

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Кемерово 2011

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
им. Т. Ф. Горбачева»

Д. В. Видин Д. Б. Шатко
С. В. Лащнина Е. В. Бакулин

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Кемерово 2011

УДК 621.002 : 658.562

Рецензенты:

Заведующий кафедрой технической механики и упаковочных технологий ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности» профессор доктор технических наук В. С. Хорунжин
Главный инженер ОАО «КАРЗ-1» Н. М. Демуцкая

Материаловедение. Технология конструкционных материалов : учеб. пособие / Д. В. Видин, Д. Б. Шатько, С. В. Лацинина, Е. В. Бакулин ; ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева». – Кемерово, 2011. – 163 с.
ISBN 978-5-89070-819-9

Подготовлено по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». Рассмотрены различные виды и свойства материалов, используемых в горной промышленности. Описаны металлические материалы, строение металлов и сплавов, железоуглеродистые сплавы. Представлены виды термической обработки металлов и методы поверхностного упрочнения. Приведена классификация, маркировка и свойства конструкционных сталей, инструментальных материалов и сплавов цветных металлов. Рассмотрены неметаллические материалы: древесные материалы и искусственные каменные материалы из неорганических минеральных веществ. Изложены основные методы получения заготовок: в литейном производстве, при обработке металлов давлением, в сварочном производстве.

Для студентов специальностей 130403 «Открытые горные работы» и 130404 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых».

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева».

УДК 621.002 : 658.562

© ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева», 2011

© Видин Д. В., Шатько Д. Б., Лацинина С. В., Бакулин Е. В., 2011

ISBN 978-5-89070-819-9

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	7
РАЗДЕЛ I. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	8
1. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	8
1.1. Металлы, атомно-кристаллическое строение.....	8
1.2. Строение реальных металлов. Дефекты в кристаллах.....	9
1.3. Кристаллизация металлов.....	13
2. ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ СПЛАВОВ.....	15
2.1. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов.....	18
2.1.1. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии.....	19
2.1.2. Диаграмма состояния сплавов с механической смесью.....	21
3. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ.....	23
3.1. Диаграмма состояния железо – цементит.....	23
3.2. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей.....	29
3.2.1. Влияние углерода.....	29
3.2.2. Влияние примесей.....	30
3.3. Классификация и маркировки сталей.....	32
3.4. Серые чугуны.....	35
4. ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ.....	39
4.1. Отжиг I рода сталей и сплавов.....	40
4.2. Отжиг II рода.....	43
4.3. Закалка стали.....	48
4.4. Отпуск стали.....	51
5. МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ.....	54
5.1. Поверхностная закалка ТВЧ.....	54
5.2. Химико-термическая обработка.....	55
6. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ.....	58
6.1. Строительные стали.....	60
6.2. Цементуемые стали.....	60
6.3. Улучшаемые стали.....	60
6.4. Рессорно-пружинные стали.....	61
6.5. Износостойкие стали.....	61

6.6. Автоматные стали.....	62
6.7. Нержавеющие стали.....	63
6.8. Жаростойкие и жаропрочные стали.....	63
7. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	64
7.1. Нетеплостойкие стали.....	64
7.2. Полутеплостойкие стали.....	65
7.2.1. Штамповые стали холодного деформирования.....	65
7.2.2. Полутеплостойкие штамповые стали горячего деформирования.....	65
7.3. Теплостойкие стали.....	66
7.4. Металлокерамические твердые сплавы.....	66
8. СПЛАВЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	68
8.1. Алюминиевые сплавы.....	68
8.2. Магниевые сплавы.....	70
8.3. Медные сплавы.....	71
8.4. Цинковые сплавы.....	73
8.5. Антифрикционные материалы.....	73
РАЗДЕЛ II. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	75
1. ДРЕВЕСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	75
2. СТРОЕНИЕ ДЕРЕВА И ДРЕВЕСИНЫ.....	75
2.1. Строение дерева.....	75
2.2. Макроскопическое строение древесины.....	76
2.3. Микроскопическое строение древесины.....	77
3. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ.....	79
3.1. Свойства, определяющие внешний вид древесины.....	79
3.2. Влажность древесины и свойства, связанные с ее изменением.....	80
3.3. Плотность древесины.....	83
3.4. Теплопроводность, звукопроводность, электропроводность древесины.....	84
4. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ.....	85
4.1. Общие понятия о механических свойствах и испытаниях древесины.....	85
4.2. Прочность древесины.....	86
4.3. Твердость, деформативность и ударная вязкость древесины.....	87
4.4. Технологические свойства древесины.....	88

5. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ИСПЫТАНИЙ ДРЕВЕСИНЫ	89
6. ПОРОКИ ДРЕВЕСИНЫ	91
6.1. Сучки	92
6.2. Трещины	93
6.3. Пороки формы ствола	93
6.4. Пороки строения древесины	94
6.5. Химические окраски	96
6.6. Грибные поражения	96
6.7. Биологические повреждения	97
6.8. Инородные включения, механические повреждения и пороки механической обработки	98
6.9. Покоробленность	100
7. ИСКУССТВЕННЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ	100
7.1. Бетоны	100
7.2. Композиционные материалы на основе бетонов	110
7.3. Силикатные материалы и изделия автоклавного твердения	113
7.4. Строительные растворы	114
РАЗДЕЛ III. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	117
1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ЛИТЬЯ	117
1.1. Литье в одноразовые формы	118
1.1.1. Литье в песчаные формы. Технология литья в песчаные формы	118
1.1.1.1. Чертеж отливки	118
1.1.1.2. Модельный комплект	120
1.1.1.3. Формовочные и стержневые смеси	120
1.1.1.4. Изготовление литейной формы	121
1.1.2. Литье в оболочковых формах	123
1.1.3. Литье по выплавляемым моделям	124
1.2. Литье в металлические формы	125
1.2.1. Литье в кокиль	126
1.2.2. Литье под давлением	128
1.2.3. Центробежное литье	129
РАЗДЕЛ IV. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	131
1. ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	131
1.1. Инструмент и оборудование для прокатки	132
1.2. Продукция прокатного производства	133

2. КОВКА.....	134
2.1. Основные операции ковки.....	135
3. ШТАМПОВКА.....	137
3.1. Горячая объемная штамповка.....	138
3.2. Холодная штамповка.....	139
3.2.1. Холодная объемная штамповка.....	139
3.2.2. Холодная листовая штамповка.....	141
3.2.3. Разделительные операции листовой штамповки.....	141
3.2.4. Формообразующие операции листовой штамповки.....	142
4. ПРЕССОВАНИЕ.....	145
5. ВОЛОЧЕНИЕ.....	146
РАЗДЕЛ V. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....	148
1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ СВАРКИ.....	148
2. СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ.....	148
2.1. Электродуговая сварка.....	149
2.2. Ручная электродуговая сварка.....	150
2.3. Автоматическая дуговая сварка под слоем флюса.....	151
2.4. Сварка в атмосфере защитных газов.....	153
2.5. Плазменная сварка.....	153
2.6. Газовая сварка.....	155
3. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ.....	157
3.1. Электрическая контактная сварка.....	157
3.1.1. Стыковая сварка.....	157
3.1.2. Точечная сварка.....	158
3.1.3. Шовная (роликовая) сварка.....	159
3.1.4. Пайка.....	160
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	161
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	162

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» состоит из пяти разделов: в первом разделе даны понятия о строении металлов и сплавов, о структурных превращениях металлов и сплавов при различных условиях, рассмотрены конструкционные и инструментальные стали и сплавы, применяемые в горной промышленности (автор ст. преп. Д. В. Видин). Во втором разделе дана характеристика древесных и каменных материалов из неорганических минеральных веществ, способов их испытаний, указана область их применения в горнорудной промышленности (авторы доц., к.т.н. Д. Б. Шатько, ст. преп. С. В. Лащинуна). Последующие три главы содержат информацию о современных рациональных методах производства отливок, о машинах, применяемых для производства отливок. В них описаны процессы деформации металлов, производство заготовок различными методами прокатки и волочения, современные рациональные методы изготовления поковок и штамповок. В разделе «Сварочное производство» изложены основные методы сварки, даны понятия о технологии изготовления сварных изделий, кратко охарактеризованы сварочные машины. Представлена информация о технологическом оборудовании, применяемом в заготовительном производстве при литье, обработке давлением и сварке (автор ст. преп. Е. В. Бакулин).

Учебное пособие написано с учетом современного состояния науки о материалах и их свойствах. Содержит краткую характеристику материалов, применяемых в горной промышленности, способе их изготовления и регулирования свойств. Учебная информация представлена в виде наглядных схем, графиков, фотографий. Содержание и объем предлагаемого учебного материала определяется рабочей программой курса. Последовательность изложения материала построена по логической схеме: виды материалов – контроль качества – способы упрочнения материалов – методы изготовления деталей из них.

Данное пособие может быть использовано в качестве основной литературы при изучении одноименного курса для студентов специальностей 130403 «Открытые горные работы» и 130404 «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых».

РАЗДЕЛ I. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1. СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Материаловедение – это наука о взаимосвязи электронного строения, структуры материалов с их составом, физическими, химическими, технологическими и эксплуатационными свойствами.

1.1. Металлы, атомно-кристаллическое строение

Металлы – один из классов конструкционных материалов, характеризующихся определенным набором свойств:

- «металлический блеск» (хорошая отражательная способность);
- пластичность;
- высокая теплопроводность;
- высокая электропроводность.

Данные свойства обусловлены особенностями строения металлов. Согласно теории металлического состояния, металл представляет собой вещество, состоящее из положительных ядер, вокруг которых по орбитали вращаются электроны. На последнем уровне число электронов невелико и они слабо связаны с ядром. Эти электроны имеют возможность перемещаться по всему объему металла, т. е. принадлежать целой совокупности атомов.

Все металлы, затвердевающие в нормальных условиях, представляют собой кристаллические вещества, т. е. укладка атомов в них характеризуется определенным порядком – периодичностью, как по различным направлениям, так и по различным плоскостям. Этот порядок определяется понятием *кристаллическая решетка*.

Другими словами, кристаллическая решетка – это воображаемая пространственная решетка, в узлах которой располагаются частицы, образующие твердое тело.

Элементарная ячейка – элемент объема из минимального числа атомов, многократным переносом которого в пространстве можно построить весь кристалл.

Основными типами кристаллических решеток являются:

1. Объемно-центрированная кубическая (ОЦК) (рис. 1.1, *a*), атомы располагаются в вершинах куба и в его центре (V, W, Ti, Fe).

2. Гранецентрированная кубическая (ГЦК) (рис. 1.1, *б*), атомы располагаются в вершинах куба и по центру каждой из 6 граней (Ag, Au, Fe).

3. Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рис. 1.1, *в*), в основании которой лежит шестиугольник, атомы располагаются в вершинах ячейки, имеется 3 дополнительных атома в средней плоскости (Mg, Zn и др.).

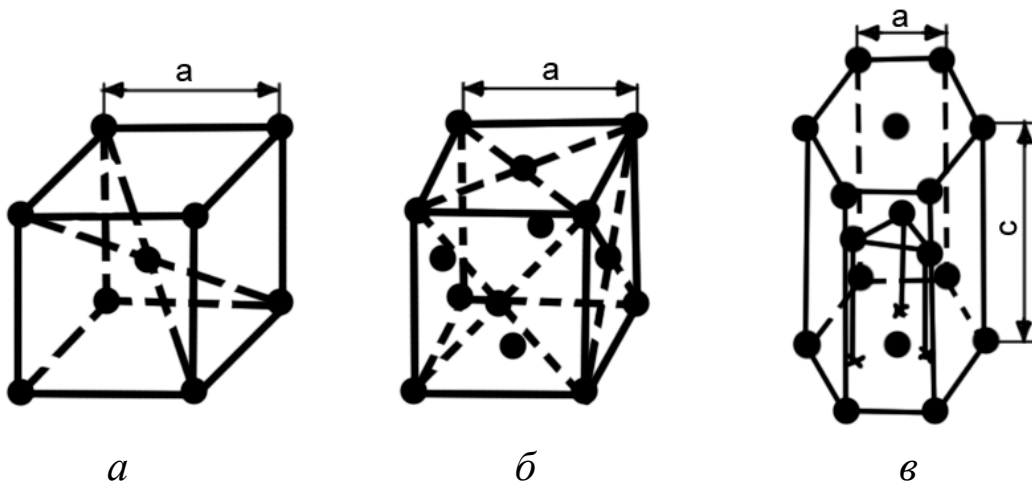


Рис. 1.1. Основные типы кристаллических решеток:

a – объемно-центрированная кубическая;

б – гранецентрированная кубическая;

в – гексагональная плотноупакованная

1.2. Строение реальных металлов.

Дефекты в кристаллах

Из жидкого расплава можно вырастить монокристалл. Их обычно используют в лабораториях для изучения свойств того или иного вещества.

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, т. е. имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы называются зернами. Они имеют неправильную форму и различно ориентированы в пространстве. Каждое зерно имеет свою ориентировку кристалличе-

ской решетки, отличную от ориентировки соседних зерен, вследствие чего свойства реальных металлов усредняются, и явления анизотропии не наблюдается.

В кристаллической решетке реальных металлов имеются различные дефекты (несовершенства), которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов. Различают дефекты по геометрическим признакам:

- точечные – малые во всех трех измерениях;
- линейные – малые в двух измерениях и сколь угодно протяженные в третьем;
- поверхностные – малые в одном измерении.

Точечные дефекты – это одно из распространенных несовершенств кристаллического строения. Выделяют следующие виды дефектов: вакансия (рис. 1.2, а) и межузельный атом (рис. 1.2, б).

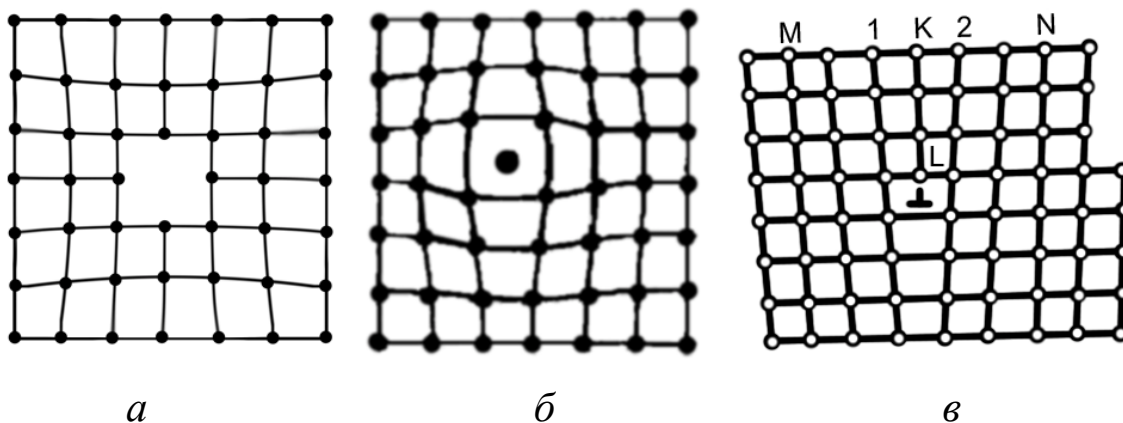


Рис. 1.2. Дефекты кристаллов:
 а – вакансия; б – межузельный атом;
 в – линейная дислокация

Вакансия – отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки, «дырки», которые образовались в результате различных причин. Образуется при переходе атомов с поверхности в окружающую среду или из узлов решетки на поверхность (границы зерен, пустоты, трещины и т. д.) в результате пластической деформации, при бомбардировке тела атомами или частицами высоких энергий.

Межузельный атом – это атом, вышедший из узла решетки и занявший место в междоузлии. Концентрация дислоцированных атомов значительно меньше, чем вакансий, так как для их образования требуются существенные затраты энергии. При этом на месте переместившегося атома образуется вакансия.

Точечные дефекты вызывают незначительные искажения решетки, что может привести к изменению свойств тела (электропроводность, магнитные свойства), их наличие способствует процессам диффузии и протеканию фазовых превращений в твердом состоянии. При перемещении по материалу дефекты могут взаимодействовать.

Линейные дефекты. Основными линейными дефектами являются дислокации.

Дислокация – это дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей.

Краевая дислокация представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край «лишней» полуплоскости (рис. 1.2, в). Большинство дислокаций образуются путем сдвигового механизма.

Неполная плоскость называется *экстраплоскостью*. Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то краевая дислокация – положительная (\perp), если в нижней, то – отрицательная (\dashv). Дислокации одного знака отталкиваются, а противоположные притягиваются.

Дислокационная структура материала характеризуется плотностью дислокации.

Плотность дислокаций изменяется в широких пределах и зависит от состояния материала. После тщательного отжига плотность дислокаций составляет $10^5 \dots 10^7 \text{ м}^{-2}$, в кристаллах с сильно деформированной кристаллической решеткой плотность дислокаций достигает $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Плотность дислокации в значительной мере определяет пластичность и прочность материала (рис. 1.3).

Минимальная прочность определяется критической плотностью дислокаций $\rho = 10^5 \dots 10^7 \text{ м}^{-2}$.

Если плотность меньше значения a , то сопротивление деформированию резко возрастает, а прочность приближается к теоретической. Повышение прочности достигается созданием металла с бездефектной структурой, а также повышением плотности дислокаций, затрудняющим их движение.

Дислокации влияют не только на прочность и пластичность, но и на физические свойства кристаллов, они ухудшаются.



Рис. 1.3. Влияние плотности дислокаций на прочность

Образуются дислокации при деформации, в процессе кристаллизации, при термической обработке.

Поверхностные дефекты – границы зерен, фрагментов и блоков (рис. 1.4).

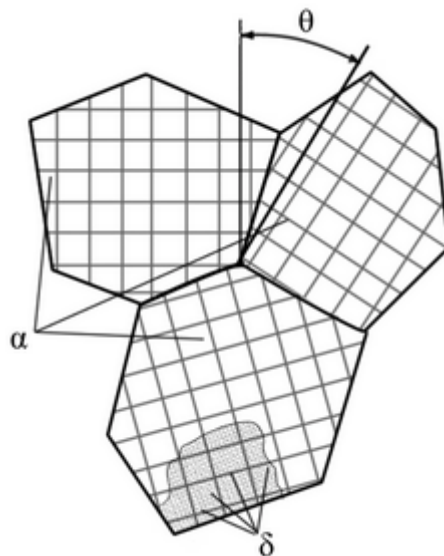


Рис. 1.4. Разориентация зерен и блоков в металле

Размеры зерен составляют до 1000 мкм. Углы разориентации составляют до нескольких десятков градусов (θ). Граница между зернами представляет собой тонкую в 5...10 атомных диаметров поверхностную зону с максимальным нарушением порядка в расположении атомов. Строение переходного слоя способствует скоплению в нем дислокаций. На границах зерен повышена концентрация примесей, которые понижают поверхностную энергию.

Поверхностные дефекты значительно влияют на механические свойства, особенно на ударную вязкость.

1.3. Кристаллизация металлов

Кристаллизация – это процесс образования участков кристаллической решетки в жидкой фазе и рост кристаллов из образовавшихся центров.

Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном. Возможен переход из одного состояния в другое, если новое состояние в новых условиях является более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

С изменением внешних условий свободная энергия изменяется по сложному закону различно для жидкого и кристаллического состояний. Характер изменения свободной энергии жидкого и твердого состояний с изменением температуры показан на рис. 1.5.

Для начала процесса кристаллизации необходимо, чтобы процесс был термодинамически выгоден системе и сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Это возможно при охлаждении жидкости ниже температуры T_s . Температура, при которой практически начинается кристаллизация, называется *фактической температурой кристаллизации*.

В соответствии со схемой рис. 1.5 выше температуры T_s вещество должно находиться в жидком состоянии, а ниже T_s – в твердом. При температуре, равной T_s , жидкая и твердая фаза обладают одинаковой энергией, металл в обоих состояниях находится в равновесии, поэтому две фазы могут существовать одновременно бесконечно долго. Температура T_s – *равновесная* или *теоретическая температура кристаллизации*.

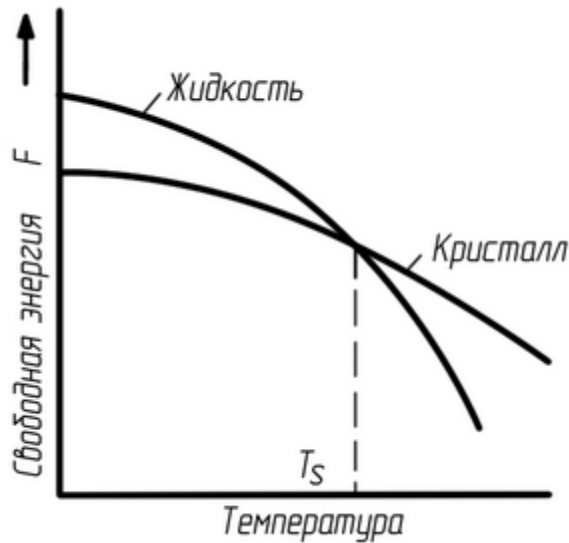


Рис. 1.5. Изменение свободной энергии в зависимости от температуры

Охлаждение жидкости ниже равновесной температуры кристаллизации называется *переохлаждением*, которое характеризуется *степенью переохлаждения* ($\Delta T = T_{\text{теор}} - T_{\text{кр}}$).

Рассмотрим переход металла из жидкого состояния в твердое, т. е. *механизм кристаллизации*.

Процесс кристаллизации зависит от температуры и протекает во времени.

Процесс перехода металла из жидкого состояния в кристаллическое можно изобразить кривыми в координатах «Время – Температура». Кривая охлаждения чистого металла представлена на рис. 1.6.

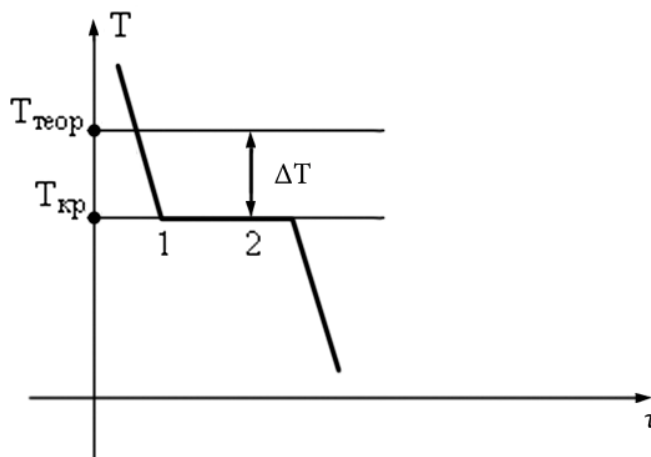


Рис. 1.6. Кривая охлаждения чистого металла

$T_{\text{теор}}$ – теоретическая температура кристаллизации; $T_{\text{кр}}$ – фактическая температура кристаллизации.

2. ТЕОРИЯ СТРОЕНИЯ СПЛАВОВ

Понятие о сплавах и методах их получения.

Под сплавом понимают вещество, полученное сплавлением двух или более элементов. Возможны другие способы приготовления сплавов: спекание, электролиз, возгонка. В этом случае вещества называются псевдосплавами.

Сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами, называется металлическим сплавом. Сплавы обладают более разнообразным комплексом свойств, которые изменяются в зависимости от состава и метода обработки.

Основные понятия и определения.

При изучении сплавов в металловедении используют следующие понятия:

Компоненты – вещества, образующие систему. В качестве компонентов выступают чистые вещества и химические соединения, если они не диссоциируют на составные части в исследуемом интервале температур.

Фаза – однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностного раздела, при переходе через которую структура и свойства резко меняются.

Система – совокупность фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях.

Структура – видимое в микроскоп строение сплава. Характеризуется формой, размером и расположением фаз.

Строение металлического сплава зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, составляющие сплав. Почти все металлы в жидком состоянии растворяются друг в друге в любых соотношениях. При образовании сплавов в процессе их затвердевания возможно различное взаимодействие компонентов.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов различают сплавы:

- 1) твердые растворы;

- 2) химические соединения;
- 3) механические смеси.

Сплавы *твердые растворы* – это твердые фазы, в которых соотношения между компонентами могут изменяться. Являются кристаллическими веществами.

Характерной особенностью твердых растворов является наличие в их кристаллической решетке разнородных атомов, при сохранении типа решетки растворителя.

По степеням растворимости компонентов различают твердые растворы:

- с неограниченной растворимостью компонентов;
- с ограниченной растворимостью компонентов.

При неограниченной растворимости компонентов кристаллическая решетка компонента растворителя по мере увеличения концентрации растворенного компонента плавно переходит в кристаллическую решетку растворенного компонента.

Для образования растворов с неограниченной растворимостью необходимы: изоморфность (однотипность) кристаллических решеток компонентов; близость атомных радиусов компонентов, которые не должны отличаться более чем на 8...13 %; близость физико-химических свойств подобных по строению валентных оболочек атомов.

При ограниченной растворимости компонентов возможна концентрация растворенного вещества до определенного предела. При дальнейшем увеличении концентрации однородный твердый раствор распадается с образованием двухфазной смеси.

По характеру распределения атомов растворенного вещества в кристаллической решетке растворителя различают твердые растворы:

- замещения;
- внедрения.

В растворах замещения в кристаллической решетке растворителя часть его атомов замещена атомами растворенного элемента (рис. 2.1, *a*). Замещение осуществляется в случайных местах, поэтому такие растворы называют неупорядоченными твердыми растворами.

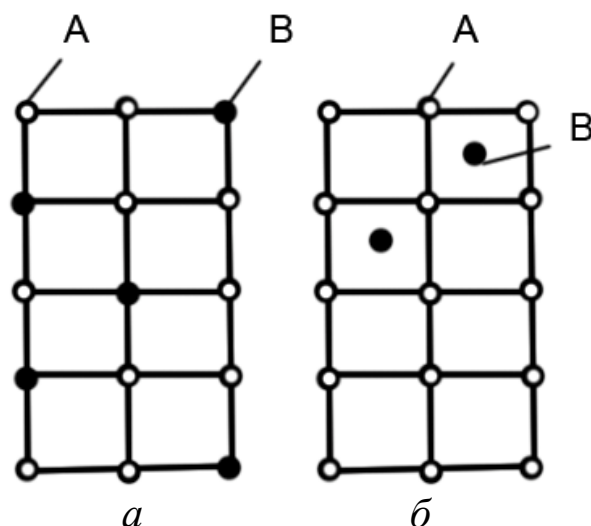


Рис. 2.1. Кристаллическая решетка твердых растворов замещения (*a*), внедрения (*б*)

При образовании растворов замещения периоды решетки изменяются в зависимости от разности атомных диаметров растворенного элемента и растворителя. Если атом растворенного элемента больше атома растворителя, то элементарные ячейки увеличиваются, если меньше – сокращаются. В первом приближении это изменение пропорционально концентрации растворенного компонента. Изменение параметров решетки при образовании твердых растворов – важный момент, определяющий изменение свойств. Уменьшение параметра ведет к большему упрочнению, чем его увеличение.

Твердые растворы внедрения образуются внедрением атомов растворенного компонента в поры кристаллической решетки растворителя (рис. 2.1, б).

Образование таких растворов возможно, если атомы растворенного элемента имеют малые размеры. Такими являются элементы, находящиеся в начале периодической системы Менделеева: углерод, водород, азот, бор. Размеры атомов превышают размеры межатомных промежутков в кристаллической решетке металла, это вызывает искажение решетки и в ней возникают напряжения. Концентрация таких растворов не превышает 2...2,5 %.

Сплавы *химические соединения* образуются между элементами, значительно различающимися по строению и свойствам, если сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем между однородными.

Особенности этих сплавов:

1) Постоянство состава, т. е. сплав образуется при определенном соотношении компонентов, химическое соединение обозначается A_nB_m .

2) Образуется специфическая, отличающаяся от решеток элементов, составляющих химическое соединение, кристаллическая решетка с правильным упорядоченным расположением атомов.

3) Ярко выраженные индивидуальные свойства.

4) Постоянство температуры кристаллизации, как у чистых компонентов.

Сплавы *механические смеси* образуются, когда компоненты не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения.

Образуются между элементами, значительно различающимися по строению и свойствам, когда сила взаимодействия между однородными атомами больше, чем между разнородными. Сплав состоит из кристаллов входящих в него компонентов. В сплавах сохраняются кристаллические решетки компонентов.

2.1. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от концентрации и температуры.

Диаграммы состояния показывают устойчивые состояния, т. е. состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии, и поэтому ее также называют диаграммой равновесия, так как она показывает, какие при данных условиях существуют равновесные фазы.

Построение диаграмм состояния наиболее часто осуществляется при помощи термического анализа. В результате получают серию кривых охлаждения, на которых при температурах фазовых превращений наблюдаются точки перегиба и температурные остановки.

По кривым охлаждения строят диаграмму состава в координатах: по оси абсцисс – концентрация компонентов, по оси ординат – температура. Температуры, соответствующие фазовым пре-

вращениям, называют критическими точками. Некоторые критические точки имеют названия, например: точки, отвечающие началу кристаллизации, называют точками *ликвидус*, а концу кристаллизации – точками *солидус*.

По диаграмме состояния можно определить температуры фазовых превращений, изменение фазового состава, приближенные свойства сплава и виды обработки, которые можно применять для сплава.

Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов строят в координатах «Температура – Концентрация компонентов в процентах %», с помощью термического анализа. Диаграмма отражает устойчивое (равновесное) состояние сплавов. При взаимодействии компонентов в процессе кристаллизации могут образовываться разные твердые фазы, что в каждом случае определяет положение линий диаграммы – получаются диаграммы состояния разных типов: с неограниченной растворимостью; с отсутствием растворимости; с переменной растворимостью; с химическим соединением.

2.1.1. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Диаграмма состояния и кривые охлаждения сплавов системы представлены на рис. 2.2.

Сначала получают термические кривые. Полученные точки переносят на диаграмму, соединив точки начала кристаллизации сплавов и точки конца кристаллизации, получают диаграмму состояния.

Основные линии диаграммы:

- acb – линия ликвидус, выше этой линии сплавы находятся в жидком состоянии;
- adb – линия солидус, ниже этой линии сплавы находятся в твердом состоянии.

Чистые компоненты А и В кристаллизуются при постоянной температуре, кривая охлаждения компонента В представлена на рис. 2.2, б.

Остальные сплавы кристаллизуются аналогично сплаву I, кривая охлаждения которого представлена на рис. 2.2, а.

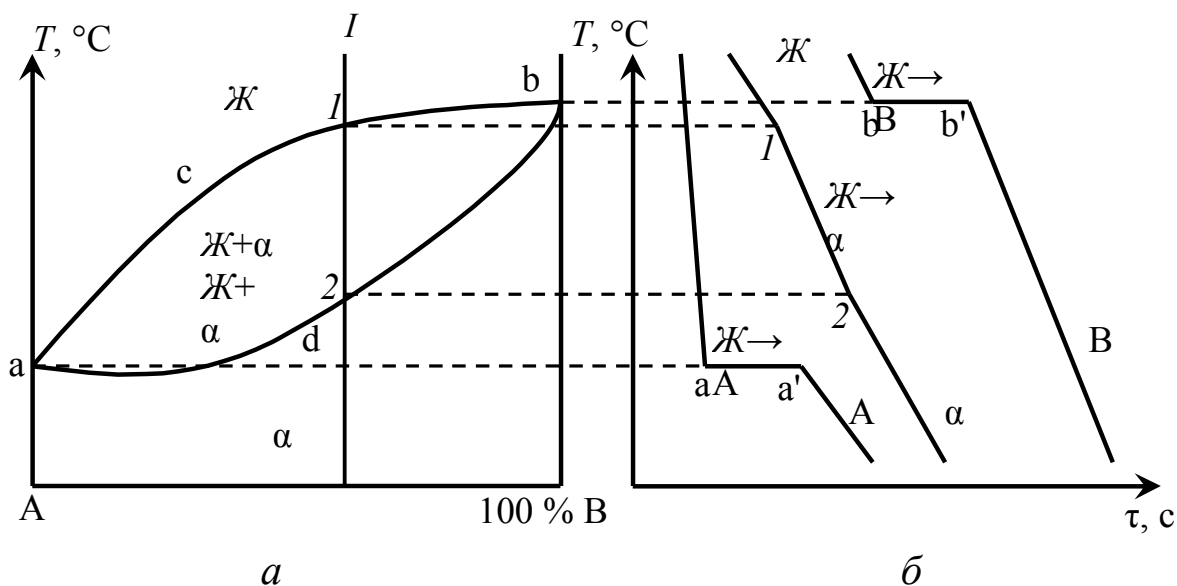


Рис. 2.2. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (*а*); кривые охлаждения типичных сплавов (*б*)

Процесс кристаллизации сплава *I*: до точки *I* охлаждается сплав в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке *I*, начинают образовываться центры кристаллизации твердого раствора α . На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. На участке *I–2* идет процесс кристаллизации, протекающий при понижающейся температуре. При достижении температуры, соответствующей точке *2*, сплав затвердевает, при дальнейшем понижении температуры охлаждается сплав в твердом состоянии, состоящий из однородных кристаллов твердого раствора α .

Схема микроструктуры сплава представлена на рис. 2.3.

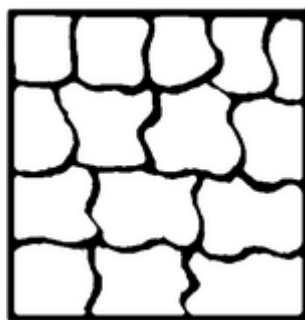


Рис. 2.3. Схема микроструктуры сплава – однородного твердого раствора

2.1.2. Диаграмма состояния сплавов с механической смесью

Сплавы с отсутствием растворимости компонентов, а также сплавы с ограниченной или переменной растворимостью компонентов характеризуются диаграммой состояния с механической смесью – эвтектикой.

Эвтектика – мелкодисперсная механическая смесь разнородных кристаллов, кристаллизующихся одновременно при постоянной, самой низкой для рассматриваемой системы, температуре.

При образовании сплавов механических смесей эвтектика состоит из кристаллов компонентов А и В: Э(А + В).

Процесс кристаллизации эвтектического сплава.

Процесс кристаллизации сплава II: до точки I охлаждается сплав в жидком состоянии (рис. 2.4). При температуре, соответствующей точке I, начинают образовываться центры кристаллизации избыточного компонента В. На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий при понижающейся температуре. При охлаждении состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус до эвтектического.

Для протекания процесса эвтектического превращения необходимо выполнение двух условий: достижение эвтектической концентрации основного легирующего элемента; постоянство температуры превращения.

При температуре, соответствующей точке эвтектического превращения, начинается одновременная кристаллизация двух разнородных компонентов. На кривой охлаждения отмечается температурная остановка, т. е. процесс идет при постоянной температуре.

На участке 2–2' кристаллизуется эвтектика (см. кристаллизацию эвтектического сплава). Ниже точки 2' охлаждается сплав, состоящий из кристаллов первоначально закристаллизовавшегося избыточного компонента В и эвтектики.

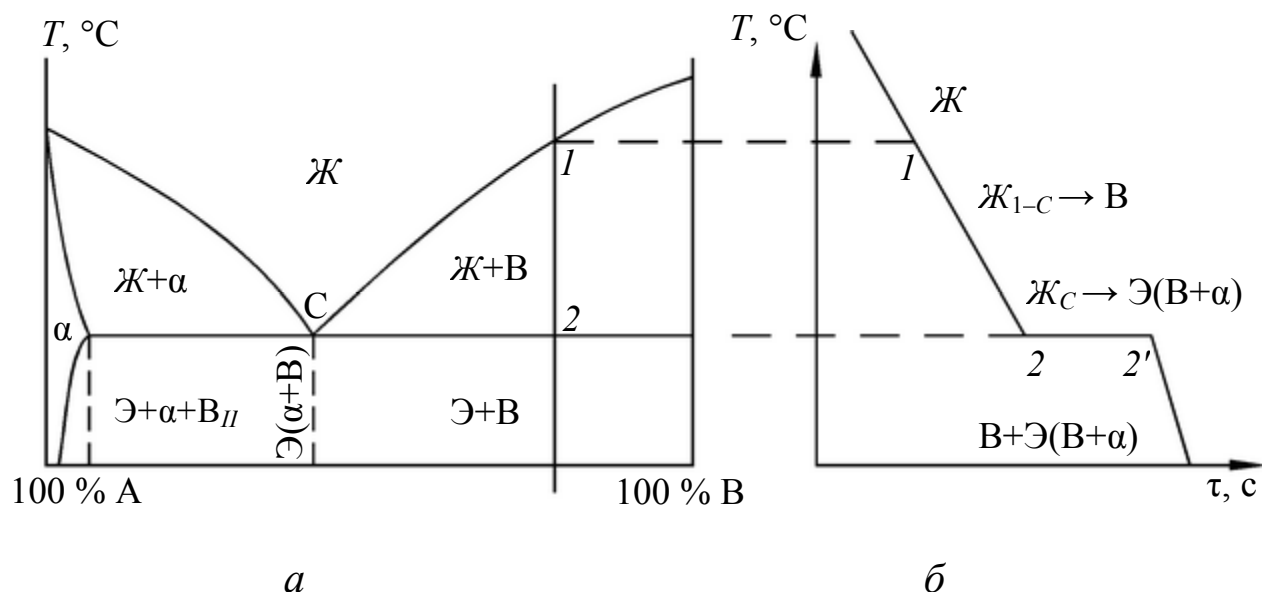


Рис. 2.4. Диаграмма состояния сплавов с механической смесью (а); кривая охлаждения сплава (б)

Схемы микроструктур сплава представлены на рис. 2.5.

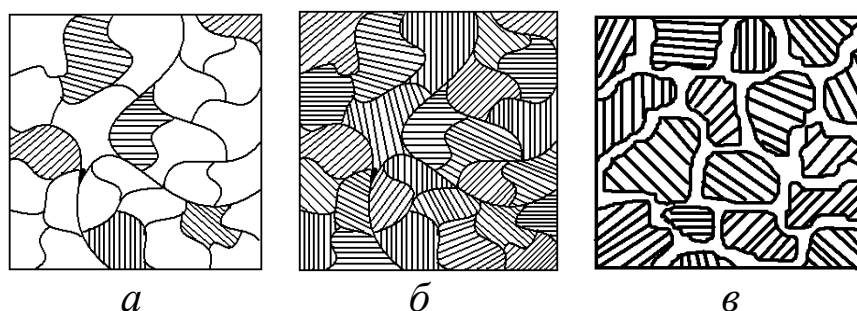


Рис. 2.5. Схема микроструктур сплавов: а – доэвтектического; б – эвтектического; в – заэвтектического

Диаграмма состояния сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии (переменная растворимость).

