500 2300—2600	1650— 1670	Широкий ассортимент хозяйственной посуды, предметы декоративно-художественного назначения, фильтры, изоляторы, санитарно-строительные изделия, химическое машиностроение
Кварцевая	1900—2100	1690— 1700	Огнеупоры общего и специального назначения, материалы для ракетно-космической и ядерной техники, изделия высокой химической стойкости

Окончание табл.

Вид керамики	Плотность, кг/м ³	Огнеупорность, °С	Область применения
Корундовая	3100—4000	1850— 2000	Тигли, электроизоляция, каркасы трубчатых нагревателей, изоляция и чехлы для термопар, футеровка индукционных печей
Из магнетита	3400—3500	2000— 2200	
Плитка кислотоупорная	—	1580— 1670	Футеровка реакционных аппаратов, емкостей, защита строительных конструкций, аппаратов в гидролизной промышленности

По назначению керамику делят на жароупорную, электроизоляционную, вакуумно-плотную, пьезоэлектрическую, ферромагнитную, инструментальную и др. В каждом виде керамики, как правило, есть разновидности. Например, керамику, применяемую в электротехнике, принято делить на установочную (для изоляторов, катушек и др.), конденсаторную (для конденсаторов различных частот), пьезоэлектрическую (для ультразвуковой техники, систем зажигания).

Электрические свойства керамик в значительной мере зависят от их кристаллического строения. Примечательным представителем керамики являются ферриты — керамические магнитные материалы, получаемые из магнетита Fe_3O_4 или двойного оксида $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. У ферритов очень узкая петля гистерезиса, что обуславливает низкие потери энергии на их перемагничивание, высокое электрическое сопротивление, приводящее к устранению вихревых токов. Указанные качества ферритов позволяют с успехом использовать их в высокочастотных трансформаторах (свыше 100 кГц), в ячейках памяти и логических цепях ЭВМ.

Из *фарфоро-фаянсовой керамики* делают посуду, предметы декоративно-художественного назначения, изоляторы, санитарно-строительные изделия.

В машиностроении керамика находит применение при изготовлении двигателей и их отдельных узлов (нитрид кремния), деталей насосов и компрессоров (оксиды кремния и циркония, карбид кремния), валов, зубчатых колес, трубок сопел, инструментов, деталей измерительных приборов и шаровых мельниц (оксид алюми-

ния). Из керамики на основе диоксида циркония делают сверхтвердый и износостойкий инструмент для волочения.

В медицине керамику используют для протезирования зубов и суставов. Пористая керамика используется при фильтрации газов и жидкостей, при стерилизации пищевых продуктов, для теплоизоляции и звукопоглощения.

В металлургии и энергетике керамика является незаменимым материалом для футеровки печей и высокотемпературных реакторов.

К разновидности керамики относят *керметы*, представляющие собой частицы кристаллической керамики, связанные в единое целое металлической матрицей. Иногда керметы называют твердыми сплавами. Широкое применение керметы получили в инструментальной сфере и, в первую очередь, для изготовления режущего инструмента.

Для сопоставления свойств режущих материалов в табл. 13.2 приведены наиболее существенные их характеристики.

Таблица 13.2. Сравнение физических свойств различных инструментальных материалов (выборочно)

Свойство	Быстрорежущая сталь — W18%; Cr4%; V1%	Кермет WC-Co	$Al_2O_3 < 1\%$, MgO	Al_2O_3 — 10% TiO
Размер частиц, мкм	10	2	3	2
Предел прочности на изгиб, МН/м ²	3500	1600	600	600
Предел прочности на сжатие, МН/м ²	4100	4500	3000	3500
Микротвердость (нагрузка 100 г)	740	1800	1570	1660
Максимальная рабочая температура, °C	600	900	1000	1000

Керметы используются также как наплавочный материал для улучшения эксплуатационных характеристик поверхности изделий (штамповый инструмент, прокатные валки), для восстановления формы и размеров изношенных деталей.

Высокая жаропрочность керметов определила их назначение в качестве конструкционного материала, работающего при высокой температуре. Они являются конкурирующими материалами со сплавами жаропрочных металлов.

Изделия из технической керамики получают методом порошковой металлургии, состоящем, как правило, из двух этапов — формовки и последующего спекания. В частности, некоторые формы глинозема производят гальваническим способом, анодированием, заключающимся в окислении поверхности алюминия электрохимическим путем.

Стекло. Стекла в основном образуются оксидами металлов и находятся в аморфном состоянии. В стеклообразном состоянии могут находиться также некоторые органические материалы, но их не принято называть стеклами.

Структура стекла на примере кремнезема показана на рис. 13.1. На этом же рисунке для сопоставления приведена структура SiO_2 в кристаллическом состоянии.

Стекла отличаются прозрачностью в диапазоне длины волн видимого света, являются хорошими изоляторами электрического тока, характеризуются низкой теплопроводностью и невысоким термическим расширением.

Термостойкость стекол оценивается по разности температур, которую выдерживает стекло при резком охлаждении в холодной воде. Световые потери оцениваются коэффициентом светопоглощения, а светопрозрачность — коэффициентом светопропускания.

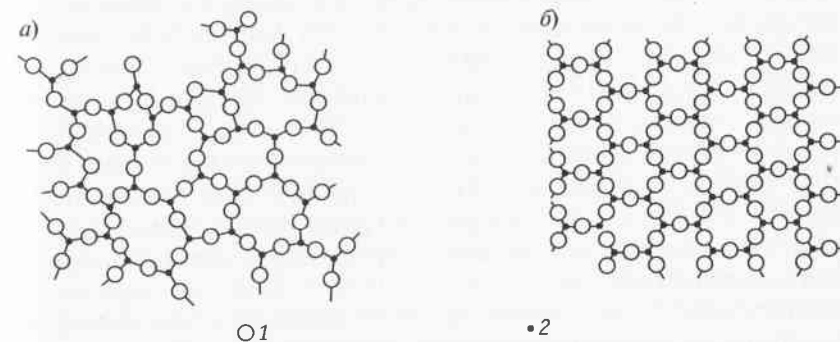


Рис. 13.1. Структура кремнезема в стеклообразном состоянии (а) и в состоянии твердого кристаллического тела (б) (показаны только три из четырех атомов кислорода, окружающих атом кремния: 1 — ион кислорода; 2 — ион кремния)

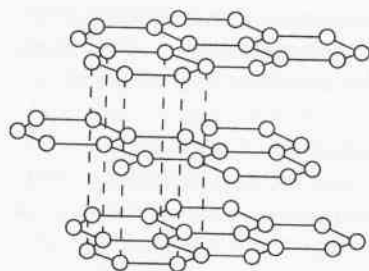


Рис. 13.2. Кристаллическая структура графита

Механические свойства стекол в значительной мере зависят от способа обработки и состояния их поверхности. Термически закаленное стекло имеет повышенные характеристики прочности, которые могут быть увеличены дополнительно химической обработкой поверхности. При быстром охлаждении (закалке) нагретого стекла в его поверхностных слоях создаются сжимающие напряжения, которые позволяют существенно повышать рабочие нагрузки на стекло. Закалке подвергают обычное листовое стекло толщиной 4,5—6,5 мм путем его равномерного и быстрого охлаждения от температуры 610—650 °С. Механические свойства закаленного стекла (стафинита) повышаются по сравнению с незакаленным стеклом в 5—7 раз. Химическое упрочнение приводит к еще большему улучшению характеристик стекла из-за образования на его поверхности тонких полимерных пленок. В частности, при обработке плавиковой кислотой с поверхности стекла удаляются дефекты, снижающие его качество. Результатом травления поверхности является повышение прочности и термостойкости стекол.

Стекла подразделяют в зависимости от стеклообразующих окислов на силикатные, алюмосиликатные, боросиликатные, а также на щелочные и бесщелочные, халькогенидные (не содержащие кислорода). По назначению стекла делятся на листовые, оптические, тугоплавкие, электротехнические, легкоплавкие, специальные. Для изготовления плит, блоков, панелей, тепло- и звукоизоляционных экранов, фильтров используют пеностекло, которое получают из промышленного стекла и газонаполнителя (уголь, мел, кокс). Вспенивание массы происходит при 690—900 °С. Для упрочнения стекла, а также для уменьшения разлета осколков при его разрушении применяют триплексы, представляющие собой композицию из двух закаленных стекол толщиной 2—3 мм с прослойкой из эластичной полимерной пленки. Если между двух стекол имеется воздушный промежуток, то такое трехслойное стекло (термопанель) обеспечивает теплоизоляцию. Эти материалы идут для теплозвукоизоляции кабин самолетов, железнодорожных вагонов, кузовов автомашин, корпусов судов, трубопроводов.

Графит. *Графит* является одной из кристаллических форм углерода и характеризуется гексагональной слоистой структурой (рис. 13.2). В направлении, перпендикулярном гексагональной плоскости, эти свойства значительно ниже. Анизотропные свойства графита учитываются при выращивании графитовых нитей — «усов», имеющих малый диаметр и существенную по отношению к диаметру длину. Если ось нити, представляющей собой монокристалл графита, параллельна слоям, т. е. длинная ось кристаллической решетки перпендикулярна оси нити, то прочность «усов» достигает 7 ГПа.

Пиролитический графит не имеет строго ориентированной кристаллографической структуры. Он используется в производстве сопел ракет и покрытий для защиты от высокой температуры. *Волокнистый графит* получают в виде поликристаллических волокон диаметром 10 мкм. Углеродные волокна имеют такую же удельную прочность, как стеклянные волокна.

13.2. Пластмассы

Пластмассы (пластики) представляют собой органические материалы на основе полимеров, способные при нагреве размягчаться и под давлением принимать определенную устойчивую форму. *Простые* пластмассы состоят из одних химических полимеров. *Сложные* пластмассы помимо полимеров включают добавки: наполнители, пластификаторы, красители, отвердители, катализаторы и др.

Наполнители в пластмассы вводят в количестве 40—70% для повышения твердости, прочности, жесткости, а также придания особых специфических свойств, например фрикционных, антифрикционных и др. Наполнителями могут быть ткани, а также порошкообразные и волокнистые вещества.

Пластификаторы (стеарин, олеиновая кислота, дибутилфталат) повышают эластичность, пластичность и облегчают обработку пластмасс. Их содержание колеблется в пределах 10—20%.

Отвердители (амины) и *катализаторы* (перекисные соединения) в количестве нескольких процентов вводят в пластмассы для отверждения, т. е. создания межмолекулярных связей и внедрение молекул отвердителя в общую молекулярную сетку.

Красители (минеральные пигменты, спиртовые растворы органических красок) придают пластмассам определенную окраску и снижают их стоимость. Состав компонентов, их сочетание и коли-

чественное соотношение позволяют изменять свойства пластмасс в широких пределах.

По виду наполнителя пластмассы бывают с твердым и с газообразным наполнителями. Твердые наполнители в виде порошков: графит, древесная мука, кварц, гипс; волокон: очесов хлопка и льна, волокон из стекла и асбеста; слоистых материалов: хлопчатобумажной, стеклянной, асбестовой тканей, бумаги.

По реакции связующего полимера к повторным нагревам выделяют термопластичные и термореактивные пластмассы. Термопластичные пластмассы на основе термопластичного полимера размягчаются при нагреве и затвердевают при последующем охлаждении. Чаще это чистые полимеры или композиции полимеров с пластификаторами, противостарителями. Термопласты отличаются низкой усадкой (1—3%). Для них характерны малая хрупкость, большая упругость и способность к ориентации.

Термореактивные пластмассы на основе термореактивных полимеров (смол) после тепловой обработки (отверждения) переходят в термостабильное состояние. Термореактивные пластмассы отличаются хрупкостью, имеют большую усадку 10—15% и содержат в своем составе наполнители.

По применению пластмассы можно подразделить на: конструкционные — для силовых деталей и конструкций, для несиловых деталей; прокладочные, уплотнительные; фрикционные и антифрикционные; электроизоляционные, радиопрозрачные; теплоизоляционные; стойкие к воздействию огня, масел, кислот; облицовочно-декоративные. Один и тот же пластик часто обладает свойствами, характерными для нескольких групп. Например, текстолит может быть одновременно конструкционным, электроизоляционным и прокладочным материалом.

Термопластичные пластмассы. Термопласты способны работать при температурах не выше 60—70 °С, поскольку выше этих температур их физико-механические свойства резко снижаются. Некоторые теплостойкие пластмассы способны работать при 150—200 °С, а термостойкие полимеры с жесткими цепями и циклической структурой устойчивы до 400—600 °С. Наличие в структуре полимеров кристаллической составляющей делает их более прочными и жесткими.

Тепловые характеристики и плотность полимеров (выборочно) представлены в табл. 13.3.

Таблица 13.3. Тепловые характеристики и плотность полимеров

Полимер	$t_{ст}, ^\circ\text{C}$	$t_{кр}, ^\circ\text{C}$	$t_{разр}, ^\circ\text{C}$	Плотность, кг/м ³
Полиэтилен	−125...−100	109—135	—	910—970
Полистирол	100	−240	≥ 250	1050—1060
Фторопласт-4	130	327	≥ 400	2140—2200
Фторопласт-3	52	218	≥ 315	2090—2160
Поливинилхлорид	85—50	—	100—180	1320—1400
Полиамиды	5—75	150—260	150—300	1040—1160
Органическое стекло	114	—	250	1180—1190
Кремнийорганические полимеры	−90...−10	—	350—400	1000—1200
Эпоксиды	50—200	—	150—175	1150—1200
Полиэфиры (ненасыщенные)	80—130	—	—	1100—1260
Фенолоформальдегидные полимеры	120—180	—	150—220	1200—1300

Примечание. $t_{ст}$, $t_{кр}$, $t_{разр}$ — температуры стеклования, кристаллизации и разрушения соответственно.

Полиэтилен получают полимеризацией бесцветного газа этилена при низком и высоком давлении.

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) (ГОСТ 16337—77) — продукт полимеризации этилена, получаемый при высоком давлении в трубчатых реакторах и реакторах с перемешивающим устройством с применением инициаторов радикального типа. Выпускается в виде гранул размером 2—5 мм. Это один из самых дешевых полимеров, обладающий высокими физико-механическими и технологическими свойствами. Он поддается всем видам переработки, свойственным термопластам, относительно прочен, пластичен, является хорошим диэлектриком. Стоек к щелочам и кислотам (серной, соляной и плавиковой), но разрушается в азотной кислоте, хлоре и фторе.

В зависимости от марки стандарт предусматривает следующие базовые марки ПЭВД (выборочно):

- 10204—003, 10703—020, 10813—020, 11513—070, 12103—200, 15303—003, 16204—020, 16803—070, 17703—010, 18303—120 — для покрытия изделий, контактирующих с пищевыми продуктами;
- 10604—007, 10703—020, 11503—070, 11503—070, 15303—003, 16204—020, 17504—006, 17703—010, 18303—120 — для изготовления игрушек;
- 10204—003, 15303—003 — для производства труб и фитингов, предназначенных для холодного хозяйственно-питьевого водоснабжения;
- 15803—020, 17603—006, 18303—120 — для изготовления узлов и деталей медицинской аппаратуры, приборов и инструмента;
- 10803—020, 11503—070, 16803—070, 17603—006, 18103—035 — для упаковки и укупорки лекарственных средств;
- 16803—070, 17603—006, 18103—035, 18303—120 — для изготовления изделий, контактирующих с живыми тканями (внутреннее протезирование).

Первая цифра 1 в марке указывает на то, что процесс полимеризации этилена протекает при высоком давлении в трубчатых реакторах и реакторах с перемешивающим устройством с применением инициаторов радикального типа.

Изделия из ПЭВД получают прессованием, экструзией, литьем, выдуванием, ротационным формованием, спеканием, напылением, заливкой, обработкой резанием и сваркой.

Полиэтилен низкого давления (ПЭНД) по ГОСТу 16338—85 (высокой плотности) получают суспензионным и газофазным методами полимеризации этилена при низком давлении на комплексных металлоорганических катализаторах в суспензии, а в газовой среде на комплексных металлоорганических катализаторах на носителе.

Базовые марки суспензионного полиэтилена (выборочно): 20108—001, 20308—005, 20608—012, 20708—016, 20908—040, 21008—075. Цифра 2 указывает на то, что процесс полимеризации этилена протекает при низком давлении с использованием комплексных металлоорганических катализаторов. Две последние цифры означают порядковый номер базовой марки. Четвертая цифра соответствует степени гомогенизации полиэтилена. Нуль означает, что полиэтилен подвергается усреднению холодным смешением. Пятая цифра определяет группу плотности полиэтилена — от 0,931 до 0,970 г/см³. Отходы производства полиэтилена и отработанные изделия из него используются для повторной переработки.

Базовые марки газофазного полиэтилена (выборочно): 271—70, 271—83, 273—73, 273—81, 276—75, 276—85, 276—95, 277—73, 277—83, 277—85, 277—95.

Макромолекулы полиэтилена высокого давления имеют более разветвленное строение. В результате ПЭВД отличается пониженной плотностью. С увеличением плотности и кристалличности полиэтилена возрастают его прочность и теплостойкость. Полиэтилен способен длительное время работать при 60—100 °С. Морозостойкость достигает — 70 °С и ниже. Химически стоек и нерастворим в растворителях при 20 °С. Полиэтилен применяют для изоляции защитных оболочек кабелей проводов, деталей высокочастотных установок и для изготовления коррозионно-стойких деталей — труб, прокладок, шлангов. Его выпускают в виде пленки, листов, труб, блоков. Полиэтилен подвержен старению. Для защиты от старения в полиэтилен вводят сажу 2—3%, замедляющую процесс старения в 30 раз. Отходы производства полиэтилена и отработанные изделия из него используются для повторной переработки.

Сополимеры стирола (ГОСТ 12271—76) — это трехкомпонентные сополимеры с акрилатами, предназначенные для изготовления изделий технического и бытового назначения методом литья под давлением. Выпускаются в виде гранул размером 3—5 мм окрашенными и неокрашенными. Стандарт регламентирует марки сополимеров стирола: МСН, МСН-Л — продукт сополимеризации стирола с метилметакрилатом и нитрилом акриловой кислоты. Он предназначен для изготовления изделий для автомобильной, радиотехнической и приборостроительной промышленности.

Полистирол общего назначения (ГОСТ 20282—86) — продукт полимеризации стирола в массе, или в суспензии, или в эмульсии, предназначается для изготовления изделий различными методами термоформирования. Марки полистирола, получаемого полимеризацией в массе: ПСМ-115, ПСМ-111, ПСМ-118, ПСМ-151 служат для изготовления методом литья под давлением изделий технического назначения и товаров народного потребления, светотехнических изделий сложной конфигурации для технического назначения, листов, профилей, пленок и нитей методом экструзии.

Условные обозначения марок: полистирол (ПС); способ получения: Э — эмульсионный, М — полимеризация в массе (блочный), С — суспензионный. В цифровом обозначении марки указаны рецептура светостабилизации, наименование цвета, рецептура окрашивания цвета, сорт, обозначение стандарта.

Пример условного обозначения полистирола блочного марки 111, светостабилизированного, красного цвета, первого сорта по ГОСТ 20282—86:

ПСМ-111—20, красный, рецептура 136П, 1-й сорт, ГОСТ 20282—86.

Полистирольная пленка (ГОСТ 12998—85) изготавливается из блочного полистирола методом экструзии расплава на приемную поверхность с последующей стадийной ориентацией, термофиксацией и охлаждением полотна.

Стандарт предусматривает следующие марки полистирольной пленки:

- К — для конденсаторов, работающих в интервале температур от -60 до $+85$ °С;
- Э — для изоляции электрических кабелей, работающих в интервале температур от -50 °С до $+70$ °С;
- Л — для ламинирования листов из ударопрочного полистирола;
- Т — общего технического назначения, для упаковки и бытового назначения.

Условное обозначение пленки состоит из сокращенного названия материала (ППС), марки (К, Э, Л, Т), толщины в микрометрах, ширины в мм, сорта и обозначения настоящего стандарта.

Пример условного обозначения полистирольной пленки марки К, толщиной 20 мкм, шириной 50 мм, высшего сорта: ППС-К, 20 × 50, высший сорт, ГОСТ 12998—85.

ГОСТ 28250—89 регламентирует группы и марки *ударопрочного полистирола*. Сверхударопрочный полистирол УПС-1002 предназначается для изготовления деталей радиотехнического и электротехнического назначения, требующих повышенных механических свойств.

Полистирол высокой ударопрочности:

- УПС-0803Э, УПМ-0703Э, УПМ-424 — для изготовления листов, внутренних деталей холодильников (кроме камер с рабочим режимом ниже -18 °С и камер с теплоизоляцией из пенополиуретана), деталей технического назначения, товаров народного потребления;
- УПС-0801, УПС-0803Л, УПМ-0703Л — для изготовления крупногабаритных изделий технического назначения и товаров народного потребления, комплектующих деталей холодильников.
- Полистирол средней ударопрочности: УПМ-0612Л, УПМ-0508, УПМ-0503Э, УПМ-0503Л — для изготовления изделий технического назначения и товаров народного потребления и тары, предназначенных для контакта с пищевыми продуктами.

Индексы «Л» и «Э» обозначают рекомендуемые способы переработки данного полимера — литьем под давлением или экструзией соответственно. Отсутствие индекса указывает на возможность переработки полимера обоими способами.

Ударопрочный полистирол выпускают в виде окрашенных и неокрашенных гранул. Его применяют для производства слабонагруженных деталей и высокочастотных изоляторов. Недостатками свойств полистирола являются его хрупкость при пониженных температурах, склонность к постепенному образованию поверхностных трещин.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) неполярен, имеет аморфно-кристаллическую структуру. Температурный порог длительной эксплуатации фторопласта-4 ограничивается 250 °С. Он относительно мягок, так как аморфная фаза находится в высокоэластическом состоянии. Фторопласт-4 отличается чрезвычайно высокой стойкостью к действию агрессивных сред: соляной, серной, плавиковой, азотной кислот, «царской водки», пероксида водорода, щелочей. Он разрушается под действием расплавов щелочных металлов, а также фтора и фтористого хлора при повышенных температурах. Фторопласт-4 не горит и не смачивается водой и многими жидкостями. Политетрафторэтилен не становится хрупким до -269 °С. Он сохраняет гибкость при температуре ниже -80 °С. Фторопласт-4 имеет низкий коэффициент трения (0,04), не зависящий от температуры плавления (327 °С) кристаллической составляющей. ГОСТ 24222—80 регламентирует пленку и ленты из фторопласта-4. Они изготавливаются механическим способом из заготовок, отпрессованных с последующей термической обработкой из порошка марок П и ПН по ГОСТу 10007—80. Стандарт предусматривает определенные марки пленок: КО, ЭО, ЭН, ИО, ИН, ПН — для изготовления прокладочного, уплотнительного и изоляционного материала.

В табл. 13.4 выборочно представлены электрические свойства полимеров и пластмасс.

Недостатками фторопласта-4 считают его токсичность вследствие выделения фтора при высоких температурах, хладотекучесть и трудность переработки из-за отсутствия пластичности.

Фторопласт-4 применяют для изготовления мембран, труб, вентиля, насосов, уплотнительных прокладок, сильфонов, манжет, антифрикционных покрытий на металлах, а также электрорадиотехнических деталей. Фторопласт-4Д (ГОСТ 14906—77) — для изготовления методом экструзии тонкостенных труб, шлангов, стержней, кабельной изоляции, ленты из материала «ФУМ», сырой каландрованной пленки. Рабочий температурный диапазон его от -60 до

+250 °С. Фторопласт-4Д имеет определенные марки, от которых зависит его применение: Ш, Л, Э, Т, У — шланги авиационного назначения, трубы, стержни, ленты «ФУМ» и изделия технического назначения.

Пример условного обозначения фторпласта-4Д марки Э: Ф-4Д, Э, ГОСТ 14906—77.

Таблица 13.4. Электрические свойства полимеров и пластмасс

Материал	Объемное электро- сопротивление, Ом · см	Электрическая прочность, кВ/мм
Полиэтилен	10^5	20
Фторопласт-4 (тефлон)	10^{17}	20
Полистирол	10^{15}	30
Фторопласт-3	10^{17}	24
Поливинилхлорид	10^{14}	16—30
Полиамиды	$10^{10}—10^{14}$	14—18
Органическое стекло	10^{15}	16
Фенопласты:		
с древесной мукой	$10^7—10^{11}$	10—11
с минеральным наполнителем	$10^{12}—10^{13}$	18
Полиэфиры	10^{12}	12—24
Эпоксиды	$10^{11}—10^{14}$	16—20
Кремнийорганические пластмассы с минеральными наполнителями	10^{13}	13—17

Трифторхлорэтилен представляет собой линейный аморфно-кристаллический полимер белого цвета. Максимальное количество кристаллической составляющей (до 80%) выделяется при медленном охлаждении из расплава до 150 °С, а при быстром охлаждении степень кристалличности составляет 30—40%. Фторопласт-3 с высокой степенью кристалличности имеет повышенную плотность, твердость. Полимер с низкой степенью кристалличности более пластичен. Фторопласт-3 имеет диапазон рабочих температур от

–105 до +70 °С, а при эксплуатации изделий от –195 до +125 °С. Нагрев выше 300 °С вызывает его деструкцию с образованием токсичного газообразного фтора. Фторопласт-3 по химической стойкости несколько уступает фторопласту-4, но все же его стойкость к действию органических растворителей кислот, щелочей и других агрессивных сред высокая. Полимер легко перерабатывается в изделия методами прессования, литья под давлением, механической обработкой.

ГОСТ 13744—87 предусматривает следующие марки: А, Б, В — для получения изделий специального назначения методом прессования и композиций специального назначения. Фторопласт-3 применяют для изготовления труб, клапанов, насосов, шлангов, а также используют в качестве низкочастотного диэлектрика.

Пример условного обозначения фторопласта-3 марки Б: Фторопласт-3, Б, ГОСТ 13744—87.

Полиметилметакрилат (органическое стекло) — пластифицированный и непластифицированный полимер (сополимер) метилового эфира метакриловой кислоты, широко применяемый в различных отраслях промышленности. Это аморфный, бесцветный, прозрачный термопласт. При нагреве до 80 °С начинает размягчаться, а при 105—150 °С становится пластичным. Основным критерием, определяющим его пригодность, является прочность. Органические стекла не подвержены действию разбавленных кислот, щелочей, углеродных топлив и смазок, растворяются в органических кислотах (уксусной, муравьиной), хлорированных углеводородах.

Техническое органическое стекло (ГОСТ 17622—72) выпускается двух марок: ТОСП и ТОСН. Температура его размягчения (в зависимости от толщины) 92—130 °С. Применяется в различных отраслях машино- и приборостроения. Условно техническое оргстекло обозначается:

- стекло органическое пластифицированное в виде листов толщиной 5 мм, красное прозрачное: Стекло органическое листовое ТОСП 5, красное прозрачное, ГОСТ 17622—72;
- стекло органическое техническое непластифицированное в виде блока толщиной 40 мм, бесцветное: Стекло органическое, блоки, ТОСН 40, бесцветное, ГОСТ 17622—72.

Листовое органическое стекло (ГОСТ 10667—90) в зависимости от назначения делят на пять марок:

- СО-120-А, СО-120-К — непластифицированное;
- СО-95-А, СО-95-К — пластифицированное;
- СО-133-К — сополимерное.

Буквы СО означают, что стекло органическое, цифры указывают на температуру размягчения, буквы — на область применения: А — авиационное, К — конструкционное (применяется в качестве конструкционного материала).

Пример условного обозначения листового органического стекла для остекления самолетов непластифицированного толщиной 10 мм, шириной 1000 мм, длиной 1100 мм: Листовое органическое стекло СО-120-А 10 Г 1000 Г 1100, ГОСТ 10667—90.

ГОСТ 9784—75 предусматривает пять марок *светотехнического органического стекла*:

- СБ — блочное;
 - СБПТ — блочное повышенной теплостойкости;
 - СБС — блочное трудногорючее (трудногораемое);
 - СЭ — экструзионное;
 - СЭП — экструзионное прозрачное.
- Стекла первых трех марок — замутненные, СЭП — прозрачное, стекла марок СБ и СБПТ могут изготавливаться окрашенными.

Часовое органическое стекло (ГОСТ 14183—78) представлено маркой СОЛ-Ч. Изготавливается оно в виде листов прямоугольной формы толщиной 0,6—2 мм, шириной 20—70 мм и длиной 100—252 мм, светопрозрачность его — не менее 92%, серебростойкость — не менее 6 ч, температура размягчения в зависимости от толщины листа — 95—118 °С.