По внешнему виду диаграмма похожа на диаграмму состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Отличие в том, что линии предельной растворимости компонентов не перпендикулярны оси концентрации. Появляются области, в которых из однородных твердых растворов при понижении температуры выделяются вторичные фазы.

В случае отсутствия растворимости компонентов на диаграмме отсутствует линия сольвуса и при кристаллизации образуется либо чистый компонент, либо химическое соединение.

3. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ

3.1. Диаграмма состояния железо – цементит

Диаграмма состояния железо – цементит ($\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$) образована двумя компонентами – железом и углеродом. Сплавы этих элементов (сталь, чугун) являются наиболее распространенными машиностроительными материалами. При сплавлении железа с углеродом образуются разнообразные фазы и структурные составляющие: твердые растворы, химические соединения и механические смеси.

В железоуглеродистых сплавах происходят превращения не только в процессе кристаллизации – плавления, но и в твердом состоянии.

Основные характеристики компонентов, фаз и структурных составляющих системы железо – цементит.

В состав этих сплавов входят два основных компонента:

Железо – металл сероватого цвета, температура плавления $1539\text{ }^\circ\text{C}$, претерпевает полиморфные превращения, связанные с обязательной перестройкой кристаллической решетки. Известно в двух полиморфных модификациях – αFe и γFe .

Углерод является неметаллическим элементом. Температура плавления углерода $3500\text{ }^\circ\text{C}$. Углерод полиморфен. В обычных условиях он находится в виде модификации графита, может существовать в виде модификации алмаза. Углерод растворим в железе в жидком и твердом состоянии, а также может находиться в виде химического соединения Fe_3C – цементита, а в высокоуглеродистых сплавах в виде графита (Γ). В сплавах железа с углеродом существуют две высокоуглеродистые фазы: метастабильная (Fe_3C) и стабильная (графит). Поэтому различают две диаграммы состояния: $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ и $\text{Fe} - \text{C}$ (графит).

В системе $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ различают следующие фазы: жидкий сплав, твердые растворы (феррит и аустенит), а также цементит.

Феррит (Φ) – твердый раствор внедрения углерода в α -железо. Решетка ОЦК – объемно-центрированный куб. Чистый феррит существует в области QPG (рис. 3.1). Содержание углерода в феррите изменяется по линии PQ и соответствует $0,025\%$ при $T = 727\text{ }^\circ\text{C}$ и $0,005\%$ при $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$. Феррит ($0,005\%$ C) имеет примерно следующие механические свойства: $\sigma_{\text{в}} = 250\text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 120\text{ МПа}$; $\delta = 50\%$; $\psi = 80\%$; НВ $800 \div 1000\text{ МПа}$.

Аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода в γ -железо. Решетка ГЦК – гранецентрированный куб. Аустенит существует в области *AESG* (рис. 3.1). Растворимость углерода изменяется по линии *ES* от 2,14 % (при $T = 1147$ °С) до 0,8 % (при $T = 727$ °С).

Имеет следующие механические свойства: $\delta = 50$ %; $\sigma_{\text{в}} = 500 \div 800$ МПа; НВ 1600 \div 2000 МПа.

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа Fe_3C . Содержание углерода 6,67 %. Механические свойства: НВ 8000 МПа; $\delta = 0$ %. В структуре сплава цементит является упрочняющей метастабильной фазой.

В этой системе образуются и структурные составляющие: эвтектика (ледебурит) и эвтектоид (перлит).

Ледебурит (Л) – эвтектическая механическая смесь двух фаз аустенита и цементита в температурном интервале $T = 1147 \div 727$ °С и смесь перлита и цементита при температуре ниже 727 °С. Образуется из жидкой фазы с содержанием углерода 4,3 % при постоянной температуре $T = 1147$ °С. При $T = 727$ °С состав ледебурита меняется вследствие эвтектоидного превращения.

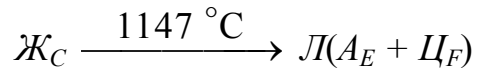
Перлит (П) – эвтектоидная механическая смесь двух фаз – феррита и цементита, образуется из аустенита с содержанием углерода 0,8 % при постоянной температуре $T = 727$ °С. Механические свойства: $\sigma_{\text{в}} = 800 \div 900$ МПа; $\delta = 12$ %; НВ 2000 МПа.

На рис. 3.1 приведена диаграмма состояния Fe – Fe_3C . Она показывает фазовый состав и структуру сплавов с концентрацией от чистого железа (0,005 % С) до цементита (6,67 % С).

Процессы первичной кристаллизации сплавов начинаются по достижении температур, соответствующих линии *ACD* (линия ликвидус). Окончание процесса затвердевания соответствует температурам, образующим линию солидус *AECF*. Точка *A* (1539 °С) на диаграмме соответствует температуре плавления чистого железа, а точка *D* (1260 °С) температуре плавления цементита. При температурах, соответствующих линии *AC*, из жидкого сплава кристаллизуется аустенит (*A*), а по линии *CD* – цементит первичный (*Ц_п*). Состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус, а состав твердой фазы (*A*) по линии солидус. Ау-

стенит обогащается, а жидкость обедняется или обогащается углеродом до 4,3 %.

В точке C при $T = 1147\text{ }^\circ\text{C}$ и концентрации углерода 4,3 % из жидкого сплава одновременно кристаллизуется аустенит и цементит, образуя эвтектику, которая называется ледебуритом.



В сплавах с содержанием до 2,14 % углерода кристаллизация аустенита заканчивается на линии AE . После затвердевания ниже линии солидус AE сплавы имеют однофазную структуру – аустенит.

Сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14 % углерода, называют сталями; сплавы, содержащие более 2,14 % углерода, – чугунами.

При кристаллизации доэвтектических чугунов, содержащих от 2,14 до 4,3 % углерода, из жидкой фазы на линии ликвидус AC сначала выделяются кристаллы аустенита, а при $T = 1147\text{ }^\circ\text{C}$ (линия ECF) сплавы затвердевают с образованием эвтектики – ледебурита. Следовательно, доэвтектические чугуны после затвердевания (выше $T = 727\text{ }^\circ\text{C}$) имеют структуру аустенит + ледебурит ($A + Л$). Эвтектический чугун, содержащий 4,3 % углерода, имеет структуру ледебурит $Л(A + Ц)$. Заэвтектические чугуны, содержащие от 4,3 до 6,67 % углерода, начинают затвердевать на линии CD . Первоначально из жидкой фазы выделяются кристаллы цементита первичного, а по достижении $T = 1147\text{ }^\circ\text{C}$ (линия ECF) сплавы окончательно затвердевают с образованием эвтектики – ледебурита. После затвердевания структура состоит из первичного цементита и ледебурита.

Цементит, образующийся из жидкой фазы в результате первичной кристаллизации, называют первичным.

Стали после затвердевания не содержат эвтектики (ледебурита) и при высокой температуре имеют структуру чистого аустенита, обладающего высокой пластичностью. Поэтому стали являются ковкими сплавами. Чугуны хрупкие, практически не поддаются ковке, но обладают хорошими литейными свойствами по сравнению со сталью. Это объясняется присутствием в структуре чугунов легкоплавкой хрупкой эвтектики.

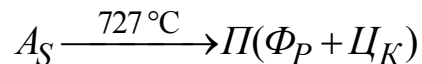
Процессы вторичной кристаллизации в твердом состоянии протекают по линиям *GSE* и *PSK*.

Фазовые и структурные изменения в сплавах Fe – Fe₃C после затвердевания связаны с переходом, при охлаждении, γ -железа в α -железо, с изменением углерода в аустените и феррите.

На линии *GS* начинается полиморфное превращение $\gamma\text{Fe} \leftrightarrow \alpha\text{Fe}$. Ниже линии *GS* из аустенита выделяется феррит.

Линия *ES* показывает изменение растворимости углерода в аустените. С изменением температуры, при охлаждении, из аустенита выделяется вторичный цементит, при этом обедняя содержание углерода в аустените до 0,8 %. Линию *ES* иногда называют линией предельной растворимости углерода в аустените или линией начала вторичной кристаллизации – линией сольвус.

При достижении температуры 727 °С происходит распад аустенита с образованием эвтектоидной структуры – перлита. Эвтектоид образуется в результате одновременного выделения из аустенита частиц феррита и цементита.



Таким образом, перлит содержит 0,8 % углерода и образуется при $T = 727$ °С. Точка *P* характеризует предельную растворимость углерода в α -железе, при эвтектоидной температуре 727 °С она составляет 0,025 % углерода. Линия *PQ* – линия предельной растворимости углерода в феррите, соответствует началу выделения из феррита избыточного третичного цементита. В результате третичной кристаллизации цементит, выделяющийся из феррита, образуется по границам и в центре объема ферритных зерен в малых количествах. Сплавы, находящиеся левее точки *Q*, состоят только из феррита.

Сплавы с концентрацией углерода от *Q* до *P* имеют двухфазную структуру: феррит + цементит третичный. Сплавы, содержащие менее 0,025 % углерода, ввиду незначительной концентрации третичного цементита, условно считают состоящими только из феррита. Данные сплавы называют техническим железом (рис. 3.2, а).

Сплавы с концентрацией углерода от 0,025 до 0,8 % называют *доэвтектоидными сталями*. Они имеют структуру феррита, выделившегося из аустенита между линиями *GS* – *QP*, и перлита,

образовавшегося из аустенита при температуре $727\text{ }^{\circ}\text{C}$, с концентрацией углерода $0,8\text{ }\%$ (рис. 3.2, б). Сталь с концентрацией углерода $0,8\text{ }\%$ называют *эвтектоидной*. Она имеет структуру перлита пластинчатого (рис. 3.2, в). Перлит пластинчатый – цементит, входящий в состав перлита, имеет форму пластин.

Стали, содержащие от $0,8$ до $2,14\text{ }\%$ углерода, называют *заэвтектоидными*. Они имеют структуру цементита вторичного, выделившегося из аустенита между линиями $ES - SK$, и перлита, образовавшегося из аустенита при $T = 727\text{ }^{\circ}\text{C}$ с содержанием углерода $0,8\text{ }\%$ (рис. 3.2, г).

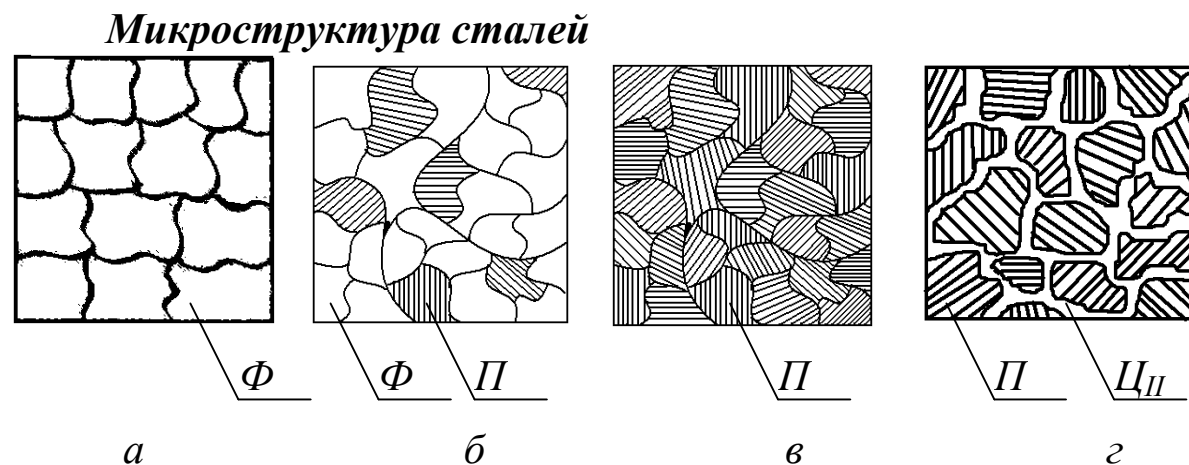


Рис. 3.2. Микроструктура сталей: *a* – техническое железо (феррит); *б* – доэвтектоидная сталь (феррит + перлит); *в* – эвтектоидная сталь (перлит пластинчатый); *г* – заэвтектоидная сталь (перлит + цементит вторичный)

В *доэвтектических чугунах* при понижении температуры вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените происходит частичный распад аустенита, выделившегося из жидкости, и аустенита, входящего в ледебурит. Этот распад заключается в выделении кристаллов $Ц_{II}$ и в уменьшении содержания углерода в аустените. При $T = 727\text{ }^{\circ}\text{C}$ аустенит, обедненный углеродом до $0,8\text{ }\%$, превращается в перлит.

Структура доэвтектического чугуна после окончательного охлаждения состоит из перлита, ледебурита ($П + Ц$) и цементита вторичного (рис. 3.3, а).

Эвтектический чугун ($4,3\text{ }\%$ углерода) при температуре ниже $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеет структуру ледебурита ($П + Ц$) (рис. 3.3, б).

Структура *заэвтектического чугуна* при температуре ниже $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ состоит из первичного цементита и ледебурита ($\text{П} + \text{Ц}$) (рис. 3.3, *в*). Сплавы железа с углеродом после окончания кристаллизации имеют различную структуру (см. рис. 3.2). Однако фазовый состав всех сплавов ниже температуры $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ одинаков. Они состоят из феррита и цементита.

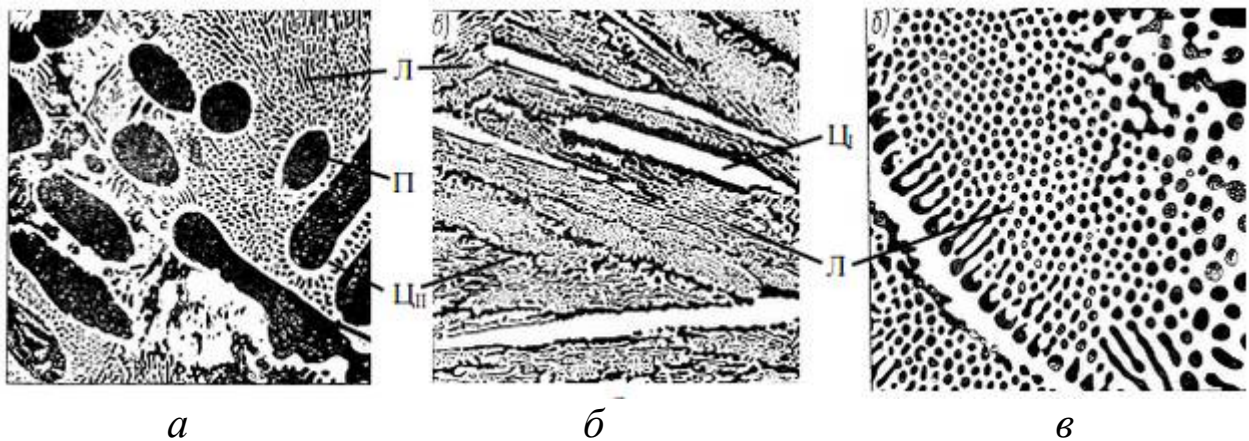


Рис. 3.3. Микроструктура чугунов: *а* – доэвтектический чугун (ледебурит + перлит + цементит вторичный);
б – заэвтектический чугун (ледебурит + цементит первичный);
в – эвтектический чугун (ледебурит)

3.2. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей

Углеродистые стали являются основными. Их свойства определяются количеством углерода и содержанием примесей, которые взаимодействуют с железом и углеродом.

3.2.1. Влияние углерода

Влияние углерода на свойства сталей показано на рис. 3.4.

С ростом содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита, при одновременном снижении доли феррита. Изменение соотношения между составляющими приводит к уменьшению пластичности, а также к повышению прочности и твердости. Прочность повышается до содержания углерода около 1 %, а затем она уменьшается, так как образуется грубая сетка цементита вторичного.

Углерод влияет на вязкие свойства. Увеличение содержания углерода повышает порог хладноломкости и снижает ударную вязкость.

Повышаются электросопротивление и коэрцитивная сила, снижаются магнитная проницаемость и плотность магнитной индукции.

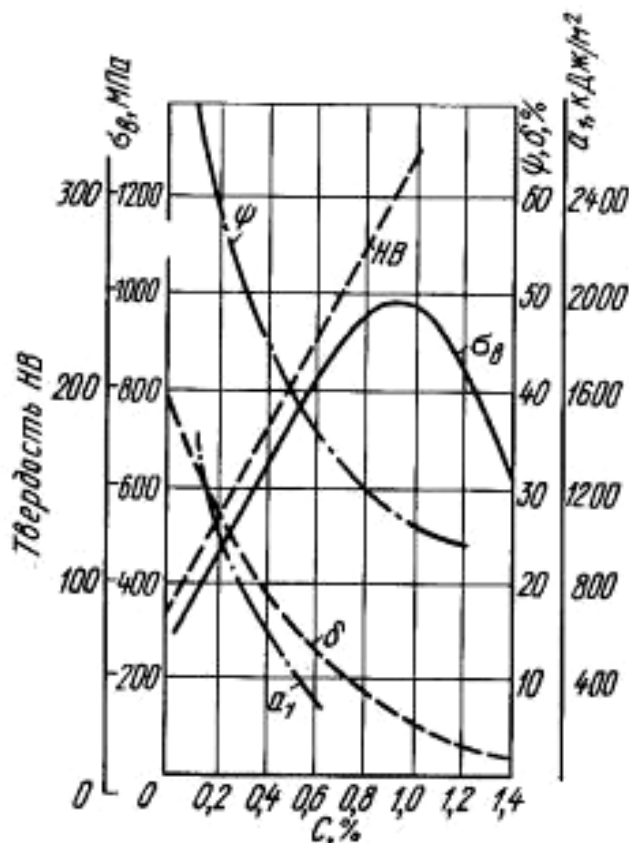


Рис. 3.4. Влияние углерода на свойства сталей

Углерод оказывает влияние и на технологические свойства. Повышение содержания углерода ухудшает литейные свойства стали (используются стали с содержанием углерода до 0,4 %), обрабатываемость давлением и резанием, свариваемость. Следует учитывать, что стали с низким содержанием углерода также плохо обрабатываются резанием.

3.2.2. Влияние примесей

В сталях всегда присутствуют примеси, которые делятся на четыре группы.

Постоянные примеси: кремний, марганец, сера, фосфор.

Марганец и кремний вводятся в процессе выплавки стали для раскисления, они являются технологическими примесями.

Содержание марганца не превышает 0,5...0,8 %. Марганец повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Он способствует уменьшению содержания сульфида железа FeS, так как образует с серой соединение сульфид марганца MnS. Частицы сульфида марганца располагаются в виде отдельных включений, которые деформируются и оказываются вытянутыми вдоль направления прокатки.

Содержание кремния не превышает 0,35...0,4 %. Кремний, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает прочность стали, особенно повышается предел текучести $\sigma_{0,2}$. Но наблюдается некоторое снижение пластичности, что снижает способность стали к вытяжке.

Содержание фосфора в стали 0,025...0,045 %. Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности σ_b и предел текучести σ_t , но снижает пластичность и вязкость. Располагаясь вблизи зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладноломкость, уменьшает работу распространения трещин. Повышение содержания фосфора на каждую 0,01 % повышает порог хладноломкости на 20...25 °С. Фосфор обладает склонностью к ликвации, поэтому в центре слитка отдельные участки имеют резко пониженную вязкость. Для некоторых сталей возможно увеличение содержания фосфора до 0,10...0,15 %, для улучшения обрабатываемости резанием.

Содержание серы в сталях составляет 0,025...0,06 %. Сера – вредная примесь, попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – сульфид серы FeS, которое, в свою очередь, образует с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 988 °С. При нагреве под прокатку или ковку эвтектика плавится, нарушаются связи между зернами. При деформации в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается – явление красноломкости.

Красноломкость – повышение хрупкости при высоких температурах.

Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность (δ и ψ), а также предел выносливости. Она ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

Скрытые примеси – газы (азот, кислород, водород) – попадают в сталь при выплавке.

Азот и кислород находятся в стали в виде хрупких неметаллических включений: окислов (FeO , SiO_2 , Al_2O_3), нитридов (Fe_2N), в виде твердого раствора или в свободном состоянии, располагаясь в дефектах (раковинах, трещинах).

Примеси внедрения (азот N, кислород O) повышают порог хладноломкости и снижают сопротивление хрупкому разрушению. Неметаллические включения (окислы, нитриды), являясь концентраторами напряжений, могут значительно понизить предел выносливости и вязкость.

Очень вредным является растворенный в стали водород, который значительно охрупчивает сталь. Он приводит к образованию в катаных заготовках и поковках флокенов.

Флокены – тонкие трещины овальной или округлой формы, имеющие в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета. Металл с флокенами нельзя использовать в промышленности, при сварке образуются холодные трещины в наплавленном и основном металле.

Если водород находится в поверхностном слое, то он удаляется в результате нагрева при $150\text{...}180\text{ }^\circ\text{C}$, лучше в вакууме $\sim 10^{-2}\text{...}10^{-3}$ мм рт. ст. Для удаления скрытых примесей используют вакуумирование.

Специальные примеси – специально вводятся в сталь для получения заданных свойств. Примеси называются легирующими элементами, а стали – легированными.

3.3. Классификация и маркировки сталей

Из всех материалов, применяемых в настоящее время и прогнозируемых в будущем, только сталь позволяет получать сочетание высоких значений различных механических характеристик и хорошую технологичность при сравнительно невысокой стоимости. Поэтому сталь является основным и наиболее распространенным конструкционным материалом.

Сталь – это сплав железа с углеродом (до 2 %) и сопутствующими примесями в виде марганца, кремния, серы, фосфора и др. Стали, применяемые в машиностроении, обычно содержат от 0,05 до 1,5 % С. Примеси, присутствующие в сталях, делят на четыре группы:

- постоянные (или обычные) – марганец, кремний, фосфор и сера, если их содержание находится в пределах: до 0,8 % – Mn; до 0,4 % – Si; до 0,05 – P и до 0,05 – S;

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

- специальные (легирующие элементы) – их вводят в состав стали для получения нужных по условиям службы деталей свойств стали. В этом случае сталь называют легированной.

Существует несколько принципов классификации сталей:

- по химическому составу: углеродистые, низколегированные (легирующих элементов ≤ 3 %), среднелегированные (3...10 %) и высоколегированные (> 10 %);

- по качеству: обыкновенного качества (S, P $\leq 0,04 \div 0,05$ % каждого), качественные (S, P $\leq 0,035$ %), высококачественные (S, P $\leq 0,025$ %), особо высококачественные (S, P $\leq 0,01 \div 0,02$ %);

- по способу выплавки: стали, выплавленные кислым или основным процессом;

- по назначению: конструкционные стали общего назначения, конструкционные стали специального назначения, инструментальные стали.

Конструкционные стали применяют для изготовления деталей машин и механизмов, металлических конструкций. Их поставляют в виде проката различных профилей, которые выпускаются различного качества, углеродистыми и легированными.

Конструкционные стали подразделяют на две большие группы – *общего* и *специального назначения*.

Стали общего назначения – это стали, которые обладают хорошими конструкционными и технологическими свойствами и используются для большой номенклатуры деталей автомобилей: валов, шестерен, муфт, полуосей, деталей кузовов и т. д.

Стали специального назначения – это стали, которые обладают специфическими основными или технологическими свойст-

вами, например, повышенной износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью, хорошей обрабатываемостью резанием и т. д. Они применяются для определенной номенклатуры деталей автомобилей: рессор, пружин, подшипников, деталей двигателей внутреннего сгорания и т. д.

Маркируют стали в соответствии с государственными стандартами, а также нормативными документами предприятий.

Углеродистые стали обыкновенного качества ($S \leq 0,05 \%$, $P \leq 0,04 \%$) маркируют буквами «Ст» и цифрой, указывающей номер стали. Способ раскисления обозначается в конце маркировки: сп – спокойная, пс – полуспокойная, кп – кипящая (ГОСТ 380–94), например, Ст3кп.

Углеродистые стали качественные ($S \leq 0,04 \%$, $P \leq 0,035 \%$) маркируют двузначным числом, которое указывает содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ 1050–88), например, сталь 30.

Легированные конструкционные стали маркируют буквами русского алфавита и цифрами (ГОСТ 4543–71), например, 40ХН3ФА.

Цифра после буквы указывает на примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если цифра отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1 %, а карбидообразующих элементов в конструкционных сталях в этом случае содержится десятые доли процента. Цифры в начале маркировки обозначают содержание углерода в сотых долях процента в конструкционных сталях, а в инструментальных – в десятых долях. Буква перед маркировкой: Ш – сталь подшипниковая, А – автоматная; А в конце маркировки обозначает, что сталь высококачественная ($S \leq 0,02 \%$, $P \leq 0,03 \%$).

Инструментальные стали применяют для изготовления режущего, мерительного и штампового инструмента. Это высокоуглеродистые стали (0,7...1,4 % С), обладающие высокими твердостью, теплостойкостью, удовлетворительной прочностью, ударной вязкостью. Их выпускают углеродистыми и легированными. По теплостойкости подразделяют: на нетеплостойкие (до 200 °С), полутеплостойкие (до 400 °С) и теплостойкие (600 °С и выше).

Особенностью маркировки инструментальных сталей является то, что содержание углерода указывается в десятых долях процента. У углеродистых оно следует за буквой У (У10), а в легированных ставится перед маркировкой (9ХС), если цифра перед маркировкой отсутствует, то углерода в стали около 1 % (ХВГ). Легирующие элементы маркируются аналогично конструкционным сталям.

В промышленности выплавляют углеродистые стали следующих марок: У7, У8, У8Г, У8ГА, У9, У10, У11, У12, У13, качественные и высококачественные У7А (ГОСТ 1435–2005), а также низколегированные нетеплостойкие Х, ХВГ, 9ХС, ХВСГ, 6ХС, среднелегированные полутеплостойкие типа Х12, 5ХНМ, 5ХГН, 4Х5В2С, 3Х2В8Ф и др. (ГОСТ 5950–73).

Высоколегированные теплостойкие инструментальные стали называют быстрорежущими. Выпускают быстрорежущие стали следующих марок: Р6М5, Р9, Р12, Р18, Р6М5К8 и др. (ГОСТ 19255–73). Особенность их маркировки – это буква Р. Следующая за ней цифра указывает на содержание основного легирующего элемента этих сталей – вольфрама в процентах. Они обязательно содержат: углерод – 0,8 % и более; хром – около 4 %; кремний – около 2 %; вольфрам – не более 1,2 %.

3.4. Серые чугуны

Чугуны – высокоуглеродистые (более 2,14 % С) сплавы железа. Особенность кристаллизации этих сплавов – возможность образования двух разных высокоуглеродистых твердых фаз, кристаллов цементита (6,67 % С) или кристаллов графита (100 % С).

В зависимости от состояния углерода в чугуне различают:

- белый чугун – углерод в связанном состоянии в виде цементита, в изломе имеет белый цвет и металлический блеск (см. рис. 3.3);

- серый чугун – весь углерод или большая часть находится в свободном состоянии в виде графита, а в связанном состоянии находится не более 0,8 % углерода. Из-за большого количества графита его излом имеет серый цвет;

- половинчатый – часть углерода находится в свободном состоянии в форме графита, но не менее 2 % углерода находится в форме цементита. Мало используется в технике.

Образование кристаллов графита (графитизация чугуна) зависит в основном от двух условий: скорости охлаждения и наличия в чугуне «графитизирующих» примесей Si, Ni, Al и др. Препятствуют графитизации быстрое охлаждение и наличие карбидообразующих примесей Mn, Cr и др., а также серы. Регулируя химсостав и скорость охлаждения, можно получить чугуны разных структурных классов.

На основные свойства серых чугунов влияет их структура: форма, размер и объем графитовых включений, строение металлической основы (рис. 3.5). Самой благоприятной формой графита является шаровидная, поэтому высокопрочные чугуны обладают самыми высокими показателями прочности в сочетании с пластичностью. Промежуточное положение занимают серые чугуны с хлопьевидным графитом – ковкий чугун, минимальными показателями прочности и пластичности обладают серые чугуны с пластинчатой формой графита.

Основа чугунов может быть ферритной, феррито-перлитной, перлитной. С увеличением доли перлита в структуре прочность возрастает, а пластичность снижается. Объемная доля феррита не оказывает положительного влияния на пластичность серого чугуна с пластинчатым графитом. В автомобилестроении используются преимущественно перлитные чугуны, при этом допускается 10...20 % феррита, потому что эти чугуны являются самыми прочными.

Маркируют серые чугуны буквами и цифрами: СЧ – чугуны с пластинчатым графитом; ВЧ – чугуны с шаровидным графитом; КЧ – чугуны с хлопьевидным графитом. Первые две цифры указывают предел прочности серых чугунов на растяжение (σ_B , кгс/мм²), а последующая цифра в ковких чугунах – относительное удлинение в процентах (δ , %).

Серые чугуны с пластинчатым графитом СЧ15, СЧ20, СЧ25 и модифицированные СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45 (ГОСТ 1412–85) имеют невысокие показатели прочности, плохо работают на растяжение. Основное их применение – детали, воспринимающие статические нагрузки, работающие без значительных динамических нагрузок.

Название, группа, марка	Структурный класс чугуна		
	ферритный	феррито- перлитный	перлитный
Серый чугун			
Марка	СЧ10; СЧ15	СЧ15; СЧ20	СЧ25; СЧ30*
Высоко- прочный чугун			
Марка**	ВЧ40	ВЧ45; ВЧ50	ВЧ60; ВЧ70
Ковкий чугун			
Марка	КЧ33-8; КЧ37-12	КЧ45-7; КЧ50-5	КЧ60-3; КЧ65-3

* – Модифицированный кремнием серый чугун

** – Модифицированный магнием высокопрочный чугун

Рис. 3.5. Классификация чугунов по структуре

Серые чугуны с пластинчатым графитом производят модифицированными. Модифицирование выполняется с целью измельчения структурных составляющих графита за счет добавки в жидкий чугун 0,3...0,5 % кремния перед разливкой в форму. Измельчение структуры модифицированием приводит к повышению прочности. К модифицированным чугунам относятся марки СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45. Их используют для более нагруженных деталей машин.

Несмотря на понижение показателей прочности по сравнению с другими, серые чугуны с пластинчатым графитом – это основной вид применяемого чугуна. Объясняется это более простой технологией их изготовления и меньшей себестоимостью отливок по сравнению с высокопрочными и ковкими чугунами.

Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 80, ВЧ 100 (ГОСТ 7293–85) получают путем раскисления жидкого расплава чугуна перед разливкой магнием, церием в сотых долях процента. Эта сложная технологическая задача решается в условиях массового производства, так как требует специального оборудования.

Шаровидная форма графита – это самая благоприятная форма, так как шаровидные частицы в меньшей степени ослабляют металлическую основу чугуна. Высокопрочные чугуны обладают самым высоким комплексом основных свойств среди чугунов, выходят по прочности на уровень нормализованной углеродистой стали, уступая при этом в пластичности. Они в 3...5 раз прочнее серых, при этом они обеспечивают пластичность до 2...10 %. Их применяют для изготовления нагруженных деталей машин и конструкций.

Ковкие чугуны КЧ 35–10, КЧ 37–12, КЧ 50–5, КЧ 55–4 (ГОСТ 1215–79) получают из отливок белого чугуна методом длительного отжига. В процессе отжига происходит графитизация, т. е. распад первичного и вторичного цементита и выделение углерода в свободном состоянии в виде графита.

Отжиг может проводиться в одну стадию, при температурах 920...970 °С с длительностью до 40...80 ч для получения чугуна на перлитной основе (КЧ 50–5, КЧ 55–4). На первой стадии графитизации первичный цементит распадается с образованием хлопьевидного графита. В случае необходимости получения чугуна на феррито-перлитной основе (КЧ 37–12, КЧ 35–10) проводится дополнительно вторая стадия графитизации с выдержкой при температурах 720...760 °С. В процессе выдержки требуемая часть аустенита распадается на феррит и графит, а оставшийся аустенит в процессе последующего охлаждения превращается в перлит. В результате формируется феррито-перлитная структура основы.

Ковкие чугуны часто на практике заменяют высокопрочные чугуны, хотя уступают им по всем основным свойствам. Преимуществом ковких чугунов является высокая плотность заготовок, так как при отжиге графит заполняет все поры, а также возможность изготовления тонкостенных отливок.

4. ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Для обеспечения повышенных требований по параметрам структуры и свойствам применяются самые прогрессивные методы термической обработки, а также современное оборудование. Многие процессы термической обработки в машиностроении автоматизированы и механизированы. На всех основных ее этапах производится контроль качества по основным параметрам структуры и свойств, которые предусмотрены государственными стандартами и техническими условиями предприятий.

Все виды термической обработки можно разделить по назначению на три большие группы: отжиг, закалка, отпуск или старение.

Отжиг – предварительная обработка, направленная на получение равновесной структуры с минимальной твердостью и максимальной пластичностью. Отжиг подготавливает структуру перед последующими технологическими операциями. Проводится перед обработкой резанием, давлением, сваркой, а также перед упрочняющей термической обработкой. Он подготавливает структуру для последующих технологических операций, исправляя дефекты структуры от предыдущей обработки. Большинство видов отжига, за исключением нормализации, являются предварительной обработкой. К ней относятся операции отжига I и II рода. Отличаются операции отжига структурными превращениями, режимами, назначением.

Закалка – термическая обработка, направленная на получение неравновесной структуры.

Закалка основывается на двух механизмах:

- мартенситном превращении;
- получении пересыщенного твердого раствора.

Отпуск или старение – завершающая операция термической обработки, обязательная после закалки. В результате этих операций в предварительно закаленных сплавах происходят фазовые превращения, связанные с распадом пересыщенного твердого раствора, приближающие их структуру к равновесной. Закалка с последующим отпуском или старением обеспечивает деталям требуемый комплекс свойств, вызывая их упрочнение.

Классификация основных видов термической обработки сталей, их режимов и назначение сведены в табл. 4.1.

Термическая обработка стали, чугунов, титановых сплавов основана на полиморфном превращении, которое может проходить либо по диффузионному механизму (отжиг), либо бездиффузионному, мартенситному механизму (закалка). Упрочняющая обработка этих сплавов базируется на мартенситном превращении и состоит из закалки и последующего отпуска.

4.1. Отжиг I рода сталей и сплавов

Отжиг I рода не связан со структурными и фазовыми превращениями, поэтому для сталей и сплавов он отличается только режимами.

Существует три основных вида отжига I рода (табл. 4.1):

- для снятия напряжений (низкий);
- диффузионный (гомогенизационный);
- рекристаллизационный.

Отжиг для снятия напряжений (низкий отжиг) проводится после различных технологических операций. В результате неравномерного охлаждения в заготовках – отливках, поковках, сварных конструкциях и т. д., а также в готовых деталях после обработки резанием, шлифованием, возникают остаточные напряжения. Они отрицательно влияют на эксплуатационные характеристики, так как, ослабляя изделие, вызывают преждевременное разрушение, понижают стойкость к коррозионному растрескиванию, приводят к короблению конструкции.

Таблица 4.1

Классификация основных видов термической обработки сталей

№	Наименование операции термообработки	Режим термообработки		Примерное назначение
		Температура нагрева	Охлаждающая среда	
ОТЖИГ I РОДА				
1	Рекристаллизационный отжиг	$T_{\text{нагр}} \geq T_{\text{рекр}}$ ($T_p = 0,4 \dots 0,6 T_{\text{пл}}$)	Печь	После холодной пластической деформации для снятия наклепа
2	Диффузионный отжиг	1100...1250 °C	Печь	Легированные стали, для устранения ликвации
3	Низкий отжиг	650...700 °C	Печь	Для снятия остаточных напряжений отливок, поковок, сварных конструкций
ОТЖИГ II РОДА				
4	Полный отжиг	$A_{c3} + (30 \dots 50 \text{ °C})$	Печь	Конструкционные (доэвтектоидные) стали
5	Изотермический отжиг	$A_{c3} + (30 \dots 50 \text{ °C})$	Печь (630...680 °C) воздух	Взамен п. 4 для сокращения цикла термообработки
6	Неполный отжиг	$A_{c1} + (30 \dots 50 \text{ °C})$	Печь	Инструментальные (заэвтектоидные) стали
7	Нормализация	$A_{c3} + (40 \dots 60 \text{ °C})$	Воздух	Взамен п. 4 для малоуглеродистых сталей. Взамен улучшения для ответственных деталей из среднеуглеродистых сталей
8	Нормализация	$A_{cm} + (40 \dots 60 \text{ °C})$	Воздух	Для устранения цементитной сетки в заэвтектоидных сталях с последующим п. 6
ЗАКАЛКА				
9	Полная закалка	$A_{c3} + (30 \dots 50 \text{ °C})$	Масло, вода, растворы солей	Конструкционные (доэвтектоидные стали), для получения структуры мартенсита (M)
10	Неполная закалка	$A_{c1} + (30 \dots 50 \text{ °C})$		Инструментальные (заэвтектоидные) стали для получения структуры ($M + C_{II}$)
ОТПУСК				
11	Низкий отпуск	160...220 °C, 1...3 ч	Воздух	После закалки, для получения структуры $M_{\text{отп}}$
12	Средний отпуск	350...450 °C, 1...3 ч	Воздух	После закалки, для получения структуры $T_{\text{отп}}$
13	Высокий отпуск	550...650 °C, 0,5...1 ч	Воздух	После закалки, для получения структуры $S_{\text{отп}}$

Для уменьшения остаточных напряжений детали нагревают. С повышением температуры предел текучести металла понижается, и под воздействием внутренних напряжений происходит пластическая деформация. В результате напряжения снижаются.

Режим низкого отжига следующий: температура нагрева составляет 650...700 °С – для сталей и чугунов, 250...300 °С – для сплавов на основе меди и алюминия; длительность – от нескольких до десятков часов; охлаждение медленное со скоростью 20...200 °С/ч в зависимости от массы, формы изделия и материала.

Диффузионный отжиг (гомогенизационный) направлен на устранение ликвации, т. е. неоднородности по химическому составу, вызванной неравновесной первичной кристаллизацией в стальных слитках и отливках из легированных сталей и алюминиевых сплавов. Неоднородность по химическому составу снижает пластичность и затрудняет дальнейшую обработку давлением. В результате диффузионного отжига с последующим полным отжигом значительно улучшается деформируемость сплавов.

Проводится диффузионный отжиг при температурах, близких к температурам плавления. При длительных выдержках за счет диффузии легирующих элементов происходит выравнивание по химическому составу, устраняется межкристаллитная ликвация. Режим диффузионного отжига следующий: температура нагрева 1100...1250 °С с выдержкой 20...50 ч – для стальных слитков; 420...520 °С с выдержкой 20...30 ч – для алюминиевых заготовок. После гомогенизирующего отжига необходимо провести нормализацию или полный отжиг с целью устранения крупнозернистой структуры. Слитки, отливки из углеродистых сталей диффузионному отжигу не подвергаются. Для них используются только полный отжиг, который исправляет дефекты структуры и одновременно обеспечивает гомогенизацию по углероду.

Рекристаллизационный отжиг применяется для снятия наклепа, вызванного холодной пластической деформацией, и для восстановления пластичности.

В процессе холодной пластической деформации возникает текстура деформации – вытянутое в направлении деформации зерно, нарастает плотность дислокаций до 10^{12} см⁻². В результате твердость, прочность увеличиваются, а пластичность металла снижается – это явление *наклепа*.

При нагреве холоднодеформированного металла выше температуры рекристаллизации зарождается и растет новое равноосное мелкое зерно, плотность дефектов снижается до равновесной $10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$. В результате пластичность восстанавливается, а прочность, твердость снижаются.

Температура рекристаллизационного отжига выбирается выше на $100 \dots 200 \text{ }^\circ\text{C}$ температурного порога рекристаллизации ($T_{п.р} = (0,6 \dots 0,7) \cdot T_{пл} \text{ }^\circ\text{C}$) и находится для сталей в интервале $650 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$, алюминиевых сплавов – $300 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$, медных сплавов – $400 \dots 450 \text{ }^\circ\text{C}$. Его продолжительность составляет от 0,5 до $8 \dots 12 \text{ ч}$ в зависимости от размеров заготовки и назначения отжига.

Рекристаллизационный отжиг используют между и после операций холодного деформирования для восстановления пластичности. Холодная пластическая деформация с последующим рекристаллизационным отжигом является единственным способом регулирования размера зерна для однофазных сплавов – деформируемых неупрочняемых термической обработкой алюминиевых сплавов, латуней, бронз, аустенитных и ферритных сталей.

4.2. Отжиг II рода

Отжиг II рода связан с фазовыми и структурными превращениями и основан в сталях на превращениях, соответствующих диаграмме Fe – Fe₃C. Предназначен для исправления дефектов структуры, возникающих на этапе заготовительного производства. Он служит промежуточной технологической операцией перед обработкой резанием, давлением, сваркой. Может быть и окончательной обработкой, если сталь не подвергается последующему термическому упрочнению.

Существуют следующие виды отжига II рода (табл. 4.1):

- полный отжиг;
- неполный отжиг;
- изотермический отжиг;
- нормализация.

Режимы отжига представлены на рис. 4.1.

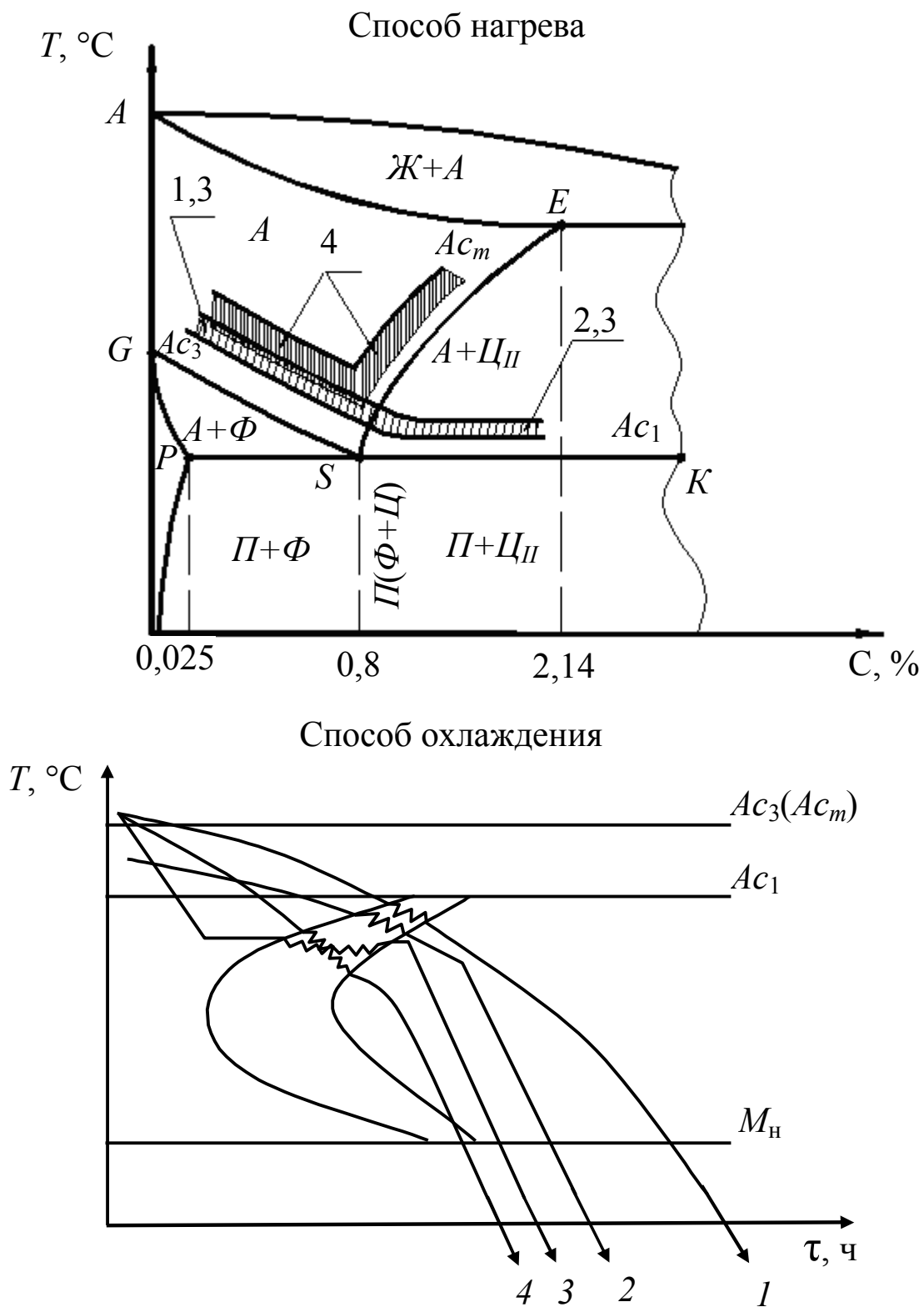


Рис. 4.1. Режимы отжига II рода для сталей:
 1 – полный; 2 – неполный; 3 – изотермический; 4 – нормализация

Полный отжиг заключается в нагреве доэвтектоидных сталей выше температур A_{c3} на 30...50 °С, выдержке при этой температуре до завершения полной фазовой перекристаллизации и последующем медленном охлаждении с печью (рис. 4.1, 1).

Применяется для доэвтектоидных сталей с целью получения мелкозернистой феррито-перлитной структуры с минимальной твердостью и максимальной пластичностью.

Доэвтектоидные стали перед отжигом в слитках имеют крупнозернистую феррито-перлитную структуру; после горячей обработки давлением – видманштеттовую, т. е. крупнозернистую с пластинчатым кристаллографическим ориентированием феррита; после прокатки – строчечно-расположенную структуру в направлении деформации, т. е. в виде полос феррита и перлита. Исправить такие дефекты в структуре можно только за счет полной фазовой перекристаллизации.

При нагреве выше A_{c3} зарождается и растет новое мелкое аустенитное зерно. В результате полностью перекристаллизовывается исходная структура, превращаясь в мелкозернистую аустенитную. Верхний интервал температур нагрева необходимо ограничить 30...50 °С во избежание роста зерна аустенита. Происходящее после выдержки медленное охлаждение обеспечивает получение феррито-перлитной структуры с мелким равноосным зерном.

Сфероидизирующий неполный отжиг заключается в нагреве эвтектоидной и заэвтектоидных сталей выше температур A_{c1} на 30...50 °С, выдержке до завершения фазовой перекристаллизации перлита в аустенит, медленном охлаждении со скоростью 20...50 °С/ч в интервале температур до 620...680 °С, затем ускоренном на воздухе (рис. 4.1, 2).

Применяется для эвтектоидных и заэвтектоидных сталей с целью получения структуры зернистого перлита и структуры зернистого перлита с включениями вторичных зернистых карбидов соответственно.

Эвтектоидные стали после горячей обработки давлением имеют структуру пластинчатого перлита, а заэвтектоидные дополнительно содержат по границе зерна цементитную сетку. Стали с такой структурой из-за повышенной твердости и низкой пластичности плохо обрабатываются резанием, давлением. При на-

нагреве до температур отжига выше A_{c1} перлит превращается в аустенит, частично растворяется цементитная сетка в заэвтектоидных сталях.

При последующем медленном охлаждении до 620...680 °С происходит распад аустенита на зернистую ферритоцементитную смесь и коагуляция вторичных карбидов.

Полученная структура зернистого перлита с вторичными зернистыми карбидами характеризуется минимальной твердостью, максимальной пластичностью, поэтому хорошо обрабатывается резанием, давлением, в том числе в холодном состоянии.

Изотермический отжиг применяется для легированных сталей и основан на изменении способа охлаждения: непрерывное медленное охлаждение (рис. 4.1, 2) заменяется на ускоренное до 650...680 °С с последующей выдержкой 1...3 ч, а затем ускоренное на воздухе (рис. 4.1, 3). Температура нагрева зависит от стали и выбирается аналогично полному и неполному отжигам.

Нормализация доэвтектоидных сталей заключается в нагреве выше температур A_{c3} на 40...60 °С, выдержке и последующем ускоренном охлаждении на воздухе (рис. 4.1, 4).

Применяется как предварительная обработка вместо полного отжига и как упрочняющая для среднеуглеродистых нелегированных сталей вместо улучшения.

Структурные превращения при нагреве аналогичны полному отжигу. Нормализация обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию, а значит, устраняет те же дефекты – крупное зерно, структурную полосчатость, видманштеттовую структуру. Ускоренное охлаждение на воздухе (см. рис. 4.1) частично подавляет выделение феррита и приводит к измельчению ферритоцементитной структуры. Она может представлять из себя после нормализации сорбитообразный пластинчатый перлит в углеродистых и низколегированных сталях или даже пластинчатый троостит, бейнит в комплексно-легированных сталях. По этой причине нормализация обеспечивает эффект упрочнения, который составляет 10...30 % по отношению к отожженному состоянию, и его степень зависит от химического состава стали.

Назначение нормализации следующее:

- для низкоуглеродистых сталей ($C \leq 0,25 \%$) – вместо полного отжига. Небольшое повышение твердости

и снижение пластичности приводит к улучшению обрабатываемости резанием этих сталей;

- для среднеуглеродистых сталей (0,3...0,5 % С) – в качестве предварительной обработки вместо полного отжига для углеродистых и низколегированных; в качестве упрочняющей термической обработки вместо улучшения только для углеродистых. Свойства нормализованных сталей будут несколько ниже улучшенных из-за различной морфологии феррито-цементитной смеси, а именно пластинчатой вместо зернистой в улучшенных сталях;
- для конструкционных сталей с повышенным содержанием углерода (0,5...0,7 %), в том числе для легированных, нормализация с высоким отпуском 650...680 °С используется в качестве предварительной обработки. В процессе отпуска происходит распад пластинчатого троостита или бейнита на зернистый сорбит или перлит, твердость снижается.

Таким образом, назначение нормализации и условия ее проведения определяются степенью упрочнения сталей за счет ускоренного охлаждения и зависят от содержания углерода и легирующих элементов в сталях.

Нормализация заэвтектоидных сталей заключается в нагреве выше температур A_{c_m} на 40...60 °С, выдержке и последующем ускоренном охлаждении на воздухе (см. рис. 4.1, 4).

Проводится перед неполным отжигом с целью устранения цементитной сетки.

Нормализация в этих сталях обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию. За счет нагрева выше A_{c_m} в аустените растворяется цементитная сетка, а при последующем ускоренном охлаждении на воздухе ее обратное выделение подавляется. Структура после нормализации представляет пластинчатый сорбитообразный перлит без цементитной сетки. Сталь с такой структурой обладает повышенной твердостью, поэтому после нормализации обычно проводят неполный отжиг для получения структуры зернистого перлита с вторичными включениями зернистых карбидов.

Нормализация – это самая экономичная операция отжига второго рода.

4.3. Закалка стали

Предназначена для упрочнения готовых деталей, так как обеспечивает высокую твердость, прочность, износостойкость сталям. После закалки обязательно проводится отпуск.

Виды закалки в зависимости от способа нагрева (см. табл. 4.1):

- полная;
- неполная.

Режимы закалки представлены на рис. 4.2.

Полная закалка заключается в нагреве доэвтектоидных сталей выше температур A_{c3} на $30...50$ °С, выдержке до завершения аустенизации стали и последующем быстром охлаждении со скоростью выше критической.

Применяется для доэвтектоидных сталей с целью получения мартенситной структуры.

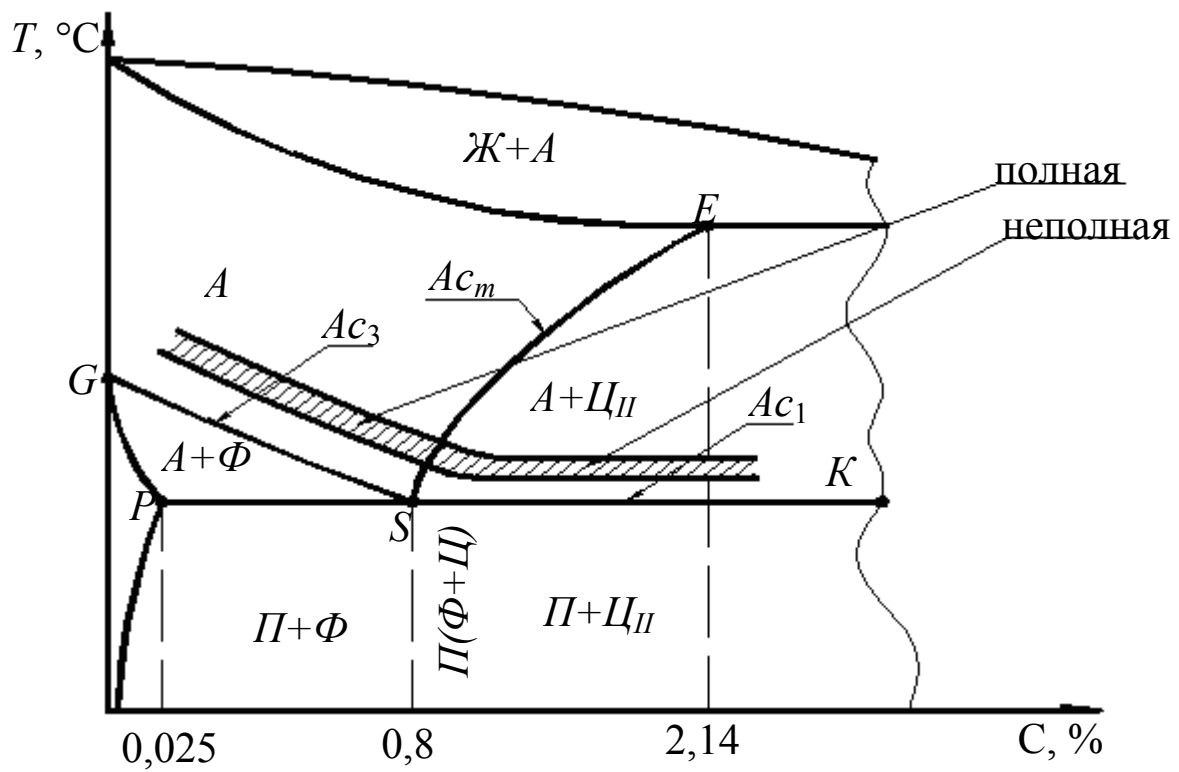
Нагрев выше A_{c3} обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию с образованием аустенита, а ограничение верхней температуры нагрева $30...50$ °С – мелкое зерно. Охлаждение со скоростью выше критической ($V_{кр}$) вызывает превращение аустенита в мартенсит мелкопластинчатый, так как им наследуется мелкое зерно аустенита.

Неполную закалку с нагревом выше A_{c1} для доэвтектоидных сталей практически не применяют, так как в структуре сохраняется мягкий феррит, снижающий твердость стали. Ее используют только иногда для улучшения обрабатываемости резанием низкоуглеродистых сталей.

Неполная закалка заключается в нагреве заэвтектоидных сталей выше A_{c1} на $30...50$ °С, выдержке для обеспечения превращения перлита в аустенит и последующем быстром охлаждении со скоростью выше критической.

Применяется для заэвтектоидных сталей с целью получения мартенситной структуры с включениями вторичных карбидов.

Способ нагрева



Способ охлаждения

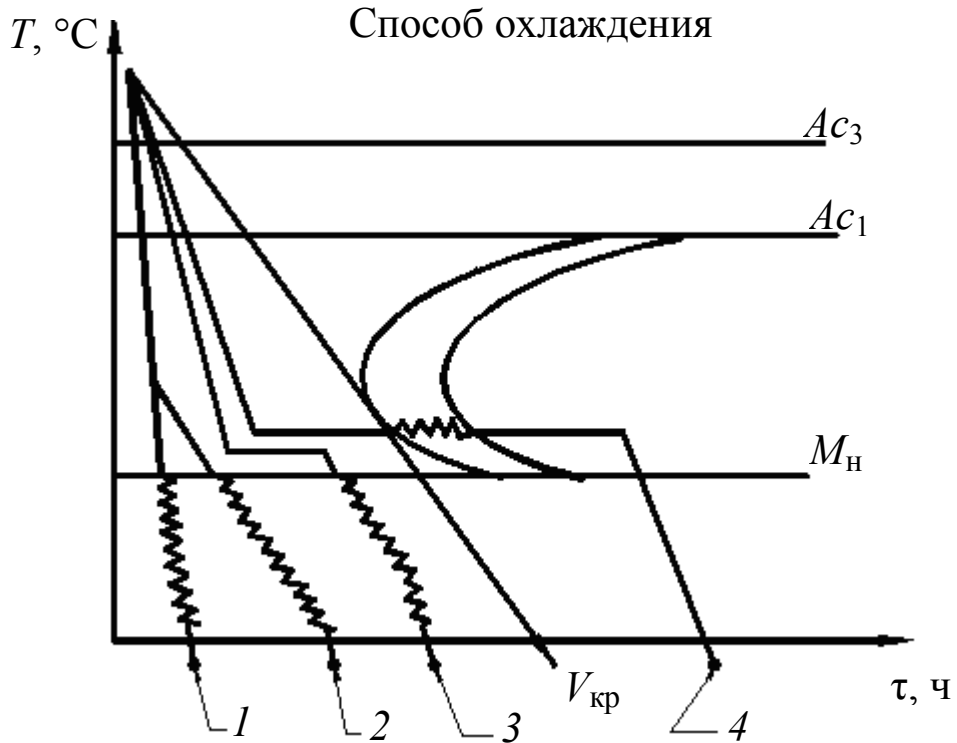


Рис. 4.2. Режимы закалки:

1 – непрерывная; 2 – прерывистая; 3 – ступенчатая;
4 – изотермическая

При нагреве заэвтектоидных сталей выше A_{c1} перлит превращается в аустенит, а вторичные карбиды лишь частично растворяются и сдерживают рост зерна аустенита. Охлаждение со скоростью выше критической приводит к превращению аустенита в мартенсит, но часть его остается, так как температура конца мартенситного превращения (M_K) у этих сталей отрицательная.

Полную закалку для заэвтектоидных сталей не используют, потому что нагрев выше A_{cm} вызывает растворение вторичных карбидов, следовательно, рост зерна аустенита. Как следствие, сталь будет иметь пониженную ударную вязкость, а из-за повышенного количества остаточного аустенита – пониженную твердость. Таким образом, только неполная закалка обеспечивает максимальную твердость, а следовательно, износостойкость заэвтектоидным сталям.

Закалку углеродистых сталей проводят в воде или соляных растворах, легированные стали можно закалывать в масле. Быстрое охлаждение при закалке из-за разности объема горячего и холодного металла вызывает термические напряжения, а разность объема аустенита и мартенсита – фазовые напряжения. Термические и фазовые напряжения, суммируясь, создают внутренние закалочные напряжения растяжения, которые вызывают коробление деталей и их растрескивание, снижают конструкционную прочность деталей. Уменьшают уровень напряжений при закалке за счет использования специальных способов охлаждения.

Виды закалки в зависимости от способа охлаждения (см. рис. 4.2):

- непрерывная;
- прерывистая;
- ступенчатая;
- изотермическая.

Непрерывная закалка (рис. 4.2, 1) проводится в одной среде – в воде, масле или соляных растворах. Является самой неблагоприятной, так как сопровождается возникновением самого высокого уровня термических и фазовых напряжений.

Прерывистая закалка (рис. 4.2, 2) проводится при охлаждении в двух средах, например из воды в масло. Предусматривает

замедленное охлаждение в области мартенситного превращения, что снижает в основном фазовые напряжения.

Ступенчатая закалка (рис. 4.2, 3) проводится в горячей среде с температурой на 50...100 °С выше температуры начала мартенситного превращения (M_n).

Выравнивание температуры по сечению детали перед закалкой снижает термические напряжения, а последующая замедленная закалка на воздухе – фазовые. Применяют этот способ только для легированных инструментальных сталей в небольших сечениях, для конструкционных сталей практически не используют.

Изотермическая закалка (рис. 4.2, 4) проводится в соляных ваннах с температурой на 50...100 °С выше M_n . Такая закалка обеспечивает получение структуры нижнего бейнита, которая уступает по твердости мартенситу, но обладает повышенными показателями конструкционной прочности. Применяется только для сталей с устойчивым аустенитом, т. е. для комплексно-легированных конструкционных сталей.

4.4. Отпуск стали

Это обязательная операция после закалки, является завершающей операцией термической обработки. Обеспечивает сталям требуемый комплекс основных свойств, устраняет внутренние напряжения и остаточный аустенит.

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали ниже A_{c1} , выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении на воздухе или в масле.

Различают три вида отпуска (см. табл. 4.1):

- низкий;
- средний;
- высокий.

Структурные превращения при отпуске зависят от температуры нагрева, так как в основу их положены диффузионные процессы, связанные с перемещением атомов углерода, железа и легирующих элементов.

Низкий отпуск проводится в интервале температур 160...250 °С в течение 1...3 ч. Основные происходящие процес-

сы: снимаются закалочные внутренние напряжения; при охлаждении от температур отпуска остаточный аустенит превращается в мартенсит. В результате мартенсит закалки переходит в мартенсит отпуска.

Структура доэвтектоидных сталей после полной закалки и низкого отпуска состоит из отпущенного мартенсита; заэвтектоидных сталей – из мартенсита отпущенного и карбидов вторичных. После такой обработки прочность и твердость сталей максимальная, но пластичность пониженная. Свойства мартенсита зависят от химического состава стали, особенно от содержания углерода, твердость после такой обработки максимальная (HRC 50÷64).

Закалка с низким отпуском применяется для конструкционных сталей с целью обеспечения износостойкости поверхности деталям машин после поверхностной закалки, цементации, нитроцементации, а также для получения низкоуглеродистого мартенсита в низкоуглеродистых легированных конструкционных сталях с целью повышения статической прочности. Этот вид обработки является основным для износостойких и инструментальных сталей ($C \geq 0,7 \%$).

Средний отпуск проводится в интервале температур 350...450 °С в течение 1...3 ч. При этих температурах происходит распад мартенсита, т. е. выделение избыточного углерода в виде карбидов цементитного типа, снижение пересыщенности углеродом в решетке мартенсита и постепенный переход ее в ферритную. Уменьшается плотность дефектов в твердом растворе.

Структура сталей после закалки и среднего отпуска состоит из дисперсной феррито-карбидной смеси, близкой к зернистой морфологии, – это троостит отпуска (HRC 40÷50). При этом феррит еще неравновесен. Такая структура обеспечивает высокие пределы текучести, выносливости и релаксационной стойкости, т. е. высокие показатели упругости.

Основное применение закалки с последующим средним отпуском – это рессорно-пружинные стали (0,55...0,75 % C). Охлаждение при отпуске этих изделий следует проводить в масле или в воде, для образования на поверхности пружин напряжений сжатия, увеличивающих предел выносливости.

Высокий отпуск проводится в интервале температур 550...650 °С в течение 0,5...1 ч. При этих температурах происходит интенсивный распад мартенсита на явно выраженную зернистую феррито-карбидную смесь с более крупными зернистыми карбидами (0,3...0,5 мкм) по сравнению с карбидами в троостите (~ 0,1 мкм), а также снижение плотности дислокаций в феррите до равновесной концентрации. Это сорбит отпуска (HRC 25÷35).

Структура сорбита обладает повышенным пределом прочности, пределом текучести, относительным удлинением и ударной вязкостью. Таким образом, закалка с высоким отпуском *улучшение* – значительно повышает конструкционную прочность сталей, увеличивает работу развития трещин и снижает порог хладноломкости. По этой причине применяется улучшение в основном для конструкционных среднеуглеродистых сталей (0,3...0,5 %), которые по способу упрочнения называют улучшаемыми.

Высокий отпуск иногда проводят после нормализации, так как комплексно-легированные конструкционные стали после нормализации имеют структуру троостита или бейнита с повышенной твердостью. Высокий отпуск при 600...700 °С вызывает распад этих структур с образованием зернистого сорбита и, как результат, снижение твердости и повышение пластичности.

Основные легирующие элементы в конструкционных сталях замедляют диффузионные процессы, поэтому повышают температуры распада мартенсита, а следовательно, и температуры отпуска.

В высоколегированных сталях (при содержании легирующих элементов более 10 %) мартенсит устойчив и его распад происходит при более высоких температурах. Распад сопровождается дисперсионным твердением, т. е. образованием в структуре мелких вторичных карбидных фаз в высокоуглеродистых, например в быстрорежущих сталях, или интерметаллидов в высоколегированных низкоуглеродистых, например в жаропрочных сталях и сплавах, – это процессы *старения*.

5. МЕТОДЫ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Большинство деталей механизмов, например зубчатые колеса, кулачки, шейки валов и т. д., работают в сложноподвижных условиях, испытывая знакопеременные, динамические нагрузки в сочетании с высокими контактными напряжениями и износом поверхности. Они выходят из строя по разным причинам: износа, усталости, хрупкого разрушения, среза, смятия, коррозии и т. д.

Износостойкость повышают за счет увеличения твердости на поверхности, благодаря наличию износостойких матриц и вторичных упрочняющих фаз в структуре поверхностного слоя, а также образованию в поверхностных слоях положительных напряжений сжатия, а конструкционную прочность – за счет обеспечения вязкой сердцевины. С этой целью используются для деталей различные *технологические методы поверхностного упрочнения*:

- без изменения химического состава поверхности – поверхностная закалка, ППД (поверхностное пластическое деформирование);
- с частичным изменением химического состава поверхности – методы ХТО (химико-термическая обработка);
- с полным изменением химического состава поверхности детали – наплавка, напыление.

Метод поверхностного упрочнения прежде всего зависит от режимов эксплуатации детали, величины предельно допустимого износа, вида нагрузки и характера трения в узле.

5.1. Поверхностная закалка ТВЧ

Это распространенный метод поверхностного упрочнения. Применяют закалку ТВЧ для углеродистых сталей марок 40, 45, 50, 55, 58, а также для низколегированных сталей неглубокой прокаливаемости – 40Х, 45Х, 50Х, 40Г, 45Г2 и др.

Закалку токами высокой частоты проводят в индукторе, мощность которого и частоту тока подбирают так, чтобы обеспечить высокоскоростной нагрев со скоростью до 300 °С/с и за несколько секунд нагреть сталь на глубину до 2...5 мм. Полный процесс аустенизации при высокоскоростном нагреве завершает-

ся в области высоких температур, поэтому температура поверхностной закалки уходит в область высоких значений и составляет 980...1020 °С.

Перед закалкой ТВЧ сердцевину деталей предварительно подготавливают, выполняя улучшение либо нормализацию, последняя допустима только для углеродистых сталей. Эти операции проводят на этапе заготовительного производства, совмещая тем самым и предварительную, и упрочняющую термические обработки. В этом случае технология изготовления деталей упрощается и состоит из следующих операций: заготовительная операция, улучшение или нормализация для сердцевины, механическая обработка, закалка ТВЧ с последующим низким отпускком, шлифование.

Закалка ТВЧ имеет ряд преимуществ. Высокоскоростной нагрев обеспечивает получение мелкого зерна, а следовательно, мелкоигльчатого мартенсита. За счет этого твердость поверхностных слоев деталей выше на HRC 2÷3 единицы по сравнению с обычной закалкой, к тому же в поверхностных слоях возникают положительные напряжения сжатия. Все это повышает износостойкость и контактную усталостную прочность на поверхности, а вязкая сердцевина обеспечивает деталям конструкционную прочность в условиях динамических и знакопеременных нагрузок. Кроме того, закалка ТВЧ – высокопроизводительный и эффективный метод поверхностного упрочнения.

5.2. Химико-термическая обработка

Химико-термической обработкой (ХТО) называют технологический процесс диффузионного насыщения поверхности сталей различными химическими элементами. В зависимости от насыщаемого элемента существуют следующие методы ХТО:

- цементация (углеродом);
- нитроцементация, цианирование (углеродом и азотом одновременно);
- азотирование (азотом);
- диффузионное насыщение металлами и неметаллами (хромирование – хромом; алитирование – алюминием; силицирование – кремнием; борирование – бором и др.).

Для обеспечения диффузионного процесса в поверхностных слоях деталей при ХТО необходимо выполнение основных условий: обязательное получение насыщаемого элемента в ионизированном состоянии; адсорбция химического элемента на поверхности; диффузионное проникновение химического элемента в поверхностные слои детали. В результате этих процессов происходит повышение концентрации легирующего элемента, что приводит к изменению фазового состава в поверхностных слоях.

Цементация – технологический процесс диффузионного насыщения углеродом.

Для цементации используют низкоуглеродистые стали (0,1...0,25 % углерода) марок Ст 3, 10, 15, 20, 25, 15Х, 20Х, 15ХГР, 18ХГТ, 25ХГТ, 12ХН3А, 20ХН4А, 20ХН2М и др. При цементации поверхность насыщается углеродом до 0,8...1,1 % на глубине 0,5...2 мм, после чего подвергается закалке и низкотемпературному отпуску. Это обеспечивает твердость на поверхности HRC 56÷62 при вязкой сердцевине с твердостью HRC 15÷40 в зависимости от марки стали и режима термической обработки.

Цементация проводится при температурах 910...980 °С в течение 5...10 ч. При газовой цементации в качестве карбюризатора используют природный газ, состоящий почти полностью из метана CH_4 .

Обязательной операцией после цементации является термическая обработка, заключающаяся в закалке и последующем низкотемпературном отпуске. Цель термической обработки – обеспечить максимальную твердость в цементованном слое и вязкую сердцевину.

Классическая термообработка заключается в двойной закалке – полной и неполной – с последующим низким отпуском. Цель полной закалки – это исправление дефектов структуры (крупное зерно, цементитная сетка) за счет полной фазовой перекристаллизации при нагреве выше линии A_{c3} на 30...50 °С. Ее можно заменить нормализацией или полностью исключить. Неполная закалка с нагревом выше линии A_{c1} на 30...50 °С обеспечивает максимальную твердость на поверхности, так как является оптимальной для структуры заэвтектоидной стали. Низкий отпуск при 160...220 °С является завершающей операцией, он выполняется для снятия остаточных напряжений, ликвидации остаточного аустенита, стабилизации структуры.

Азотирование – процесс диффузионного насыщения поверхности стали азотом. Цель его – повышение износостойкости, выносливости за счет высокой твердости (HV 800÷1200), коррозионной стойкости в атмосфере и пресной воде, теплостойкости (до 500 °С). Азотируемые изделия имеют технологические преимущества: мало деформируются в процессе ХТО, хорошо шлифуются и полируются.

Азотированные стали превосходят в 2...4 раза цементованные по износостойкости, но уступают им по контактной усталостной прочности ввиду небольшой глубины азотированного слоя (0,45...0,5 мм). Азотирование следует использовать для деталей машин (коленчатые валы, гильзы цилиндров, червяки, шестерни и др.), испытывающих высокие циклические нагрузки, трение, абразивный износ при умеренных контактных напряжениях.

Азотирование проводят на легированных среднеуглеродистых сталях с целью образования в структуре упрочняющих фаз в виде нитридов и карбонитридов легирующих элементов. Классической азотируемой сталью считается марка 38Х2МЮА. Азотирование проводят в среде аммиака, который диссоциирует с образованием атомарного азота, обеспечивая тем самым условие для диффузии в поверхностные слои детали.

Обычно азотирование проводят при температурах 500...520 °С в течение 24...90 ч на максимальную твердость до HV 1100÷1200. Перед азотированием сердцевину изделия подготавливают, проводя термическое улучшение – полную закалку с высоким отпуском на зернистый сорбит. Температура высокого отпуска должна быть выше температуры азотирования. Затем производят механическую обработку, придающую окончательные размеры изделию. После азотирования шлифование можно не применять ввиду хорошего качества азотированной поверхности.

Нитроцементация – процесс диффузионного насыщения поверхности стали одновременно углеродом и азотом. Оптимальное соотношение между ними составляет 0,7...0,9 % С и 0,3...0,55 % N, содержание азота может достигать 1 %.

Применяется этот метод ХТО с той же целью и на тех же сталях, что и цементация. Нитроцементация имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с цементацией: снижается

длительность на 50...60 % за счет ускорения диффузии углерода в присутствии азота; снижается температура до 840...880 °С, которая не вызывает роста зерна аустенита в процессе нитроцементации и является оптимальной для закалки. В результате сокращается процесс последующей термической обработки за счет совмещения операций нитроцементации и закалки.

Нитроцементация является более распространенным процессом по сравнению с цементацией и основным в машиностроении для изготовления деталей с нешлифуемой поверхностью. Нитроцементированный слой обладает износостойкостью на 40...60 % выше по сравнению с цементированным, хорошей обрабатываемостью за счет увеличенного количества остаточного аустенита до 30 % в поверхностных слоях.

Диффузионное насыщение металлами и неметаллами применяют для повышения коррозионной стойкости, жаропрочности, износостойкости сталей и сплавов на никелевой и других основах. Насыщаемые детали вместе с порошком упаковывают в металлические контейнеры, нагревают до 1000...1200 °С и выдерживают несколько часов.

Выделяются следующие методы: алитирование, хромирование, солицирование, борирование. Данные методы ХТО являются длительными, из-за низкой диффузии легирующих элементов, и достаточно дорогостоящими. В структуре насыщенного слоя образуются твердые растворы легирующего элемента в α -Fe и упрочняющие вторичные фазы в виде химических соединений (Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Cr_2O_3 , SiO_2 , FeB, Fe_2B , Al_2O_3). Упрочняющие фазы повышают износостойкость, а окислы – коррозионную стойкость и жаростойкость.

Методы диффузионного насыщения металлами и неметаллами применяют ограниченно.

6. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

В современных легированных сталях в качестве легирующих элементов используют в основном хром, никель, марганец, кремний, молибден, вольфрам, ванадий, титан, реже – кобальт, алюминий, медь, цирконий, бор, азот. Эти легирующие элементы растворяются в твердом растворе, карбидах, при определенных кон-

центрациях образуют специальные фазы. Кроме того, они меняют положение линий на диаграмме состояний, что отражается на структуре сталей в равновесном состоянии. Легированные стали по структуре в равновесном состоянии подразделяют на классы.

Перлитный класс. Суммарное количество легирующих элементов в них не превышает 5 %. В зависимости от содержания углерода они имеют структуру до-, за- или эвтектоидной стали.

Ферритный класс. Низкоуглеродистые ($C \leq 0,2 \%$), высокохромистые или кремнесодержащие (2...4 % кремния) стали. Имеют структуру феррита при всех температурах до температур плавления.

Аустенитный класс. Низкоуглеродистые ($C \leq 0,2 \%$), содержание Ni и Mn в сумме $\geq 10 \%$. Имеют структуру аустенита при всех температурах до температур плавления.

Ледебуритный или карбидный класс. Высокоуглеродистые ($C \geq 0,8 \%$), содержащие карбидообразующие элементы в сумме $\geq 10 \%$. В структуре таких сталей имеется грубая карбидная эвтектика. Легированные стали маркируют буквами и цифрами (ГОСТ 4543–71).

Принято обозначать:

Cr – X,	Ni – H,	Mn – Г,	Si – С,	Mo – М,	W – В,
Ti – Т,	V – Ф,	Al – Ю,	Cu – Д,	Nb – Б,	Co – К,
B – Р,	N – А,	Zr – Ц,	P – П,	Se – Е.	

Цифра после буквы указывает на примерное содержание легирующих элементов в процентах. Если цифра отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1 %, а карбидообразующих элементов в конструкционных сталях в этом случае десятые доли процента. Две цифры в начале маркировки указывают на содержание углерода в сотых долях процента в конструкционных сталях, а в инструментальных – на содержание углерода в десятых долях. Если перед маркировкой стоят буквы, то они означают: Ш – подшипниковая, А – автоматная. А, Ш в конце маркировки означают, что сталь высококачественная, особо высококачественная соответственно.

6.1. Строительные стали

Содержат до 0,22 % углерода (для обеспечения хорошей свариваемости). Это в основном недорогие марганцовистые, хромистые стали следующих марок: 09Н2, 14Г2, 12ГС, 17ГС, 17Г1С, 09Г2С, 10Г2С1, 15Г2СФД, 1612АФ, 14ХГС, 10ХСНД, 15ХСНД, 25ХСНД, 25Г2С, 35ГС (ГОСТ 19281–89).