Пример условного обозначения органического часового стекла марки СОЛ-Ч 1-го сорта, толщиной 1 мм шириной 20 мм, длиной 216 мм: Часовое органическое стекло СОЛ-Ч 1 Г 20 Г 216 — сорт 1, ГОСТ 14183—78.

Полиамид 610 литьевой (ГОСТ 10589—87) предназначен для изготовления литьем под давлением различных изделий конструкционного и электроизоляционного назначения. Изделия из полиамида 610, в том числе электроизоляционного назначения, работающие на низких и средних частотах, сохраняют свои механические свойства в интервале температур от –60 до +70 °С (при отсутствии механических нагрузок — до 100 °С). Они стойки к действию углеводородов, органических растворителей, масел и щелочей к солнечной радиации. Полиамид 610 выпускается в виде гранул белого и светло-желтого цвета размером 3—5 мм.

Поливинилхлорид (ПВХ) — линейный аморфный полимер. ПВХ стоек во многих средах: воде, щелочах, разбавленных кислотах, маслах, бензине. Размягчается при температуре, близкой к 70 °С. Поливинилхлорид используют в виде винипласта и пластика. Винипласт содержит стабилизаторы (карбонаты металлов) и

представляет собой прозрачное твердое вещество. Винипласт хорошо поддается механической обработке, легко сваривается, склеивается различными клеями. Материал применяют для облицовки гальванических ванн и в качестве защитного покрытия металлических емкостей. Винипласт склонен к хладотекучести. Он чувствителен к надрезам, отличается хрупкостью при низких температурах и низкой теплостойкостью.

Пластикаты получают, вводя в ПВХ пластификаторы — труднорастворимые органические жидкости. Пластифицированный ПВХ отличается повышенной эластичностью и морозостойкостью и более низкими электроизоляционными свойствами. Он выпускается промышленностью в виде листов, лент, трубок. Его часто используют в качестве уплотнителя воздушных и гидравлических систем, изолятора проводов и защитных оболочек кабелей аккумуляторных баков.

ГОСТ 5960—72 регламентирует пластикаты поливинилхлоридные для изоляции и защитных оболочек проводов и кабелей:

- И — изоляционный; марки: И40—13, И40—13А, И50—13, И40—14, И50—14, И60—12.
- ИТ — изоляционный термостойкий, ИТ—105.
- ИО — изоляционный и для оболочек, ИО45—12.
- О — для оболочек, О—40, О—50, О—55, ОМБ—60, ОНМ—50, ОНЗ—40.

Пример условного обозначения пластика для маслобензостойких оболочек черного цвета, рецептуры М317: Пластикат ОМБ—60, черный, рецептура М317, ГОСТ 5960—72.

Пластикат изоляционный термостойкий марки ИТ—105 с верхним пределом рабочей температуры 105 °С, неокрашенный, рецептуры Т—50, высшего сорта условно обозначается: Пластикат ИТ—105, неокрашенный, рецептура Т—50, высшего сорта, ГОСТ 5960—72.

Изоляционные пластикаты вышеуказанных марок окрашивают в различные цвета.

Термореактивные пластмассы. Их производят на основе термореактивных смол: фенолформальдегидных, аминокальдегидных, эпоксидных, полиамидных, кремнийорганических, ненасыщенных полиэфилов. Они отличаются повышенной прочностью, не склонны к ползучести и способны работать при повышенных температурах. Смолы в пластмассах являются связкой и должны обладать высокой клеящей способностью, теплостойкостью, химической стойкостью в агрессивных средах, электроизоляционными свойствами, доступной технологией переработки, малой усадкой при затвердевании.

Смолы — высокомолекулярные органические соединения, получаемые по реакциям полимеризации и поликонденсации.

В реакции полимеризации могут участвовать два мономера и более, а получаемые вещества называют сополимерами. Введение в реакцию дополнительных веществ, помимо основного мономера, необходимо для изменения свойств полимеров в требуемом направлении. Таким образом происходит образование сополимера из полистирола и каучука.

Процесс поликонденсации сопровождается отщеплением низкомолекулярных соединений (аммиак, вода, спирт и др.) в результате взаимодействия функциональных групп исходных мономеров. Здесь имеет место несовпадение элементарного состава мономеров, получаемых на основе полимеров. Поликонденсация протекает как в наличии, так и отсутствии катализатора.

Фенолформальдегидная (бакелитовая) смола — продукт поликонденсации фенола $\text{H}_5\text{C}_6\text{—OH}$ с формальдегидом H_2CO . В зависимости от условий поликонденсации образуются резольные (термореактивные) или новолачные (термопластичные) смолы, способные отверждаться при последующей переработке.

Новолачные смолы получают при избытке фенола, в присутствии кислотного катализатора при последующем нагревании для удаления воды. Новолак — твердая, хрупкая, прозрачная смола плавится при 100—120 °С, растворяется в этиловом спирте, ацетоне. Новолачные смолы отверждают нагревом совместно с уротропином, но значительно быстрее резольных. Новолаки часто применяют для изготовления пресс-порошков.

Резольные смолы получают поликонденсацией фенола с избытком формальдегида в щелочной среде. Резольные смолы длительное время при переработке сохраняют вязкотекучее состояние, что позволяет применять их в производстве толстостенных слоистых пластиков. Эти смолы способны отверждаться без подвода теплоты в присутствии кислот. Отверждение идет с большей скоростью, но эксплуатационные свойства полимера в этом случае невысоки. Отвержденная фенолформальдегидная смола с частой сетчато-пространственной структурой обладает повышенной хрупкостью. Смола обладает высокой адгезионной способностью ко многим наполнителям. В чистом виде эпоксидные смолы — вязкие жидкости, способные длительное время сохранять свойства без изменений. Они растворяются во многих органических растворителях (ацетон, толуол) и нерастворимы в воде, бензине. В присутствии отвердителей (амины, их производные, ангидриды карбоновых кислот) эпок-

сидные смолы быстро затвердевают, приобретая сетчато-пространственное строение. Отверждение смолы — полимеризационный процесс, без выделения воды или низкомолекулярных веществ, и развивается равномерно в весьма толстом слое. Получению монолитной массы затвердевшей эпоксидной смолы способствует сравнительно малая, всего 0,5—2%, усадка. Из-за наличия в затвердевшей смоле гидроксильной группы — OH она обнаруживает высокую адгезию ко многим материалам: стеклу, металлам, некоторым пластмассам.

Кремнийорганические смолы (силиконы) содержат в составе элементарного звена макромолекулы атомов углерода и кремния. Без наполнителя смола способна работать при 250—300 °С, а с наполнителями (слюда, асбест, стеклянное волокно) до 400—450 °С.

Недостатками силоксановых полимеров следует считать невысокую механическую прочность и пластичность при температурах выше 150 °С и низкую адгезионную способность к большинству других материалов. Кремнийорганические полимеры широко используются в качестве связующих в производстве стеклотекстолитов, а также в производстве термостойких резин (каучук СКТ), лакокрасочных покрытий, клеев, герметиков.

Полиэфирные смолы получают поликонденсацией различных спиртов и кислот (или их ангидридов).

Глифталевые смолы (алкидные) отверждаются в три стадии, как и фенолформальдегидные, с выделением воды. Для этого требуется более высокая температура и значительное время. Глифталевые смолы имеют повышенную теплостойкость до 150 °С. Они отличаются от бакелитовых смол повышенной эластичностью, стойкостью к старению при повышенных температурах и адгезией. Глифталевые смолы растворяются в ацетоне и спирте, стойки к воздействию воды, кислых сред и имеют хорошие диэлектрические свойства. На основе глифталевых смол получают клеи и лаки.

Пластмассы с порошковыми наполнителями. Их готовят на основе фенолформальдегидных (новолачных резольных), кремнийорганических и других смол. Другими компонентами пластмасс являются пластификаторы, красители и наполнители — древесная мука, молотый кварц, асбест, слюда, графит. Готовые изделия из пластмасс получают методом прессования. Марка *пресс-порошка* (композиции) складывается из набора букв и цифр. Буква К обозначает слово «композиция». Следующее за ней число — номер (марка) связующей смолы, а цифра соответствует определенному наполни-

телю. Так, цифра 1 обозначает, что наполнителем является целлюлоза, 2 — древесная мука, 3 — слюдяная мука, 4 — плавиковый шпат, 5 — молотый кварц, 6 — асбест. Марка К-220-21 означает, что пресс-порошок изготовлен на основе резольной смолы № 220 и наполнителей: древесной муки и целлюлозы; К-18-53, К-18-42, К-214-42 обладают повышенной водо- и теплостойкостью, ФКП-1, ФКПМ-10 — повышенной ударной прочностью.

Повышенной химической стойкостью владеют марки: К-17-36, К-18-81, К-17-81; грибостойкостью К-18-36.

Жаростойкие, химически влагостойкие и ударопрочные пресс-порошки в качестве основы содержат новолачные смолы. У жаростойких пресс-порошков наполнителем является асбест или слюда. Химически и влагостойкие пресс-порошки, как правило, модифицированы поливинилхлоридом или фенолформальдегидной смолой, а в качестве наполнителя содержат древесную муку, измельченный кокс, рубленую стеклонить.

Пресс-порошки на основе кремнийорганических смол применяются в высокочастотной и низкочастотной технике для изготовления дугостойких и электроизоляционных деталей (каркасы катушек, переключатели, штепсельные разъемы), деталей антенных устройств, работающих при 200—250 °С и кратковременно при 350—400 °С. Наполнителями в них являются асбест и стекло.

Газонаполненные пластмассы. В зависимости от макроструктуры газонаполненные пластмассы делятся на пенопласты и поропласты. В пенопластах полимерная основа образует систему замкнутых изолированных ячеек, заполненных газом. В поропластах полимерная основа образует систему ячеек с частично разрушенными перегородками, которые сообщаются между собой.

Поропласты (губчатые материалы) эластичны, их объемная масса составляет 25—45 кг/м³. Получают поропласты, вводя в состав композиций вещества, способные выкипать при нагреве или вымываться водой, что и приводит к образованию пор. Поропласты выпускают в виде блоков с пленкой на поверхности. Они отличаются высокой способностью поглощать звуки (70—80 %) на технических частотах.

Пенопласты — жесткие материалы, имеют малую объемную массу от 20 до 300 кг/м³. Замкнутая ячеистая структура придает им хорошую плавучесть и высокие теплоизоляционные свойства. Коэффициент теплопроводности низкий — от 0,003 до 0,007 Вт/(м · К).

Термопластичные пенопласты на основе полистирола, поливинилхлорида, полиэтилена и других получают вспениванием их в состоянии высокоэластической деформации, т. е. при температуре, превышающей температуру стеклования на 10—20 °С. При этом происходит некоторая ориентация макромолекул, что приводит к получению более прочных пенопластов. Их термостойкость не превышает 60 °С, так как при 70—80 °С развиваются релаксационные процессы и связанная с ними усадка пенопласта.

Термореактивные смолы — фенолформальдегидная, эпоксидная, кремнийорганическая и другие — быстро переходят при нагреве в вязкотекучее состояние с малой эластичностью и по мере увеличения пространственных связей быстро затвердевают, образуя пространственно сшитые макромолекулы. Формование изделий из термореактивных смол и их вспенивание выполняют на начальной стадии отверждения, когда молекулы смолы способны к вязкому течению. Пористая структура получается введением в состав смол газообразователей — порофоров, минеральных (NH₄)CO₃, NaHCO₃ и органических (азодинитрил диизомасляной кислоты, полиизоцианаты).

Свойства пенопластов зависят от их плотности и химического состава полимерной основы.

Наиболее распространенными и прочными являются пенополистирол (ПС) и пенополивинилхлорид (ПХВ), способные работать при 60 °С. Фенолкаучуковые (ФК) пенопласты имеют рабочую температуру 120—160 °С. Наличие в их составе алюминиевой пудры (ФК-20-А-20) повышает рабочую температуру до 200—250 °С. Пенопласт К-40 на кремнийорганической основе кратковременно выдерживает температуру 300 °С. Пенопласты широко применяются в качестве теплоизоляционного материала в конструкциях холодильников, контейнеров, рефрижераторов. Они часто используются для заполнения внутренних полостей конструкций и тем самым повышают удельную прочность, жесткость и вибропрочность силовых элементов.

Плиты пенополистирольные (пенопласты) ГОСТ 15588—86 изготавливаются беспрессовым способом из суспензионного вспенивающегося полистирола с добавкой и без добавки антипирена. Плиты предназначены для тепловой изоляции строительных ограждающих конструкций и промышленного оборудования. Температура изолирующих поверхностей — не выше 80 °С. Плиты относятся к группе стораемых материалов. Марки плит: 15, 25, 35, 50 (цифры соответ-

вуют величине объемной массы плит в кг/м^3 в воздушно-сухом состоянии). Пример условного обозначения плит из вспененного полистирола с добавкой антипирина марки 15, длиной 900 мм, шириной 500 мм, толщиной 50 мм: ПсБ-С-15-900 × 500 × 50, ГОСТ 15588—86.

Пластмассы без наполнителя или с порошкообразным наполнителем называют по роду связующего вещества с добавлением окончания «пласт», например:

- фенопласты (на основе фенолформальдегидных смол);
- аминопласты (аминоформальдегидные смолы);
- анилопласты (анилиноформальдегидные смолы);
- эфиропласты (полиэфирные смолы);
- этиленопласты (полиэтиленовые смолы с элементарным звеном $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$, пример материала — полиэтилен);
- винипласты (поливинилхлоридные смолы); фторопласты (полифторэтиленовые смолы); стиропласты (полистирольные смолы); акрилопласты (полиакриловые смолы, пример материала — оргстекло);
- эпоксипласты (эпоксидные смолы);
- амидопласты (полиамидные смолы, примеры материалов: капрон с нейлоном);
- уретанопласты (полиуретановые смолы);
- силикопласты (полисилоксановые связующие);
- целлопласты (на основе эфиров целлюлозы).

Пластмассы со сложным и волокнистым наполнителем называют по роду наполнителя:

- текстолиты (наполнитель — ткань);
- стеклотекстолиты — стеклянная ткань;
- гетинаксы (бумаголиты) — бумага или картон;
- асболиты — картон из асбеста;
- древолиты — древесный шпон;
- волокниты — волокно органического происхождения (хлопковое, льняное);
- стекловолокниты — стеклянное волокно;
- асбоволокниты — асбестовое волокно.