Поступают чаще всего строительные стали в виде нормализованного проката либо после закалки и высокого отпуска.

Структура после нормализации состоит из феррита и перлита мелкозернистых (НВ 160÷220), после улучшения – из сорбита (НВ 200÷250).

6.2. Цементуемые стали

Содержат менее 0,25 % С (ГОСТ 4543–71): 15Х, 20Х, 15Г, 18ХГР, 15ХФ, 25ХГТ, 20ХН, 12ХН2А, 12ХН3ФА, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А.

Подвергаются цементации с последующей закалкой и низким отпуском. Термическая обработка направлена на получение высокой твердости на поверхности (HRC 58÷62) со структурой мартенсита и вторичных карбидов за счет неполной закалки и на получение повышенной пластичности в сердцевине с сорбитной структурой с HRC 25÷35 за счет полной закалки. Заключительной операцией обязательно является низкий отпуск, цель которого – снять напряжение и ликвидировать остаточный аустенит.

6.3. Улучшаемые стали

Содержат 0,3...0,5 % С (ГОСТ 4543–71): 30Х, 35Х, 38ХА, 40Х, 50Х, 30Г, 40Г, 35Г, 50Г, 35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2, 30ХГТ, 40ХФА, 33ХС, 38ХС, 40ХС, 30ХГС, 35ХГСА, 30ХМ, 35ХМ, 40ХН, 50ХН, 30ХН3А, 38ХГН, 30ХН2МА, 40Х2Н2МА и др.

Подвергаются термической обработке – улучшению на структуру сорбит с твердостью HRC 30÷35. Такая термическая обработка обеспечивает наилучшее сочетание прочности и вязкости, что обеспечивает конструктивную прочность деталей.

6.4. Рессорно-пружинные стали

Стали предназначены для изготовления пружин, упругих элементов, рессор. К ним предъявляются требования по пределу выносливости, упругости, релаксационной стойкости при достаточной пластичности и вязкости.

Указанные свойства достигаются повышенным содержанием углерода 0,5...0,8 %, введением основных легирующих элементов кремния 1,5...2,8 %, марганца 0,6...1,2 %, повышающих упругость, и термической обработкой на структуру троостит отпуска. Углеродистые стали 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г по ГОСТ 1050–88 используются для пружин малого сечения, для работающих с динамическими нагрузками – стали с никелем 60С2Н2А по ГОСТ 14959–79.

Типовой режим термической обработки заключается в полной закалке и среднетемпературном отпуске на структуру троостита с твердостью HRC 38÷48. Срок службы пружин повышает обработка ППД, а также использование патентирования холодно-тянутой проволоки.

6.5. Износостойкие стали

Предназначены для изготовления деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного, усталостного изнашивания, а также в условиях больших давлений и ударных нагрузок. К износостойким материалам относятся стали с высоким содержанием углерода, которые обрабатывают на максимальную твердость.

Стали, устойчивые к усталостному изнашиванию, марок ШХ4, ШХ15, ШХ15ГС, ШХ20СГ (ГОСТ 801–78) называются подшипниковыми. Они предназначены для изготовления шариков, роликов, внутренних и внешних колец подшипников качения. Для обеспечения максимальной твердости эти стали содержат 1 % С, а для улучшения технологических свойств, в том числе и прокаливаемости, их легируют хромом, который указывается в маркировке в десятых долях процента. По структурному признаку это стали перлитного класса, заэвтектоидные.

Типовой режим термической обработки соответствует заэвтектоидным сталям: неполная закалка от 820...850 °С и низкий

отпуск при 160...220 °С на структуру мартенсит и вторичные карбиды Me_3C (HRC 60÷64).

В качестве износоустойчивой стали широкое распространение получили высоколегированные стали Гатфильда. Стали марок 110Г13Л, 110Г13Х2БРЛ, 130Г14ХМФАЛ, 110Г13ФТЛ, 120Г10ФЛ и др. обладают очень высокими вязкостью и сопротивляемостью ударному истиранию: в условиях больших давлений и ударной нагрузки твердость и износостойкость их возрастает от наклепа. Из данных сталей изготавливают стрелки и крестовины железных дорог, черпаки и козырьки землечерпальных машин, гусеницы тракторов. Детали из стали Гатфильда получают литьем и закаливают после нагрева до 1000...1050 °С для растворения карбидов, снижающих вязкость и прочность стали. После закалки сталь имеет структуру аустенита без карбидов и ввиду большой вязкости и способности наклепываться очень трудно поддается обработке резанием, ее обрабатывают при малых режимах резания твердосплавным инструментом и абразивами.

6.6. Автоматные стали

Это стали хорошей обрабатываемости резанием, созданные для обработки на автоматических линиях. Обрабатываемость резанием низкоуглеродистых сталей улучшается за счет введения повышенного количества серы (0,08...0,3 %) и фосфора (0,05...0,15 %), а также свинца (0,15...0,3 %) и кальция (0,002...0,008 %), которые способствуют из-за наличия глобульных включений образованию стружки скалывания.

В настоящее время используются стали марок А12, А20, А30, А35, А40Г, АС14, АС40, АС35Г2, АС45Г2, АЦ20, АЦ30, АЦ40Х, АЦ30ХН (ГОСТ 1414–75), в которых цифры указывают содержание углерода в сотых долях процента; С – стали со свинцом, Ц – стали с кальцием. Они являются низко- и среднеуглеродистыми сталями, и поэтому типовые режимы упрочняющей термообработки заключаются либо в нормализации, либо в улучшении, либо в цементации с последующей закалкой и низким отпуском. Вид термической обработки определяется назначением детали.

6.7. Нержавеющие стали

В общем машиностроении широко применяются хромистые стали 08X13, 12X13, 20X13, 30X13, 40X13, 12X17, 15X25T (ГОСТ 5632–72). Стали содержат более 12,5 % хрома, что изменяет их электропотенциал с электроотрицательного на электроположительный.

Структура и свойства хромистых сталей зависят от количества углерода и хрома. Стали 08X13, 12X17, 15X25T по своему признаку являются сталями ферритного класса и имеют структуру феррита или феррита с небольшим количеством карбидов хрома. Может применяться закалка по стабилизации феррита с целью растворения карбидов от 1000 °С и отпуску при 600...700 °С. Остальные из перечисленных марок хромистых сталей относятся к сталям мартенситного класса (кроме 12X13 – феррито-мартенситная). Это значит, что они претерпевают полное фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение и закаливаются на воздухе.

6.8. Жаростойкие и жаропрочные стали

Жаропрочность – свойство материала работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение длительного времени без существенного снижения прочности. Жаропрочные стали, как и нержавеющие стали, выпускают по ГОСТ 5632–72.

Перлитные стали содержат малое количество углерода, легируются хромом, молибденом, ванадием (12X1МФ, 25X2М1Ф). Оптимальной термической обработкой являются нормализация после нагрева до 1000 °С и последующий отпуск при 650...750 °С в течение 2...3 ч.

Мартенситные стали – сильхромы, легированные хромом 6...14 %, кремнием 2...3 %, молибденом 0,2...0,4 %, углеродом 1,5...0,8 %. Термообработка заключается в высокотемпературной закалке и отпуске. При нагреве под закалку до 1000...1050 °С происходит растворение вторичных фаз, следовательно, обогащение твердого раствора легирующими элементами – одно из условий получения жаропрочного мартенсита. После закалки проводится высокотемпературный отпуск, который способствует выделению из мартенсита дисперсных карбидов хрома $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_3 . Температура отпуска выбирается на 100...150 °С выше, по

сравнению с рабочей температурой. В этом случае сохранение прочности при повышенных температурах обеспечивается стабильностью структуры.

Аустенитные стали легированы хромом до 14...18 %, никелем до 9...15 %, молибденом, вольфрамом, ванадием в небольшом количестве, содержат углерода до 0,5 % (09X14H16Б, 09X14H19Б2БР, 12X18H10Т, 45X14H14В2М, 55X20Г9АН4, 45X22H4МЗ, 45X14В2М). Аустенитные стали по жаропрочности превосходят перлитные и мартенситные стали, используют их при температуре выше 600 °С. Жаропрочность этих сталей обеспечивается высоколегированным аустенитом, присутствием в структуре дисперсных карбидов хрома $M_{23}C_6$, а также вольфрама W_6C и молибдена M_6C в большем количестве по объему по сравнению с сильхромами. Формируется дисперсная карбидная структура за счет термообработки: закалки от температуры 1150...1200 °С на высоколегированный аустенит с последующим старением от температур 700...800 °С, вызывающих дисперсионное твердение.

7. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

7.1. Нетеплостойкие стали

Это углеродистые стали – качественные У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13 и высококачественные (ГОСТ 1435–99), а также низколегированные стали, содержащие до 3...5 % легирующих элементов: 9Х1, ХВ4Ф, 9ХС, ХВГ, 6ХВС и др. (ГОСТ 5950–73).

По структурному признаку это стали перлитного класса. Упрочняющая термическая обработка направлена на обеспечение максимальной твердости в результате мартенситного превращения при закалке и последующего низкотемпературного отпуска. Температура закалки выбирается выше линии Ac_3 на 30...50 °С для доэвтектоидных и выше линии Ac_1 на 30...50 °С для заэвтектоидных сталей. Закалку углеродистых сталей проводят в воде, легированных – в масле. Низкий отпуск проводят при 160...250 °С. Его цель – снять внутренние напряжения и превратить остаточный аустенит в отпущенный мартенсит.

7.2. Полутеплостойкие стали

7.2.1. Штамповые стали холодного деформирования

Содержат повышенное количество углерода (до 2,2 %) и хрома (8...18 %), X12, X12Ф1, X12ВМ, X12МФ (ГОСТ 5950–73). Они являются сталями высокой прокаливаемости – до 200 мм.

По структурному признаку это стали ледебуритного класса, т. е. содержат в литом состоянии карбидную эвтектику. Для измельчения карбидной эвтектики и снижения балла карбидной неоднородности стали ледебуритного класса перед отжигом обязательно кууют. В структуре отожженных сталей присутствуют перлит и карбиды $Cr_{23}C_6$, Cr_7C_6 первичные и вторичные.

Высокохромистые стали подвергают закалке с нагревом выше линии A_{c3} до 1000...1050 °С и последующему низкому отпуску при 180...200 °С с выдержкой 1 ч.

7.2.2. Полутеплостойкие штамповые стали горячего деформирования

Для штампов горячего деформирования применяются полутеплостойкие стали умеренной теплостойкости (400...500 °С): 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВС; повышенной теплостойкости (до 650 °С): 4Х5МФС, 4Х5В2ФС; высокой теплостойкости (700 °С и выше): 4Х2В5ФМ, 3Х2В8Ф и др. (ГОСТ 5950–73).

Из соображений обеспечения высокой горячей прочности, вязкости, окалиностойкости, разгаростойкости это средне- и низкоуглеродистые стали, легированные никелем, марганцем и карбидообразующими элементами. По структуре – это стали перлитного класса, а стали высокой теплостойкости – карбидного.

Их термическая обработка имеет особенность – после полной закалки выполняется среднетемпературный отпуск на структуру троостит, который обладает повышенной вязкостью и рабочей температурой от 500 до 700 °С в зависимости от степени легированности сталей.

7.3. Теплостойкие стали

Называют быстрорежущими. Это высоколегированные стали, содержащие углерод (1...2 %), вольфрам (0...18 %), молибден (0...6 %), ванадий (1...5 %), хром (3...4 %), кремний (2 %).

В настоящее время находят применение стали Р6М5, Р6М3, Р9, Р12, Р18, Р6М5К5, Р12Ф3, Р9К5 и др. (ГОСТ 19265–73). Маркируют их буквой Р, цифры после буквы указывают содержание основного легирующего элемента быстрорежущих сталей – вольфрама в целых процентах. Хром, кремний, ванадий, если последнего меньше 2 %, не указываются. В остальном маркировка этих сталей не отличается от маркировки легированных сталей.

Отжиг быстрорежущих сталей проводят при температурах 840...860 °С с изотермической выдержкой при 720...750 °С. Структура сталей после отжига состоит из сорбитообразного перлита, 5...12 % нерастворимых первичных и 15...20 % растворимых вторичных карбидов. Особенностью окончательной термической обработки быстрорежущих сталей является высокотемпературный нагрев под закалку и трехкратный отпуск при 550...560 °С по 1 ч каждый.

7.4. Металлокерамические твердые сплавы

При изготовлении бурового инструмента в горнорудной промышленности широкое применение нашли металлокерамические твердые сплавы. Металлокерамические твердые сплавы – это материалы, состоящие из высокотвердых и тугоплавких карбидов вольфрама, титана, тантала, связанных кобальтовой металлической связкой. Их изготавливают методом порошковой металлургии. Для этой цели методом химического восстановления производят порошки карбидов, их смешивают с порошками кобальта и прессуют под давлением до 20000 МПа, а затем при температуре 1400...1450 °С спекают в формах, соответствующих размерам готовых пластинок или инструмента. Термической обработке твердые сплавы не подвергаются, так как приобретают окончательные свойства после изготовления.

За счет наличия в структуре тугоплавких карбидов твердосплавный инструмент обладает высокой твердостью HRA 80÷92

(73÷76 HRC_Э), теплостойкостью (800...1000 °С), поэтому ими можно работать со скоростями, в 1,5...3 раза превышающими скорости резания по сравнению с быстрорежущими сталями. Однако, в отличие от быстрорежущих сталей, твердые сплавы имеют пониженную прочность ($\sigma_{изг} = 1000\div 1500$ МПа), не обладают ударной вязкостью.

По химическому составу твердые сплавы классифицируют:

- вольфрамокобальтовые (ВК);
- титановольфрамокобальтовые (ТК);
- титанотанталовольфрамокобальтовые (ТТК).

Вольфрамокобальтовые (группа ВК) ВК3, ВК4, ВК6, ВК8, ВК10, ВК11, ВК20. Цифра в маркировке указывает на количество кобальта в сплаве, остальное приходится на карбид WC. Их структура состоит из карбида WC (α -фаза) и кобальтовой связки (β -фаза).

Сплавы этой группы имеют наибольшую прочность и сопротивляемость ударным нагрузкам, но несколько пониженную твердость, их теплостойкость не более 800 °С. Их применяют в режущем инструменте для обработки чугунов, сталей, цветных сплавов и неметаллических материалов. Причем чем больше кобальта в твердых сплавах, тем выше прочность и вязкость. Поэтому сплавы ВК2, ВК3 применяют для полустойкой и чистой обработки, а сплавы ВК6, ВК8 – для чернового точения, фрезерования чугуна.

Титановольфрамокобальтовые (группа ТК) Т5К10, Т5К12, Т14К8, Т15К6, Т30К4. Цифры после буквы Т указывают на весовое количество карбида TiC, цифры после буквы К – на количество кобальта, остальное приходится на карбид WC. В структуре этих сплавов при спекании может происходить частичное или полное растворение карбида титана в карбиде вольфрама с образованием твердого раствора (Ti, W)C – γ -фаза, имеющего более высокую твердость, чем WC.

Сплавы этой группы имеют более высокую теплостойкость (до 900...1000 °С) и твердость (до 92 HRA). Титановольфрамокобальтовые сплавы применяют преимущественно для высокоскоростной чистой обработки стали и чугунов. Наибольшей эксплуатационной прочностью обладают сплавы Т5К10, Т14К8, поэтому их применяют для черновой обработки стальных слитков.

Титанотанталовольфрамкобальтовые (группа ТТК) ТТ10К8, ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9. Цифра после букв ТТ указывает на суммарное содержание карбидов TiC, TaC, а после буквы К – на количество кобальта. Структура карбидов в этих сплавах состоит из твердого раствора (Ti, Ta, W)C – η-фаза и WC.

Сплавы этой группы отличаются от предыдущих ВК и ТК большей прочностью, лучшей сопротивляемостью вибрациям и выкрашиванию. Поэтому они используются для особо тяжелых условий работы – при черновой обработке стальных поковок, отливок, для обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов.

8. СПЛАВЫ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

8.1. Алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы по технологическому признаку разделяют на деформируемые, которые обрабатывают прокаткой, прессованием, ковкой и штамповкой, и литейные, предназначенные для фасонного литья. Деформируемые сплавы по способности упрочняться термической обработкой делят на сплавы, упрочняемые и не упрочняемые термообработкой (упрочняющей термической обработкой для алюминиевых сплавов являются закалка и старение – длительная выдержка при нормальной или повышенной температуре).

Деформируемые алюминиевые сплавы изготавливают по ГОСТ 4784–97.

К сплавам, упрочняемым термической обработкой, относят:

Дуралюмины. Это сплавы системы Al-Cu-Mg. Их маркируют буквой Д и цифрой, обозначающей условный номер сплава (Д1, Д16).

Дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием, хорошо свариваются точечной сваркой. Из них изготавливают обшивки, шпангоуты и лонжероны самолетов, силовые каркасы, строительные конструкции, кузова грузовых автомобилей и т. д.

Высокопрочные сплавы. К ним относят сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu. Их маркируют буквой В и цифрой, обозначающей условный номер сплава (В95, В96).

Высокопрочные сплавы прочнее, чем дуралюмины, но пластичность их ниже. Они хорошо обрабатываются резанием и свариваются точечной сваркой. Такие сплавы применяют в самолетостроении для нагруженных конструкций.

Ковочные сплавы. Это сплавы системы Al-Cu-Mg-Si. Их маркируют буквами АК и цифрой, обозначающей условный номер сплава (АК6, АК8).

Такие сплавы обладают хорошей пластичностью и стойкостью к образованию трещин при горячей пластической деформации. Они хорошо обрабатываются резанием и удовлетворительно свариваются контактной сваркой. Ковочные сплавы используют для изготовления средненагруженных деталей сложной формы: подмоторных рам, фитингов, крыльчаток лопастей винтов вертолета и т. д.

К алюминиевым сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относят:

1. Сплавы алюминия с марганцем (АМц, содержащий 1...1,5 % марганца).
2. Сплавы алюминия с магнием (АМг, АМг2 и др.).

Сплавы алюминия с марганцем и магнием легко обрабатываются давлением, хорошо свариваются и обладают высокой коррозионной стойкостью. Обработка резанием затруднена. Их применяют для сварных и клепаных конструкций, испытывающих небольшие нагрузки и требующих высокого сопротивления коррозии.

Литейные алюминиевые сплавы по ГОСТ 1583–93 маркируют буквами и цифрами. Первая буква А означает основу сплава (алюминий), последующие буквы – основные легирующие компоненты (К – кремний, М – медь, Ц – цинк, Мг – магний, Мц – марганец, Кд – кадмий), а цифры – среднее содержание компонентов в процентах. Отсутствие цифры означает, что данного компонента в сплаве около 1 % (АК5М – алюминиевый сплав, содержащий около 5 % кремния и 1 % меди).

К литейным алюминиевым сплавам относят:

1. Сплавы алюминия с кремнием (силумины) марок АК12, АК9, АК7, АК8М и др. Силумины обладают высокими литейными свойствами, хорошо свариваются, сравнительно легко обраба-

тываются резанием. Их применяют для изготовления средних и крупных литых деталей ответственного назначения.

2. Сплавы алюминия с медью марок АМ5, АМ4,5. Эти сплавы обладают высокой прочностью при обычных и повышенных температурах, хорошо обрабатываются резанием и свариваются, но обладают низкими литейными свойствами. Их используют для отливки небольших деталей простой формы.

3. Сплавы алюминия с магнием (магналии) марок АМг10, АМг5Мц и др. Такие сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, прочностью, вязкостью и хорошей обрабатываемостью резанием, но, как и сплавы системы Al-Cu, имеют невысокие литейные свойства. Их применяют для изготовления деталей, работающих в условиях высокой влажности в судостроении и авиации.

8.2. Магниевые сплавы

Магниевые сплавы, как и алюминиевые, по технологическому признаку делят на деформируемые и литейные.

Деформируемые магниевые сплавы по ГОСТ 14957–76 разработаны на базе систем Mg-Mn, Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr и Mg-Li. Их маркируют буквами МА и цифрой, обозначающей условный номер сплава (МА5, МА11).

Литейные магниевые сплавы по ГОСТ 2856–79 изготавливают на базе систем Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr и Mg-Nd. Эти сплавы маркируют буквами МЛ и цифрой, обозначающей условный номер сплава (МЛ5, МЛ8).

Сплавы магния обладают малой плотностью, высокой удельной прочностью и удельной жесткостью. Они хорошо обрабатываются резанием, легко шлифуются и полируются, удовлетворительно свариваются дуговой и контактной сваркой. Ряд магневых сплавов может быть упрочнен закалкой и старением. К недостаткам относятся меньшая, чем у алюминиевых сплавов, коррозионная стойкость, худшие литейные свойства, малый модуль упругости, склонность к газонасыщению, окислению и воспламенению при выплавке.

8.3. Медные сплавы

По химическому составу сплавы меди делят на две основные группы: латуни (сплавы меди с цинком) и бронзы (сплавы меди с другими элементами). Бронзы, в свою очередь, подразделяют на оловянные и безоловянные. По технологическому признаку медные сплавы делят на деформируемые и литейные.

Сплавы меди маркируют буквами Л (латунь) или Бр (бронза), после чего следуют буквы и цифры, обозначающие составляющие сплав элементы и среднее содержание этих элементов в процентах. Условные обозначения элементов в медных сплавах: А – алюминий, Б – бериллий, Ж – железо, К – кремний, Мц – марганец, Н – никель, О – олово, С – свинец, Ф – фосфор, Х – хром, Ц – цинк. Порядок букв и цифр различен для деформируемых и литейных сплавов.

В марках *деформируемых латуней* по ГОСТ 15527–70 первые две цифры после буквы Л обозначают среднее содержание меди в процентах. Цифры, указывающие содержание других элементов в сплаве, пишут через тире после всех букв, обозначающих эти элементы. Содержание цинка определяют по разности от 100 % (Л70 – латунь, содержащая около 70 % меди и $100 - 70 = 30$ % цинка; ЛО70-1 – латунь, содержащая 70 % меди, 1 % олова и $100 - 70 - 1 = 29$ % цинка; ЛАЖ60-1-1 – латунь, содержащая 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и $100 - 60 - 1 - 1 = 38$ % цинка).

Деформируемые латуни хорошо поддаются холодной обработке давлением, обработке резанием, имеют высокую коррозионную стойкость. Из них изготавливают радиаторные трубки, гильзы патронов и снарядов, сильфоны, втулки, тройники, штуцеры, токопроводящие детали электрооборудования и т. д.

В литейных латунях по ГОСТ 17711–93 среднее содержание элемента в процентах ставят сразу после буквы, обозначающей данный элемент. Отсутствие цифры означает, что данного элемента в сплаве около 1 %. Содержание меди определяют по разности от 100 % (ЛЦ40С – латунь, содержащая 40 % цинка, 1 % свинца и $100 - 40 - 1 = 59$ % меди; ЛЦ40Мц3Ж – латунь, содержащая 40 % цинка, 3 % марганца, 1 % железа и $100 - 40 - 3 - 1 = 56$ % меди).

Литейные латуни обладают хорошей жидкотекучестью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. Из них изготавливают втулки, сепараторы шариковых и роликовых подшипников, гребные винты и их лопасти и т. д.

В марках деформируемых бронз содержание основного компонента – меди – не указывают, а определяют по разности от 100 %. Цифры, указывающие содержание элементов в сплаве, пишут через тире после всех букв, обозначающих эти элементы (БрОФ6,5-0,4 – бронза, содержащая 6,5 % олова, 0,4 % фосфора и $100 - 6,5 - 0,4 = 93,1$ % меди).

Деформируемые оловянные бронзы (ГОСТ 5017–74) обладают хорошими антифрикционными свойствами и коррозионной стойкостью. Их используют для изготовления плоских и круглых пружин, барометрических коробок, мембран, антифрикционных деталей.

К деформируемым безоловянным бронзам (ГОСТ 18175–78) относят:

1. Алюминиевые бронзы БрА5, БрА7, БрАЖ9-4 и др. Они отличаются высокими механическими, антикоррозионными и антифрикционными свойствами. Из них изготавливают втулки, фланцы, шестерни, червячные колеса и другие ответственные детали.

2. Бериллиевые бронзы БрБ2, БрБ2,5 и др. Они имеют высокую прочность, упругость, коррозионную стойкость, хорошо обрабатываются резанием и свариваются. Эти бронзы используют в приборостроении для изготовления ответственных пружин, мембран, кулачков, пружинящих контактов и т. д.

3. Кремнистые бронзы БрКМц3-1, БрКН1-3. Они характеризуются хорошими механическими, упругими и антифрикционными свойствами. Такие бронзы легко обрабатываются давлением, резанием и свариваются. Кремнистые бронзы используют вместо более дорогих оловянных для изготовления антифрикционных деталей, а также для замены бериллиевых бронз при производстве упругих деталей, работающих в пресной и морской воде.

В марках литейных бронз, как и в литейных латунях, среднее содержание элемента в процентах ставят сразу после буквы, обозначающей этот элемент (БрОЗЦ12С5 – бронза, содержащая 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца и $100 - 3 - 12 - 5 = 80$ % меди).

Литейные оловянные (ГОСТ 613–79) и *безоловянные* (ГОСТ 493–79) бронзы обладают хорошей жидкотекучестью и малой усадкой, что позволяет применять их для изготовления сложных отливок. Высокая коррозионная стойкость в атмосферных условиях, пресной и морской воде способствует их широкому использованию для изготовления пароводяной арматуры. Литейные бронзы являются также хорошим антифрикционным материалом, их применяют для изготовления подшипников.

8.4. Цинковые сплавы

Промышленные цинковые сплавы разработаны на базе систем Zn-Al и Zn-Al-Cu. Поскольку цинк относительно плохо деформируется, детали из цинковых сплавов изготавливают литьем.

Литейные цинковые сплавы по ГОСТ 25140–93 маркируют буквами и цифрами. Первая буква Ц означает основу сплава (цинк), последующие буквы – основные легирующие компоненты (А – алюминий и М – медь), а цифры – среднее содержание компонентов в процентах (ЦА4М3 – цинковый сплав, содержащий около 4 % алюминия и 3 % меди).

8.5. Антифрикционные материалы

Антифрикционные сплавы применяют для изготовления вкладышей подшипников скольжения. Эти сплавы должны иметь достаточную твердость, но не очень высокую, чтобы не вызвать сильного износа вала; сравнительно легко деформироваться под влиянием местных напряжений, т. е. быть пластичными; удерживать смазочный материал на поверхности; иметь малый коэффициент трения между валом и подшипником; обладать хорошей теплостойкостью для обеспечения интенсивного теплоотвода от поверхностей трения; быть устойчивыми к коррозии. Для обеспечения этих свойств структура антифрикционных сплавов должна быть неоднородной и состоять из мягкой и пластичной основы с включениями твердых частиц (реже из твердой основы и мягких включений). В качестве антифрикционных сплавов используют чугуны, сплавы на основе меди-бронзы и латуни, сплавы на оловянной, свинцовой, цинковой и алюминиевой основе.

Чугунные вкладыши изготавливают из серых чугунов СЧ15, СЧ20 (ГОСТ 1412–85) и легированных антифрикционных чугунов: серых АЧС-1, АЧС-2 и др.; высокопрочных АЧВ-1 и АЧВ-2; ковких АЧК-1 и АЧК-2 (ГОСТ 1585–85). Они предназначены для работы при значительных давлениях и малых скоростях скольжения. К достоинствам чугунов можно отнести их невысокую стоимость, к недостаткам – плохую прирабатываемость, чувствительность к недостаточности смазочного материала и пониженную стойкость к воздействию ударных нагрузок.

Чаще всего для монолитных подшипников скольжения, работающих при значительных давлениях и средних скоростях скольжения, используют оловянные и свинцовые бронзы БрО10Ф1, БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3 (ГОСТ 613–79), БрС30 (ГОСТ 493–79).

Латуни применяют в качестве заменителей бронз для опор трения. Латуни ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А и др. (ГОСТ 17711–93) применяют при малых скоростях скольжения и невысоких нагрузках (для опор трения приборов).

Антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе называют баббитами. В соответствии с ГОСТ 1320–74 к сплавам на оловянной основе относят Б83 (содержит примерно 83 % олова), Б88 (88 % олова) и Б83С (83 % олова, со свинцом), на свинцовой основе – Б16 (16 % олова), БС6 (6 % олова, с сурьмой) и БН (с никелем). Другую группу образуют более дешевые свинцово-кальциевые баббиты (ГОСТ 1209–90) БКА (с кальцием и алюминием), БК2 (2 % олова, с кальцием) и др.

К антифрикционным цинковым сплавам по ГОСТ 21438–95 относят ЦАМ10-5 (содержит 10 % алюминия и 5 % меди) и ЦАМ9-1,5 (9 % алюминия и 1,5 % меди).

Алюминиевые антифрикционные сплавы изготавливают по ГОСТ 14113–78. К ним относят АО6-1 (содержит 6 % олова и 1 % меди), АО9-2 (9 % олова и 2 % меди) и др. Алюминиевые сплавы применяют вместо баббитов и свинцовой бронзы в подшипниках, работающих при высоких нагрузках и средних скоростях.

РАЗДЕЛ II. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1. ДРЕВЕСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Древесина, как материал, имеет огромное значение во многих отраслях промышленности. Большое значение древесина приобретает в настоящее время в связи с разработкой новых видов материалов, в которых устранены основные недостатки древесины – анизотропность и формоизменяемость. Такие материалы, как слоистая древесина, клееная фанера, древесно-слоистые пластики, древесно-волоконистые и древесно-стружечные плиты проникают сейчас во все отрасли промышленности и иногда заменяют металл. Область применения древесины значительно возросла с появлением новых видов клеев и синтетических смол.

По породам древесина объединяется в две группы: древесина хвойных пород и древесина лиственных пород. К первой группе относятся следующие породы: сосна, ель, пихта, лиственница и кедр. Вторая группа включает следующие породы: береза, осина, бук, дуб, вяз, граб, ильм, клен, липа, ольха, ясень. Каждая из перечисленных пород имеет свои особенности по структуре, по физико-механическим свойствам и по условиям произрастания.

2. СТРОЕНИЕ ДЕРЕВА И ДРЕВЕСИНЫ

2.1. Строение дерева

Растущее дерево состоит из кроны, ствола и корней. При жизни дерева каждая из этих частей выполняет свои определенные функции и имеет различное промышленное применение.

Крона состоит из ветвей и листьев (или хвои). Промышленное использование кроны невелико. Из листьев (хвои) получают лекарственные препараты, из ветвей – технологическую щепу для производства тарного картона и древесно-волоконистых плит.

Ствол растущего дерева дает основную массу древесины (от 50 до 90 % объема всего дерева) и имеет главное промышленное значение. Верхняя тонкая часть ствола называется вершиной, нижняя толстая часть – комлем. На поперечном разрезе ствола

можно видеть сердцевину, кору и древесину с ее годичными слоями.

Сердцевина – узкая центральная часть ствола, представляющая рыхлую ткань. На торцовом разрезе имеет вид темного пятнышка диаметром 2...5 мм. На радиальном разрезе сердцевина видна в виде прямой или извилистой темной узкой полоски.

Кора покрывает дерево сплошным кольцом и состоит из внешнего коркового слоя и внутреннего слоя – луба, который проводит воду с органическими веществами, выработанными в листьях, вниз по стволу.

Кора используется для дубления кож, изготовления теплоизоляционных и строительных плит. Из луба коры делают мочало, рогожи, веревки и др. Из коры добывают химические вещества, применяемые в медицине. Между корой и древесиной располагается очень тонкий, сочный, не видимый невооруженным глазом слой камбий, состоящий из живых клеток.

Корни проводят воду с растворенными в ней минеральными веществами вверх по стволу. Корни используются как второсортное топливо. Пни и крупные корни сосны служат сырьем для получения канифоли и скипидара.

Главные разрезы ствола. Разрез, проходящий перпендикулярно оси ствола, образует торцовую плоскость, проходящий через сердцевину ствола – радиальную, а на некотором расстоянии от нее – тангенциальную плоскость. Древесина на указанных разрезах имеет различный вид и неодинаковые свойства.

2.2. Макроскопическое строение древесины

Заболонь, ядро. Породы древесины, имеющие ядро, называют ядровыми. Остальные породы, у которых нет различия между центральной и периферической частью ствола ни по цвету, ни по содержанию воды, называют заболонными (безъядровыми).

Из древесных пород ядро имеют: хвойные – сосна, лиственница, кедр; лиственные – дуб, ясень, ильм, тополь. К заболонным породам относятся лиственные: береза, клен, граб, самшит.

Однако у некоторых безъядровых пород (береза, бук, осина) наблюдается потемнение центральной части ствола. В этом случае темная центральная зона называется ложным ядром.

Годичные слои. На поперечном разрезе видны концентрические слои, расположенные вокруг сердцевины. Эти образования представляют собой ежегодный прирост древесины. Называются они годичными слоями. Годичные слои нарастают ежегодно от центра к периферии, и самым молодым слоем является наружный. По числу годичных слоев на торцовом разрезе на комле можно определить возраст дерева.

Сердцевинные лучи. На поперечном разрезе некоторых пород хорошо видны невооруженным глазом светлые, направленные от сердцевины к коре линии – сердцевинные лучи. В растущем дереве сердцевинные лучи служат для проведения воды в горизонтальном направлении и для хранения запасных питательных веществ.

Сосуды. На поперечном (торцовом) разрезе лиственных пород видны отверстия, представляющие сечения сосудов – трубок, каналов разной величины, предназначенных для проведения воды. Объем сосудов в зависимости от породы колеблется в пределах от 7 до 43 %.

Смоляные ходы. Характерная особенность строения древесины хвойных пород – смоляные ходы. Различают смоляные ходы вертикальные и горизонтальные. Горизонтальные проходят по сердцевинным лучам. Вертикальные смоляные ходы – тонкие узкие каналы, заполненные смолой. Смоляные ходы занимают небольшой объем древесины ствола (0,2...0,7 %) и поэтому не оказывают существенного влияния на свойства древесины.

2.3. Микроскопическое строение древесины

Строение древесины, видимое в микроскоп, называется микроструктурой. Древесина состоит из мельчайших частичек – клеток, преимущественно (до 98 %) мертвых. Растительная клетка имеет тончайшую прозрачную оболочку, внутри которой находится протопласт, состоящий из цитоплазмы и ядра. По мере развития, в зависимости от функций, которые призвана выполнять та или иная клетка, размеры, состав и строение ее оболочки существенно изменяются. Наиболее частым видом изменения клеточных оболочек является их одревеснение и опробкование.

В процессе роста клеточные оболочки утолщаются, при этом остаются неутолщенные места, называемые порами. Пory служат для проведения воды с растворенными питательными веществами из одной клетки в другую.

Виды клеток древесины. Клетки, составляющие древесину, разнообразны по форме и величине. Различают два основных вида клеток: клетки, имеющие длину волокон 0,5...3 мм, диаметр 0,01...0,05 мм, с заостренными концами – прозенхимные и клетки меньших размеров, имеющие вид многогранной призмы с примерно одинаковыми размерами сторон (0,01...0,1 мм), – паренхимные. Паренхимные клетки служат для отложения запасных питательных веществ.

Основная масса древесины всех пород состоит из клеток прозенхимных, которые в зависимости от выполняемых ими жизненных функций разделяются на проводящие и опорные, или механические. Проводящие клетки у растущего дерева служат для проведения из почвы в крону воды с растворами минеральных веществ; опорные создают механическую прочность древесины.

Ткани древесины. Клетки одинакового строения, выполняющие одни и те же функции, образуют ткани древесины.

В соответствии с назначением и видом клеток, из которых состоят ткани, различают: запасающие, проводящие, механические (опорные) и покровные ткани.

Запасающие ткани состоят из коротких запасающих клеток и служат для накопления и хранения питательных веществ.

Проводящие или сосудистые ткани состоят из вытянутых тонкостенных клеток с широкими внутренними просветами. Клетки соединяются друг с другом, создавая сосуды – трубки, через которые влага, впитанная корнями, проходит к листьям.

Механические (опорные) ткани состоят из длинных толстостенных клеток с малыми внутренними просветами. Эти ткани способны сопротивляться механическим воздействиям. Механическая ткань самая прочная и наиболее устойчивая. Чем больше этой ткани, тем древесина плотнее, тверже, прочнее. Механические ткани называют либриформом.

Покровные ткани находятся в коре и выполняют защитную роль.

Особенности микроскопического строения древесины лиственных и хвойных пород обуславливают различие их свойств. Волокна у древесины хвойных пород прямолинейны. Поэтому у хвойных пород более высокие показатели прочности при одинаковой плотности. Древесина лиственных пород имеет некоторую извилистость волокон, вследствие чего у нее более высокие показатели ударной вязкости и более высокая прочность при скалывании вдоль волокон. Древесина лиственных пород лучше гнется, так как в ней расположены сосуды, которые дают возможность древесине уплотняться без разрушения.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

Физическими свойствами древесины называются такие свойства, которые определяют без нарушения целостности испытуемого образца и изменения его химического состава, т. е. выявляют путем осмотра, взвешивания, измерения, высушивания.

К физическим свойствам древесины относятся: внешний вид и запах, плотность, влажность и связанные с ней изменения – усушка, разбухание, растрескивание и коробление. К физическим свойствам древесины относится также ее электро-, звуко- и теплопроводность, показатели макроструктуры.

3.1. Свойства, определяющие внешний вид древесины

Внешний вид древесины определяется ее цветом, блеском, текстурой и макроструктурой.

Цвет. Цвет древесине придают находящиеся в ней дубильные, смолистые и красящие вещества, которые находятся в полостях клеток. Древесина пород, произрастающих в различных климатических условиях, имеет различный цвет. На окраску древесины оказывает влияние также возраст дерева. У молодых деревьев древесина обычно светлее, чем у старых.

Цвет древесины имеет важное значение в производстве мебели, музыкальных инструментов, столярных и художественных изделий.

Блеск – это способность направленно отражать световой поток. Блеск древесины зависит от ее плотности, количества, раз-

меров и расположения сердцевинных лучей. Блеск придает древесине красивый вид и может быть усилен полированием, лакированием, вощением или оклеиванием прозрачными пленками из искусственных смол.