В текстолитах, бумаголитах и древолитах наполнителями могут служить также крошки и всевозможные отходы бумаги, картона, тканей, дерева. Пластмассы с пористой и ячеистой структурой и удельным весом от 0,3 до 3,0 кН/м^3 называют пенопластами, а с удельным весом свыше 3,0 кН/м^3 — поропластами. Форма макромолекул полимеров представлена на рис. 13.3.

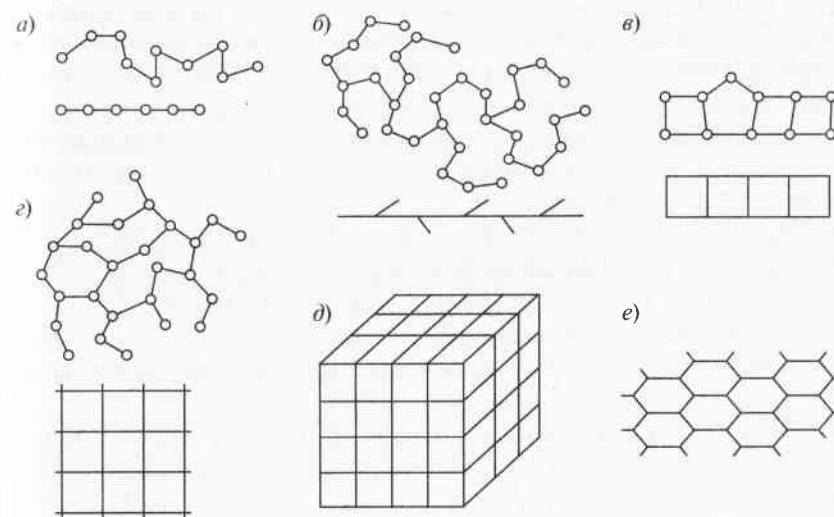


Рис. 13.3. Формы макромолекул полимеров: а — линейная; б — разветвленная; в — лестничная; г — сетчатая; д — пространственная; е — паркетная

Пластмассы технологичны, изделия из них получают без обработки резанием, используя литье и обработку давлением. В табл. 13.5 выборочно указано применение термопластов и термореактивных пластмасс.

Таблица 13.5. Применение термопластов и термореактивных пластмасс

Наименование	Область применения
Полиэтилен: высокого давления; низкого давления	Упаковочный материал, конструкционные несилочные детали (вентили, емкости), чехлы, покрытия, стекла для парников
Полипропилен	Трубы, конструкционные детали автомобилей, холодильников и других механизмов, емкости, упаковочный материал
Полистирол	Радиотехнические детали, детали фотооборудования, электроизоляционные изделия, теплоизолирующие пенопласты

Окончание табл.

Наименование	Область применения
Винипласт	Детали химического оборудования, трубы, профили, фланцы, муфты, элементы насосов и вентиляторов, упаковочный материал
Фторопласт-4 (тефлон)	Изделия с высокими диэлектрическими свойствами, детали химического оборудования, стойкие в агрессивных средах, антифрикционные покрытия
Стекло органическое конструкционное	Светотехнические и оптические детали, стекла для воздушного, наземного и водного транспорта
Поликарбонат	Детали точных станков и приборов, вычислительных машин, радио- и электротехнической промышленности, машино- и приборостроения
Фенопласт	Малонагруженные детали, корпуса приборов, панели, электроизоляционные детали
Аминопласт	Детали осветительной аппаратуры, электротехнические и электроизоляционные детали, цветные изделия бытового назначения
Волокнит	Шкивы, маховики, втулки, диски, кожухи, детали с повышенными антифрикционными свойствами
Текстолит	Шестерни, втулки, подшипники скольжения, конструкционные и электроизоляционные детали
Стеклотекстолит	Конструкционные силовые детали, корпусные детали, кузова и кабины автомашин, трубы, емкости, электро- и теплоизоляция

13.3. Эластомеры

Важной группой высокомолекулярных полимеров являются каучуки, которые бывают натуральными и синтетическими. Натуральный каучук добывают из некоторых тропических растений (гевея бразильская), поэтому он дефицитен и дорог. По объему мирового потребления натуральный каучук составляет 30%. Синтетический каучук получают полимеризацией или поликонденсацией.

Известно около 250 видов синтетических каучуков. Каучук обладает способностью к вулканизации. В результате вулканизации возникает сетчатая (пространственная) структура. После вулканизации каучук из термопластичного материала переходит в термостабильное состояние и становится прочным, нерастворимым, теплостойким, неклеящим и эластичным материалом — резиной. Резину отличает высокая эластичность, упругость, амортизирующая способность, высокое сопротивление истиранию и многократному изгибу, стойкость к действию жидкого топлива и масел, хорошая уплотняющая способность, электроизоляционность, газо- и водонепроницаемость.

Таблица 13.6. Типы резины и свойства каучуков (выборочно)

Тип резины	Тип каучука	Плотность, кг/м³	Остаточное удлинение после разрыва, %	Интервал рабочих температур, °C
Общего назначения	Натуральный (НК)	910	32	—50...+130
	Бутадиеновый синтетический (СКБ)	910	60	—50...+150
	Изопреновый синтетический (СКИ)	910	28	—50...+130
Специального назначения:				
бензомаслостойкая	Бутадиен-нитрильный (СКН)	960	20	—40...+170
теплостойкая	Силоксановый (СКТ)	1850	4	—70...+300
теплохимически стойкая	Фторкаучук (СКФ)	1850	8	—40...+300
Морозостойкая	Бутадиенметилстирольный (СКМС) и бутадиенстирольный (СКС)	940	16	—80...+130

Основные виды резин и свойства каучуков приведены в табл. 13.6. Резина представляет собой сложную композицию, состоящую из многих ингредиентов. Кроме каучука, которого содержится до 95%, в состав резины входят вулканизаторы (обычно сера), наполнители (сажа, каолин, окиси металлов — кремния, титана, цинка, магния, а также ткани), пластификаторы (фенолы), ускорители (свинцовый глет), противостарители (амины, фенолы), пигменты (красители).

Механические свойства резин оцениваются пределом прочности при растяжении σ_b , относительным удлинением δ в момент разрыва и остаточным удлинением после разрыва. В значительной мере свойства резин зависят от содержания серы.

Под эластичностью подразумевают способность материала деформироваться под действием небольших напряжений, причем деформация обладает выраженной релаксацией.

Старение резины оценивается ухудшением ее свойств после нагрева в термокамере при 70° в течение 144 ч.

Теплостойкость определяют по величине относительного удлинения δ в условиях обычных и повышенных температур. Морозостойкость характеризует начало потери эластичности при низких температурах. Стойкость к проникновению жидкости измеряют по изменению веса резины после выдержки ее во влажной среде в течение 24 ч.

Классификация резин производится по различным параметрам. В зависимости от твердости резины делят на пористые (губчатые), мягкие, особоэластичные, средней твердости, твердые, высокой твердости, жесткие. Примером жестких резин могут служить эбониты. В них количество серы доходит до 30—50%. Резина средней твердости содержит 10—15% серы, в обычной резине 5—8%.

По назначению различают универсальные резины и специальные (маслостойкие, свето- и озоностойкие, морозо- и теплостойкие, электростойкие).

13.4. Клеевые и лакокрасочные материалы

Клеи представляют собой композиции высокополимерных веществ, которым присущи необратимые изменения свойств со временем. Это коллоидные вязкие растворы, обладающие способностью образовывать твердую пленку, прочно сцепляющуюся с соединяемыми материалами.

К недостаткам клеев можно отнести ограниченную теплостойкость (от 60 до 400 °С) и пониженную прочность при неравномерном отрыве.

Качество клея оценивают по его вязкости (время вытекания через сопло), усадке (большая усадка вызывает разрыв пленки), рабочей жизнеспособности (время сохранения необходимого уровня свойств), водостойкости, теплостойкости, прочности сцепления.

Классификацию клея можно произвести по *основе связующего вещества*: белковые (казеиновые), смоляные (в основе синтетические смолы) и каучуковые (резиновые).

В частности, по отношению к *нагреву* клеи делят на обратимые (термопластичные) и необратимые (термореактивные), по *назначению* — на конструкционные силовые (несут нагрузку) и несиловые (механические усилия отсутствуют). Для силовых соединений используют термореактивные клеи, для несиловых — на основе термопластичных смол.

На практике широкое применение находят универсальные клеи БФ, с помощью которых можно склеивать металлы, пластмассы, керамику, стекло. Распространены эпоксидные и полиуретановые клеи, клеи на основе формальдегидных смол ВИАМ-БЗ и КБ-З (для пенопластов, слоистых и волокнистых пластмасс), резиновые клеи (88, НС-30, Б-10). Для примера в табл. 13.7 приведены свойства конструкционных смоляных клеев.

Для улучшения рабочих характеристик клеев в их состав вводят разные вещества: для обеспечения электропроводимости — медь, серебро, графит, никель; для повышения термостойкости — порошки Al, Al₂O₃, SiO₂.

Клеи, изготовленные на основе кремнийорганических и неорганических полимеров, могут выдерживать температуру до 1000 °С и выше. Клеи выпускаются в виде жидкостей, замазок, паст, пленок, гранул, пластин.

Герметики готовят на основе каучуков, кремнийорганических, неорганических и других полимеров и служат для уплотнения и герметизации всевозможных соединений, трубопроводов, баков, транспортных средств, радиоэлектронных изделий. Рабочая температура герметиков находится в диапазоне 60—300 °С, многие из них выдерживают удары и вибрацию. Герметики делят на каучуковые, каучуко-смоляные и смоляные. Свойства герметиков приведены в табл. 13.8.

Таблица 13.7. Свойства конструкционных смоляных клеев

Клей	Предел прочности, МПа, при			Теплостой- кость, °С	Водостой- кость (срав- нительная)	Температура склеивания, °С
	сдвиге	равномер- ном отрыве	неравно- мерном от- рыве			
Фенолформальдегидный	13—15	—	—	60—100	Хорошая	20 или 50—60
Фенолокаучуковый	14—25	17—20	3—5	200—350	Отличная	165—205
Фенолополивинилацеталевый	17—18	36—60	0,8—1,2	200—350	Хорошая	180
Фенолополивинилбутиральный	22	32—35	3,0	60—80	Удовлетво- рительная	120—140
Фенолокремнийорганический	12—17	28—30	—	250—600	Хорошая	180—200
Эпоксидный	10—30	10—60	1,0—1,5	60—350	Удовлетво- рительная	20 или 80—210
Полиуретановый	11—20	22—35	2,5—3,0	60—100	Хорошая	18—25 или 105
Полиуретановый карборансо- держажий	10—20	—	—	350—1000	Хорошая	150
Кремнийорганический	9— 17,5	15—22	0,8—2,0	350—1200	Удовлетво- рительная	180—270
Полибензимидазольный	15—30	—	—	350—540	Отличная	150—400
Полиамидный	15—30	—	—	300—375	Отличная	180—260

Таблица 13.8. Свойства герметиков

Герметик	Плот- ность, кг/м ³	Предел прочности, МПа	Удлинение, %		Рабочая температу- ра, °С	Рабочая среда
			относи- тельное	оста- точ- ное		
Тиколо- вый ($\gamma = 30$ М)	1200— 1400	2,9—3,4	300— 400	2—10	—42...+130	Топливо, масло
Кремний- органиче- ский	1020— 1800	1,5—4,5	150— 600	0—10	—60...+300	Различ- ные кли- матиче- ские условия
Фтор- каучуко- вый	1600— 3200	7—14	120— 450	20— 50	—20...+250	Топливо, масло, ат- мосферная среда
Эпоксид- ный	—	6—55	—	—	60—75 (140)	Тропиче- ская ат- мосфера

Герметики должны обладать хорошей адгезией к металлам и другим материалам, быть эластичными и непроницаемыми для различных сред, устойчивы к воздействию атмосферы и активных сред, термо- и морозостойки.

Лакокрасочные материалы представляют собой жидкие композиции, образующие после нанесения и высыхания пленку, адгезионно сцепляющуюся с окрашиваемой поверхностью, и предназначенные для защиты деталей и изделий от коррозии, для придания поверхности необходимого вида, для изоляции, светозащиты, для предупреждения гниения дерева.

По сравнению с другими методами поверхностной обработки (металлизация, химико-термическая) использование лакокрасочных материалов имеет ряд преимуществ: легкость нанесения по открытым, их разнообразие, стойкость по отношению к различным воздействиям.

Лакокрасочные материалы состоят из нескольких компонентов. Главным компонентом (основой) являются пленкообразующие вещества, обладающие хорошей адгезией (растительные масла, смолы, эфиры, целлюлозы, жидкое стекло). К классу других компонен-

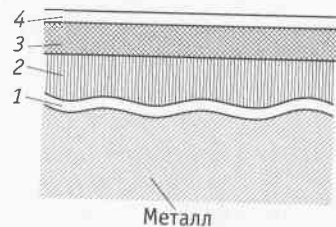


Рис. 13.4. Схема лакокрасочного покрытия:
1 — грунт; 2 — шпатлевка; 3 — эмаль; 4 — покрывной лак

Лакокрасочные покрытия наносятся в определенной последовательности, называемой системой покрытия, схема которой показана на рис. 13.4.

13.5. Древесные материалы

Дерево широко используется в самых разнообразных отраслях народного хозяйства. Годовое потребление древесины, исключая дрова, составляет более 1000 млн т. Все растения состоят из одного и того же полимера, но расположение молекул у различных видов растений не одинаково. В сухой древесине содержится 50—60% линейного полимера, называемого целлюлозой, и порядка 25% жидкого компонента с высокой вязкостью — лигнина. Оставшаяся масса состоит из родственных целлюлозе химических соединений. Молеку-

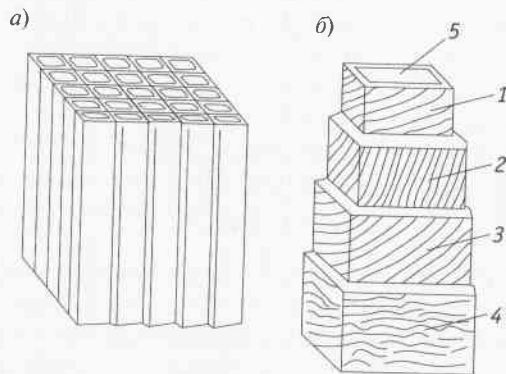


Рис. 13.5. Структура древесины:
а — система клеток (трахеидов) длиной до 1 мм, шириной 10 мкм; б — слои в стенках клеток с различной ориентацией волокон целлюлозы (1 — внутренний; 2 — средний; 3 — внешний; 4 — первичный, 5 — люмен)

ла основного компонента древесины целлюлозы состоит из колец глюкозы (до 5000 колец), соединенных атомами кислорода.