Текстура – рисунок, который получается на разрезах древесины при перерезании ее волокон, годичных слоев и сердцевинных лучей. Текстура зависит от особенностей анатомического строения отдельных пород древесины и направления разреза. Текстура определяет декоративную ценность древесины, что особенно важно при изготовлении художественной мебели, при украшении музыкальных инструментов и др.

Запах древесины зависит от находящихся в ней смол, эфирных масел, дубильных и других веществ. Большое значение имеет запах древесины при изготовлении тары. В свежесрубленном состоянии древесина имеет более сильный запах, чем после высыхания.

3.2. Влажность древесины и свойства, связанные с ее изменением

Влажность. Под влажностью древесины понимают отношение количества удаленной влаги к массе древесины в абсолютно сухом состоянии. Влажность древесины выражают в процентах.

Абсолютно сухую древесину в небольших образцах можно получить путем высушивания ее в специальных шкафах. В природе и на производстве древесина всегда содержит в себе то или иное количество влаги.

Влага в древесине пропитывает клеточные оболочки и заполняет полости клеток и межклеточные пространства. Влага, пропитывающая клеточные оболочки, называется связанной или гигроскопической. Влага, заполняющая полости клеток и межклеточные пространства, называется свободной, или капиллярной. При высыхании древесины сначала из нее испаряется свободная влага, а затем гигроскопическая. Общее количество влаги в древесине складывается из свободной и связанной влаги.

Состояние древесины, при котором клеточные оболочки содержат максимальное количество связанной влаги, а в полостях

клеток находится только воздух, называется пределом гигроскопичности. Таким образом, влажность, соответствующая пределу гигроскопичности, при комнатной температуре (20 °С) составляет 30 % и практически не зависит от породы.

При изменении гигроскопической влажности размеры и свойства древесины резко изменяются.

Различают следующие степени влажности древесины: мокрая – длительное время находившаяся в воде, влажность выше 100 %; свежесрубленная – влажность 50...100 %; воздушно-сухая – долгое время хранившаяся на воздухе, влажность 15...20 % (в зависимости от климатических условий и времени года); комнатно-сухая – влажность 8...12 % и абсолютно сухая – влажность 0 %.

Для определения влажности древесины пользуются весовым и электрическим методами. Влажность древесины W , определенную весовым методом, вычисляют в процентах по формуле

$$W = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right] \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

где m_1 – масса образца древесины до высушивания, г; m_2 – масса того же образца в абсолютно сухом состоянии, г.

Преимущество весового метода – точное определение влажности древесины при любом количестве влаги. Недостаток – продолжительность высушивания образцов (12...24 ч).

При электрическом методе влажность древесины определяют электровлагомером. Действие этого прибора основано на измерении электропроводности древесины в зависимости от изменения ее влажности. Преимущество электрического метода – быстрота определения и возможность проверки влажности древесины любого размера. Недостатки – определение влажности только в месте соприкосновения древесины с датчиком; невысокая точность.

Усушка. Усушкой называется уменьшение линейных размеров и объема древесины при высыхании. Усушка начинается после полного удаления свободной влаги и с начала удаления связанной влаги. Усушка, которая происходит при удалении всей связанной влаги, называется полной. Уменьшение объема древе-

сины при испарении связанной влаги называется объемной усушкой.

При распиловке бревен на доски предусматривают припуски на усушку с тем, чтобы после высыхания пиломатериалы и заготовки имели заданные размеры. По величине коэффициента объемной усушки наши древесные породы можно разделить на три группы:

- малоусыхающие (коэффициент объемной усушки не более 0,40 %) – ель сибирская и обыкновенная, пихта сибирская, кедры сибирский и корейский, тополь белый;
- среднеусыхающие (коэффициент объемной усушки от 0,40 до 0,47 %) – бук восточный, вяз, дуб, липа мелколистная, ольха черная, осина, пихта белокорая, кавказская и маньчжурская, тополь черный, ясень;
- сильноусыхающие (коэффициент объемной усушки 0,47 % и более) – березы плакучая и белая, бук восточный, граб, лиственница, клен остролистный.

Внутренние напряжения, коробление. Напряжения, которые возникают без участия внешних сил, называют внутренними. Причина образования напряжений при сушке древесины – неравномерность распределения влаги. Вначале испаряется влага с поверхностных слоев древесины. Однако из-за сопротивления более влажных внутренних слоев поверхностные слои усохнут не полностью. В результате этого в древесине появляются напряжения, растягивающие ее в поверхностных зонах и сжимающие во внутренних.

Внутренние напряжения сохраняются в высушенном материале и служат причиной изменения размеров и формы деталей при механической обработке древесины. Сохранившиеся после окончания сушки остаточные напряжения можно снять путем дополнительной обработки пиломатериалов (увлажнением поверхности паром или водой).

При высыхании или увлажнении древесины изменяется форма поперечного сечения доски. Такое изменение формы называется короблением. Чем ближе доска расположена к сердцевине, тем больше ее коробление. Правильная укладка, сушка и хранение пиломатериалов исключают появление коробления.

Разбуханием называется увеличение линейных размеров и объема древесины при повышении содержания связанной влаги. Это происходит при увлажнении древесины и представляет собой явление, обратное усушке.

Так же как и усушка, разбухание – отрицательное свойство древесины. Однако в некоторых случаях оно играет положительную роль: обеспечивает плотность соединений в бочках, лодках, деревянных трубах и т. п.

Водопоглощение – способность древесины благодаря пористому строению поглощать капельно-жидкую влагу. Водопоглощение происходит при непосредственном контакте древесины с водой.

Водопоглощение зависит от породы, начальной влажности, температуры, формы и размеров древесины. У пород с меньшей плотностью водопоглощение больше, так как больше объем полостей, которые могут быть заполнены свободной влагой.

3.3. Плотность древесины

В древесине имеются пустоты (полости клеток, межклеточные пространства), и если удалось бы спрессовать древесину, чтобы все пустоты исчезли, то получили бы сплошное древесинное вещество. Плотность древесины вследствие пористого строения меньше, чем плотность древесинного вещества.

Плотность древесины зависит от влажности, и для сравнения значения плотности всегда приводят к единой влажности (12 %). С увеличением влажности плотность древесины увеличивается.

Между плотностью и прочностью древесины существует тесная связь. Более тяжелая древесина, как правило, является более прочной. Плотность определяется количеством древесинного вещества в единице объема.

По плотности при влажности 12 % древесину можно разделить на три группы:

- породы с малой плотностью (510 кг/м^3 и менее): сосна, ель, пихта, кедр, тополь, липа, ива, ольха;

- породы средней плотности (550...740 кг/м³): лиственница, тис, береза, бук, вяз, груша, дуб, ильм, клен, платан, рябина, яблоня, ясень;
- породы с высокой плотностью (750 кг/м³ и выше): акация белая, береза железная, граб, самшит, саксаул, фисташка.

Плотность древесины имеет большое практическое значение. Древесину с высокой плотностью (самшит, граб, бук, клен, груша) особенно ценят на производстве за ее прочность и хорошую обрабатываемость.

3.4. Теплопроводность, звукопроводность, электропроводность древесины

Теплопроводностью древесины называется ее способность проводить тепло через свою толщину от одной поверхности к другой. Теплопроводность сухой древесины незначительна, что объясняется пористостью ее строения. Межклеточные и внутриклеточные пространства в ней заполнены воздухом, который является плохим проводником тепла. Благодаря низкой теплопроводности древесина получила широкое распространение как стеновой материал, а также как материал для изготовления ручек утюгов, чайников и т. п.

Плотная древесина проводит тепло несколько лучше рыхлой. Влажность древесины повышает ее теплопроводность, так как вода по сравнению с воздухом является лучшим проводником тепла. Кроме того, теплопроводность зависит от плотности древесины, направления ее волокон и породы. Например, теплопроводность древесины вдоль волокон примерно вдвое больше, чем поперек.

Звукопроводностью называется свойство материала проводить звук; она характеризуется скоростью распространения звука в материале. В древесине быстрее всего звук распространяется вдоль волокон. Это отрицательное свойство древесины требует при устройстве деревянных перегородок, полов и потолков применения звукоизолирующих материалов. Звукопроводность древесины и ее способность резонировать (усиливать звук без искажения тона) широко используются при изготовлении музыкаль-

ных инструментов. Повышенная влажность древесины понижает ее звукопроводность.

Электропроводность древесины характеризуется ее сопротивлением прохождению электрического тока. Электропроводность древесины зависит от породы, температуры, направления волокон и от влажности. Электропроводность сухой древесины незначительна. Это позволяет применять ее в качестве изоляционного материала. Электрическое сопротивление древесины вдоль волокон меньше в несколько раз, чем поперек волокон. Повышение температуры древесины приводит к уменьшению ее сопротивления примерно в 2 раза.

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

4.1. Общие понятия о механических свойствах и испытаниях древесины

Механические свойства характеризуют способность древесины сопротивляться воздействию внешних сил (нагрузок). По характеру действия сил различают нагрузки статические, динамические, вибрационные и долговременные. Статическими называют нагрузки, возрастающие медленно и плавно. Динамические или ударные нагрузки действуют на тело мгновенно и в полную силу. Вибрационными называют нагрузки, у которых меняются и величина, и направление. Долговременные нагрузки действуют в течение очень продолжительного времени.

Под воздействием внешних сил в древесине нарушается связь между отдельными ее частицами и изменяется форма. Из-за сопротивления древесины внешним нагрузкам в ней возникают внутренние силы; если эти силы отнести к единице площади сечения, то получим напряжение.

Деформацией называется изменение формы и размеров древесины под действием внешних сил. Деформации, исчезающие после прекращения действия силы, называются упругими, а сохраняющиеся после снятия нагрузки – остаточными.

К механическим свойствам древесины относятся прочность, твердость, деформативность, ударная вязкость.

4.2. Прочность древесины

Прочностью называется способность материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих под действием нагрузки или других факторов. Прочность древесины зависит от направления действующей нагрузки, породы дерева, плотности, влажности, наличия пороков.

В соответствии с действиями механических сил различают прочность древесины на растяжение, сжатие, изгиб, скалывание.

Предел прочности при растяжении. Средняя величина предела прочности при растяжении вдоль волокон для всех пород составляет 1300 кгс/см^2 . На прочность при растяжении вдоль волокон оказывает большое влияние строение древесины.

Прочность древесины при растяжении поперек волокон очень мала и в среднем составляет $1/20$ часть от предела прочности при растяжении вдоль волокон, т. е. 65 кгс/см^2 . Поэтому древесина почти не применяется в деталях, работающих на растяжение поперек волокон.

Предел прочности при сжатии. Различают сжатие вдоль и поперек волокон. При сжатии вдоль волокон деформация выражается в небольшом укорочении образца. Разрушение при сжатии начинается с продольного изгиба отдельных волокон, которое во влажных образцах и образцах из мягких и вязких пород проявляется как смятие торцов и выпучивание боков, а в сухих образцах и в твердой древесине вызывает сдвиг одной части образца относительно другой. Средняя величина предела прочности при сжатии вдоль волокон для всех пород составляет 500 кгс/см^2 . Прочность древесины при сжатии поперек волокон ниже, чем вдоль волокон примерно в 8 раз.

Предел прочности при статическом изгибе. При изгибе, особенно при сосредоточенных нагрузках, верхние слои древесины испытывают напряжения сжатия, а нижние – растяжения вдоль волокон. Примерно посередине высоты элемента проходит плоскость, в которой нет ни напряжения сжатия, ни напряжения растяжения. Эту плоскость называют нейтральной; в ней возникают максимальные касательные напряжения. Предел прочности при сжатии меньше, чем при растяжении, поэтому разрушение начинается в сжатой зоне.

Видимое разрушение начинается в растянутой зоне и выражается в разрыве крайних волокон.

Предел прочности древесины зависит от породы и влажности. В среднем для всех пород прочность при изгибе составляет 1000 кгс/см^2 , т. е. в 2 раза больше предела прочности при сжатии вдоль волокон.

Прочность древесины при сдвиге. Внешние силы, вызывающие перемещение одной части детали по отношению к другой, называют сдвигом. Различают три случая сдвига: скалывание вдоль волокон, скалывание поперек волокон и перерезание.

Прочность при скалывании вдоль волокон составляет $1/5$ часть от прочности при сжатии вдоль волокон.

Предел прочности при скалывании поперек волокон примерно в 2 раза меньше предела прочности при скалывании вдоль волокон. Прочность древесины при перерезании поперек волокон в 4 раза выше прочности при скалывании вдоль волокон.

4.3. Твердость, деформативность и ударная вязкость древесины

Твердость. Твердостью называется способность древесины сопротивляться проникновению в нее твердых тел.

По степени твердости все древесные породы можно разделить на три группы:

- мягкие (торцовая твердость 385 кгс/см^2 и менее) – сосна, ель, кедр, пихта, тополь, липа, осина, ольха;
- твердые (торцовая твердость от 386 до 825 кгс/см^2) – лиственница сибирская, береза, бук, вяз, ильм, клен, яблоня, ясень;
- очень твердые (торцовая твердость более 825 кгс/см^2) – акация белая, береза железная, граб, самшит.

Твердость древесины имеет существенное значение при обработке ее режущими инструментами: фрезеровании, пилении, а также в тех случаях, когда она подвергается истиранию при устройстве полов, лестниц, перил.

Деформативность. Деформативностью называется способность древесины изменять свои размеры и форму при воздействии усилий. Показателями деформативности служат модули

упругости, коэффициенты поперечной деформации, модули сдвига древесины. В условиях непродолжительного воздействия нагрузок древесина ведет себя как упругое тело. Способность древесины деформироваться характеризует ее жесткость.

Величины модулей упругости при сжатии, растяжении вдоль волокон, а также при изгибе с нагружением в двух точках практически не различаются. Для древесины разных пород модуль упругости колеблется в пределах 100–150 тыс. кгс/см². Модуль упругости при растяжении и сжатии поперек волокон значительно меньше модулей при сжатии и растяжении вдоль волокон: для лиственных пород в 20 раз, а для хвойных – в 25 раз.

Ударная вязкость. Ударная вязкость, характеризующая способность древесины поглощать работу при ударе без разрушения, определяется при испытаниях на изгиб. Чем больше величина работы, потребной для излома образца древесины, тем выше его вязкость. Если древесина хрупкая, то для разрушения образца необходимо затратить меньшую величину работы.

Древесина лиственных пород в среднем имеет ударную вязкость в 2 раза (мягкие в 1,5 раза, твердые в 2,5 раза) большую, чем у хвойных пород.

4.4. Технологические свойства древесины

Способность древесины удерживать металлические крепления. При вбивании гвоздя в древесину перпендикулярно волокнам они частично перерезаются, частично изгибаются, раздвигаются и оказывают на боковую поверхность гвоздя давление, которое вызывает трение, удерживающее гвоздь в древесине.

При испытании древесины определяют усилие, необходимое для выдергивания гвоздя или шурупа данных размеров. Величина сопротивления выдергиванию зависит от направления по отношению к волокнам, породы древесины и плотности. Чем больше плотность древесины, тем выше сопротивление выдергиванию гвоздя или шурупа.

Удельное сопротивление древесины выдергиванию гвоздей и шурупов определяют в соответствии с ГОСТ 16483.33–77.

Износостойкость древесины. Износостойкость древесины характеризуется ее способностью противостоять износу, т. е. раз-

рушению в процессе трения. Метод испытания создает условия, подобные реальным условиям истирания полов и настилов (ГОСТ 16483.39–81). Для этих испытаний используют специальную машину, которая обеспечивает истирание древесины при возвратно-поступательном движении образца с одновременным его поворотом.

Износ древесины с боковой поверхности больше, чем с торцевой. Износ уменьшается с повышением твердости и плотности древесины. Влажная древесина более подвержена износу.

Сопротивление древесины раскалыванию. Раскалываемостью называют способность древесины под действием клина разделяться на части вдоль волокон. Раскалывание древесины по действию силы и характеру разрушения напоминает растяжение поперек волокон и объясняется малым сцеплением волокон по длине ствола. Это свойство древесины имеет практическое значение, так как ряд сортиментов древесины заготавливают путем раскалывания (клепка, обод, спицы, дрань).

В настоящее время испытания на раскалывание теряют свое значение, так как большая часть колотых сортиментов заменяется пилеными.

5. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ИСПЫТАНИЙ ДРЕВЕСИНЫ

Так как древесине присуща неоднородность строения, показатели ее свойств определяют на двух уровнях: на малых чистых образцах, свободных от пороков, и на образцах, соизмеримых с элементами конструкций и содержащих пороки. Испытания на малых образцах выполняют для сопоставления пород, изучения влияния различных технологических факторов (температуры, влажности, ионизирующих излучений и т. д.) на показатели физико-химических свойств древесины. Испытания на образцах натуральных размеров необходимы для контроля соответствия показателей пиломатериалов техническим условиям. Без результатов таких испытаний невозможно обеспечить эффективное использование массивной древесины в строительстве, они нужны для проектирования деревянных конструкций и создания автоматизированных средств неразрушающего контроля качества пиломатериалов.

Чтобы обеспечить сопоставимость результатов измерений, испытания должны проводиться по общей методике в соответствии с требованиями ГОСТов на методы испытания малых чистых образцов древесины, пиломатериалов и заготовок, регламентирующих форму и размеры образцов, правила их отбора и подготовки, процедуру испытания и последовательность обработки данных.

Форма и размеры образцов. Для характеристики свойств древесины как однородного материала, без пороков, для испытаний выбирают образцы небольшого сечения, чтобы избежать влияния кривизны годичных слоев. В то же время образцы должны включать в себя достаточное число характерных для испытываемой породы анатомических элементов (не меньше 4 или 5 годичных слоев). Поэтому испытания проводят на образцах поперечным сечением 20×20 мм (рис. 5.1).

Отбор и подготовка образцов. Образцы для определения показателей свойств чистой древесины круглых лесоматериалов, пиломатериалов и заготовок отбирают в соответствии с техническими условиями или другой документацией, утвержденной в установленном порядке.

Из отобранных единиц выборки (деревьев, кряжей, пиломатериалов и т. д.) вырезают заготовки, размеры которых позволяют изготовить образцы нужной формы. Если заготовка для образцов окажется непригодной, берут другую из этой единицы отбора. Образцы из высушенных заготовок кондиционируют при температуре (20 ± 2) °С и относительной влажности воздуха (65 ± 5) % до достижения нормализованной влажности.

Общие требования к проведению испытаний. При испытаниях температура в помещении должна быть (20 ± 2) °С, влажность воздуха (65 ± 5) %. Перед испытаниями в помещении с другой температурой и влажностью воздуха необходимо проводить кондиционирование или хранить образцы в герметичной упаковке. После испытаний определяют влажность и при необходимости плотность образцов. Рекомендуется определять влажность на пробах, вырезанных из испытанных образцов.

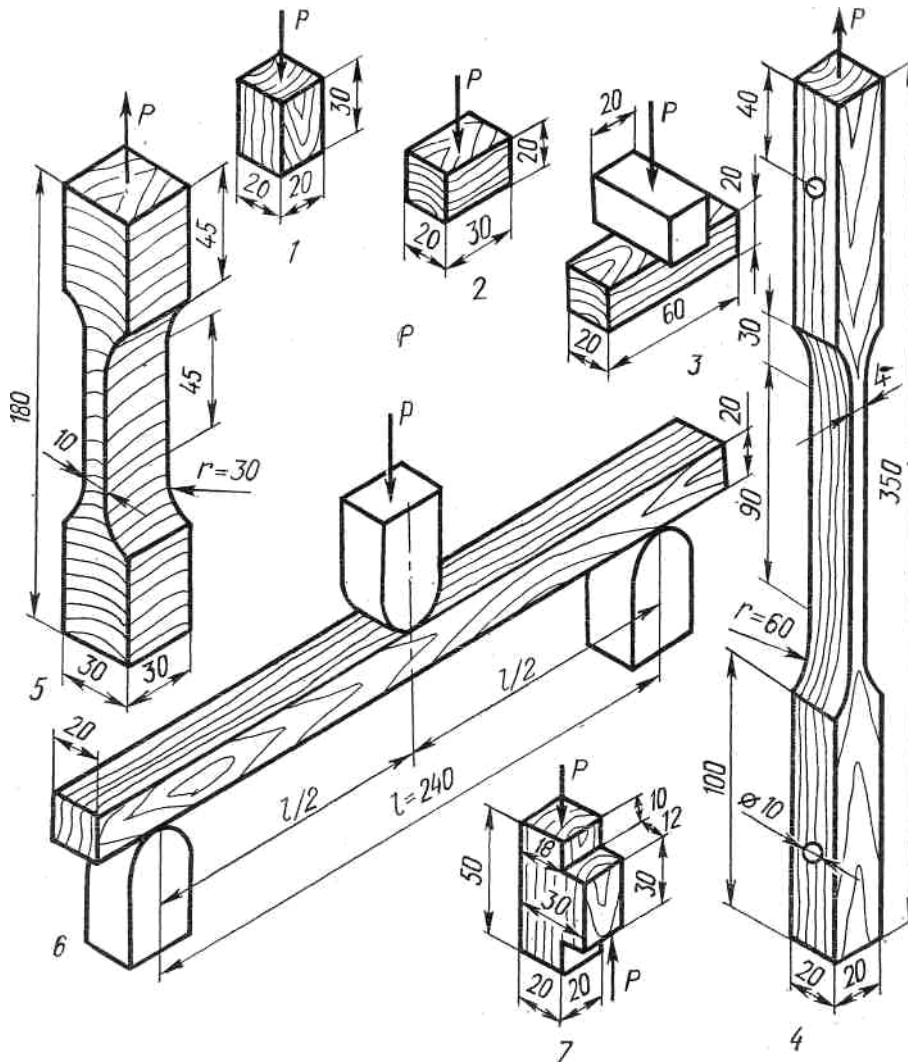


Рис. 5.1. Образцы и схемы основных испытаний древесины на прочность:

- 1 – сжатие вдоль волокон; 2 – сжатие поперек волокон;
 3 – местное смятие поперек волокон; 4 – растяжение вдоль волокон;
 5 – растяжение поперек волокон (радиальное);
 6 – статический изгиб; 7 – скалывание вдоль волокон (тангенциальное)

6. ПОРОКИ ДРЕВЕСИНЫ

Пороки древесины возникают в процессе роста дерева или в древесине при нарушении технологии ее хранения и переработки, могут появляться при неправильной эксплуатации деревянных изделий и сооружений.

Номенклатура пороков разделена на девять групп: 1) сучки; 2) трещины; 3) пороки формы ствола; 4) пороки строения древесины; 5) химические окраски; 6) грибные поражения; 7) биологические повреждения; 8) инородные включения, механические повреждения и пороки обработки; 9) покоробленность. В каждую группу входит несколько видов пороков, некоторые из которых подразделены на разновидности.

6.1. Сучки

Сучок – основание ветви, заключенное в древесине ствола.

Виды сучков в круглых лесоматериалах: по степени зарастания – открытый (выходит на боковую поверхность сортимента) и заросший (обнаруживается по вздутиям и другим следам зарастания на боковой поверхности сортимента).

Открытые сучки в пиломатериалах и шпоне делятся по форме разреза на поверхности на несколько основных разновидностей (рис. 6.1).

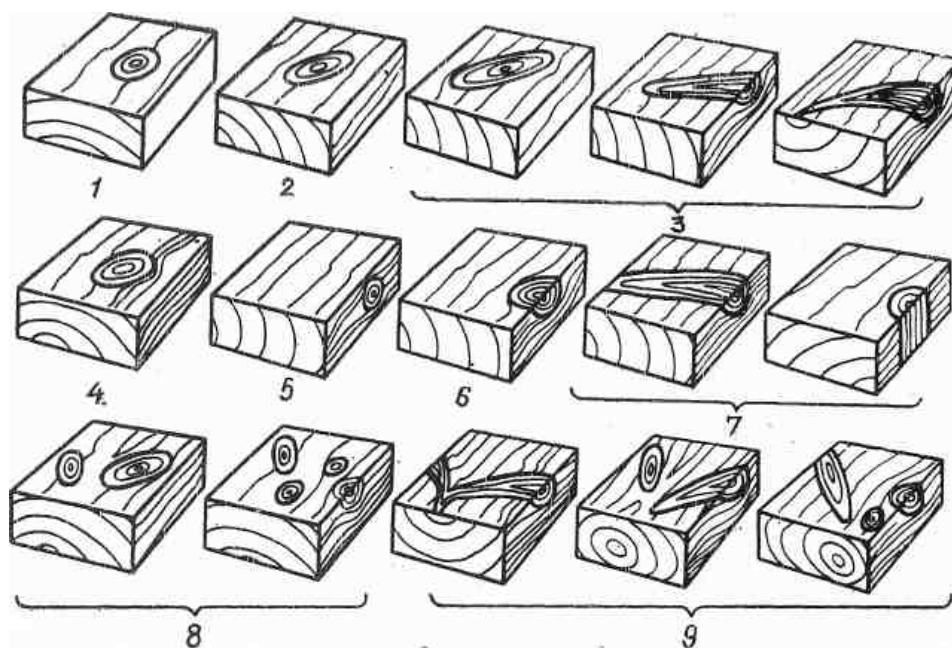


Рис. 6.1. Основные разновидности сучков:
 1 – круглый; 2 – овальный; 3 – продолговатые;
 4 – пластевой; 5 – кромочный; 6 – ребровый;
 7 – сшивные; 8 – групповые; 9 – разветвленные

Сучки часто ухудшают внешний вид древесины, нарушают однородность строения, а иногда и ее целостность, вызывают искривления волокон и годичных слоев, затрудняют механическую обработку. Сучки, особенно ребровые, продолговатые, сшивные и групповые, снижают прочность пилопродукции и деталей при растяжении вдоль волокон и изгибе. При поперечном сжатии и продольном скалывании сучки повышают прочность древесины.

6.2. Трещины

Трещина – нарушение целостности древесины, вызванное внутренними напряжениями. Основные типы трещин представлены на рис. 6.2.

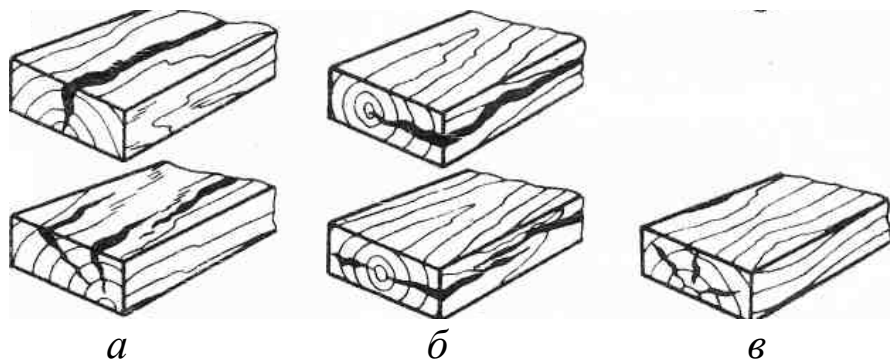


Рис. 6.2. Основные разновидности трещин:
а – пластевые; *б* – кромочные; *в* – торцовые

Трещины, особенно сквозные, нарушают целостность лесоматериалов и в некоторых случаях снижают их механическую прочность.

6.3. Пороки формы ствола

Различают следующие пороки формы ствола: сбежистость, закомелистость (рис. 6.3, 1), овальность, нарост (рис. 6.3, 2), кривизну.

Данные пороки затрудняют использование круглых лесоматериалов по назначению, увеличивают количество отходов при

распиловке и лущении круглых лесоматериалов и раскрое пилопродукции.

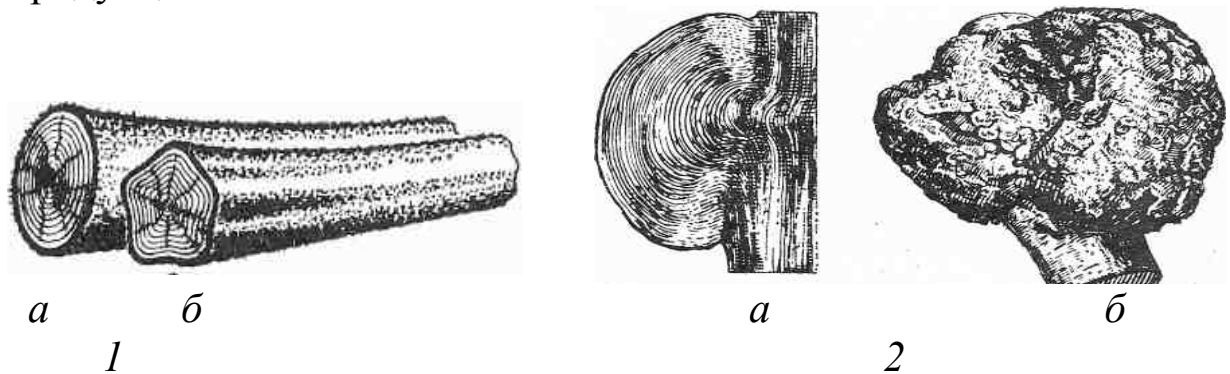


Рис. 6.3. Некоторые пороки формы ствола:
 1 – закомелистость: а – округлая; б – ребристая;
 2 – наросты: а – гладкий нарост на сосне;
 б – бугристый нарост (кап) на карельской березе

6.4. Пороки строения древесины

Основные пороки строения древесины включают: наклон волокон, свилеватость, завиток, кармашек, сердцевину, сухобокость, засмолок, ложное ядро и др.

Наклон волокон – отклонение направления волокон от продольной оси лесоматериала. Встречается у всех пород, очень распространенное природное явление.

Наклон волокон увеличивает прочность древесины при раскалывании, но затрудняет ее механическую обработку, снижает способность к гнущю, уменьшает прочность пиломатериалов и деталей на растяжение вдоль волокон и изгиб.

Свилеватость – извилистое или беспорядочное расположение волокон древесины. Встречается у всех древесных пород, преимущественно лиственных.

Свилеватость снижает прочность древесины на растяжение, сжатие и изгиб, но повышает прочность при скалывании, сопротивление раскалыванию и увеличивает ударную вязкость, затрудняет механическую обработку древесины.

Завиток (рис. 6.4, а) – местное искривление годичных слоев около сучков. Завиток снижает прочность древесины на сжатие и растяжение вдоль волокон и статический изгиб, а также ударную вязкость при изгибе преимущественно мелких сортиментов.

Кармашек (рис. 6.4, б) – полость (кармашек) внутри или между годичными слоями, заполненная смолой. Вытекающая из кармашков смола портит поверхность изделий и усложняет их лицевую отделку и облицовывание. В мелких деталях кармашки могут снижать прочность древесины.

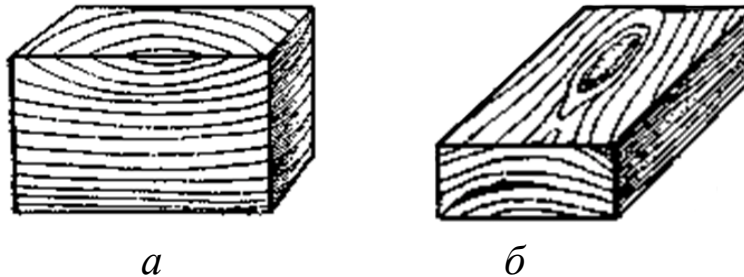


Рис. 6.4. Некоторые пороки строения древесины:
а – завиток; б – кармашки

Сердцевина – узкая центральная часть ствола, состоящая из рыхлой ткани бурого или более светлого, чем у окружающей древесины, цвета. В пиломатериалах присутствие сердцевины нежелательно из-за многочисленных заросших сучков вокруг нее. Сортименты с сердцевиной, как правило, растрескиваются.

Сухобокость – участок поверхности ствола, омертвевший в процессе роста дерева в результате повреждений коры растущего дерева. Сухобокость искажает правильность формы круглых лесоматериалов, вызывает местное искривление годичных слоев, может уменьшить выход пиломатериалов и шпона.

Засмолок – участок древесины хвойных пород, обильно пропитанный смолой. Засмоленная древесина более плотная и стойкая к загниванию, обладает значительно меньшими водопроницаемостью, влаго- и водопоглощением, имеет пониженную ударную вязкость, плохо отделяется и склеивается.

Ложное ядро (рис. 6.5) – темная, неравномерно окрашенная зона, не отличающаяся по твердости от окружающей древесины. Портит внешний вид, характеризуется плохой проницаемостью, пониженной прочностью на растяжение вдоль волокон и повышенной хрупкостью.

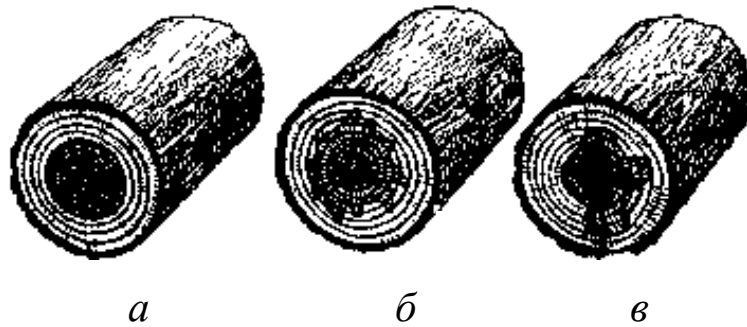


Рис. 6.5. Ложное ядро: *а* – округлое; *б* – звездчатое; *в* – лопастное

6.5. Химические окраски

Химическая окраска древесины – ненормально окрашенные равномерные по цвету участки в срубленной древесине. Делятся на продубину, дубильные потеки и желтизну. Расположены обычно в поверхностных слоях древесины (1–5 мм). При высушивании древесины химическая окраска в большей или меньшей степени выцветает.

Химические окраски изменяют цвет и блеск древесины, но остальные ее свойства остаются прежними. При интенсивной окраске ухудшается внешний вид древесины.

6.6. Грибные поражения

Грибные ядровые пятна (полосы) – ненормально окрашенные участки ядра, образующиеся в растущих деревьях всех пород под воздействием деревоокрашивающих и (или) дереворазрушающих грибов. Прочность при статической нагрузке почти не изменяется, однако ударная вязкость уменьшается (на 30–40 %). Водопоглощение и водопроницаемость становятся больше.

Плесень на древесине – грибница плесневых грибов на поверхности древесины в виде отдельных пятен или сплошного налета. Плесень не влияет на механические свойства древесины, но ухудшает внешний вид, способна переходить на продукты питания и изделия, разрушает животные клеи.

Гниль (рис. 6.6) – отличающиеся по цвету участки древесины без изменения твердости, образующиеся под воздействием дереворазрушающих грибов. Различают гнили по цвету и структуре поражения: пеструю ситовую, бурую трещиноватую и белую волокнистую; по типам: заболонную (твердую и мягкую), ядровую и наружную трухлявую.

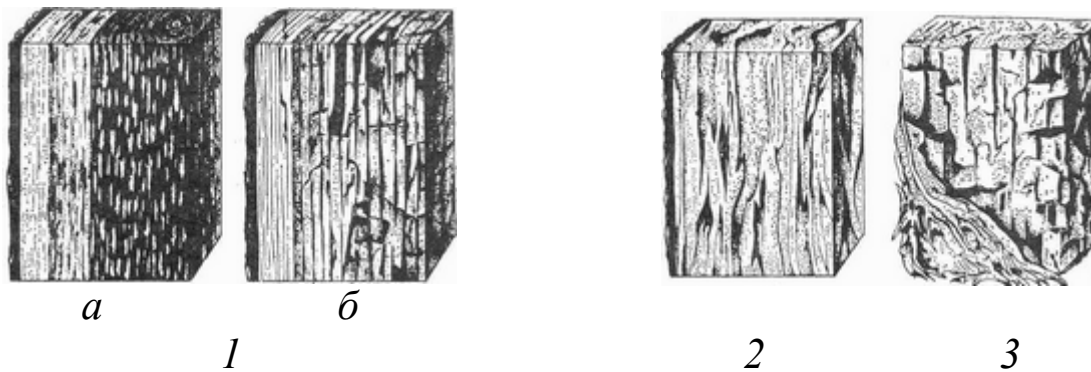


Рис. 6.6. Грибные поражения:

- 1 – ядровые гнили: *a* – пестрая ситовая; *б* – бурая трещиноватая;
 2 – заболонная гниль с рисунком, напоминающим мрамор;
 3 – наружная трухлявая гниль

6.7. Биологические повреждения

Червоточина (рис. 6.7) – ходы и отверстия, проделанные в древесине насекомыми, в основном их личинками. Встречается при нарушении технологии хранения в свежезаготовленных лесоматериалах, преимущественно хвойных, а также в сухостойных и ослабленных деревьях в лесу.

Различают червоточины по глубине: поверхностную, неглубокую и глубокую; по размеру отверстия: некрупную, крупную и сквозную (выходящую на две противоположные стороны).

Поверхностная червоточина не влияет на механические свойства древесины. Неглубокая и глубокая червоточины нарушают целостность древесины и снижают ее механические свойства.

Повреждение древесины паразитными растениями – отверстия в древесине пилопродукции или детали, проделанные при-

сосками паразитных растений, которые нарушают целостность древесины и снижают ее механические свойства.

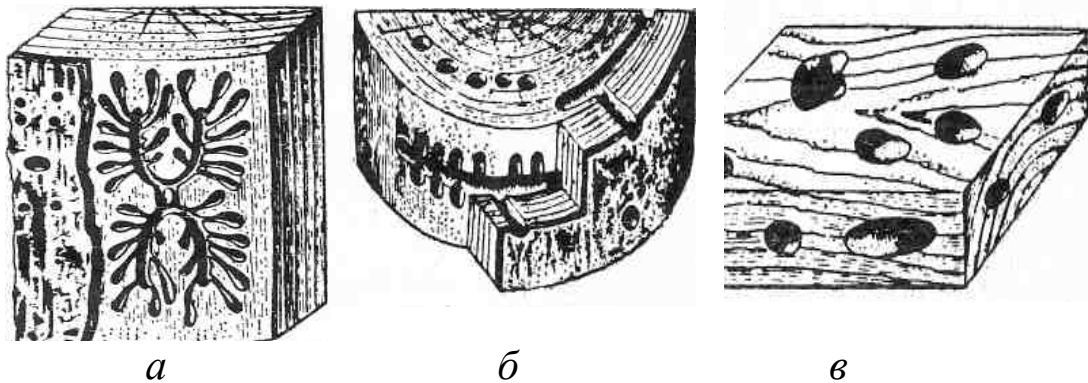


Рис. 6.7. Червоточина:

а – поверхностная; *б* – глубокая в круглых лесоматериалах;
в – глубокая в пиломатериалах

6.8. Инородные включения, механические повреждения и пороки механической обработки

Инородное включение – присутствующее в лесоматериалах постороннее тело недревесного происхождения (камень, гвоздь, металлический осколок). Затрудняет обработку древесины, нередко бывает причиной повреждения режущих инструментов.