На микроуровне древесина состоит из длинных закрытых трубчатых клеток, называемых трахеидами, полые центры которых — люмены — заполнены водой или соком (рис. 13.5). В период интенсивного роста стенки клеток тонкие, при замедлении роста сердцевина клетки становится меньше, а стенки — толще. На поперечном срезе дерева эти различия проявляются в виде характерных годовичных колец.

К достоинствам древесины можно отнести малую объемную массу, относительно высокую удельную прочность, низкую теплопроводность, незначительный коэффициент температурного расширения, хорошую технологичность. Но у древесины имеется склонность к влагопоглощению и загниванию, она также легко воспламеняется.

Защиту дерева от влаги и гниения производят с помощью покрытий красками, пластмассой, прибегают к опрыскиванию или пропитке антисептическими растворами солей NaF , ZnCl_2 , CuSO_4 , при соприкосновении с бетоном делают прокладки из гидроизоляционных материалов.

Воспламеняемость древесины снижают пропиткой алюминиевыми солями, солями фосфорной или борной кислот, а также покрытием специальными огнезащитными лаками и красками.

Основными характеристиками древесины считаются влажность, усушка (уменьшение линейных размеров или объема при высыхании), набухание (связанное с водопоглощением), объемная масса, прочность и твердость, отсутствие пороков (трещины, сучки, морозобоины, продольные трещины на стволе, грибковые заболевания).

Древесные материалы поступают для использования в виде пиломатериалов, которые делят на брус и доски (отношение сторон поперечного сечения в первом случае меньше двух, во втором — больше двух). Распространены также такие виды древесных материалов, как шпон (широкая ровная стружка толщиной 0,55—1,5 мм), фанера (результат склейки листового шпона с общей толщиной 1—12 мм), плиты (более толстые клееные конструкции), прессованная древесина (получаемая прессованием дерева в нагретых пресс-формах), древесностружечные плиты (получаемые горячим прессованием стружки со связующими смолами). Свойства древесины указаны в табл. 13.10.

Таблица 13.10. Основные свойства наиболее распространенных пород древесины при влажности 15%

Порода древесины	Объем- ный вес, кг/м ³	Кэф- фициент усушки, %	Предел прочности, МПа, при			Твердость, Н/м ²		
			сжатию вдоль волокон	растяжении вдоль волокон	изгибе	ради- альная	танген- циальная	торцо- вая
Хвойные породы								
Лиственница	680	0,62	54,9	122,7	98,4	28	27,8	40,3
Сосна	510	0,51	41,4	100,7	75,8	21,7	22,3	26,2
Ель	460	0,52	39,6	106,1	71,7	17,3	16,8	24,1
Кедр сибирский	440	0,42	36,3	82	64,8	—	—	20,3
Пихта	390	0,46	34,2	76,1	60,7	16,7	16,4	24,8
Лиственные породы								
Граб	810	0,61	53,1	134,7	121,1	70,1	71,7	82,5
Дуб	760	0,48	51,9	—	89,1	53,6	56,8	65,3
Клен	700	0,54	52	—	105,3	50,6	53,7	69
Бук	680	0,55	47,4	117,8	95,3	39,4	40,3	55,6
Береза	640	0,64	46,7	161	96,7	33,6	30	42,3
Липа	500	0,58	39,8	115,8	77,5	15,6	16,3	23,4
Осина	500	0,47	37,4	120,1	68,6	17,5	18,3	24,1

Контрольные вопросы

1. Из чего изготавливают керамику и где она применяется?
2. Назовите отличия традиционной и новой керамик.
3. На какие виды делится керамика по назначению?
4. Какими электрическими свойствами обладает керамика?
5. Какое применение находит керамика в машиностроении, металлургии и медицине?
6. Дайте характеристику стекла: изготовление, разновидность, применение.
7. Что такое графит и где его применяют?
8. По каким признакам можно классифицировать пластмассы?
9. В чем разница между термореактивными и термопластичными пластмассами?
10. Как получают, маркируют и используют полиэтилен?
11. На какие виды делится полистирол, где они применяются?
12. Дайте характеристику фторопласта.
13. Что такое полиметилметакрилат?
14. Какие смолы вы знаете? Для чего они применяются?
15. Какие наполнители применяют для пластмасс и какую роль они играют?
16. Перечислите виды газонаполненных пластмасс. Где они применяются и как маркируются?
17. Охарактеризуйте каучуки и резину.
18. Какие вещества называют клеями?
19. Какие требования предъявляются к термостикам?
20. Назовите назначение пигментов, наполнителей и пластификаторов при получении лакокрасочных материалов.
21. Как защищают древесину от влагопоглощения, загнивания и повреждения?

Композиционные материалы

14.1. Основные свойства и классификация композиционных материалов

Композиционные материалы обладают комплексом свойств, отличающихся от традиционных конструкционных материалов. *Композиционными* называют материалы, состоящие из двух и более компонентов, объединенных различными способами в монолит и сохраняющими при этом индивидуальные особенности.

Для композиционных материалов характерны следующие признаки:

- состав, форма и распределение компонентов материала определены заранее;
- материалы состоят из двух и более компонентов различного химического состава и разделены границей;
- свойства материала определяются каждым из составляющих его компонентов;
- материал обладает свойствами, отличными от свойств составляющих его компонентов, взятых в отдельности;
- материал однороден в макромасштабе и неоднороден в микромасштабе;
- материал не встречается в природе, а является искусственно созданным.

Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. Компонент, который обладает непрерывностью по всему объему, является матрицей. Компонент же прерывный, разделенный в объеме композиционного материала, считается армирующим или упрочняющим.

В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, а также органические и неорганические полимеры, керамические, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и ее эксплуатационные характеристики: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, со-

противление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Армирующие или упрочняющие компоненты равномерно распределены в матрице. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Более широким понятием, чем армирующий или упрочняющий компонент, является термин «наполнитель», поскольку наполнитель в матрице помимо изменения прочности оказывает влияние и на другие характеристики композиции.

Композиционные материалы классифицируют по геометрии наполнителя, расположению его в матрице и природе компонентов.

По геометрии наполнителя композиционные материалы подразделяют на три группы:

- с нуль-мерными наполнителями, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок;
- одномерными наполнителями, один из размеров которых значительно превосходит два других;
- двумерными наполнителями, размеры которых значительно превосходят третий.

По схеме расположения наполнителей выделяют три группы композиционных материалов:

- с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;
- с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя в виде волокон, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;
- с трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его распределении.

По природе компонентов композиционные материалы делятся на четыре группы:

- композиционные материалы, содержащие компонент из металлов или сплавов;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неорганических соединений оксидов, карбидов, нитридов;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неметаллических элементов, углерода, бора;
- композиционные материалы, содержащие компонент из органических соединений (эпоксидные, полиэфирные, фенольные и другие смолы).

В названную классификацию не входят полиармированные композиционные материалы, содержащие чередующиеся слои двух композиций или более, с матрицами, отличающимися химическим составом.

Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и от прочности связи между ними. Обычно компоненты для композиционного материала выбирают со свойствами, существенно отличающимися друг от друга.

Композиционные материалы по сравнению с современными конструкционными материалами обнаруживают более высокие удельную жесткость E/ρ и удельную прочность σ_b/ρ .

Модуль упругости композиционных материалов может изменяться в требуемом направлении в зависимости от схемы армирования. Высокая надежность в работе конструкций из композиционных материалов связана с особенностями распространения в них трещин. В обычных сплавах трещина развивается быстро и скорость роста ее в период работы конструкции детали возрастает. В композиционных материалах трещина обычно возникает и развивается в матрице и встречает препятствия на границе матрица — упрочнитель. Армирующий элемент тормозит ее распространение, задерживая на некоторое время ее рост.

14.2. Композиционные материалы с нуль-мерными наполнителями

В композиционных материалах этого типа наибольшее распространение получила металлическая матрица из металла или сплава. Композиции на металлической основе упрочняются равномерно распределенными дисперсными частицами различной зернистости: микроскопические с диаметром частицы $d = 0,01—0,1$ мкм; мелкие с диаметром частицы $d = 1—50$ мкм.

Композиционные материалы с равномерным распределением частиц упрочнителя различаются изотропностью свойств.

Композиции, армированные дисперсными частицами, получают чаще методами порошковой металлургии, включающей следующие этапы: получение порошковой смеси матричного металла и упрочнителя (рассев порошков на фракции, смешивание порошков в смесителях различных систем); прессование порошка в компактную заготовку в стальных матрицах (изостатическое прессование) с последующим спеканием.

На уровень прочности композиций оказывают влияние объемное содержание частиц упрочнителя, степень дисперсности и расстояние между частицами.

Армирующими наполнителями чаще служат дисперсные частицы тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов (AlO_3 , ThO_2 , HfO_2 , BN , SiC , Be_2C и др.). Эти тугоплавкие соединения имеют высокие значения модуля упругости, низкую плотность, значительную инертность в отношении материала матрицы. Так, модуль упругости¹ оксидов ThO_2 и AlO_3 равен $380,5 \cdot 10^3$ и $146,12 \cdot 10^3$ МПа, а плотность — 1,0 и 3,97 г/см³ соответственно.

Кроме метода порошковой металлургии существуют и другие технологии получения дисперсионно-упрочненных композиционных материалов. Например, вводят частицы армирующего порошка в жидкий расплав металла или сплава. Улучшения смачивания частиц жидким металлом и равномерного распределения их в матрице достигают в этом случае ультразвуковой обработкой расплава или другими способами.

Композиционные материалы с алюминиевой матрицей. Промышленное применение нашли композиционные материалы на основе алюминия, упрочненные частицами Al_2O_3 . Их получают прессованием алюминиевой пудры с последующим спеканием (САП).

Уменьшение размеров частиц пудры увеличивает их общую поверхность и содержание оксидов алюминия (табл. 14.1).

Таблица 14.1. Механические свойства САП

Марка	Содержание Al_2O_3 , %	σ_b МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ , %	E , ГПа
САП-1	6—8	300	200	7—9	67
САП-2	9—12	320	230	4	71
САП-3	13—17	400	340	3	76
Д20*	—	420	300	11	69

* В состоянии после закалки с температурой $(535 \pm 5)^\circ C$ и последующего старения при $180^\circ C$, 124 ч.

¹ Модуль упругости — характеристика сопротивления материалов упругой деформации. Модуль упругости важен при расчетах на прочность, жесткость, устойчивость, а также как мера силы межатомной связи.

При комнатной температуре механические свойства САП ниже свойств высокопрочных алюминиевых сплавов (Д20).

Преимущества САП отчетливо проявляются при температурах выше 300 °С, при которых алюминиевые сплавы разупрочняются. При 500 °С деформируемые сплавы Д19, Д20 имеют прочность в пределах 1—5 МПа, в то время как прочность σ_b САП-1 составляет 80 МПа, САП-2—90 МПа, САП-3—120 МПа.

Физические свойства САП — электропроводность, теплопроводность и коэффициент термического расширения — связаны линейной зависимостью с содержанием Al_2O_3 , и их значения уменьшаются по мере его повышения. Электропроводность и теплопроводность сплава САП-3 выше, чем у стандартных алюминиевых сплавов (Д19, Д20), и составляет 70—75% от соответствующих значений технического алюминия.

Сплавы САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы САП-1 — и в холодном. САП легко обрабатываются резанием, удовлетворительно свариваются аргонодуговой и контактной сваркой.

Из САП выпускают полуфабрикаты в виде листов, профилей, труб, фольги. Детали из САП работают при 300—500 °С. Из него изготавливают лопатки компрессоров, вентиляторов и турбин, поршневые штоки. Листы из САП используют для изготовления деталей обшивок гондол и жалюзи, работающих в зоне выхлопа силовых установок.

Композиционные материалы с никелевой матрицей. Упрочняющим компонентом в композиционных материалах с никелевой матрицей являются токсичные частицы диоксида тория (ThO_2) или диоксида гафния (HfO_2). Эти материалы обозначают ВДУ-1 и ВДУ-2 соответственно. В сплаве ВДУ-3 матрицей служит никелевохромовый твердый раствор (20% хрома), а упрочнителем — диоксид гафния.

Композиционные материалы ВДУ-1, ВДУ-2 и ВДУ-3 при умеренных температурах по прочности уступают жаропрочным никелевым сплавам. Большая прочность сплава ВДУ-3 по сравнению с остальными двумя связана с легированием матрицы хромом. Дисперсно-упрочненные сплавы ВДУ-1, ВДУ-2 и ВДУ-3 целесообразно применять при рабочих температурах 1100—1200 °С.

Композиционные материалы ВДУ-1 и ВДУ-2 пластичны, и полуфабрикаты этих сплавов деформируются в широком интервале температур различными методами (ковка, штамповка, осадка, глу-

бокая вытяжка). Для соединения деталей из сплавов типа ВДУ применяют высокотемпературную пайку либо диффузионную сварку, с тем чтобы избежать расплавления. Сплавы ВДУ-2, ВДУ-3 выпускают в виде труб, прутков, листов, проволоки, фольги. Их применяют главным образом в авиационном двигателестроении. Из композиций ВДУ-2 и ВДУ-3 изготавливают сопловые лопатки, стабилизаторы пламени, камеры сгорания, а также трубопроводы и сосуды, работающие при высоких температурах в агрессивных средах.

14.3. Композиционные материалы с одномерными наполнителями

В композиционных материалах этого типа упрочнителями являются одномерные элементы в форме нитевидных кристаллов, волокон (проволоки). Волокна и другие армирующие элементы скрепляются матрицей в единый монолит. Матрица защищает упрочняющие волокна от повреждений, служит средой, передающей нагрузку на волокна, и перераспределяет напряжения в случае разрыва отдельных волокон.