Обугленность древесины – обгорелые и обуглившиеся участки поверхности лесоматериалов, появившиеся в результате повреждения огнем. Затрудняет использование, увеличивает количество отходов при распиловке и раскрое пиломатериалов.

Обдир коры – участок поверхности круглого лесоматериала без коры. Снижает стойкость свежезаготовленных круглых лесоматериалов к грибным поражениям и растрескиванию.

Обзол – часть боковой поверхности бревна, сохранившаяся на обрезном пиломатериале или детали. Уменьшает фактическую ширину сортимента, затрудняет использование пиломатериалов, увеличивает количество отходов при их раскрое.

Волнистость поверхности древесины – неплоский пропилен или неровности на поверхности лесоматериала в виде закономерно чередующихся возвышений и впадин дугообразного профиля.

Ворсистость поверхности древесины – наличие на поверхности лесоматериала часто расположенных, неполностью отделенных волокон древесины.

Задир – частично отделенный и приподнятый над поверхностью лесоматериала участок древесины с зацепистыми краями. Сопутствует сучкам, наклону волокон, свилеватости и завиткам. Часто наблюдается в местах выхода режущего инструмента из обрабатываемого лесоматериала.

Вмятины на древесине – углубления на поверхности лесоматериала, образованные в результате местного смятия древесины.

Непрофрезеровка древесины – необработанный участок поверхности пилопродукции или детали при фрезеровании.

Гребешок – участок необработанной поверхности сортимен-та в виде узкой полосы, выступающей над обработанной поверхностью, образующийся в результате дефекта режущей кромки инструмента.

Прошлифовка – удаление при шлифовании части древесины ниже обрабатываемой поверхности.

Недошлифовка – нешлифованный участок поверхности лесоматериала при шлифовании.

Ожог древесины – участок поверхности древесины, потемневший в результате частичного обугливания при действии высоких температур, возникающих при повышенном трении режущих инструментов о древесину.

Волнистость, ворсистость и др. являются показателями качества обработки, определяют шероховатость поверхности, уменьшают фактические размеры материала и затрудняют отделку, склеивание и облицовывание материала. Задир, запил, заруб нарушают целостность древесины, ухудшают внешний вид, уменьшают фактические размеры материала, при больших их размерах снижается механическая прочность материала, затрудняется его использование. Заусенец, гребешок являются показателями обработки резанием. Непрофрезеровка, недошлифовка, прошлифовка ухудшают внешний вид, нарушают правильность формы сорти-мента, в результате чего требуется дополнительная обработка. Вмятина, ожог ухудшают внешний вид деталей и изделий.

6.9. Покоробленность

Покоробленность – изменение формы пиломатериала при сушке или увлажнении и механической обработке в результате анизотропии усушки (разбухания), а также внутренних напряжений в древесине. Различают продольную по пласти (по длине в плоскости, перпендикулярной пласти), простую (продольную по пласти с одним изгибом), сложную (продольную по пласти с несколькими изгибами), продольную по кромке (по длине в плоскости, параллельной пласти) и поперечную покоробленности (по ширине), а также крыловатость (спиральную покоробленность по длине).

Покоробленность снижает качество лесоматериалов и изделий из древесины, затрудняет их использование, осложняет обработку и раскрой, увеличивает количество отходов.

7. ИСКУССТВЕННЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ

7.1. Бетоны

Бетоном называют искусственный каменный материал, получаемый в результате твердения правильно подобранной, тщательно перемешанной и уплотненной смеси вяжущего вещества, воды, заполнителей и в необходимых случаях – специальных добавок. Смесь из указанных выше компонентов до начала ее затвердевания называют *бетонной смесью*. Бетонная смесь представляет собой пластично-вязкую массу, сравнительно легко принимающую любую форму и затем самопроизвольно переходящую в камневидное состояние. Таким способом легко получают конструкции и изделия любой заданной формы.

Классифицируют бетоны по следующим основным признакам: назначению, средней плотности, виду вяжущего, виду заполнителей, по структуре и условиям твердения.

По назначению различают следующие бетоны:

- *обычный или общестроительный* – бетон, к которому не предъявляют особых требований;

- *гидротехнический* – бетон, применяемый для возведения гидротехнических сооружений (плотин, водорегулирующих, водозаборных и других сооружений);

- *бетоны для транспортного строительства* предназначены для возведения мостов, виадуков, путепроводов, эстакад, водопропускных труб и регулиционных сооружений на железных и автомобильных дорогах;

- *дорожный* – бетон, применяемый в покрытиях дорог, аэродромов и других подобных сооружениях;

- *жаростойкие бетоны* применяют для изготовления конструкций, которые в условиях эксплуатации подвергаются постоянному или периодическому воздействию температур выше 200 °С;

- *конструкционно-теплоизоляционные бетоны* предназначены для железобетонных конструкций, к которым предъявляют требования как по несущей способности, так и по теплоизоляционным свойствам;

- *коррозионностойкие* – бетоны, способные в условиях эксплуатации противостоять действию агрессивных сред.

В зависимости от средней плотности различают:

- *особо тяжелые бетоны* со средней плотностью более 2500 кг/м³, изготавливают на особо тяжелых заполнителях (магнетит, лимонит, чугунная дробь, обрезки стали). Эти бетоны применяют для изготовления специальных конструкций, например при сооружении зданий атомных электростанций для защиты от радиоактивного излучения;

- *тяжелые бетоны* со средней плотностью 2000...2500 кг/м³, изготавливают на плотном песке и крупном заполнителе из плотных горных пород и используют во всех несущих конструкциях;

- *легкие бетоны* со средней плотностью 500...2000 кг/м³, изготавливают на пористом крупном заполнителе и пористом или плотном мелком заполнителе. Их используют в основном для производства ограждающих или несущих конструкций;

- *особо легкие бетоны (ячеистые)* со средней плотностью менее 500 кг/м³, изготавливают на основе вяжущего вещества и парообразователя. Применяют в качестве теплоизоляционного материала в виде плит, скорлуп и других изделий.

По виду вяжущего бетоны подразделяют:

- *на цементные бетоны*, их изготавливают на портландцементе и его разновидностях, на глиноземистом цементе. Они обладают универсальными свойствами. Их применяют для несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений;

- *известковых вяжущих*, изготавливают на извести, кварцевом песке, шлаке, золе, активных минеральных добавках. Бетоны на извести и кремнеземистом компоненте, твердеющих при автоклавной обработке, называют силикатными. Наибольшее распространение имеют силикатные бетоны на кварцевом песке. Применяют их в промышленности и гражданском строительстве для изготовления стеновых блоков, панелей, облицовочных плит; ячеистые бетоны, кроме того, применяют для устройства теплоизоляции;

- *гипсовые бетоны*, изготавливают на основе гипсовых вяжущих: строительного, высокопрочного (технического), высокообжигового. Эти бетоны имеют низкую водостойкость. Их применяют в основном для изготовления перегородочных плит и панелей, эксплуатируемых в сухой среде. Более водостойки бетоны на гипсоцементно-пуццолановом вяжущем, которые применяют для изготовления сантехкабин и даже для наружных стен;

- *шлакощелочные бетоны*, изготавливают на шлакощелочных вяжущих – доменном гранулированном или электротермофосфорном стекле и др. Применяют их для изготовления любых конструкций;

- *полимерные бетоны*, изготавливают на полимерных связующих – полиэфирных, эпоксидных и других смолах. Их применяют для эксплуатации в агрессивных средах. Бетоны на смешанном связующем называют полимерцементными; бетоны, пропитанные полимерами, – бетонополимерами.

По виду применяемых заполнителей в бетонах они бывают:

- *на плотных заполнителях*, изготавливают на заполнителях из горных пород или отходов промышленности со средней плотностью более 2000 кг/м^3 . Например, гранитный щебень, металлургические шлаки;

- *пористых заполнителях*, изготавливают на заполнителях со средней плотностью менее 2000 кг/м^3 . Это специально изго-

тавливаемые заполнители – керамзитовый гравий и песок, аглопоритовый щебень и песок и др. или получаемые из горных пористых пород – туфов, известняков и др. К ним относят также бетоны с крупными и плотными мелкими заполнителями, бетоны на органических заполнителях (арболиты);

- *специальных заполнителях*, изготавливают на заполнителях, получаемых из материалов, придающих бетонам определенные свойства. Так, заполнители из железных руд лимонита, гематита, имеющие повышенную плотность, поглощают радиоактивные лучи. Их применяют в бетонах для защиты от радиоактивных излучений. Жаростойкие бетоны изготавливают, используя бой керамических изделий, шамотный щебень и песок.

По крупности зерен заполнителей различают бетоны:

- *мелкозернистые*, размеры зерен крупного заполнителя не крупнее 10 мм;
- *крупнозернистые*, размеры зерен крупного заполнителя более 10 мм.

В зависимости от характера структуры выделяют следующие виды бетонов:

- *бетоны плотной (слитной) структуры*, в которых пространство между зернами заполнителей полностью занято затвердевшим вяжущим веществом. Допустимый объем межзерновых пустот в уплотненной бетонной смеси не превышает 6 %;
- *крупнопористые бетоны* (беспесчаные или малопесчаные), в которых значительная часть объема межзерновых пустот остается не занятой мелким заполнителем и затвердевшим вяжущим;
- *поризованные бетоны*, в которых пространство между зернами заполнителей занято вяжущим веществом, поризованным пенообразующими или газообразующими добавками;
- *ячеистые бетоны* – бетоны с искусственно созданными ячейками-порами, состоящие из смеси вяжущего вещества, токодисперсного кремнеземистого компонента и порообразующей добавки.

По условиям твердения бетоны подразделяют:

- на бетоны *естественного твердения*, твердеющие при температуре 15...20 °С и атмосферном давлении;

- бетоны, подвергнутые с целью ускорения *твердения тепловой обработке* (70...90 °С) при атмосферном давлении;
- бетоны, твердеющие в автоклавах при температуре 175...200 °С и давлении пара 0,9...1,6 МПа.

Структура бетона. Образуется в результате затвердевания (схватывания) бетонной смеси и последующего твердения бетона. Структура бетона определяет его свойства.

После приготовления и уплотнения бетонной смеси в результате гидратации цемента происходит медленное упрочнение свежееуложенной смеси, однако какое-то время она еще сохраняет способность к значительным пластическим деформациям. После образования заметного количества новообразований их частицы сближаются и начинается переход коагуляционной структуры в кристаллизационную с резким возрастанием прочности. Бетонная смесь затвердевает, возникает твердая структура бетона.

Продолжительность периода формирования структуры бетона и ее свойства зависят от состава бетона и применяемых материалов. Определяющее значение имеют вид цемента и химические добавки. Применение быстротвердеющих цементов, добавок – ускорителей твердения, уменьшение водоцементного отношения и повышение жесткости или температуры бетонной смеси ускоряют формирование структуры бетона. Это имеет большое значение при заводском производстве железобетонных изделий. Схватывание бетонной смеси ускоряется также при увеличении содержания заполнителя и уменьшении его крупности.

Введение в бетонную смесь некоторых пластифицирующих добавок, например СДБ, или специальных добавок – замедлителей схватывания замедляет формирование структуры бетона. Этот прием используют при необходимости перевозки бетонной смеси на дальние расстояния или при бетонировании в жаркую погоду. Всякое воздействие на бетонную смесь с целью ее формоизменения или уплотнения должно заканчиваться до начала схватывания. Воздействие в более поздние сроки может привести к необратимому нарушению еще слабой первоначальной структуры бетона.

Образовавшаяся после затвердевания бетонной смеси структура тяжелого бетона представляет собой цементный камень с втопленными в него зернами заполнителя, имеющий мно-

жество пор и пустот разных размеров и происхождения. В бетоне различают макроструктуру, представленную системой щебень – цементно-песчаный раствор; микроструктуру, показывающую строение системы песок – цементный камень, и микроструктуру – тонкое строение цементного камня и заполнителя.

Различают следующие виды макро- и мезоструктур бетона:

- зерна заполнителя значительно раздвинуты цементным камнем и как бы «плавают» в нем;
- цементный камень заполняет поры между зернами заполнителя и лишь незначительно раздвигает их, покрывая тонким слоем;
- зерна заполнителя контактируют друг с другом через тонкую прослойку цементного камня, который лишь частично заполняет пустоты между его зернами.

Наиболее оптимальной является структура второго вида, которая обеспечивает высокую плотность и заданную прочность бетона при минимальном расходе цемента (рис. 7.1).

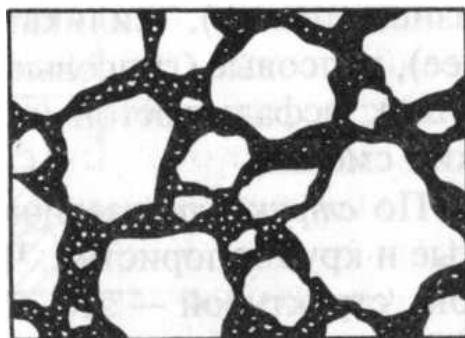


Рис. 7.1. Структура бетона

Микроструктура цементного камня в бетоне состоит из новообразований и непрореагировавших зерен цемента и микропор различных размеров. С увеличением возраста бетона его микроструктура в результате продолжающейся гидратации цемента изменяется: возрастает количество новообразований цементного камня, уменьшается его пористость, изменяется распределение пор по размерам. Изменение структуры бетона сопровождается изменением его свойств: бетон становится прочнее, он твердеет.

Прочностные характеристики бетона. Тяжелый бетон – основной конструкционный строительный материал, поэтому

оценке его прочностных свойств уделяется большое внимание. Прочностные характеристики бетона определяют строго в соответствии с требованиями стандартов. Используется несколько показателей, характеризующих прочность бетона. Неоднородность бетона как материала учитывается в основной прочностной характеристике – классе бетона.

Прочность. Как и у всех каменных материалов, предел прочности бетона при сжатии значительно (в 10...15 раз) выше, чем при растяжении и изгибе. Поэтому в строительных конструкциях бетон, как правило, работает на сжатие. Когда говорят о прочности бетона, подразумевают его прочность на сжатие. В остальных случаях оговаривается вид прочности.

Бетон на портландцементе набирает прочность постепенно. При нормальной температуре и постоянном сохранении влажности рост прочности бетона продолжается длительное время, но скорость набора прочности со временем затухает (рис. 7.2).

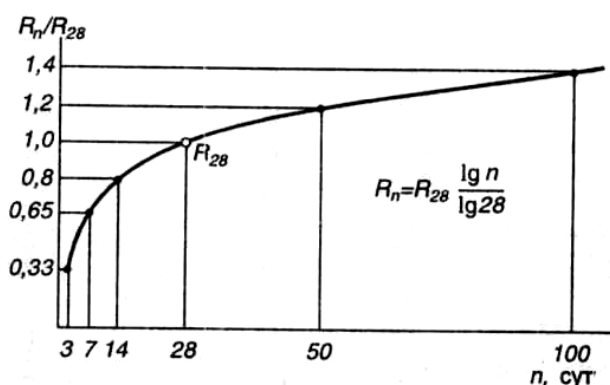


Рис. 7.2. Изменение прочности бетона во времени в условиях нормального твердения (R_{28} – марочная прочность бетона; n – время твердения, сут)

Прочность бетона принято оценивать по среднему арифметическому значению результатов испытания образцов данного бетона через 28 сут нормального твердения. Для этого используют образцы-кубы размером 150×150×150 мм, изготовленные из рабочей бетонной смеси и твердевшие при (20 ± 2) °С на воздухе при относительной влажности 95 % (или в иных условиях, обеспечивающих сохранение влаги в бетоне). Методы определения прочности бетона регламентированы стандартом.

Марка бетона. По среднему арифметическому значению прочности бетона устанавливают его марку – округленное значение прочности (причем округление идет всегда в нижнюю сторону). Для тяжелого бетона установлены следующие марки по прочности на сжатие: 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 700 и 800 кгс/см². При обозначении марки используют индекс «М»; так, например, марка бетона М350 означает, что его средняя прочность не менее 35 МПа (но не более 40).

Отличительная особенность бетона – *значительная неоднородность его свойств*. Это объясняется изменчивостью в качестве сырья (песка, крупного заполнителя и даже цемента), нарушением режима приготовления бетонной смеси, ее транспортировки, укладки (степени уплотнения) и условиями твердения. Все это приводит к разбросу значений прочности бетона одной и той же марки. Чем выше культура производства (лучше качество подготовки материалов, приготовления, укладки и т. п.), тем меньше будут возможные колебания прочности бетона. Для строителя важно получить бетон не только с заданной средней прочностью, но и с минимальными отклонениями (особенно в низшую сторону) от этой прочности. Показателем, который учитывает возможные колебания качества бетона, является класс бетона.

Класс бетона – это численная характеристика какого-либо его свойства (в том числе и прочности), принимаемая с гарантированной обеспеченностью (обычно 0,95). Это значит, что установленное классом свойство, в данном случае прочность бетона, достигается не менее чем в 95 случаях из 100. Понятие «класс бетона» позволяет назначать прочность бетона с учетом ее фактической или возможной вариации. Чем меньше изменчивость прочности, тем выше класс бетона при одной и той же средней прочности. ГОСТ 26633–85 устанавливает следующие классы тяжелого бетона по прочности на сжатие (МПа): 3,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 20; 25; 30; 32,5; 40; 45; 50; 55 и 60. Класс по прочности на сжатие обозначают латинской буквой В, справа от которой приписывают его гарантированную прочность в мегапаскалях. Так, у бетона класса В15 предел прочности при сжатии не ниже 15 МПа с гарантированной обеспеченностью 0,95.

Соотношение между классами и марками бетона неоднозначно и зависит от однородности бетона, оцениваемой с помощью коэффициента вариации. Чем меньше коэффициент вариации, тем однороднее бетон.

Класс бетона одной и той же марки заметно увеличивается при снижении коэффициента вариации. Так, при марке бетона М300 и коэффициенте вариации 18 % класс бетона будет В15, а при коэффициенте вариации 5 % – В20, т. е. на целую ступень выше. Это показывает, как важно тщательное выполнение всех технологических операций и повышение культуры производства. Только в этом случае достигается высокая однородность бетона и более высокий класс его прочности при неизменном расходе цемента.

Строительными нормами принят нормативный коэффициент вариации прочности бетона, равный 13,5 % и характеризующий технологию бетонных работ как удовлетворительную.

Соотношение между классами бетона по прочности на сжатие и его марками при нормативном коэффициенте вариации, равном 13,5 %, приведено в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Соотношение между марками и классами тяжелого бетона по прочности при коэффициенте вариации 13,5 %

Класс бетона	Средняя прочность данного класса, кгс/см ²	Ближайшая марка бетона	Класс бетона	Средняя прочность данного класса, кгс/см ²	Ближайшая марка бетона
В3,5	46	М50	В30	393	М400
В5	65	М75	В35	458	М450
В7,5	98	М100	В40	524	М550
В10	131	М150	В45	589	М600
В12,5	164	М150	В50	655	М600
В15	196	М200	В55	720	М700
В20	262	М250	В60	786	М800
В25	327	М350			

Определение прочности бетона. Марочная прочность бетона в соответствии со стандартами определяется после 28 сут нормального твердения. Однако при необходимости можно испытать бетонные образцы в другом возрасте (не ранее чем через 3 дня после изготовления) и с достаточной точностью рассчитать 28-дневную прочность по формуле

$$R_{28}=R_n(\lg 28/\lg n), \quad (7.1)$$

где R_n – прочность бетона в возрасте n дней, МПа.

Испытания бетона проводят на прессах с максимальным усилением для образцов $10 \times 10 \times 10$ см – 500 кН, а $15 \times 15 \times 15$ см – 1000 кН.

Образцы очищают от пыли и устанавливают строго в центре нижней плиты пресса так, чтобы верхняя (при формовании) грань образца оказалась в вертикальной плоскости. Верхнюю плиту пресса опускают до соприкосновения с образцом для выравнивания плоскостности, а затем немного приподнимают так, чтобы образовался зазор 2...5 мм. После этого включают пресс и нагружают образец со скоростью 0,4...0,8 МПа/с до его разрушения. Разрушающая нагрузка F_p (кН) фиксируется на силоизмерительной шкале по показанию пассивной стрелки, отмечающей максимальное усилие пресса в ходе испытания (рис. 7.3).

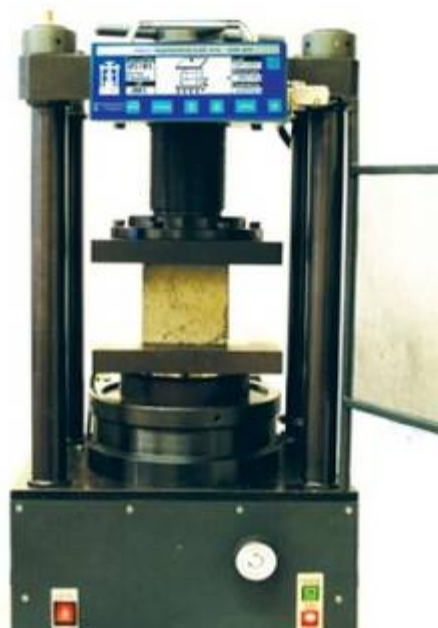


Рис. 7.3. Пресс испытательный гидравлический ПГМ МГ4

Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ (МПа) испытываемого образца рассчитывают по формуле

$$R_{сж} = 10F_p/A, \quad (7.2)$$

где A – площадь поперечного сечения образца, $см^2$. Если шкала прессы градуирована в килограмм-силах, то вместо коэффициента 10 в формуле следует использовать коэффициент 0,1.

При испытании образцов, твердевших не 28 дней, делают перерасчет их прочности на 28-дневную по указанной ранее формуле.

Прочность бетона данного замеса устанавливают, рассчитывая среднее арифметическое результатов испытания (при испытании трех образцов для расчета берут два наибольших значения). При размере образцов $15 \times 15 \times 15$ см рассчитанная прочность является марочной прочностью бетона; если размер образцов был $10 \times 10 \times 10$ см, то полученное значение умножают на коэффициент 0,91.

7.2. Композиционные материалы на основе бетонов

Железобетон – это композиционный материал, в котором монолитно соединены и совместно работают в конструкции стальная арматура и бетон.

Для армирования железобетонных конструкций применяют стержневую и проволочную арматурную сталь.

Смысл армирования можно пояснить на элементах, работающих на изгиб (балках, ригелях). В таких элементах часть поперечного сечения элемента подвергается сжатию, а другая – растяжению. Если балку изготовить из неармированного бетона, то вследствие низкой его прочности на растяжение (1...4 МПа) уже под небольшой нагрузкой бетон в растянутой зоне растрескивается и балка разрушается. Если же в растянутую зону ввести стальную арматуру, то она примет на себя растягивающие напряжения (прочность стали при растяжении более 200 МПа) и балка, хотя на ней могут появиться трещины, не разрушится даже при больших нагрузках. В ряде случаев армируют элементы, работающие и на сжатие (колонны, сваи), так как и на сжатие сталь в 5...10 раз прочнее бетона.

Бетон благодаря своей плотности и водонепроницаемости, с одной стороны, и щелочной реакции цементного камня в бетоне, с другой, защищает сталь от коррозии. Кроме того, бетон как сравнительно плохой проводник теплоты защищает сталь от быстрого нагрева при пожарах. Так, опыты показали, что при температуре поверхности бетона 1000 °С арматура, находящаяся на глубине 50 мм, через 2 ч нагревается лишь до 500 °С.

Совместная работа арматуры и бетона обуславливается хорошим сцеплением между ними и приблизительно одинаковыми температурными коэффициентами линейного расширения.

Сборные железобетонные изделия классифицируют по виду армирования, плотности и виду бетона, внутреннему строению, назначению и области применения.

По виду армирования различают изделия:

- с обычным армированием с помощью плоских сеток и пространственных (объемных) каркасов, изготовленных из стальных стержней различного диаметра, сваренных между собой в местах пересечений;

- с предварительно напряженным армированием железобетона, арматуру предварительно растягивают, а после изготовления конструкции и затвердевания бетона ее освобождают от натяжения.

По плотности различают тяжелый, облегченный, легкий или особо легкий бетон.

По внутреннему строению железобетонные изделия могут быть сплошными, пустотелыми и комбинированными, включающими элементы из других материалов. Изделия могут состоять из одного вида бетона – однослойные, из различных видов бетона – многослойные.

По назначению сборные железобетонные изделия выпускаются для жилых, общественных, промышленных зданий, для сооружений сельскохозяйственного и гидротехнического строительства, а также общего назначения. Они должны быть типовыми или унифицированными.

По форме сборные железобетонные изделия выполняются линейными (колонны, балки, прогоны и др.), плоскостными (плиты покрытий и перекрытий, панели стен и перегородок и др.), блочными (массивные изделия фундаментов, стены подвалов, ог-

раждающих конструкций и др.) и *пространственными* (объемные элементы санитарных кабин, кольца колодцев и др.).

Марки бетонных и железобетонных сборных конструкций и изделий содержат обозначения основных характеристик последних и состоят из буквенно-цифровых групп, которые разделяются дефисами. Число групп должно быть не более трех. Марка записывается в одну строку.

Первая группа включается в марку всех бетонных и железобетонных сборных конструкций и изделий и содержит:

- обозначение типа и конструкции изделия по его наименованию (**С** – свая, **К** – колонны, **Ф** – фундаменты и др.);
- определяющие габаритные размеры (или обозначение типоразмера конструкции и изделия).

Во второй группе приводятся:

- несущая способность конструкции и изделия, указываемая цифрами, соответствующими расчетной нагрузке;
- класс напрягаемой арматуры в соответствии со стандартами и техническими условиями на арматурную сталь и нормативными документами на проектирование железобетонных конструкций;
- вид бетона (**Л** – легкий, **Я** – ячеистый, **С** – плотный силикатный, **М** – мелкозернистый, **Ж** – жаростойкий).

В третью группу включены дополнительные характеристики, отражающие особые условия применения конструкций и изделий:

- стойкость бетона к воздействию агрессивной среды: **Н** – нормальная проницаемость; **П** – пониженная проницаемость; **О** – особо низкая проницаемость. Показатели бетона должны приниматься согласно СНиП 2.03.11–85;
- сейсмостойкость – для зданий и сооружений с расчетной сейсмичностью 7 баллов и выше обозначается буквой **С**;
- стойкость к воздействию повышенных и высоких температур – указывается классом жаростойкости бетона согласно ГОСТ 20910;
- конструктивные особенности – арабскими цифрами или строчными буквами указывается наличие дополнительных закладных изделий, отверстий, проемов, вырезов и т. п.

7.3. Силикатные материалы и изделия автоклавного твердения

К силикатным материалам автоклавного твердения относятся материалы, получение которых основано на гидротермальном синтезе минеральной смеси (основное сырье, вяжущее вещество и заполнители), осуществляемом при повышенных значениях давления (до 1,5 МПа) и температуры (174...200 °С) водяного пара.

В качестве основных сырьевых компонентов для материалов автоклавного твердения применяют преимущественно известково-песчаные смеси и промышленные отходы – доменные шлаки, топливные золы, нефелиновый шлак и др. Наиболее распространены известково-песчаные (силикатные) материалы.

По назначению изделия из силикатных материалов подразделяют на *конструкционные* и *теплоизоляционные изделия*, а по форме изготовления – на *штучные* и *крупноразмерные*.

По объему выпуска изделий из материалов автоклавного твердения ведущее место занимает *силикатный кирпич*, а за ним – *стеновые изделия* из плотного и ячеистого бетонов.

Силикатный кирпич – искусственный безобжиговый стеновой строительный материал, изготовленный прессованием из смеси кварцевого песка (90...92 %) и гашеной извести (8...10 %) с последующим твердением в автоклаве. В составе сырьевой смеси для получения силикатного кирпича содержание извести колеблется от 7 до 10 % в пересчете на активную роль СаО. Для повышения прочности силикатного кирпича в качестве вяжущего компонента применяют тонкомолотые известково-кремнеземистые, известково-шлаковые и известково-золевые смеси.

Промышленностью выпускаются *одинарные* и *модульные силикатные кирпичи*, а также *силикатные камни*. По теплотехническим свойствам и средней плотности в сухом состоянии силикатный кирпич и силикатные камни подразделяют на три группы:

- *эффективные*, позволяющие уменьшать толщину ограждающих конструкций по сравнению с толщиной стен, выложенных из полнотелого кирпича; к этой группе относят кирпич плотностью не более 1400 кг/м³, камни плотностью не более 1450 кг/м³ и теплопроводностью до 0,46 Вт/(м · К);

- *условно-эффективные*, улучшающие теплотехнические свойства ограждающих конструкций без снижения их толщины; к этой группе относят кирпич плотностью 1401...1650 кг/м³, камни плотностью 1451...1650 кг/м³ и теплопроводностью до 0,58 Вт/(м·К);

- *обыкновенный силикатный кирпич* плотностью свыше 1650 кг/м³.

По механическим свойствам силикатный кирпич близок к керамическому кирпичу, но менее огнестоек. В зависимости от предела прочности при сжатии силикатные камни и кирпич подразделяют на марки 300, 250, 200, 150, 125, 100, 75. Для кирпича нормируется также предел прочности при изгибе. Водопоглощение силикатных кирпича и камней должно быть не более 6 %. По морозостойкости силикатные кирпич и камни могут иметь марки F 50, F 35, F 25, F 15.

Силикатные кирпич и камни применяют для кладки каменных и армированно-каменных наружных и внутренних конструкций в надземной части зданий с нормальным и влажным режимом эксплуатации.

7.4. Строительные растворы

Строительный раствор – это искусственный камневидный материал, полученный в результате твердения растворной смеси, состоящей из вяжущего вещества, воды, мелкого заполнителя и добавок, улучшающих свойства смеси и растворов. Крупный заполнитель отсутствует, так как раствор применяют в виде тонких слоев (шов каменной кладки, штукатурка и др.). Требования к качеству вяжущих веществ, заполнителей, добавок и воды такие же, как и к материалам, применяемым для приготовления бетонов.

В качестве вяжущего вещества используют цемент, глину, гипс, известь или их смеси. Строительные растворы, приготовленные на одном вяжущем материале, называются *простыми*, а на нескольких вяжущих веществах – *сложными растворами*.

Составы простых растворов обозначают двумя числами, которые показывают соотношение объемных частей вяжущего материала и заполнителя. Для сложных растворов соотношение со-

стоит из трех чисел, соответствующих объемным частям основного и дополнительного вяжущих веществ и заполнителя. Например, состав 1:0,15:4 известково-гипсового раствора представляет собой одну часть извести, 0,15 гипса и четыре части заполнителя.

В качестве мелкого заполнителя применяют природные пески – кварцевые, полевошпатовые, а также искусственные дробленые пески – из плотных и пористых горных пород и искусственных материалов (пемзовые, керамзитовые, перлитовые и др.).

Неорганические (известь, зола ТЭС, молотый доменный шлак и др.) и органические (например, омыленный древесный пек) добавки вводят в растворные смеси, чтобы сохранить их удобоукладываемость. Органические добавки также экономят вяжущее вещество, повышают морозостойкость, снижают водопоглощение и усадку строительного раствора.

Строительные растворы различают в зависимости от вида вяжущего вещества, средней плотности, механических свойств и назначения.

По виду вяжущего вещества различают растворы:

- *цементные;*
- *известковые;*
- *гипсовые;*
- *смешанные* (цементно-известковые, цементно-глиняные, известково-гипсовые и др.);
- *битумные и полимерные вяжущие вещества*, находят применение в дорожном строительстве и при специальных работах (устройство стяжек, защитных антикоррозионных слоев).

По средней плотности различают:

- *тяжелые растворы* плотностью более 1500 кг/м^3 , изготавливаемые обычно на кварцевом песке;
- *легкие растворы* плотностью менее 1500 кг/м^3 , изготавливаемые на пористом мелком заполнителе (с плотностью менее 1200 кг/м^3) и с порообразующими добавками.

По механическим свойствам растворы классифицируются:

- *по прочности* на сжатие в 28-суточном возрасте строительные растворы для кладки и штукатурки делят на следующие марки, кг/см^2 : 4; 10; 25; 50; 75; 100; 150; 200. Прочность растворов на растяжение в 5...10 раз меньше их прочности на сжатие;

- *морозостойкости*, которая зависит от вида вяжущего вещества, водоцементного отношения, введенных добавок и условий твердения. Строительные растворы для каменной кладки наружных стен и наружной штукатурки имеют марки по морозостойкости: F 10; F 15; F 25; F 35; F 50. Для влажных условий эксплуатации растворы должны иметь более высокие марки по морозостойкости: F 100; F 150; F 200 и F 300.

По назначению строительные растворы различают как:

- *кладочные* – для каменной кладки стен, фундаментов, столбов, сводов и других конструкций зданий;
- *штукатурные* – для оштукатуривания внутренних стен, потолков, фасадов зданий;
- *монтажные* – для заполнения швов между крупными элементами (панелями, блоками и др.) при монтаже зданий и сооружений из готовых сборных конструкций и деталей;
- *специальные* (декоративные, гидроизоляционные, тампонажные, рентгенозащитные, акустические и другие строительные растворы).

РАЗДЕЛ III. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Литейное производство – это отрасль машиностроения, занимающаяся изготовлением фасонных деталей и заготовок путем заливки расплавленного металла в форму, полость которой имеет конфигурацию детали. После затвердевания металла получается отливка (деталь или заготовка), которую, при необходимости, подвергают последующей механической обработке. Отливка по форме и размерам должна быть максимально приближена к форме и размерам готового изделия.

В машинах и промышленном оборудовании около 50 % деталей изготавливают литьем. Для этого используются литейные сплавы, которые должны обладать высокими литейными, механическими и другими (антикоррозионными, антифрикционными, декоративными и т. д.) свойствами. В качестве литейных сплавов в основном используются: серые чугуны (литейный, ковкий, высокопрочный), углеродистые и легированные стали, латуни, бронзы, алюминиевые и магниевые сплавы. В зависимости от условий, в которых отливается деталь будет эксплуатироваться, выбирают тот или иной литейный сплав.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ЛИТЬЯ

В настоящее время существует довольно много различных методов литья, отличающихся как технологией, так и параметрами получаемых отливок. Каждый метод литья может быть охарактеризован следующими критериями:

- По кратности использования литейной формы различают одноразовые формы – разрушаются при извлечении отливки; полупостоянные формы – используются для изготовления нескольких десятков отливок; многоразовые формы – используются для получения сотен, тысяч и десятков тысяч отливок.

- Максимальная масса отливки.
- Минимальная толщина стенки отливки.
- Шероховатость поверхности отливки.
- Характер производства, в котором используется данный метод литья, – единичное, серийное, средне- и крупносерийное, массовое производство.

1.1. Литье в одноразовые формы

К методам литья в одноразовые формы относятся следующие: литье в песчаные формы, литье в оболочковые формы, литье по выплавляемым моделям.

1.1.1. Литье в песчаные формы. Технология литья в песчаные формы

С помощью литья в песчаные формы получают до 75 % всех отливок. Этим методом можно получить изделия массой более 100 т, с минимальной толщиной стенок 3...5 мм, с шероховатостью поверхности $Ra = 20\div 80$ мкм в единичном, серийном и среднесерийном производстве.

Отливки получают в литейной форме, полость которой соответствует конфигурации отливки. При литье в песчаные формы их изготавливают из формовочной смеси, состоящей из формовочных материалов. Формовочную смесь засыпают в литейные опоки и выполняют в них отпечаток модели (*литейная опока* – приспособление для удержания формовочной смеси при изготовлении литейной формы, ее транспортировке и заливке жидким расплавом). Модель имеет конфигурацию внешней поверхности отливки, обычно ее изготавливают из дерева, металла, пластмассы. Внутренняя поверхность отливки (отверстия, полости и т. п.) образуется при помощи литейного стержня, который устанавливают в форму. Литейные стержни изготавливают из стержневой смеси в стержневых ящиках. Стержневые ящики изготавливают из тех же материалов, что и модели. Между полостью формы и стержнем образуется пространство, заполняемое жидким металлом. После его затвердевания образуется отливка.

1.1.1.1. Чертеж отливки

Разработка технологического процесса литья в песчаные формы начинается с разработки чертежа отливки. Исходным документом для разработки чертежа отливки является чертеж детали. Чертеж отливки будет отличаться от чертежа детали следующими параметрами:

1. *Припуск на механическую обработку* – это дополнительный слой металла (на сторону), который будет удален в процессе последующей механической обработки отливки, с целью обеспечения необходимой точности и чистоты (шероховатости) поверхности. Величина припуска на механическую обработку регламентируется ГОСТами и зависит от материала отливки, от ее размеров и от расположения отливки в форме. Чем больше усадка и размеры изделия, тем больше припуск. Так как качество отливки в нижней части формы выше, чем в верхней, поскольку в верхней части скапливаются многие литейные дефекты (шлаковые включения, газовые пузыри и т. д.), поэтому припуск для верхней части отливки будет больше, чем для нижней и боковых частей.

2. *Технологический припуск* – служит для упрощения и облегчения процесса изготовления отливки. К технологическим припускам относятся:

- *литейные уклоны* – все наружные вертикальные поверхности отливки изготавливаются с уклоном в несколько градусов (в зависимости от высоты модели и в соответствии с ГОСТами) для удобства извлечения модели из формы без ее разрушения. Уклоны выполняются в направлении извлечения модели из формы;

- *напуски* – служат для упрощения изготовления отливки. Небольшие отверстия в отливке можно не делать, так как их целесообразнее просверлить в процессе механической обработки. Так же поступают с различными мелкими канавками, уступами, выточками и т. п.;

- *приливы* – предусматривают для удобства крепления отливки в приспособления при механической обработке, для захвата изделия при транспортировке. Их удаляют при механической обработке;

- *галтели* – закругления внутреннего угла отливки для получения плавного перехода в сопрягаемых стенках. Галтели препятствуют осыпанию формовочной смеси в углах модели при ее извлечении из формы и позволяют избежать концентрации напряжений в углах отливки при ее затвердевании и охлаждении.

1.1.1.2. Модельный комплект

Модельный комплект – это комплект формовочных приспособлений, необходимых для изготовления литейной формы. Он включает, кроме литейной модели, стержневой ящик, модель литниковой системы, подмодельную плиту, формовочные, контрольные и сборочные шаблоны для конкретной отливки.

Стержневой ящик – приспособление, имеющее рабочую полость для получения в ней стержня нужных размеров и очертаний из стержневой смеси. Он изготавливается из дерева или металла, может быть разъемным и неразъемным, а также иметь съемные части – вкладыши.

Литниковая система – система каналов и элементов литейной формы для подвода в ее полость расплавленного металла. Она обеспечивает заполнение и питание отливки при затвердевании, а также служит для улавливания шлака, попадающего вместе с металлом в литниковую чашу. В зависимости от формы и толщины стенок и от заливаемого металла питатели могут подводиться к отливке сверху, снизу или сбоку.

Подмодельная плита – плита, на которой осуществляется изготовление песчаной литейной формы.

1.1.1.3. Формовочные и стержневые смеси

Из формовочных смесей изготавливают песчаные формы, а из стержневых – стержни. В состав формовочных и стержневых смесей входят: кварцевый песок, глина, вода, связующие материалы и специальные добавки (синтетические и естественные смолы). Эти смеси должны отвечать определенным требованиям:

- *огнеупорность* – способность формовочной смеси не оплавляться, не размягчаться или спекаться под действием высокой температуры металла, заливаемого в форму;

- *газопроницаемость* – способность формы и стержней пропускать газы благодаря своей пористости. Газы выделяются из формовочной и стержневой смеси при заливке расплава в форму. При низкой газопроницаемости возникает брак по газовым раковинам. Чем крупнее форма, тем больше должна быть газопроницаемость;

- *пластичность* – обеспечивает получение в форме хорошего отпечатка модели; прочность – способность смеси и формы выдерживать внешние нагрузки. Форма не должна деформироваться и разрушаться при изготовлении, транспортировке и заливке расплава;

- *противопригарность* – способность смеси и формы не спекаться и не сплавляться с расплавленным металлом.

Формовочные и стержневые смеси изготавливают по определенному рецепту. Как правило, смеси используются многократно (оборотные смеси), а к ним добавляют свежие порции.

Различие между формовочной и стержневой смесью обусловлено тем, что стержень работает в более жестких условиях, так как он со всех сторон окружен расплавленным металлом. В связи с этим, стержень должен обладать большей прочностью, газопроницаемостью и противопригарностью. Этого добиваются, вводя специальные добавки.

1.1.1.4. Изготовление литейной формы

Форму изготавливают в следующей последовательности (рис. 1.1): на подмодельную плиту устанавливают полуопоку и нижнюю полумоделю (в случае разъемной модели), затем засыпают формовочную смесь в опоку и уплотняют ее. Полуопоку с утрамбованной формовочной смесью переворачивают на 180° и на нижнюю половину модели устанавливают верхнюю половину модели и модель литниковой системы. Затем поверхность разъема нижней полуформы посыпают тонким слоем разделительного песка для того, чтобы после утрамбовки можно было бы разделить полуформы без их разрушения. Затем устанавливают вторую полуопоку. После чего насыпают формовочную смесь и опять утрамбовывают. Далее, из уплотненной формовочной смеси удаляют модель стояка с литниковой чашей и модель выпора. Потом полуопоки разъединяют, извлекают полумодели, исправляют дефекты, если они возникли, и устанавливают стержни. На нижнюю полуформу устанавливают верхнюю, их скрепляют между собой. Собранный форма подвергается сушке. Затем в нее заливают расплавленный металл.

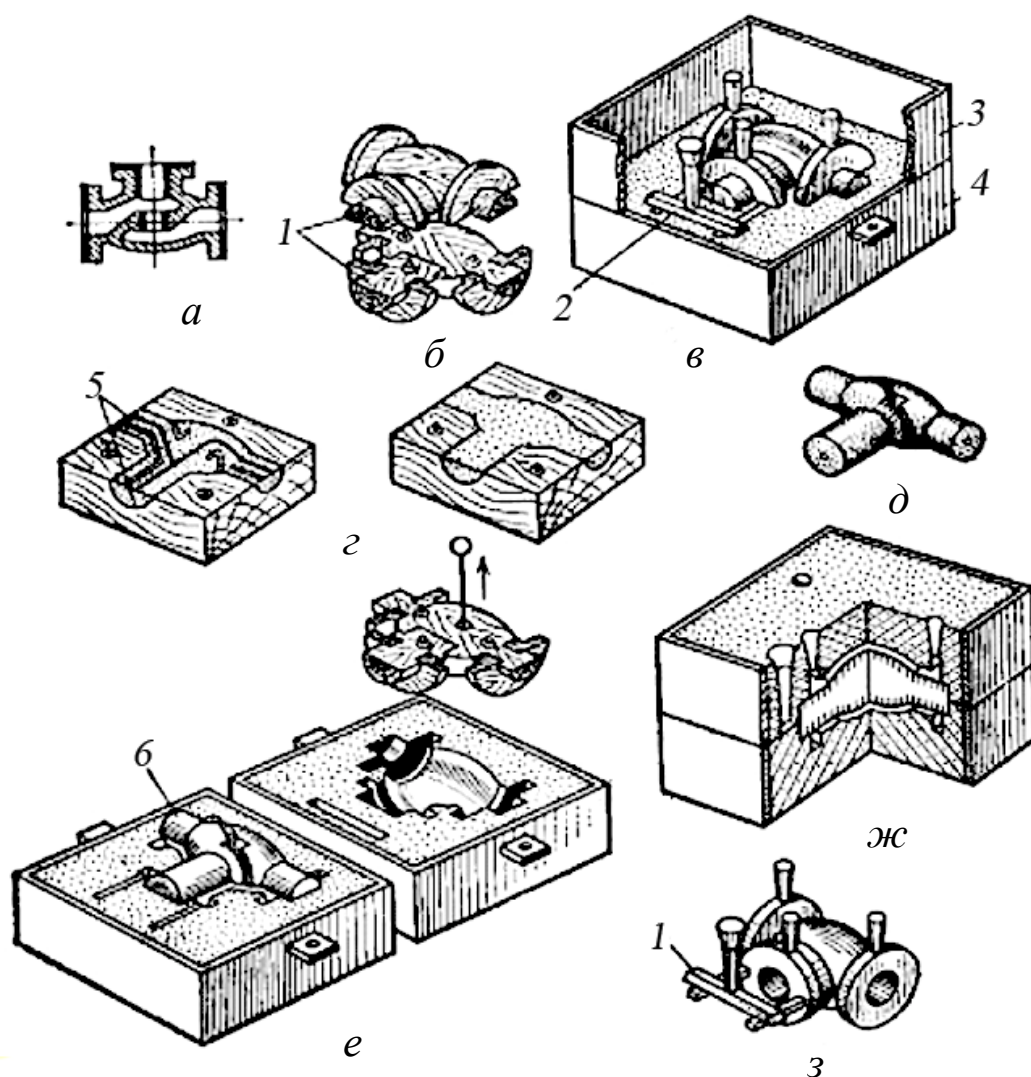


Рис. 1.1. Последовательность изготовления отливки:
а – чертеж отливки; *б* – деревянная модель; *в* – модель отливки, заформованная в нижнюю полуопоку (установлена модель литниковой системы); *г* – разъемный стержневой ящик; *д* – изготовленный стержень; *е* – две полуформы с извлеченными полумоделями и установленным стержнем; *ж* – собранная форма; *з* – отливка

Жидкий металл поступает в песчаную форму по литниковой системе, которая обеспечивает его непрерывную подачу, питает отливку в момент ее затвердевания и усадки и задерживает проникновение шлака в форму. При необходимости в форме для отвода газов предусматриваются дополнительные каналы – выпоры.

После затвердевания сплава и его охлаждения отливку из формы удаляют (выбивают), а форму разрушают. Затем выбивают стержни, обычно это делают на вибрационных установках или струей воды под высоким давлением (250...1000 кН/м²).

Литниковую систему отбивают (чугун), отпиливают или удаляют газовой резкой (сталь, цветные сплавы). Затем идет стадия очистки отливок от пригоревшей формовочной смеси и заусенцев.

Последней операцией перед выходным контролем является термообработка готовых изделий. Она обычно необходима, так как отливки часто имеют крупнозернистое строение, ликвационные зоны, неоднородное распределение легирующих элементов и неметаллических включений, что снижает механические свойства. (Виды термообработки рассматривались выше в разделе «Материаловедение»).

1.1.2. Литье в оболочковых формах

Литье в оболочковых формах – процесс получения отливок путем свободной заливки расплава в оболочковые формы из терморезистивных смесей.

Оболочковая форма – одноразовая тонкостенная химически твердеющая литейная форма, которую изготавливают из смеси кварцевого песка и порошка фенолформальдегидной смолы (6...7 %). Эта смола терморезистивная – она размягчается при 70 °С, а выше 120 °С плавится. С этого момента начинается процесс полимеризации, который идет тем быстрее, чем выше температура. При этом смола необратимо твердеет, а при температуре более 450 °С – начинает выгорать.

Изготовление оболочковой формы осуществляется следующим образом. Сначала формовочную смесь засыпают в бункер, который накрывают подогреваемой металлической модельной плитой. На ней закреплены металлические полумодели. Далее бункер переворачивают на 180°, формовочная смесь засыпает нагретую модельную плиту с полумоделями. Смола начинает плавиться и вместе с кварцевым песком обволакивает нагретые полумодели. За 30 с образуется оболочка толщиной 6...8 мм. Затем бункер возвращается в исходное положение, избыток смеси осыпается вниз. Модельную плиту с полуформами и оболочками

снимают с бункера и помещают в печь для полимеризации смолы и полного затвердевания оболочки (4...5 мин), плиту вынимают из печи с помощью специальных приспособлений, снимают оболочки. Затем две половины оболочки склеивают и соединяют скобами – получается готовая литейная форма: форму заливают расплавом и после его затвердевания разрушают, извлекая отливку.

К достоинствам метода относится высокая точность размеров и высокое качество поверхности отливки. К недостаткам – ограниченность массы отливки. Этим методом можно получить отливки массой не более 100 кг.

1.1.3. Литье по выплавляемым моделям

Это один из старейших методов литья, с его помощью в древности изготавливали скульптуры, колокола и другие изделия сложной формы. В машиностроении он начал применяться с 40-х годов XX века.

Процесс изготовления формы для этого метода литья состоит в следующем:

- изготавливают металлическую или пластмассовую съемную пресс-форму, с помощью пресс-формы из предварительно расплавленного легкоплавкого материала (обычно смеси 50 % стеарина и 50 % парафина) отливают несколько моделей;

- легкоплавкие модели собирают в блоки с общей литниковой системой; затем их погружают в огнеупорную суспензию, состоящую из 30 % жидкого связующего и 70 % кварцевой муки. Вынув блок из суспензии, его посыпают сухим кварцевым песком и сушат на воздухе. Эту операцию повторяют несколько раз, пока не получат форму со стенкой толщиной 6...8 мм, далее модель выплавляют из формы горячим воздухом, паром или горячей водой (100...150 °С);

- готовую форму прокаливают при температуре 850...900 °С. При этом выгорают остатки легкоплавкого состава и она приобретает прочность. В готовую форму заливают расплав, после затвердевания которого ее разбивают и извлекают отливку. Отливка может иметь очень сложную форму с большим количеством мелких деталей, канавок, отверстий и т. д., в которых могут остаться элементы огнеупорной корки. Их удаляют

выщелачиванием при 120 °С с последующей промывкой в горячей воде.

Этот метод литья очень трудоемок и дорог, но с его помощью можно получать отливки очень сложной формы, с высокой точностью и низкой шероховатостью поверхности, что исключает последующую механическую обработку. В настоящее время начинают внедряться новые методы литья, такие как литье по выжигаемым моделям, литье по растворяемым моделям, литье по размораживаемым моделям, литье по газифицируемым моделям. Наиболее перспективен последний метод. Модель изготавливается из пенопласта (пенополистирола), который легко обрабатывается вручную и на станках. (В крупносерийном производстве модели можно получать методом вспенивания в металлических и пластмассовых формах). Обычно форма делается неразъемной, модель из нее не извлекается, а газифицируется за счет тепла расплавленного металла (пенополистирол разлагается при 300...350 °С). Этот метод используется для получения отливок из различных сплавов массой от 0,2 кг до нескольких тонн.

Полупостоянные формы изготавливаются из шамота, металлокерамики, графита. Их можно использовать для получения нескольких десятков или сотен отливок. Этот метод занимает промежуточное положение между литьем в одноразовые и многоразовые (металлические) формы и подробно рассматриваться не будет.

1.2. Литье в металлические формы

Литье в металлические формы включает в себя следующие методы:

1. Литье в кокиль.
2. Литье под давлением.
3. Центробежное литье.

Различные методы литья в металлические (многоразовые) формы имеют свои специфические особенности, однако тот факт, что во всех случаях форма изготавливается из металла, придает этим методам некоторые общие черты:

1. Формы газонепроницаемы.

2. Формы неподатливы (не меняют своих размеров под давлением затвердевающего металла).

3. Высокая теплопроводность формы приводит к высокой скорости охлаждения и затвердевания металла, что имеет свои положительные и отрицательные стороны:

- при быстром охлаждении возникает большое количество центров кристаллизации и отливка приобретает мелкозернистую структуру с повышенной плотностью и прочностью;

- поверхность отливки, охлаждаясь с большой скоростью, подвергается закалке (у чугуновых отливок появляется поверхностный слой белого чугуна – отбельная корка). Это явление может быть использовано, когда изделие или его часть должно обладать твердой, износостойкой поверхностью. Если в этом нет необходимости или требуется последующая механическая обработка, то ей должна предшествовать термообработка (отпуск, отжиг, нормализация);

- высокая скорость охлаждения приводит к возникновению больших внутренних напряжений, поэтому в отливке не должно быть острых углов, резких переходов от толстых стенок к тонким, радиусы галтелей увеличиваются в 1,5 раза по сравнению с литьем в песчаные формы;

- при интенсивном охлаждении расплав быстро теряет жидкотекучесть, в связи с этим увеличивается минимальная толщина стенок отливки.

4. Металлические формы позволяют получать отливки с высокой точностью и высокой чистотой поверхности в серийном, крупносерийном и массовом производстве. Исключается применение формовочной смеси, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда.

5. Металлические формы отличаются высокой стоимостью.

6. Процесс литья легко механизуется и автоматизируется.

1.2.1. Литье в кокиль

Литье в кокиль – процесс получения отливок путем свободной заливки расплавленного металла в металлические *формы* – *кокиля* (рис. 1.2). *Кокиль* – металлическая форма, которая заполняется жидким расплавом под действием сил тяжести. В ко-

килях получают 45 % отливок из алюминиевых и магниевых сплавов, 5 % стальных и 10 % чугуновых отливок.

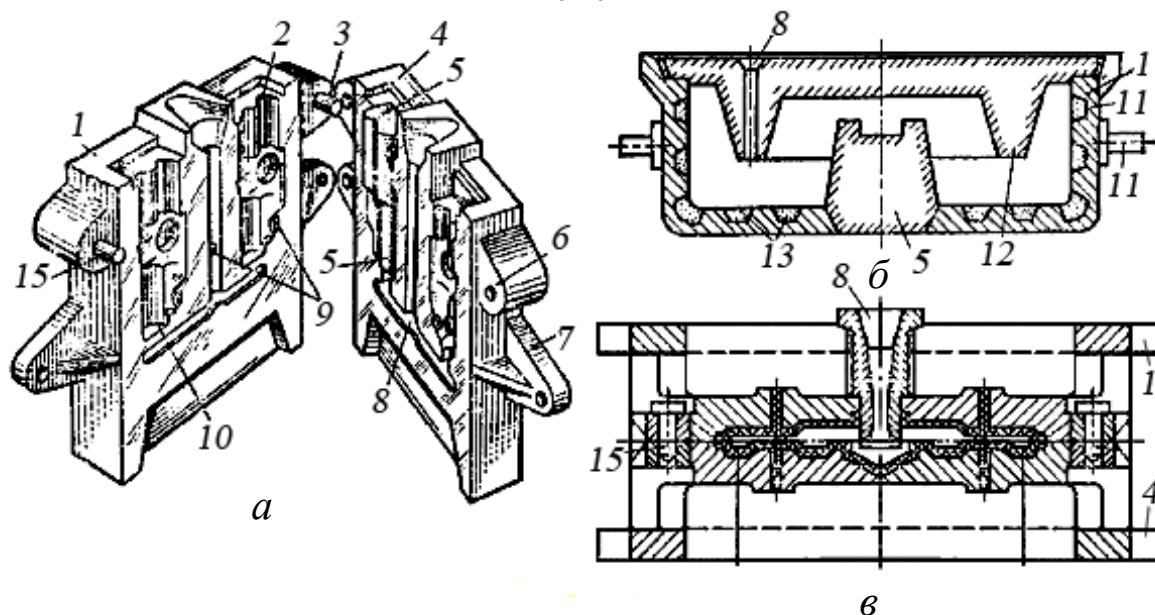


Рис. 1.2. Конструкции кокилей:

а – кокиль с вертикальной линией разъема; *б* – неразъемный кокиль; *в* – кокиль с горизонтальной линией разъема; 1, 4 – две половины кокиля; 2 – выпор; 3, 6, 15 – центрированные штыри и втулки; 5 – стержень; 7 – приливы для крепления кокиля к станку; 8 – литник; 9 – отверстия для толкателей, выталкивающих отливку из кокиля; 10 – рабочая полость кокиля; 11 – цапфы для переворота кокиля; 12 – песчаные стержни; 13 – формовочная смесь (футерованный кокиль); 14 – стержневая смесь – облицованный кокиль

Кокили могут быть неразъемными (вытряхными) (рис. 1.2, б). Внутренняя часть отливки образуется песчаным стержнем, стержнем же перекрывается и верхняя часть. Металл заливается через литниковую систему и после затвердевания, с помощью цапф, кокиль переворачивается и отливка выталкивается.

Чаще кокили изготавливаются из двух половин, его рабочая полость соответствует внешней конфигурации отливки. Внутренние полости образуются с помощью песчаных или металлических (цельных или разъемных) стержней. Конструкция разъемного кокиля также предусматривает наличие литниковой системы. После затвердевания сплава кокиль раскрывается и из него вы-

талкивается готовая отливка. В зависимости от конфигурации отливки, кокиль может иметь одну или несколько плоскостей разъема. Они могут быть вертикальными (рис. 1.2, *а*), горизонтальными (рис. 1.2, *в*) или комбинированными. Для удаления газов из газонепроницаемой формы – кокиля предусмотрен выпор, а также газовые каналы ($d = 0,2 \div 0,5$ мм) по линии его разъема.

1.2.2. Литье под давлением

Литье под давлением – это процесс получения отливок в металлических формах, при которых их заполнение сплавом и формирование отливок осуществляется под давлением. При литье под давлением пресс-форма выполняется из стали. Это сложное приспособление, состоящее из 30...100 деталей. Ее рабочая часть выполняется из вкладышей. Для формирования внутренних полостей отливки применяются неразъемные металлические стержни. На рис. 1.3 приведен пример получения отливок на машине с горизонтальной камерой сжатия.

Процесс литья осуществляется следующим образом:

- 1) Металл заливается в заливочное окно камеры сжатия.
- 2) Под давлением поршня сплав заполняет пресс-форму и затвердевает.
- 3) Извлекается металлический стержень и открывается пресс-форма.
- 4) Отливка удаляется выталкивателем, затем процесс повторяется.

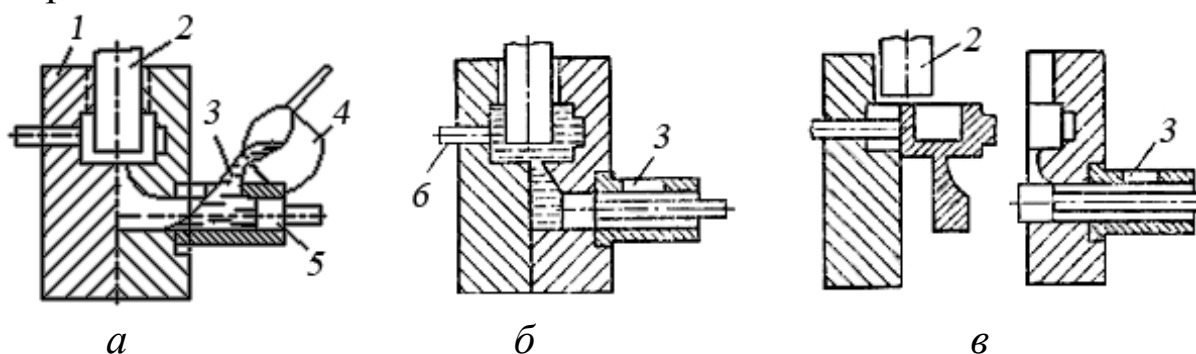


Рис. 1.3. Процесс литья под давлением:

а – заливка металла в заливочное окно; *б* – заполнение пресс-формы под давлением; *в* – удаление отливки; 1 – пресс-форма; 2 – металлический стержень; 3 – заливочное окно; 4 – расплав; 5 – поршень; 6 – выталкиватель

Производительность достигает 200...400 циклов в час. При литье под давлением струя жидкого металла с большой скоростью заполняет рабочую полость и газы, находившиеся в ней, не успевают удалиться. Это приводит к образованию в толстостенных отливках газовой пористости. Метод литья под давлением обеспечивает высокую точность и чистоту поверхности, что освобождает от последующей механической обработки. Он высокопроизводителен и легко автоматизируется. Стальные пресс-формы обладают высокой стойкостью. К недостаткам метода можно отнести чрезвычайно высокую стоимость пресс-форм, поэтому метод экономичен только в крупносерийном и массовом производстве. Для отливок характерна газовая пористость.

1.2.3. Центробежное литье

Центробежное литье – способ, при котором отливки получают свободной заливкой во вращающиеся формы. Отливка формируется под действием центробежных сил, которые отбрасывают заливаемый металл к стенкам формы, где он затвердевает, образуя пустотелое изделие. Формы приводят во вращение центробежные машины. Они могут иметь горизонтальную и вертикальную ось вращения. На машинах с горизонтальной осью вращения получают отливки со стенками равномерной толщины по длине и в поперечном сечении. При вертикальной оси вращения формы отливки имеют параболическую внутреннюю поверхность, и толщина верхней части отливки меньше, чем нижней.

Короткие трубы получают следующим образом (рис. 1.4): жидкий металл ковшем через желоб заливают во вращающуюся форму. Центробежными силами он отбрасывается к ее стенкам и затвердевает, после чего цилиндрическую отливку извлекают из формы.

При производстве длинных труб на труболитейных машинах используется подвижный желоб, который в процессе литья перемещается вдоль оси формы, которая имеет уклон в 5° . При этом металл навивается на ее внутреннюю поверхность. Для образования раструба трубы используется песчаный стержень. Машины с горизонтальной осью вращения используются также для

получения фасонных отливок. Машины с вертикальной осью вращения используются для получения коротких трубных заготовок и фасонных изделий.

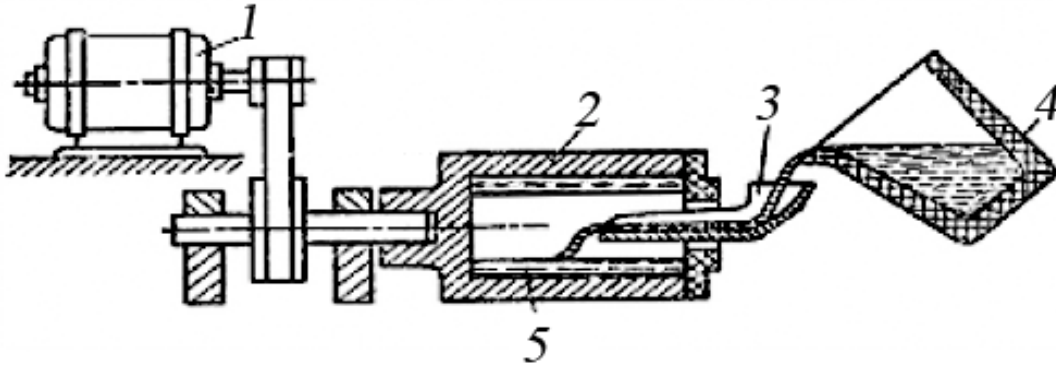


Рис. 1.4. Центробежная машина с горизонтальной осью вращения для литья коротких труб:

1 – электродвигатель; 2 – форма; 3 – заливочный желоб;
4 – ковш; 5 – отливка

Центробежное литье имеет свои особенности, достоинства и недостатки:

1. Исключается применение стержней для изготовления полости в отливке.
2. Отливки отличаются большой плотностью и высокими механическими свойствами.
3. Обеспечивается высокая точность наружных размеров и высокая чистота поверхности.
4. Этим методом можно получать тонкостенные изделия из сплавов с низкой жидкотекучестью.
5. Процесс автоматизируется.

К недостаткам метода можно отнести следующее:

1. Этим методом можно получать в основном только тела вращения.
2. Низкое качество отливок из сплавов, склонных к ликвации.
3. Внутренние размеры отливки зависят от количества залитого металла, в связи с этим трудно обеспечить их точность.

РАЗДЕЛ IV. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением основана на их способности пластически деформироваться в результате воздействия на заготовку внешних сил. При этом значительно снижается количество отходов по сравнению с обработкой резанием. Для данного метода обработки характерна высокая производительность, так как при однократном приложении усилия можно значительно изменить форму и размеры изделия. Кроме того, при пластической деформации металла меняются его физико-механические свойства: увеличивается прочность, износостойкость, упругость и т. д. Все это приводит к тому, что удельный вес этого метода в металлообработке постоянно повышается. Все процессы обработки металлов давлением делятся по назначению на два вида:

1. Получение заготовок постоянного поперечного сечения по длине – прутки, проволока, лента, лист, из которых затем изделия изготавливаются обработкой резанием. К ним относятся прокатка, прессование и волочение.

2. Получение деталей или заготовок-полуфабрикатов по форме и размерам, приближенным к готовым изделиям. При этом последующая обработка резанием применяется для придания им окончательных размеров и необходимой чистоты поверхности. К ним относятся ковка и штамповка.

1. ПРОКАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Прокатка – один из видов обработки металлов давлением, при котором металл пластически деформируется вращающимися валками. Взаимное расположение валков и заготовки, форма и число валков могут быть разными. Существует три основных вида прокатки – продольная, поперечная, поперечно-винтовая (рис. 1.1).

Продольная прокатка (рис. 1.1, а) – заготовка деформируется между двумя валками, вращающимися в разные стороны, и перемещается перпендикулярно осям валков.

Поперечная прокатка (рис. 1.1, б) – валки вращаются в одном направлении, придают вращение заготовке, которая, перемещаясь вдоль оси валков, деформируется.

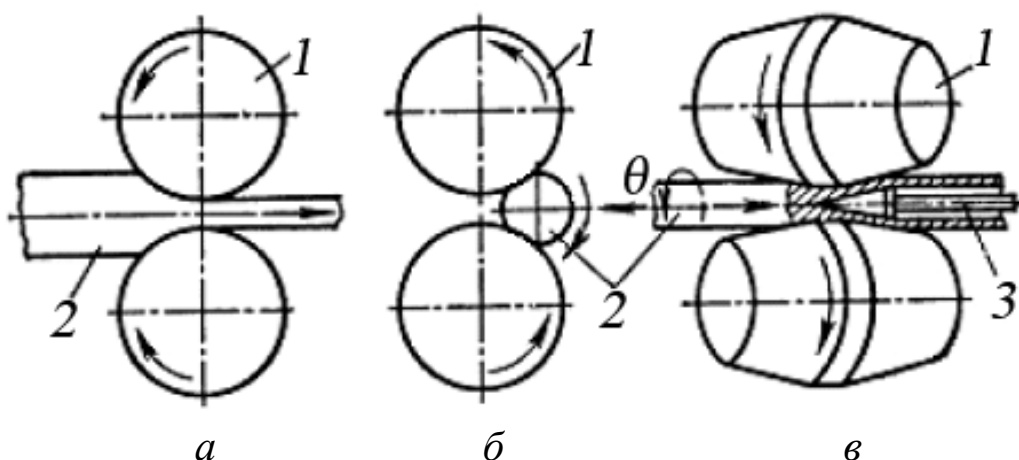


Рис. 1.1. Основные виды прокатки:

a – продольная прокатка; *б* – поперечная прокатка; *в* – поперечно-винтовая прокатка; 1 – валки; 2 – заготовка; 3 – оправка

Поперечно-винтовая прокатка (рис. 1.1, в) – валки расположены под углом и придают заготовке при деформировании вращательное и поступательное движение.

Прокатке подвергается до 90 % выплавляемой стали. Наиболее распространена продольная прокатка. При любом виде прокатки деформации подвергается небольшой участок заготовки, который постепенно перемещается по всему металлу. При этом уменьшается толщина заготовки и увеличивается ее длина и ширина. Площадь поперечного сечения заготовки при прокатке всегда уменьшается. Величина $\mu = l/l_0 = F_0/F$, где l , F и l_0 , F_0 – длина и сечение заготовки после прокатки и до прокатки соответственно, называется вытяжкой – это основная количественная характеристика различных видов обработки пластической деформацией. При прокатке $\mu = 1,1 \div 1,6$.

1.1. Инструмент и оборудование для прокатки

Инструментом при прокатке является валок, который может быть: гладким (рис. 1.2, а) – для прокатки листов, лент; ступенчатым – для прокатки полос; ручьевым (рис. 1.2, б) – для прокатки фасонного профиля. Ручьем называется вырез на боковой по-

верхности валка. Совокупность двух ручьев пары валков образует калибр.

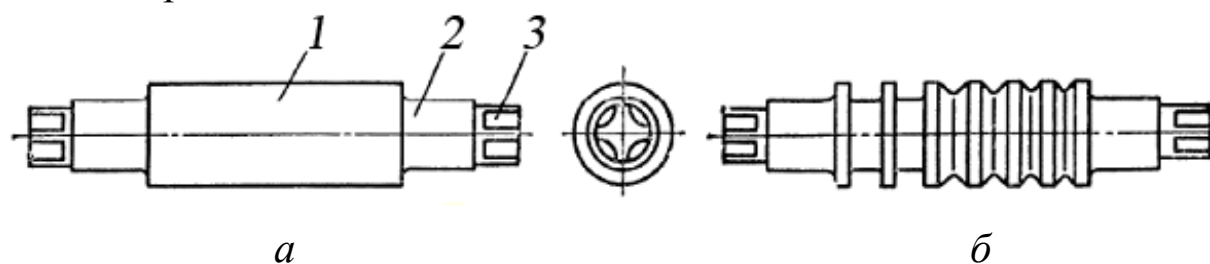


Рис. 1.2. Валки:

a – гладкий валок; 1 – бочка; 2 – шейка (цапфа);
3 – трефа; *б* – ручьевого валок

Валки устанавливаются в подшипниках на станине, на которой есть механизмы регулировки их положения. Комплект валков со станиной образует рабочую клеть. Привод, шестеренная клеть и рабочие клетки образуют прокатный стан.

1.2. Продукция прокатного производства

Исходной заготовкой при прокатке являются слитки металла: стальные до 60 т, из цветных металлов – до 10 т. Форма поперечного сечения прокатанного изделия называется профилем. Совокупность различных профилей различных размеров называется сортаментом. Сортамент изготавливаемых профилей делится на четыре группы: сортовой прокат, листовой прокат, трубы, специальный прокат.

1. Сортовой прокат. Прокатка осуществляется в горячем состоянии стальных слитков до 12 т. Профили сортового проката делят на две группы: простой формы – круг, квадрат, шестигранник, прямоугольник; сложной формы (фасонный) – швеллер, рельс, тавр, двутавр, уголок и т. д.

2. Листовой прокат. Листовой прокат делят: по области применения – электротехнический, судостроительный, котельный, автомобильной, консервная жесть и т. д.; по толщине – броневые плиты (до 550 мм), толстый лист (4...160 мм), тонкий лист (4...0,2 мм), фольга (менее 0,2 мм).

Толстый лист прокатывают из стальных слитков до 45 т в горячем состоянии. Тонкий лист прокатывают в горячем и холодном (тоньше 2 мм) состоянии. Все чаще используется бесслитковая прокатка, при которой жидкий металл через щель в распределительной коробке подается на валки-кристаллизаторы.

3. Трубы. Стальные трубы делят на бесшовные ($D = 30 \div 650$ мм) и сварные ($D = 10 \div 1420$ мм).

При прокатке бесшовных труб сначала осуществляется изготовление отверстия в заготовке – прошивка гильзы. Эта операция осуществляется на прошивных станах. Затем на раскатных станах гильзу раскатывают в трубу требуемых диаметров.

Сварные трубы получают из стальной ленты – штрипсы, которую сворачивают по спирали или из листов, ширина которых соответствует длине окружности труб. В обоих случаях сначала осуществляется формовка заготовки в трубу, сварка, отделка и правка.

4. Специальный прокат – кольца, зубчатые колеса, периодические профили и т. д.

2. КОВКА

Ковка – вид горячей обработки металлов давлением, при котором деформация осуществляется с помощью универсальных инструментов – бойков. Заготовку помещают на нижний боек и верхним бойком последовательно деформируют на отдельных участках. Металл течет в те стороны, которые не ограничены рабочими поверхностями инструмента. Бойки могут быть плоскими или фигурными (вырезными), также может применяться различный подкладной инструмент. Ковкой, как правило, получают заготовки (поковки) для последующей механической обработки.

Исходной заготовкой дляковки является металлический слиток массой до 320 т, а поковка может достигать веса более 250 т, таким образом, ковка – единственный метод изготовления заготовок такой массы. Для поволок небольшой массы используется сортовой прокат. В процессековки слитков происходит

уничтожение их литой дендритной структуры и улучшение механических свойств изделия.

2.1. Основные операцииковки

Для получения поковки в процессековки происходит чередование в определенной последовательности основных и вспомогательных операций.

Осадка – операция уменьшения высоты заготовки за счет увеличения площади ее поперечного сечения (рис. 2.1). Степень деформации при осадке – уковка – определяется отношением площадей поперечного сечения до осадки (F_0) и после осадки (F_1): $u = F_1/F_0$ – при осадке отношение высоты заготовки к ее диаметру не должно превышать 2,5. Разновидностью осадки является высадка – осаживание металла на части заготовки.

Протяжка – операция удлинения заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения (рис. 2.2). При протяжке заготовку подвергают последовательным ударам с подачей вдоль оси протяжки и поворотами вокруг своей оси. Степень деформации при протяжке также оценивается уковкой.

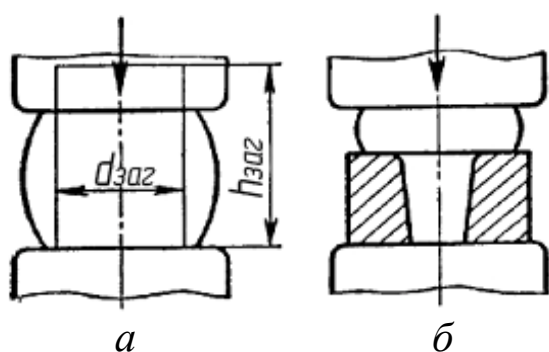


Рис. 2.1. Осадка (а) и высадка (б)

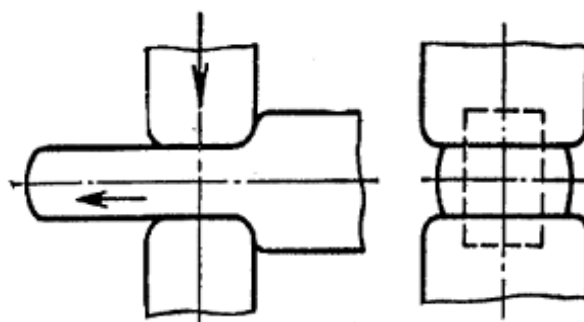


Рис. 2.2. Протяжка

Прошивка – операция получения полости (глухая прошивка) (рис. 2.3, а, б) или отверстия (рис. 2.3, в) в заготовке за счет вытеснения металла. Инструментом являются прошивки.

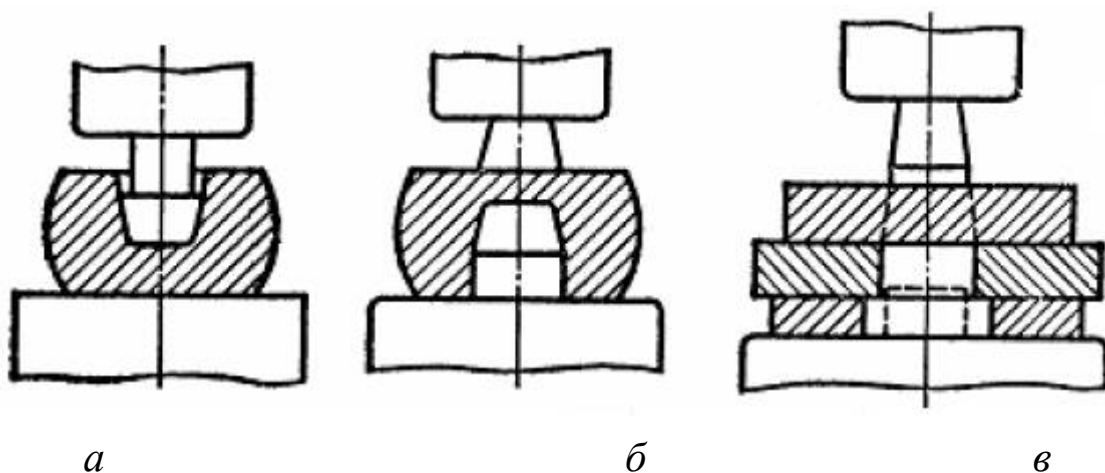


Рис. 2.3. Прошивка:

а, б – двухсторонняя прошивка;

в – односторонняя прошивка с подкладным кольцом

Отрубка – операция отделения заготовки по незамкнутому контуру (рис. 2.4, *а*). Отрубка осуществляется инструментом – топором (рис. 2.4, *б*).