Для армирования композиционных материалов используют непрерывные дискретные волокна с размерами в поперечном сечении от долей до сотен микрометров. Для упрочнения композиционных материалов используют высокопрочную проволоку из стали, молибдена, вольфрама и других металлов и их сплавов. Кроме того, используют волокна из бора, углерода, стекла, а также монокристаллы из оксидов, нитридов алюминия и кремния и других соединений.

Проволока из *вольфраморениевого сплава* до 1100 °С имеет более высокую длительную прочность. Однако при 1200 °С длительная прочность проволоки ВТ-15, содержащей добавку диоксида тория, превосходит длительную прочность проволоки ВР-20. Высокие прочностные свойства проволок из вольфрама, молибдена, тантала сохраняются до 1200—1500 °С.

Вольфрамовую и молибденовую проволоку целесообразно применять для армирования жаропрочных композиционных материалов.

Бериллиевую проволоку чаще применяют для упрочнения матриц с малой плотностью — алюминиевой, магниевой, титановой.

Углеродные волокна получают из полиакрилонитрильного (ПАН) гидроцеллюлозного волокна или из волокон на основе нефтяных смол или пеков. Прочность углеродных волокон также зави-

сит от наличия дефектов — пустот, трещин — и значительно снижается с увеличением размеров дефектов.

В настоящее время освоено производство нескольких типов углеродных волокон, различающихся уровнем механических свойств:

- высокопрочные волокна ($\sigma_{\text{в}} = 2500\text{—}3200$ МПа, $E = (180\text{—}220 \times 10^3)$ МПа);
- высокомодульные волокна ($\sigma_{\text{в}} = 1400\text{—}2200$ МПа, $E = (350\text{—}550) \cdot 10^3$ МПа).

Промышленностью выпускаются углеродные волокна в виде крученого или некрученого жгута с диаметром волокон около 7 мкм и числом волокон в жгуте от 1000 до 160 000. Из углеродных волокон делают ленты различной ширины.

К недостаткам углеродных волокон следует отнести их склонность к окислению на воздухе, химическую активность при взаимодействии с металлическими матрицами, слабую адгезию с полимерными матрицами. Улучшения совместимости волокон с металлическими матрицами и защищенности их от окисления добиваются нанесением на углеродные волокна металлических и керамических покрытий.

Борные волокна. Борные волокна получают осаждением бора из газовой фазы ($\text{BCl}_2 + \text{H}_2$) при $1100\text{—}1200$ °С на предварительно нагретую и очищенную вольфрамовую проволоку диаметром 12 мкм. В результате осаждения образуется сердцевина из боридов вольфрама (WB , W_2B_5 , WB_4) диаметром 15—17 мкм, вокруг которой располагается слой поликристаллического бора. Диаметр полученного таким образом волокна бора 70—200 мкм.

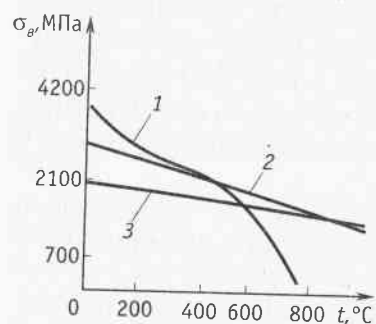


Рис. 14.1. Изменение прочности волокон бора (1), борсика (2), карбида кремния (3) на воздухе в зависимости от температуры

Прочность борных волокон определяется поверхностными и объемными дефектами, а также дефектами на поверхности раздела сердцевина — оболочка.

Волокна бора обладают ценным сочетанием свойств: низкой плотностью 2600 кг/м^3 , достаточно высокой прочностью $\sigma_{\text{в}} = 3500$ МПа, температурой плавления 2300 °С. Волокна бора, покрытые карбидом кремния, получили название *борсик*. При повышенных температурах на воздухе проч-

ность волокон борсика и карбида кремния значительно выше прочности волокон бора (рис. 14.1).

Борные волокна выпускаются промышленностью в виде моноволокон на катушках, а также в виде полуфабрикатов — лент полотняного плетения шириной от 5 до 50 см. Основу полотен образуют борные волокна, а уток — полиамидные или другие волокна. Волокна бора применяют в производстве композитов на основе полимерной и алюминиевой матриц.

Волокна карбида кремния. Волокна этого типа получают по технологии, мало отличающейся от технологии получения волокон бора. Карбидокремниевые волокна, полученные на углеродной подложке, более дешевые и характеризуются повышенной чувствительностью к поверхностным дефектам и пониженными характеристиками прочности.

Волокна карбида кремния применяют для армирования металлических матриц композитов, предназначенных для эксплуатации при высоких температурах.

Стекланные волокна. Получают путем пропускания расплавленного стекла при $1200\text{—}1400$ °С через фильеры диаметром 0,8—3 мм и дальнейшим быстрым вытягиванием до диаметра несколько микрометров. Непрерывные волокна диаметром 3—100 мкм, соединяясь в пряжи, наматываются на вращающиеся с большой скоростью барабаны и имеют длину до 20 км. Штапельные волокна выпускают диаметром 0,5—20 мкм, длиной 0,01—5 м.

Активные замасливатели (пленкообразующие смазочные материалы, кремнийорганические соединения) помимо предотвращения истирания волокон в пряжи усиливают адгезию между матрицей и стекловолокном в армированных пластиках. Замасливатели также препятствуют возникновению дефектов на поверхности волокон и таким образом увеличивают их прочность.

Непрерывные волокна выпускают с треугольной, квадратной, прямоугольной, шестиугольной и круглой формой поперечного сечения, что позволяет получить более плотную упаковку их в композиции и, таким образом, повысить ее прочность и жесткость.

Основой стекланных волокон является диоксид кремния SiO_2 . В зависимости от природы стеклообразующего вещества стекла делят на силикатные (SiO_2), алюмосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$), алюмоборосиликатные ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{—B}_2\text{O}_3$).

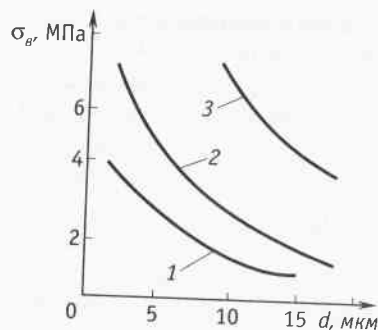


Рис. 14.2. Зависимость прочности волокон из щелочного (1), бесщелочного (2) и алюмоборосиликатного (3) стекол от его диаметра

разрушениями (обрывами) очень многих из них. Оптимальные диаметры волокон для армирования пластиков 5–15 мкм.

Стекловолокна применяют для армирования композитов в виде жгутов, нитей, лент, тканей различного плетения, матов.

Стеклонаполненные полиамиды (ГОСТ 17648—83). Представляют собой композиционный материал, состоящий из полиамидов, наполненных длинными отрезками стеклянных нитей. Предназначены для изготовления деталей литьем под давлением конструкционного электротехнического и общего назначения, обладающих повышенной теплостойкостью и повышенными механическими свойствами и применяемых для нужд отечественного народного хозяйства и экспорта.

Стандарт предусматривает следующие марки: ПА 610-ДС, ПА 6-210-ДС, ПА 6-211-ДС, ПА 66-ДС.

Условные обозначения стеклонаполненного полиамида состоят из наименования исходного полиамида (ПА), краткого цифрового обозначения марки исходного полиамида (610, 6-210, 6-211, 66), условного обозначения длины стеклянной нити в грануле стеклонаполненного полиамида (ДС), длины отрезка стеклянной нити, цвета и сорта.

Для марки ПА 6-211-ДС в скобках указывают наименование стабилизатора и букву К для полиамида, окрашенного в массу.

Примеры условного обозначения: ПА 6-210-ДС, черный, сорт высший, ГОСТ 17648—83; ПА 6-211-ДС-К (стабилин 10), сорт высший, ГОСТ 17648—83.

Широко используемое для армирования пластиков Е-стекло размягчается при 846 °С, его плотность 2540 кг/м³.

Высокопрочное S-стекло при комнатной температуре имеет прочность $4,5 \cdot 10^3$ МПа, а модуль упругости — $87 \cdot 10^3$ МПа. Прочность стеклянных волокон уменьшается при увеличении их диаметра (рис. 14.2). Более тонкие волокна содержат меньше дефектов (пор, микротрещин). Для армирования пластиков очень тонкие непрерывные стеклянные волокна не используют в связи с

Таблица 14.2. Обозначения марок стеклонаполненного полиамида в различных стандартах

ГОСТ 17648—83	ГОСТ 17648—72	Нормативно-техническая документация
ПА 610-ДС	П 68С-30	—
ПА 6-210-ДС	КПС-30	КС-30, КОС-30
ПА 66-ДС	—	АС-30, АОС-30
ПА 6-211-ДС	—	ПА 6-211-ДС

В табл. 14.2 приведены обозначения марок стеклонаполненного полиамида, аналогичных указанным в ГОСТе 17648—83.

Нитевидные кристаллы (усы). Нитевидные кристаллы карбидов и нитридов кремния, оксида и нитридов алюминия и других тугоплавких соединений получают осаждением из газовой фазы с использованием транспортных реакций, реакций пиролиза, восстановления летучих соединений по методу пар — жидкость — твердая фаза (ПЖТ).

Рост кристаллита карбида кремния (по схеме ПЖТ) происходит аналогично выращиванию кристалла кремния (рис. 14.3).

На поверхности кремниевой подложки 3 находится частица золота при температуре, близкой к температуре плавления. В этих условиях золото растворяет кремний и превращается в капельку 2 расплава золото — кремний. Пары кремния, конденсируясь в капельке расплава, пересыщают ее атомами кремния. Это ведет к выделению кремния на границе раздела жидкость — подложка и росту нитевидного кристалла 4. Поперечные размеры кристалла определяются диаметром капли расплава, а скорость роста уса — скоростью кристаллизации поступающего к поверхности капли кремния. При полу-

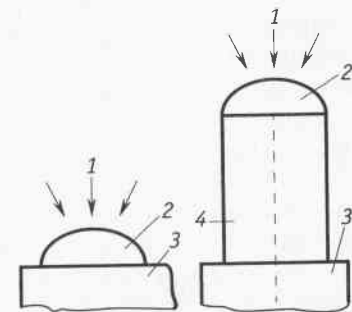
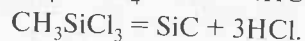
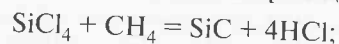


Рис. 14.3. Схема роста кристалла кремния по механизму пар — жидкость — кристалл: 1 — пар; 2 — капелька расплава Au—Si; 3 — кремниевая подложка; 4 — кристалл кремния

чении нитевидных кристаллов карбида кремния их выращивание ведут из хлорсиланов и углеводов по реакциям



В качестве жидкой фазы используют тройные расплавы железо — углерод — кремний, а подложкой служит графит. Процесс проходит при температуре 1250—1350 °С.

Диаметр кристаллита кремния в зависимости от условий получения изменяется от долей до десятков микрометров. Длина кристаллитов достигает 60—80 мкм.

Промышленные методы производства усов других соединений (нитридов кремния, алюминия, бора, оксидов алюминия) имеют много общего и аналогичны технологии получения карбидов кремния.

Усы, нитевидные кристаллы отличаются совершенством структуры и имеют прочностные свойства, близкие к теоретическим. Свойства наиболее изученных и используемых практически нитевидных кристаллов для армирования композиционных материалов приведены в табл. 14.3.

Таблица 14.3. Свойства некоторых нитевидных кристаллов (усов)

Материал кристаллов	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м³	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Предел прочности, $\sigma_b \cdot 10^{-3}$, МПа
SiC	2665	3320	49	21
B ₄ C	2450	2490	45	14
Al ₂ O ₃	2040	3880	64	28
Si ₃ N ₄	1675	3320	31	14
Cr	1665	7500	23	9
Fe	1540	6370	20	13,3
Графит	3640	1660	71	19,9

Усы графита, обладая высокими показателями удельной прочности и жесткости, неустойчивы в металлических матрицах при высоких температурах. Нитевидные кристаллы металлов из-за высокой плотности обнаруживают пониженную удельную жесткость по сравнению с соответствующими характеристиками усов тугоплавких соединений (SiC, B₄C). Усы металлов склонны к разупрочнению при переработке, несовместимы с металлическими матрицами и непригодны для армирования металлических матриц. Нитевидные кристаллы SiC, Al₂O₃ обладают лучшей совместимостью с металлами, стойки к воздействию влаги, истиранию при переработке. Обнаруживая лучшие высокотемпературные свойства, усы SiC, Al₂O₃ и других тугоплавких соединений являются хорошими упрочнителями композиционных материалов с металлической матрицей.

Получение композиционных материалов на металлической основе, армированных волокнами. При производстве композиционных материалов с металлической матрицей наибольшее распространение получили твердофазные, жидкофазные, газопарофазные, химические и электрохимические методы.

Твердофазный метод совмещения компонентов композиции предполагает использование материала матрицы в виде листов, фольги, проволоки или порошка. Композиционный материал получают: диффузионной сваркой под давлением; сваркой взрывом; деформационной обработкой под давлением; прессованием с последующим спеканием (порошковой металлургией).

Жидкофазные процессы получения композиционных материалов заключаются в пропитке упрочняющих волокон или нитевидных кристаллов, расположенных в определенной последовательности или беспорядочно, расплавом материала матрицы.

Методы получения композиционного материала различаются между собой условиями пропитки волокон расплавом, проходящей:

- при нормальном давлении;
- в условиях вакуума (вакуумное всасывание);
- под давлением;
- в сочетании элементов вакуумной пропитки и литья под давлением.

Газопарофазные методы заключаются в нанесении на армирующие волокна барьерных или технологических покрытий, защищающих их от разрушения при взаимодействии с материалом матрицы. Их фазовый состав (чаще всего нитриды, бориды, оксиды, карбиды) выбирают исходя из физико-химической и термомехани-

ческой совместимости армирующих волокон и материала матрицы. Покрывают в результате либо разложения летучих карбонильных соединений металлов, либо испарения металлов и сплавов при термическом воздействии электронным лучом, ионными пучками. Низкая производительность методов не позволяет использовать их для прямого компактирования композиционных материалов. Для этих целей используют метод газотермического плазменного напыления, обеспечивающий получение полуфабрикатов композиционных материалов.

Плазменным напылением наносят покрытия из матричного материала на армирующие волокна без существенного повышения их температуры. Прочность сцепления покрытия с основой определяется механическим сцеплением частиц напыляемого металла или сплава с шероховатой поверхностью, силами адгезии и химическим взаимодействием. Прочность связи плазменных покрытий значительно ниже, чем покрытий, получаемых металлизацией, испарением или конденсацией в вакууме.

Электролитические методы позволяют получать композиционные материалы в результате осаждения матричного материала на нитевидные кристаллы и волокна, которые непрерывно находятся в контакте с катодом. Процесс протекает при низкой температуре и в отсутствие давления, что практически полностью исключает разрушение волокон и вредное влияние температурного фактора. Покрытие получается плотным, беспористым в том случае, если оно равномерно покрывает поверхность волокон и пространство между ними. Пористость наблюдается при использовании волокон бора, карбида бора или металлических волокон диаметром более 100 мкм.

Химические методы позволяют осаждать металлические покрытия на не проводящие ток упрочнители в виде нитевидных кристаллов (сапфир), а также на углеродные волокна (ленты, пряжи). Металлическая пленка точно воспроизводит профиль волокна, и ее толщина легко контролируется параметрами технологического процесса. Сущность химического метода осаждения покрытий заключается в восстановлении ионов металлов на поверхности покрываемого вещества.

Методом химического осаждения получают покрытия толщиной до 300 мкм и более. Наиболее широко используют осаждения на упрочнители никеля, в меньшей степени меди, хрома и кобальта.

Свойства композиции наиболее полно реализуются в деталях и узлах с непрерывным расположением волокон. Целесообразно изготавливать детали из композиционного материала непосредствен-

но в процессе производства композиции. Изготавливать детали и элементы конструкций из полуфабрикатов композиционных материалов в виде прутков, листов, труб, лент и т. п. затруднительно, и в этом случае не реализуются до конца преимущества композиционных материалов по сравнению с обычными.

Композиционные материалы с алюминиевой матрицей, армированные стальной проволокой и другими материалами. Технический алюминий и его сплавы (АМц, АМг6, АД1, Д16, САП и др.) используют в качестве матриц композиционных материалов. Армирование матриц выполняют высокопрочной стальной проволокой из сталей (08Х18Н9Т, 1Х15Н4АМЗ, ЭП322), бериллиевой проволокой и волокнами бора, карбида кремния, углерода.

Композиции, упрочненные стальными проволоками, получают прокаткой между валками прокатного стана до компактного состояния. Прокатке подвергают сэндвич из алюминиевой фольги и волокон. Промышленностью освоен выпуск композита КАС-1. В качестве упрочнителя применяют проволоку 1Х15Н4АМЗ диаметром 0,15 мм. Матрицей в этих композициях служит сплав АВ или САП-1. Механические свойства листов композиционных материалов с алюминиевой матрицей, армированных стальной проволокой, приведены в табл. 14.4.

Таблица 14.4. Механические характеристики композиций с алюминиевой матрицей, армированной стальными проволоками

Материал матрицы	Наполнитель		Плотность, т/м ³	Прочность, МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$, МПа
	Материал проволоки; его прочность, МПа	Количество, %			
АД1	Х18Н9Т 1850	7—24	3,1—3,9	160—465	100
АМг6	Х18Н9Т 2000	5—20	2,9—3,7	390—630	70—90
АМг6	ЭП322 2700	5—25	2,9—4	420—1000	80—101
САП-1	1Х15Н4АМЗ 4200	40	4,8	1700	100

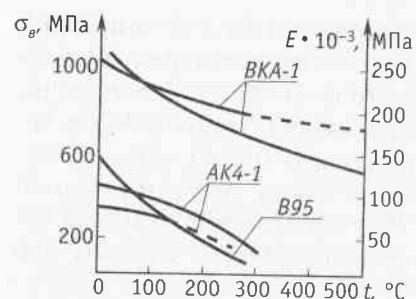


Рис. 14.4. Зависимость предела прочности (—) и модуля упругости (----) композиционного материала ВКА-1, сплавов В95 и АК4-1 от температуры

Для работы при высоких температурах рационально в качестве матрицы использовать дисперсионно-упрочненные материалы типа САП.

Композиция А1 — волокно бора отличается высокой прочностью и жесткостью и способна работать при 400—500 °С, поскольку бор мало разупрочняется с повышением температуры. Увеличение объемного содержания бора увеличивает прочность и жесткость композиции А1 — В (табл. 14.5).

Таблица 14.5. Прочность и жесткость композиции А1 — В в зависимости от содержания волокон бора

Содержание волокон бора, %	Прочность, МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$, МПа
0	70—140	70
10	300—380	105
20	500—650	135
30	700—900	180
40	900—1140	190—200
50	1100—1400	200—257

В результате армирования алюминиевой матрицы прочность композиции увеличивается в 10—12 раз при объемной доле упрочнителя до 25%. При увеличении объемной доли армирующего волокна до 40% временное сопротивление прочности композиции достигает 1700 МПа.

Алюминиевая матрица, армированная стальной проволокой (25—40%), по прочностным свойствам превосходит высокопрочные алюминиевые сплавы и приближается к уровню аналогичных свойств титановых сплавов.

Прочность и модуль упругости материала ВКА-1 до температуры 500 °С превосходят соответствующие характеристики высокопрочного сплава В95 и сплава АК4-1 (рис. 14.4). Наиболее значительно преимущество композиционного материала при 250—400 °С.

Предел прочности алюминия, армированного волокнами борсика, при 500 °С составляет 600 МПа. Прочность такой композиции при объемном содержании борсика 65% составляет 1600 МПа и сохраняется после длительной выдержки (до 1000 ч) материала при 300 и даже 500 °С.

Производство композиционного материала с углеродным волокном связано с большими технологическими трудностями вследствие взаимодействия углерода с металлической матрицей (в том числе и алюминиевой) при нагреве. В результате отмечается понижение прочности материала. Композиции А1 — углеродное волокно получают быстрым протягиванием пучка углеродных волокон через расплав алюминия.

Добиться улучшения свойств композиционного материала можно, совершенствуя технологию его изготовления.

Композиционные материалы с титановой матрицей армируют в целях увеличения модуля упругости и повышения рабочих температур. Производство композиционных материалов с титановой матрицей связано с необходимостью нагрева до высоких температур, что резко активизирует способность матрицы к газопоглощению и взаимодействию со многими упрочнителями (бором, карбидом кремния, оксидом алюминия).

Композиционные материалы на никелевой матрице, упрочняемые нитевидными кристаллами, вольфрамовой и молибденовой проволокой и другими материалами. Армированию чаще подвергают жаропрочные никелевые сплавы, чтобы увеличить время их работы и рабочую температуру до 1100—1200 °С. Для армирования никелевых сплавов применяют упрочнители — нитевидные кристаллы Al_2O_3 (усы), проволоки тугоплавких металлов и сплавов на основе W и Mo, волокна углерода и карбида кремния.

Наиболее широкое распространение получило армирование жаропрочных никелевых сплавов вольфрамовой проволокой. Композиционный материал в этом случае получают способами пластического деформирования прокаткой, сваркой или взрывом.

Композиционный материал ВКН-1 (матрица — литейный жаропрочный сплав ЖС6К, упрочненный вольфрамовой проволокой ВА диаметром 0,5 мм) получают вакуумным всасыванием. Длительная

прочность ВКН-1 выше прочности сплава ЖС6К, и при одинаковых значениях нагрузки и долговечности он по сравнению с неармированной матрицей имеет резерв по температуре 100 °С.

14.4. Эвтектические композиционные материалы

Эвтектическими композиционными материалами называют сплавы эвтектического или близкого к эвтектическому состава, в которых упрочняющей фазой выступают ориентированные кристаллы, образующиеся в процессе направленной кристаллизации. В отличие от обычных композиционных материалов, получаемых путем последовательного выполнения нескольких трудоемких технологических операций, эвтектические композиционные материалы получают за одну операцию. Ценно то, что направленная ориентированная структура может быть получена на уже готовых изделиях. Это существенное преимущество эвтектических композиций по сравнению с другими технологиями получения композиционных материалов.

Способами направленной кристаллизации получают композиционные материалы на основе Al, Mg, Cu, Ni, Co, Ti, Nb, Ta и других элементов, поэтому эвтектические композиционные материалы могут эксплуатироваться в широком интервале температур.

Эвтектические композиционные материалы на алюминиевой основе. Методом направленной кристаллизации получают композиции Al—Al₃Ni и Al—CuAl₂. При затвердевании эвтектического сплава Al—Al₃Ni фаза Al₃Ni выделяется

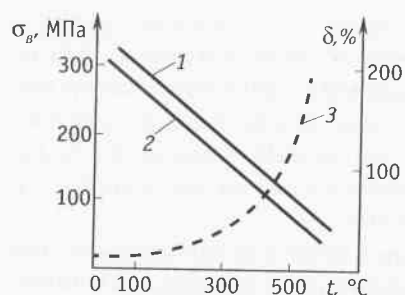


Рис. 14.5. Зависимость прочности композиции Al—Al₃Ni (1), Al—CuAl₂ (2) и относительного удлинения композиции Al—CuAl₂ (3) от температуры

в виде сильно вытянутых частиц, объемное содержание которых 11%. Направленность частиц Al₃Ni достигается кристаллизацией со скоростью 2—10 см/ч. Прочность сплава, полученного без направленной кристаллизации, низкая (около 90 МПа), в то время как при ориентации армирующих частиц Al₃Ni его прочность повышается до 330 МПа.

С повышением температуры прочность сплава Al—Al₃Ni понижается (рис. 14.5, кривая 1) и

при 500 °С составляет 75 МПа. Композиция отличается высокой стабильностью структуры вплоть до температур плавления. В композиции Al—CuAl₂ при направленной кристаллизации эвтектика имеет пластинчатое строение. Объемная доля концентрации пластин CuAl₂ среди пластин твердого раствора меди в алюминии составляет приблизительно 50%. Пластины CuAl₂, концентрация которых в композиции весьма высокая, имея меньшую прочность, чем Al₃Ni, упрочняют матрицу меньше, чем Al₃Ni. Сплав Al—CuAl₂ из-за пластинчатого строения эвтектики отличается высокой хрупкостью. Разрушение материала начинается с разрушения пластин, за которым следует разрушение матрицы.

С повышением температуры у композиции Al—CuAl₂ отмечено существенное возрастание относительного удлинения и падение предела прочности до 30 МПа (рис. 14.5, кривая 2).

Эвтектические композиционные материалы Al—Al₃Ni, Al—CuAl₂ хорошо свариваются методом диффузионной сварки и обрабатываются холодной пластической деформацией. Диффузионную сварку можно вести при 525 °С и получать листы с перекрестным армированием.

В результате прочность композиции Al—Al₃Ni вдоль волокон становится меньше исходной, что важно для электрических проводов и контактов электрических выключателей.

Композиционные материалы Al—Al₃Ni и Al—CuAl₂ применяют как конструкционный материал, а также для изготовления высокопрочных электрических проводов и контактов электрических выключателей.

Эвтектические композиционные материалы на никелевой основе.

Композиционные материалы на основе никеля являются жаропрочными материалами. Пластинчатые композиции, содержащие объемную долю упрочняющей фазы более 33—35%, относятся к хрупким. К пластичным относятся композиции на основе никеля с содержанием объемной доли волокон 3—15% из карбидов тантала, ниобия, гафния. Прочность карбидов близка к прочности усов, полученных из газовой фазы, и колеблется в пределах 600—1200 МПа.

Повышение прочности матрицы в результате ее легирования неизбежно приводит к повышению прочности всей композиции. Прочность пластинчатых эвтектик возрастает с уменьшением межпластинчатого расстояния, которое, в свою очередь, зависит от скорости охлаждения композиции. Разрушение хрупких пластинча-



Рис. 14.6. Влияние температуры на 100-часовую длительную прочность жаропрочных никелевых сплавов (1 — ЭИ741; 2 — ЭИ437Б; 3 — ЖС6; 4 — ЖС6Ф) и эвтектических композиционных материалов (5 — $(\text{Ni}-\text{Ni}_3\text{Al})-\text{Ni}_3\text{Nb}$; 6 — $\text{Ni}_3\text{Al}-\text{Ni}_3\text{Nb}$)

тых эвтектик происходит вслед за разрушением небольшого числа пластин (рис. 14.6).

Обработка и соединение композиционных материалов. На практике часто возникает необходимость соединения деталей узлов из композиционных материалов между собой и с конструкциями, выполненными из металлов и сплавов. В этом случае задача сводится к обеспечению равнопрочности соединения с основным материалом. Соединение композиционного материала производится через матрицу, по прочности существенно уступающей волокнам. В месте соединения волокна претерпевают разрывы, и для обеспечения прочности соединения необходимо использовать большие перекрытия. Отношение длины перекрытия к толщине материала обычно не менее 20.

К металлическим композиционным материалам применимы методы соединения точечной и диффузионной сваркой, пайкой, с помощью болтов, заклепок и клеев.

Наиболее надежным и дешевым способом соединения композиционных материалов является *точечная сварка*. Высокое качество и надежность соединения обеспечиваются режимами сварки, при которых упрочняющие волокна не подвергаются длительному нагреву и не перерезаются. Сварка композиционных материалов

требует тщательного выбора режимов, которые реализуются на обычном сварочном оборудовании или усовершенствованном, обеспечивающем более плавное регулирование давления и температуры.

Соединение *с помощью болтов и заклепок* менее эффективно, чем соединение, полученное точечной сваркой. Сверление отверстий неизбежно связано с разрушением волокон, и прочность таких соединений зависит от прочности материала матрицы. Прочность болтовых и заклепочных соединений повышают дополнительным перекрестным армированием их фольгой из коррозионно-стойких сталей, сплавов. Для того чтобы волокна, например борные, не ломались, внешний слой матрицы должен быть не очень тонким. Усилие натягивания болтов и заклепок контролируют и устанавливают в зависимости от качества соединяемых материалов.

Прочность клеевых соединений зависит от способа и качества подготовки поверхности. Для очистки поверхностей соединения от посторонних включений используют пескоструйную или механическую обработку вращающейся стальной щеткой.

Комбинированные клееболтовые и клеезаклепочные соединения более прочны и надежны, чем соединения клеевые или механические в отдельности.

Композиционные материалы, армированные металлическими и углеродными волокнами, удовлетворительно обрабатываются методами *механической обработки*: резкой, фрезерованием, сверлением, шлифованием. Трудности возникают при обработке композиционных материалов, упрочненных вольфрамовой проволокой диаметром, большим 0,3 мм. Механическая обработка материалов, армированных волокнами, методами резания практически невозможна. Борные волокна, обнаруживающие высокие абразивные свойства, быстро притупляют режущие кромки инструмента, а сами волокна вблизи линии реза выкрашиваются, разрушаются и выдергиваются из матрицы. Обработывающий инструмент и материал разогреваются, армирующие волокна теряют прочность, а сама композиция очень часто расслаивается.

Наилучшие результаты при сверлении отверстия получены при использовании сверл с алмазными покрытиями режущей кромки. Сверление производят при охлаждении инструмента эмульсией.

Установка накладок в непосредственной близости от концов трещин предотвращает резкое снижение разрушающих напряжений при статических нагрузках с увеличением длины трещины (рис. 14.7, а) и

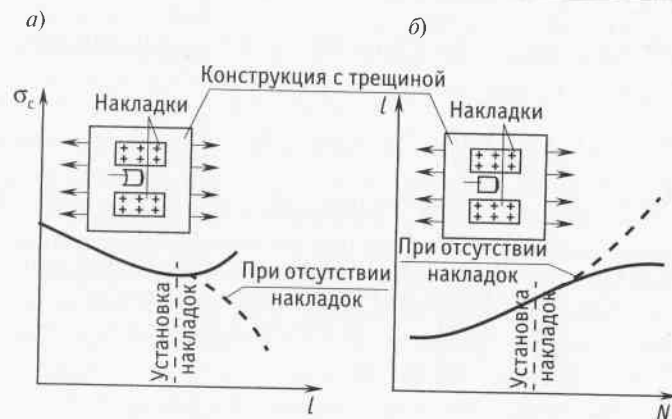


Рис. 14.7. Эффективная роль накладок из композиционных материалов для восстановления работоспособности конструкций с трещинами: а — зависимость разрушающих напряжений σ_c от длины трещины l ; б — зависимость длины l усталостной трещины от числа циклов N нагрузки

позволяет затормозить или полностью остановить развитие трещины при циклическом нагружении (рис. 14.7, б). Абразивная резка обеспечивает высокое качество краев обрабатываемого материала независимо от направления упрочняющих волокон. Процесс обеспечивает высокую производительность при хорошей стойкости инструмента. Одним из названных методов производят крепление накладок (стопперов) на наиболее нагруженные места конструкции и тем самым повышают ее несущую способность.

Контрольные вопросы

1. Какие признаки характерны для композиционных материалов?
2. Как классифицируют композиционные материалы?
3. Какие наполнители относятся к нуль-мерным?
4. Как получают и где применяются композиционные материалы с алюминиевой матрицей?
5. Как обозначаются композиционные материалы с никелевой матрицей?
6. Что такое одномерные наполнители и для чего они применяются?
7. Дайте характеристику волокнам бора, углеродным и карбида кремния?
8. Расскажите о процессе получения стеклянных волокон.

9. Как обозначаются и где применяются стеклонаполненные полиамиды?
10. Как получают нитевидные кристаллы (усы) и чем они характерны?
11. Какие методы получения композиционных материалов применяются в промышленности?
12. Чем характерны композиционные материалы на никелевой матрице?
13. Какие сплавы называют эвтектическими композиционными? Каково их отличие от обычных композиционных материалов?
14. Расскажите о механической обработке и соединении изделий из композиционных материалов.

Справочные данные

1. Основные и дополнительные единицы в Международной системе единиц, СИ

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение
<i>Основные единицы</i>		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд

Дополнительные единицы

Плоский угол	радиан	рад
Телесный угол	стерадиан	ср

2. Некоторые производные единицы СИ, имеющие собственные наименования

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение	Выражение производной единицы через другие единицы СИ
Частота периодического процесса, частота колебаний	герц	Гц	с^{-1}
Сила	ньютон	Н	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Давление, напряжение	паскаль	Па	$\text{Н}/\text{м}^2$
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж	$\text{Н} \cdot \text{м}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	$\text{Дж}/\text{с}$

Окончание табл.

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение	Выражение производной единицы через другие единицы СИ
Количество электричества, электрический заряд	кулон	Кл	$\text{А} \cdot \text{с}$
Электрический потенциал	вольт	Вт	$\text{Вт}/\text{А}$
Электрическая емкость	фарад	Ф	$\text{Кл}/\text{В}$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$\text{В}/\text{А}$
Электрическая проводимость	сименс	См	$\text{А}/\text{В}$
Магнитный поток	вебер	Вб	$\text{В} \cdot \text{с}$
Магнитная индукция	тесла	Тл	$\text{Вб}/\text{м}^2$
Индуктивность	генри	Гн	$\text{Вб}/\text{А}$
Световой поток	люмен	лм	$\text{кд} \cdot \text{ср}$
Освещенность	люкс	лк	$\text{м}^2 \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$

3. Некоторые другие производные единицы СИ

Температура Цельсия	градус Цельсия	$^{\circ}\text{С}$
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$\text{м}/\text{с}^2$
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	$\text{рад}/\text{с}^2$
Угловая скорость	радиан в секунду	$\text{рад}/\text{с}$
Площадь	квадратный метр	м^2
Молярная концентрация	моль на кубический метр	$\text{моль}/\text{м}^3$
Плотность электрического тока	ампер на квадратный метр	$\text{А}/\text{м}^2$
Плотность	килограмм на кубический метр	$\text{кг}/\text{м}^3$
Пространственная плотность электрического заряда	кулон на кубический метр	$\text{Кл}/\text{м}^3$
Напряженность электрического поля	вольт на метр	$\text{В}/\text{м}$
Плотность звуковой энергии	джоуль на кубический метр	$\text{Дж}/\text{м}^3$
Теплоемкость	джоуль на кельвин	$\text{Дж}/\text{К}$

Окончание табл.

Яркость	кандела на квадратный метр	кд/м ²
Напряжение магнитного поля	ампер на метр	А/м
Молярная внутренняя энергия	джоуль на моль	Дж/мол
Момент силы	ньютон-метр	Н·м
Магнитная проницаемость	генри на метр	Гн/м
Диэлектрическая проницаемость	фарад на метр	Ф/м
Энергетическая сила света	ватт на стерадиан	Вт/ср
Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)
Удельный объем	кубический метр на килограмм	м ³ /кг
Поверхностное натяжение	ньютон на метр	Н/м
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)
Скорость (линейная)	метр в секунду	м/с
Объем	кубический метр	м ³

4. Приставки для образования наименований кратных и дольных единиц

Кратность и дольность	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
1 000 000 000 000 000 000=10 ¹⁸	экса	Е	Э
1 000 000 000 000 000=10 ¹⁵	пета	Р	П
1 000 000 000 000=10 ¹²	тера	Т	Т
1 000 000 000=10 ⁹	гига	Г	Г
1 000 000=10 ⁶	мега	М	М
1 000=10 ³	кило	к	к
100=10 ²	гекто	г	г
10=10 ¹	дека	да	да
0,1=10 ⁻¹	деци	д	д
0,01=10 ⁻²	санти	с	с
0,001=10 ⁻³	милли	м	м

Окончание табл.

Кратность и дольность	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
0,000 001=10 ⁻⁶	микро	м	мк
0,000 000 001=10 ⁻⁹	нано	н	н
0,000 000 000 001=10 ⁻¹²	пико	р	п
0,000 000 000 000 001=10 ⁻¹⁵	фемто	ф	ф
0,000 000 000 000 000 001=10 ⁻¹⁸	атто	а	а

5. Соответствие между числами твердости, определяемыми различными методами, и пределом прочности при растяжении

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу HR			Твердость по Виккерсу HV	Предел прочности стали при растяжении σ_B , МПа		
Диаметр отпечатка в мм	Число твердости	Шкалы				Углеродистая	Хромистая	Никелевая и хромоникелевая
		C	A	B				
2,2	780	72	89		1224			
2,25	745	70	87	—	1116	—		—
2,3	712	68	86	—	1022	—	—	—
2,35	682	66	85	—	941	—	—	—
2,40	653	64	84		868	—		—
2,45	627	62	83	—	804	—	—	—
2,50	601	60	82	—	746	—	—	—
2,55	578	58	81	—	694	—	—	—
2,60	555	56	79	—	649	—	—	—
2,65	534	54	78	—	606	—	—	—
2,70	514	52	77	—	587		—	—
2,75	495	50	76	—	551	1780	1730	1680
2,80	477	49	76		534	1720	1670	1610
2,85	461	48	75	—	502	1650	—	—
2,90	444	46	74	—	473	1600	1560	—
2,95	429	45	73	—	460	1550	1500	1460
3,00	415	44	72	—	435	1490	1450	1410
3,02	409	43	72	—	432	1470	1430	1396

Продолжение табл.

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу HR			Твердость по Виккерсу HV	Предел прочности стали при растяжении σ_B МПа		
Диаметр отпечатка в мм	Число твердости	Шкалы				Углеродистая	Хромистая	Никелевая и хромоникелевая
		C	A	B				
3,05	401	42	71	—	412	1440	1395	1365
3,10	388	41	71	—	401	1395	1360	1320
3,15	375	40	70	—	390	1350	1315	1275
3,20	363	39	70	—	380	1305	1270	1235
3,25	352	38	69	—	361	1265	1230	1195
3,30	341	37	68	—	344	1225	1190	1160
3,35	331	36	68	—	335	1195	1165	1130
3,40	321	35	67	—	320	1155	1120	1090
3,45	311	34	67	—	312	1115	1085	1055
3,50	302	33	67	—	305	1085	1055	1025
3,55	293	31	66	—	291	1055	1025	1000
3,60	286	30	66	—	285	1030	1005	975
3,65	277	29	65	—	278	995	970	940
3,70	269	28	65	—	272	970	940	915
3,75	262	27	64	—	261	945	920	895
3,80	255	26	64	—	255	920	890	865
3,85	248	25	63	—	250	895	870	845
3,90	241	24	63	100	240	870	845	820
3,95	235	23	62	99	235	845	825	805
4,00	228	22	62	98	226	825	800	775
4,05	223	21	61	97	221	800	775	765
4,10	217	20	61	97	217	780	760	740
4,15	212	19	60	96	213	760	740	720
4,20	207	18	60	95	209	745	725	705
4,25	202	16	59	94	201	720	710	685
4,30	196	15	58	93	197	705	685	665
4,35	192	15	58	92	190	690	670	650
4,40	187	—	57	91	186	675	655	635
4,45	183	—	56	89	183	660	640	625

Продолжение табл.

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу HR			Твердость по Виккерсу HV	Предел прочности стали при растяжении σ_B МПа		
Диаметр отпечатка в мм	Число твердости	Шкалы				Углеродистая	Хромистая	Никелевая и хромоникелевая
		C	A	B				
4,50	179	—	56	88	177	640	625	605
4,55	174	—	55	87	174	625	610	590
4,60	170	—	—	86	171	610	595	580
4,65	166	—	—	85	165	600	585	570
4,70	163	—	—	84	162	585	570	555
4,75	159	—	—	83	159	575	555	545
4,80	156	—	—	82	154	560	545	530
4,85	153	—	—	81	152	550	535	520
4,90	149	—	—	80	149	535	520	505
4,95	146	—	—	78	147	525	510	500
5,00	143	—	—	76	144	510	495	485
5,05	140	—	—	76	—	500	490	475
5,10	137	—	—	75	—	495	480	465
5,15	134	—	—	74	—	486	470	455
5,20	131	—	—	72	—	470	455	445
5,25	128	—	—	71	—	4625	447,5	435
5,30	126	—	—	69	—	450	435	425
5,35	124	—	—	69	—	440	430	420
5,40	121	—	—	67	—	435	425	410
5,45	118	—	—	66	—	425	415	400
5,50	116	—	—	65	—	417,5	407,5	392,5
5,55	114	—	—	64	—	412,5	402,5	387,5
5,60	112	—	—	62	—	405	395	385
5,65	109	—	—	61	—	390	—	—
5,70	107	—	—	59	—	385	—	—
5,75	105	—	—	58	—	380	—	—
5,80	103	—	—	57	—	370	—	—
5,85	101	—	—	56	—	365	—	—
5,90	99	—	—	54	—	355	—	—

Окончание табл.

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу HR			Твердость по Виккерсу HV	Предел прочности стали при растяжении $\sigma_{\text{в}}$ МПа		
Диаметр отпечатка в мм	Число твердости	Шкалы				Углеродистая	Хромистая	Никелевая и хромоникелевая
		С	А	В				
5,95	97	—	—	53	—	350	—	—
6,00	96	—	—	52	—	345	—	—
6,10	92	—	—	49,5	—	330	—	—
6,20	88	—	—	47	—	320	—	—
6,36	84	—	—	43,5	—	300	—	—
6,48	80	—	—	40,5	—	290	—	—
6,56	78	—	—	38,5	—	280	—	—

Примечание. Числа твердости по Бринеллю получены при нагрузке 3000 кгс и шарике диаметром 10 мм.

Список литературы

1. Адаскин А. М., Зуев В. М. Материаловедение (металлообработка). — М.: Академия, 2006.
2. Батиенков В. Т. Материаловедение. — М.: Инфра—М, 2005.
3. Воробьева Г. А. и др. Особенности обозначения сталей и сплавов в национальных стандартах разных стран. — СПб., 2002.
4. Голубок А. О. и др. Зависимость свойств материалов от состава и структуры. — СПб.: ИТМО, 2002.
5. Маслов А. Р. и др. Инструмент для современных технологий. — М.: ИТО, 2005.
6. Машиностроение. В 40 т. Т. 2 / О. А. Банных, Н. А. Александров, Е. Т. Долбенко. — М.: Машиностроение, 2000.
7. Металловедение/ Под ред. Г. П. Фетисова. — М.: Высш. школа, 2000.
8. Стерин И. С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки. — СПб.: Политехника, 2003.
9. Стерин И. С. Машиностроительные материалы. — Л.: Лениздат, 1984.
10. Товароведение промышленных материалов / В. Д. Дурнев, С. В. Сапунов, В. К. Федюкин. — М.: Филинь, 2002.
11. Федюкин В. К. Термоциклическая обработка: технология, структура и свойства металлических материалов. — Л., 1991.