Гибка – операция придания заготовке изогнутой формы по заданному контуру (рис. 2.4, *в*). При гибке в зоне изгиба уменьшается площадь поперечного сечения – это называется утяжкой.

Скручивание – операция, при которой часть заготовки поворачивается вокруг своей продольной оси.

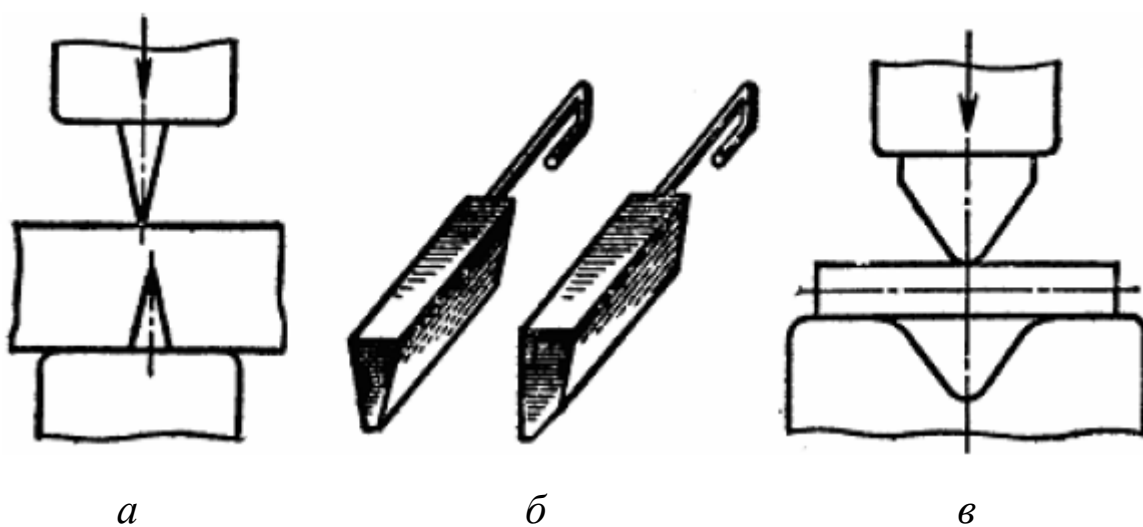


Рис. 2.4. Отрубка и гибка:

а – отрубка; *б* – топоры для отрубки; *в* – гибка

Штамповка в подкладных штампах – операция получения поковок сложной конфигурации при заполнении металлом полости инструмента – подкладного штампа (рис. 2.5).

Операцииковки осуществляют на ковочных молотах и ковочных прессах. *Молоты* – механизмы ударного действия. Время деформации на них – тысячные доли секунды. Они бывают пневматическими и паровоздушными.

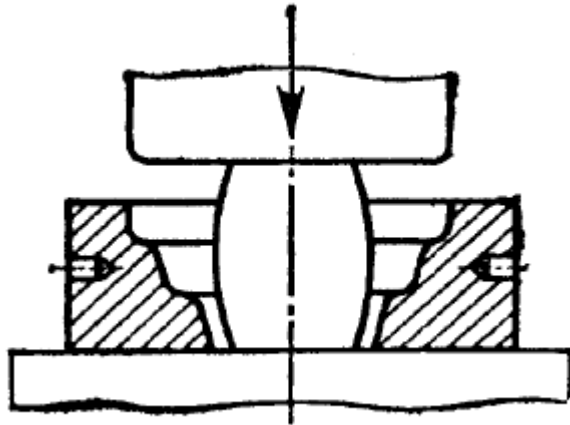


Рис. 2.5. Штамповка в подкладном штампе

Гидравлические прессы – машины статического действия, время деформации у них может составлять до десятков секунд.

Чертеж поковки разрабатывается на основе чертежа будущей детали. Как и в случае разработки чертежа отливки, в чертеже поковки присутствуют припуски и напуски.

Так как при ковке используется универсальный инструмент, то, несмотря на ее невысокую производительность (по сравнению со штамповкой), она широко применяется в единичном и мелкосерийном производстве, где применение штамповки не экономично из-за высокой стоимости инструмента.

3. ШТАМПОВКА

Штамповка – это вид обработки металлов давлением, при котором формообразование поковки осуществляется с помощью специального инструмента – *штампа*. Течение металла ограничивается поверхностями полостей и выступов штампа. Его единая замкнутая полость называется *ручьём*, а само изделие – *поковкой*.

Заготовками для штамповки является прокат, разрезанный на мерные куски. В основном штампуют поковки массой 20...30 кг, так как для этого метода требуются очень большие усилия деформации (гораздо большие, чем при ковке). В отдельных случаях штампуют поковки до 3 т.

3.1. Горячая объемная штамповка

При горячей объемной штамповке заготовку предварительно нагревают для увеличения ее пластичности и снижения прикладываемого давления. Характер течения металла в процессе штамповки определяется типом штампа, поэтому ее подразделяют на штамповку в открытых и в закрытых штампах.

Штамповка в открытых штампах (рис. 3.1, а). При этом виде штамповки зазор между подвижной и неподвижной частями штампа меняется в процессе изготовления поковки. В зазор вытекает заусенец – *облой*, который закрывает выход из полости штампа, и металл заполняет ее полностью. В конце процесса в заусенец выдавливаются излишки металла, поэтому требования к точности заготовки по массе невысоки. Впоследствии заусенец удаляется в специальных штампах.

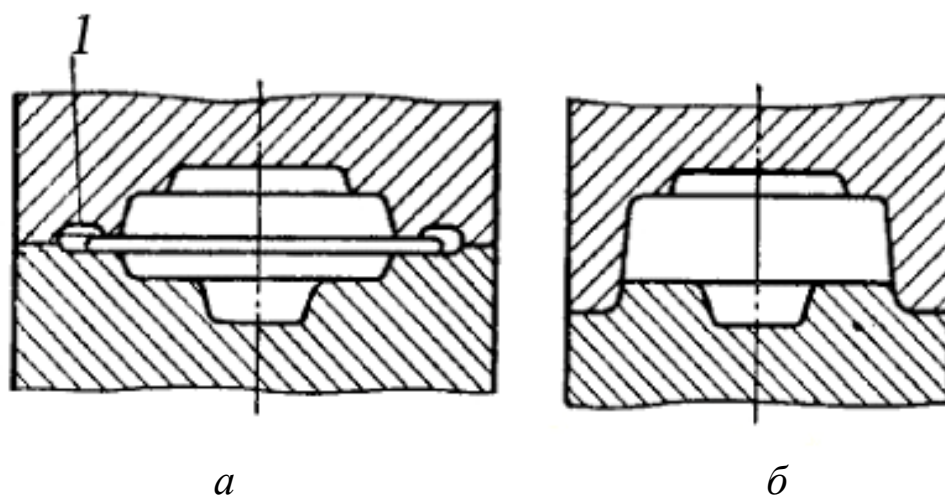


Рис. 3.1. Схема штамповки:

а – открытый штамп; *б* – закрытый штамп;
I – заусенчатая канавка

Штамповка в закрытых штампах (рис. 3.1, б). При этом виде штамповки полость штампа остается закрытой, а зазор между подвижной и неподвижной частями постоянный и небольшой.

При этом заусенец не образуется, что требует высокой точности заготовки по массе, но зато снижает расход металла. Получаемые поковки имеют более рациональную микроструктуру, так как волокна металла обтекают контур поковки, а не перерезаются. Деформация заготовки происходит в условиях всестороннего неравномерного сжатия, что позволяет штамповать малопластичные материалы.

Поковки простой конфигурации штампуются в штампах с одной полостью – одноручьевые штампы. Поковки сложной формы штампуют в многоручьевых штампах, постепенно приближая форму заготовки к форме конечного изделия.

При проектировании поковки ее чертеж разрабатывают по чертежу детали. При штамповке в открытом штампе сначала выбирают плоскость разъема, затем определяют припуски на механическую обработку, штамповочные уклоны, радиусы закругления в местах пересечения поверхностей. На отдельных участках поковки могут быть сделаны напуски (диаметры отверстий менее 30 мм не делаются). Все размеры спроектированной поковки увеличивают на величину усадки. Теперь по этому чертежу изготавливают полость штампа. При штамповке в открытых штампах вдоль внешнего контура полости выполняют заусенчатую канавку.

Для горячей объемной штамповки применяются молоты, ковочные машины и прессы различных конструкций.

3.2. Холодная штамповка

Холодная штамповка осуществляется при комнатной температуре, без предварительного нагрева и подразделяется на объемную и листовую. При холодной обработке давлением получаемые изделия более точны по размерам и имеют меньшую шероховатость поверхности, что позволяет свести к минимуму или даже исключить последующую обработку резанием.

3.2.1. Холодная объемная штамповка

Холодное выдавливание. В этом методе заготовка помещается в полость, из которой металл выдавливается в отверстие

в рабочем инструменте. В качестве заготовки используется мерно нарезанный пруток. Выдавливание может быть: прямым, когда направление течения металла совпадает с направлением движения пуансона; обратным, когда направление течения металла противоположно направлению пуансона; боковым и комбинированным.

Холодное выдавливание позволяет получать заготовки при больших степенях деформации, которая характеризуется величиной $k = F_0/F_1$, где F_0 – площадь поперечного сечения исходной заготовки; F_1 – площадь поперечного сечения выдавленной части. Например, для алюминия $k > 100$. Так получают трубы с толщиной стенки 0,1...0,2 мм и диаметром 20...40 мм.

Допустимая степень деформации ограничена высокими удельными усилиями выдавливания, которые могут превысить прочность инструмента.

Холодная высадка. Эту операцию осуществляют на холодновысадочных автоматах из прутка или проволоки. Таким образом получают заготовки и детали диаметром 0,5...40 мм: заклепки, болты, винты, гвозди, шарики, ролики, гайки и т. д. На рис. 3.2 приведен пример последовательности изготовления винта.

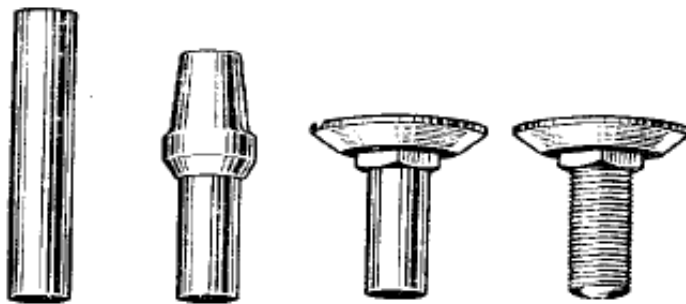


Рис. 3.2. Последовательность изготовления винта на холодновысадочных автоматах

Холодная высадка отличается высокой производительностью: 20...400 деталей в минуту, и чем меньше деталь, тем про-

изводительность выше. Для этого метода характерен высокий коэффициент использования металла – до 95 %.

Холодная формовка – это холодная штамповка в открытых штампах. Этот метод аналогичен горячей объемной штамповке, но в отличие от нее здесь требуются большие удельные усилия, так как в холодном состоянии металлы менее пластичны и упрочняются в процессе деформации вследствие наклепа. Для снятия наклепа приходится проводить рекристаллизационные отжиги.

3.2.2. Холодная листовая штамповка

При холодной листовой штамповке в качестве заготовки используется листовая прокат: лист, полосы, ленты. Их толщина обычно не превышает 10 мм. Перечень изделий, получаемых этим методом, чрезвычайно велик – от долей граммов (и долей миллиметра) – секундные стрелки ручных часов; до изделий массой в десятки килограммов (и размерами в несколько метров) – корпуса автомобилей, самолетов, ракет.

Для получения деталей различной формы требуется последовательно деформировать различные части заготовки. Весь процесс листовой штамповки состоит из набора операций – процессов пластической деформации, обеспечивающих характерное изменение формы определенного участка заготовки. Различают формообразующие операции, в которых деталь не разрушается в процессе деформации, и разделительные операции, в которых пластическая деформация завершается разрушением детали.

3.2.3. Разделительные операции листовой штамповки

Отрезка – отделение части заготовки по незамкнутому контуру. Эта операция выполняется в ножницах и штампах. Как правило, она является заготовительной операцией – разделением листа на мерные заготовки. Чаще эта операция осуществляется с помощью ножниц двух типов: гильотинные – с поступательным движением ножа, и дисковые – с вращательным движением ножей.

Вырубка и пробивка. *Вырубка* – операция оформления наружного контура детали. *Пробивка* – операция оформления внутреннего контура детали – изготовление отверстий. Эти операции осуществляются с помощью пуансона и матрицы – пуансон выдавливает часть заготовки в отверстие матрицы. Качество поверхности реза определяется выбором зазора между ними – $z = (0,05 \div 0,1)s$.

Кроме рассмотренных выше разделительных операций в листовой штамповке применяются такие операции, как *надрезка* – частичное отделение части заготовки по незамкнутому контуру; *обрезка* – отделение краевой части заготовки.

3.2.4. Формообразующие операции листовой штамповки

Гибка – операция по изменению кривизны заготовки без изменения ее линейных размеров (рис. 3.3). В процессе гибки пластическая деформация происходит на узком участке под пуансоном. Минимальный радиус, при котором заготовка не разрушается, $r_{\min} = (0,1 \div 2)s$.

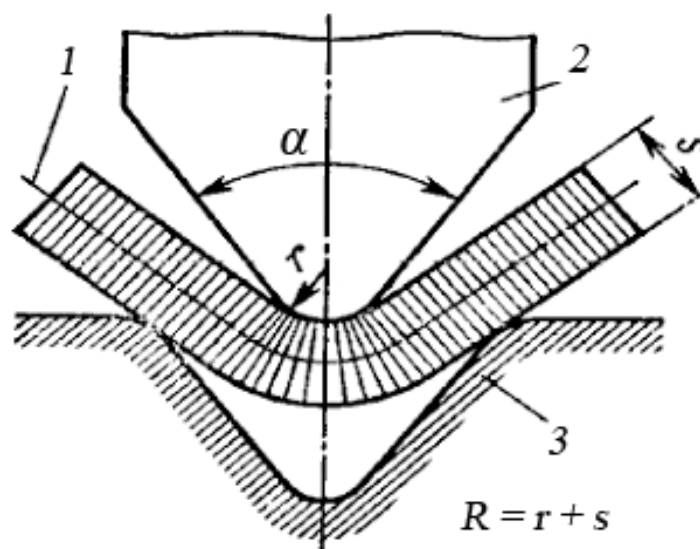


Рис. 3.3. Схема гибки:

1 – нейтральный слой; 2 – пуансон; 3 – матрица

Операция гибки может осуществляться в штампах, при этом можно изменять кривизну сразу на нескольких участках заготовки. Детали, изогнутые в нескольких плоскостях, получают последовательным деформированием в нескольких штампах.

Вытяжка без утонения стенок – операция преобразования плоской заготовки в полое пространственное изделие за счет уменьшения периметра вытягиваемой заготовки. На рис. 3.4 приведена схема первого перехода вытяжки.

Для проведения операции вытяжки предварительно вырубают круглую заготовку, которую укладывают на плоскость матрицы. Пуансон давит на центральную часть заготовки и перемещает ее в отверстие матрицы, при этом центральная часть тянет за собой фланец – *периферийную часть*. Фланец, смещаясь в матрицу, образует стенки изделия.

При неправильном выборе диаметра заготовки [$D - d > (18 \div 20)s$] возможно образование складок. Для предотвращения появления складок применяется прижим, который прижимает фланец заготовки к матрице.

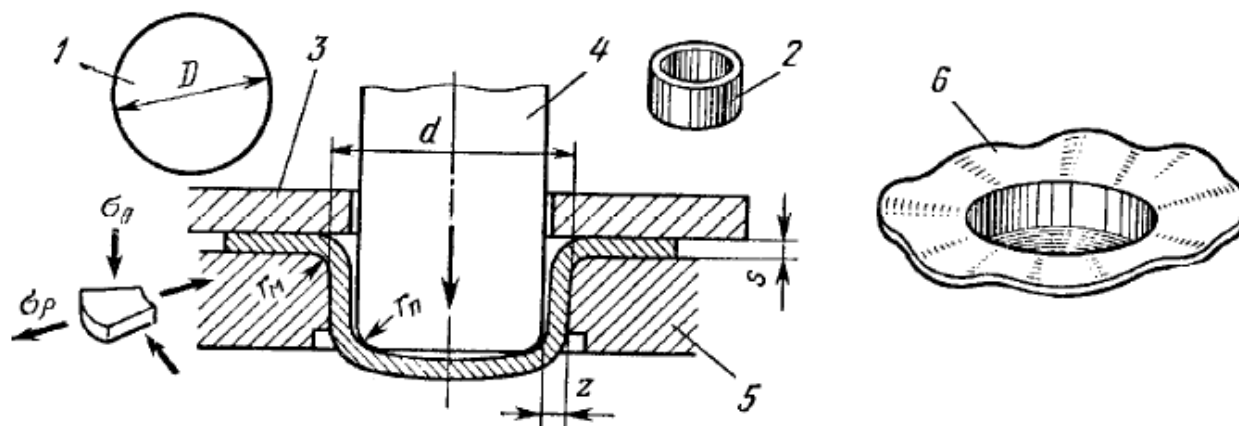


Рис. 3.4. Вытяжка без утонения стенок:

1 – заготовка; 2 – изделие; 3 – прижим; 4 – пуансон; 5 – матрица;
6 – изделие со складками (без прижима)

Если растягивающие напряжения σ_p , действующие на входе в матрицу, сравниваются с пределом прочности заготовки, то заготовка у доньшка может разрушиться. Таким образом, можно вытягивать заготовку только с ограниченной шириной фланца. Степень деформации оценивается коэффициентом вытяжки $K_B = D/d$. В зависимости от металла и условий вытяжки $K_B = 1,8 \div 2,1$. Если за один переход при допустимом коэффициенте вытяжки невозможно получить готовую деталь, то вытяжку осуществляют за несколько переходов (рис. 3.5, а). В последующих переходах заготовкой является полый полуфабрикат, полученный на преды-

дущем переходе вытяжки. При холодной деформации металл упрочняется из-за наклепа, поэтому допустимый коэффициент вытяжки на последующих переходах снижается до $K_B = 1,2 \div 1,4$. Если заготовку подвергнуть рекристаллизационному отжигу, то допустимый коэффициент вытяжки можно повысить до $K_B = 1,4 \div 1,6$.

Усилие вытяжки $P = \pi \cdot n \cdot \sigma_B \cdot (D - d) \cdot b$, где $b = 1,1 \div 1,2$ – для первого перехода вытяжки; $b = 1,6 \div 1,9$ – для последующих переходов вытяжки отожженной заготовки; $b = 2,3 \div 2,7$ – для последующих переходов без межоперационного отжига.

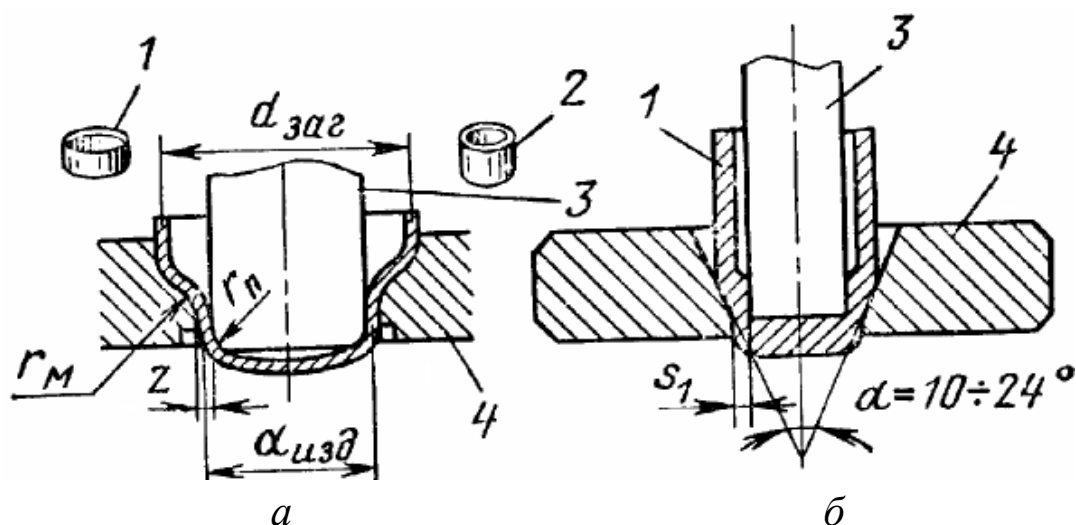


Рис. 3.5. Схема последующей вытяжки:

a – без утонения; *б* – с утонением стенок;

1 – заготовка; 2 – изделие; 3 – пуансон; 4 – матрица

Для уменьшения концентрации напряжений и предотвращения разрушения заготовки кромки пуансона и матрицы скругляются с радиусом $r_M, r_{II} = (5 \div 10)s$, для этого же применяют смазку.

При вытяжке без утонения стенок площадь поверхности заготовки изменяется незначительно, поэтому размер заготовки можно определить из условий равенства и площади поверхности детали по средней линии и площади плоской заготовки. Для осесимметричных деталей заготовка обычно имеет форму круга. Для повышения стойкости инструмента между пуансоном и матрицей делают зазор $z = (1,1 \div 1,3)s$.

Вытяжка с утонением стенок – операция по увеличению длины полой заготовки в основном за счет уменьшения толщины ее стенок (рис. 3.5, б). При этой операции зазор между пуансоном

и матрицей должен быть меньше толщины стенки, которая в процессе вытяжки утоняется и удлиняется. Этим методом получают детали, у которых толщина доньшка больше толщины стенок (гильзы для патронов и снарядов). Удельные усилия при такой вытяжке значительно больше, допустимая степень деформации возрастает, толщина заготовки за один проход может быть снижена в 1,5...2 раза. Размеры заготовки для получения изделий вытяжкой с утонением стенки определяют из условия равенства объемов заготовки и детали.

4. ПРЕССОВАНИЕ

Прессование – процесс обработки металлов давлением, при котором металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие, соответствующее сечению прессуемого профиля. Таким методом получают как сплошные, так и полые профили. На (рис. 4.1) приведен вариант прямого прессования – направление движения пуансона совпадает с направлением движения готового профиля.

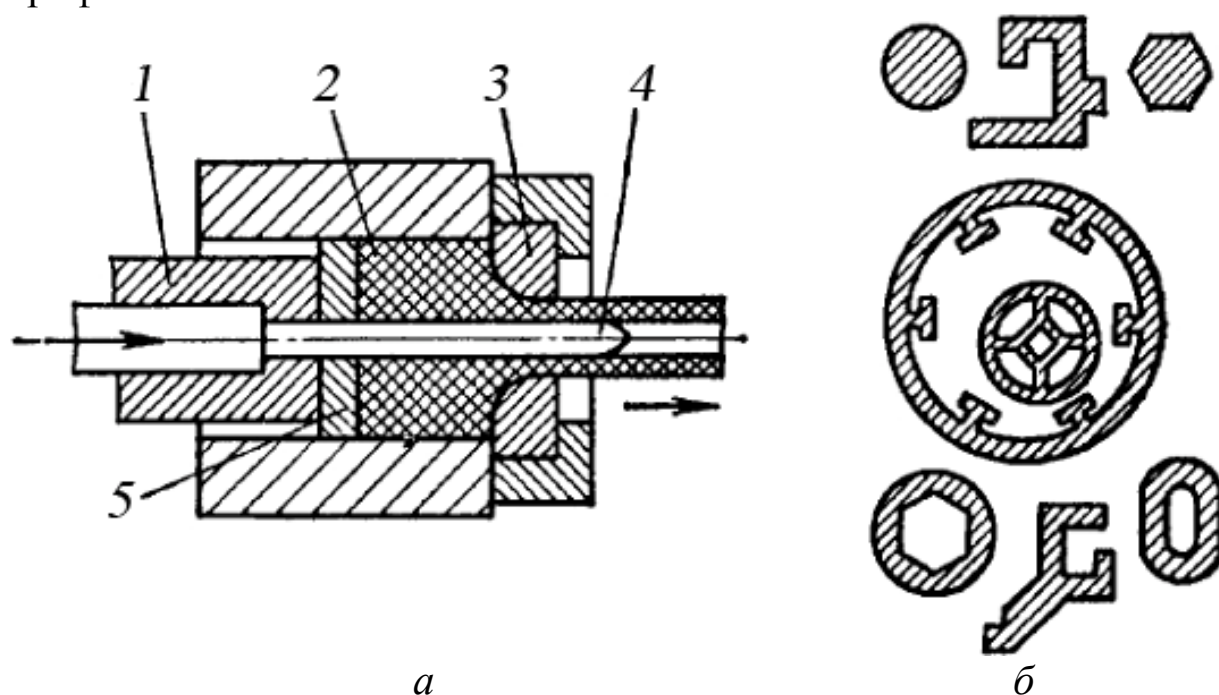


Рис. 4.1. Прессование полого профиля (а);
прессованные профили (б);

1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица;

4 – игла; 5 – пресс-шайба

Прессование, как и выдавливание, может осуществляться и по обратной схеме, когда пуансон и прессуемый профиль перемещаются в противоположных направлениях. Исходной заготовкой для прессования является слиток или прокат. Для снижения необходимых для деформации нагрузок и повышения стойкости инструмента заготовку обычно нагревают, а также предварительно обтачивают на станке. С этой же целью используют различные смазки. Ассортимент получаемых профилей очень велик: прутки диаметром 3...250 мм, трубы диаметром 20...400 мм со стенкой толщиной 1,5...12 мм и т. д. Коэффициент, определяемый как отношение площади сечения заготовки к площади сечения прессуемого профиля и определяющий степень деформации, достигает при прессовании 10...50. Этим методом получают профили сложной формы, которые другими способами получить нельзя. Точность изготовления прессованных изделий выше, чем прокатанных.

К недостаткам прессования можно отнести большие отходы металла – пресс-остаток может достигать 40 % от массы исходной заготовки. Инструмент для прессования испытывает большие нагрузки в сочетании с высокими температурами, поэтому его изготавливают из высококачественных инструментальных сталей, и он очень дорог.

5. ВОЛОЧЕНИЕ

Волочение – процесс, при котором заготовку протягивают через постепенно сужающееся отверстие в инструменте. Инструмент называют волокой (рис. 5.1). Исходными заготовками служат прокатанные или прессованные прутки и трубы. Волочение, в большинстве случаев, осуществляется в холодном состоянии.

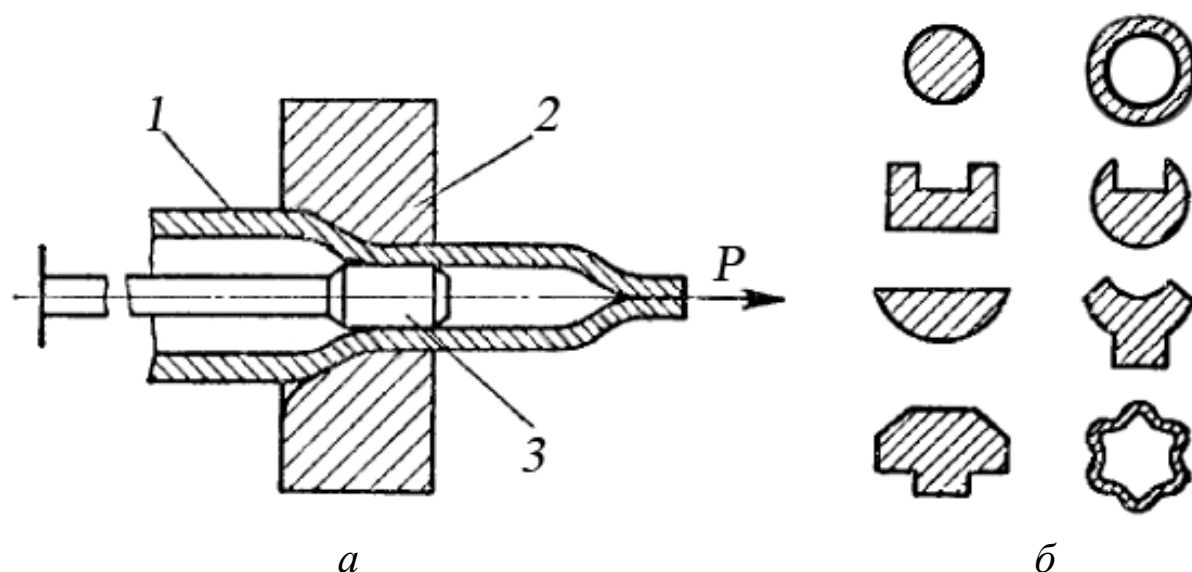


Рис. 5.1. Волочение трубы (а);
 профили, полученные волочением (б);
 1 – заготовка (труба); 2 – волока; 3 – оправка

При волочении площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а длина увеличивается, поэтому количественно деформацию можно охарактеризовать вытяжкой μ – отношением полученной длины к исходной. За один проход $\mu = 1,25 \div 1,45$. Заготовку протягивают через инструмент, а усилие, приложенное к заготовке, необходимо как для ее пластической деформации, так и для преодоления трения. В связи с этим, для уменьшения сил трения, используют смазки, а внутреннюю поверхность волоки (фильеры) полируют.

Как правило, для получения необходимого профиля требуется деформация, превышающая величину, допустимую за один проход. В связи с этим волочение осуществляют через ряд волок с постепенно уменьшающимися отверстиями. При волочении металл испытывает значительный наклеп, который снимается промежуточными рекристаллизационными отжигами.

Сортамент изделий, полученных волочением, весьма разнообразен: это и проволока диаметром 0,002...10 мм, и фасонные профили; волочением калибруют трубы диаметром от долей миллиметра (капилляры) до 500 мм и прутки диаметром 3...150 мм. Метод обеспечивает высокую точность размеров, низкую шероховатость поверхности, а также позволяет получать очень тонкие профили.

РАЗДЕЛ V. СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Сварка – технологический процесс получения неразъемных соединений различных материалов (однородных и разнородных металлов и сплавов, металлов и неметаллов, пластмасс) за счет образования прочных связей между атомами или молекулами на поверхности соединяемых заготовок. Для получения сварного соединения необходимо сблизить соединяемые поверхности на расстояние, на котором начинают действовать силы межатомного сцепления, и создать условия, необходимые для возникновения межатомных и межмолекулярных связей – температуру, время контакта, качество поверхности. Для этого требуется введение энергии для активации поверхностных атомных слоев. Энергия сообщается в виде теплоты, упругопластической деформации, электронного, ионного, лазерного и других видов облучения.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ СВАРКИ

Для сближения поверхностей соединяемых заготовок и создания условий для образования соединения существующие способы сварки предусматривают тепловое, механическое или их совместное воздействие в зоне соединения.

Способы сварки классифицируются или по методу объединения поверхностей соединяемых заготовок (сварка плавлением, сварка давлением), или по виду применяемой энергии (электрическая, химическая, механическая).

2. СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ

При сварке плавлением происходит расплавление кромок свариваемого материала, а в случае необходимости и присадочного материала для дополнительного заполнения зазора между ними. Энергии достаточно для самопроизвольного объединения расплавленных частей заготовок. Образуется общая сварочная ванна, а после ее затвердевания, на месте соединения, – сварочный шов.

2.1. Электродуговая сварка

При электродуговой сварке источником энергии является электрическая дуга, обычно одним из электродов – свариваемые металлы.

Электрическая дуга – мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается в процессе ее горения.

Зажигание дуги начинается с короткого замыкания электрода на заготовку, при этом происходит разогрев торца электрода. Затем электрод отводят на 3...6 мм. Под действием электрического поля с катода начинается эмиссия электронов, возникает устойчивый дуговой разряд (столкновение быстролетающих от катода к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации, дуговой промежуток становится электропроводящим) (рис. 2.1). При сварке неплавящимся электродом дуга зажигается с помощью высокочастотного электрического разряда.

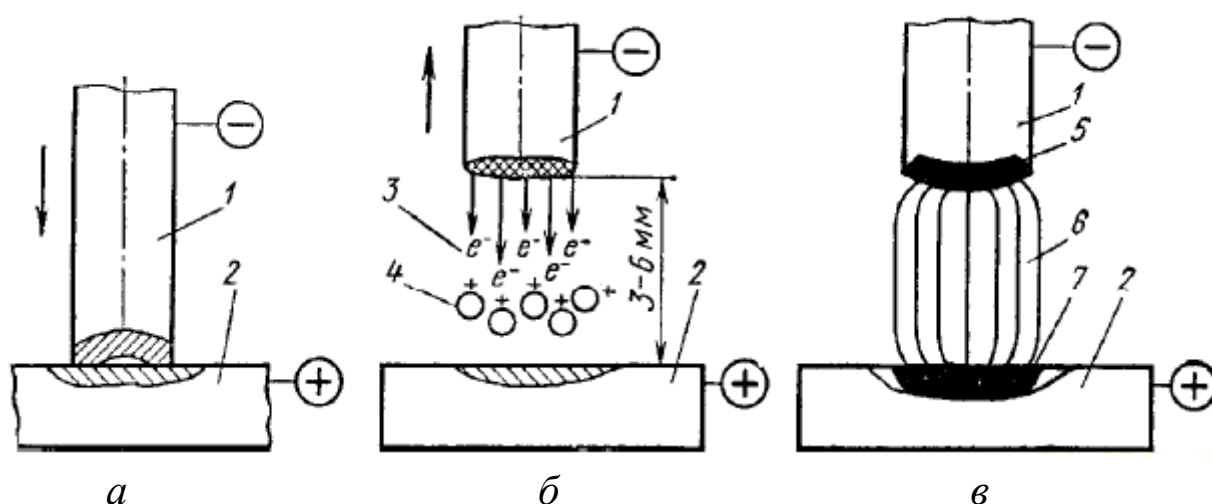


Рис. 2.1. Схема процесса зажигания дуги:

- а* – короткое замыкание электродов; *б* – эмиссия электронов с поверхности катода; *в* – устойчивое горение дуги;
- 1* – электрод; *2* – свариваемый металл; *3* – электроны;
- 4* – ионы газа и металла; *5* – катодное пятно;
- 6* – столб дуги; *7* – анодное пятно

Дуга – концентрированный источник тепла, столб дуги имеет температуру 6000...7000 °С, катодное пятно имеет температуру 2400 °С, анодное пятно – 2600 °С. Источником питания при сварке на переменном токе являются сварочные (понижающие) трансформаторы с напряжением холостого хода $U = 60 \div 80$ В. Они применяются чаще, так как проще в эксплуатации, долговечнее, имеют более высокий КПД. При сварке на постоянном токе используют сварочные генераторы постоянного тока и выпрямители.

2.2. Ручная электродуговая сварка

Ручная электродуговая сварка осуществляется сварочными электродами, которые подаются в дугу и перемещаются вдоль заготовки вручную сварщиком. Для удержания электрода и подвода к нему тока сварщик использует электродержатель. Для защиты от светового и ультрафиолетового излучения используется защитный щиток или маска с темным стеклом, а тело и руки защищены брезентовой спецодеждой. Рабочее место сварщика – специальная сварочная кабина.

Рассмотрим схему процесса сварки металлическим покрытым электродом. Дуга горит между стержнем электрода и основным металлом. Стержень электрода плавится, и жидкий металл по каплям стекает в металлическую ванну. Одновременно плавится и покрытие электрода, образуя газовую защитную атмосферу вокруг дуги и жидкую шлаковую ванну на поверхности жидкого металла. Металлическая и шлаковая ванны вместе образуют сварочную ванну. Жидкий шлак, остыв, образует на поверхности шва защитную шлаковую корку.

В сварочной ванне протекает ряд процессов: испарение и окисление (выгорание) ряда легирующих элементов (углерода, кремния, марганца, хрома), сварной шов насыщается кислородом, водородом, азотом, что снижает его механические свойства. Для предотвращения этих процессов применяют обмазку электродов.

Обмазка выполняет следующие функции:

1. Создание защитной атмосферы вокруг зоны сварки.

2. Образование ионов, стабилизирующих процесс горения дуги.

3. Раскисление (восстановление образовавшихся оксидов) материала шва.

4. Легирование сварочного шва.

5. Защита жидкой металлической ванны расплавленными шлаками от окисления.

Сварочный электрод – проволочный стержень из сварочной проволоки с покрытием (обмазкой). Диаметр проволоки 0,3...12 мм. Все марки сварочной проволоки в зависимости от состава делятся: на углеродистую, легированную и высоколегированную. Маркировка та же, что и у сталей, с добавлением букв «Св».

Ручной электродуговой сваркой сваривают заготовки толщиной 2...30 мм. Она удобна для выполнения коротких и криволинейных швов в любых пространственных положениях (нижнем, вертикальном, горизонтальном, потолочном), для наложения швов в труднодоступных местах, при монтажных работах, при сборке сложных конструкций. Этот вид сварки дает хорошее качество сварного шва (при условии высокой квалификации сварщика), но он менее производителен по сравнению с автоматической сваркой под слоем флюса. Сварочный ток нельзя поднимать выше некоторого предела из-за разогрева электрода и отслаивания покрытия, разбрызгивания металла и его большого угара.

2.3. Автоматическая дуговая сварка под слоем флюса

При этом способе (рис. 2.2, а) сварку осуществляют непокрытой электродной проволокой, а дугу и сварочную ванну защищают флюсом. Подача флюса, подача и перемещение электродной проволоки, зажигание дуги и заварка кратера в конце шва осуществляются автоматически. Дуга горит между электродной проволокой и основным металлом. Столб дуги и металлическая ванна закрыты слоем флюса толщиной 30...50 мм. Часть флюса расплавляется, образуя на поверхности расплавленного металла ванну жидкого шлака. Сварочные токи велики, до 2000 А, что обеспечивает увеличение глубины проплавления –

можно сваривать толщины до 20 мм за один проход без разделки кромок. При сварке металла толщиной более 20 мм кромки разделяют под углом в 30° . Этот метод сварки в 15...20 раз производительнее ручной дуговой сварки. Качество шва выше благодаря автоматизированности и непрерывности процесса, плотная флюсовая защита ванны предотвращает разбрызгивание и угар металла, интенсивное раскисление и легирование осуществляется за счет увеличения объема жидкого шлака и более медленного остывания шва под флюсом и твердой шлаковой коркой.

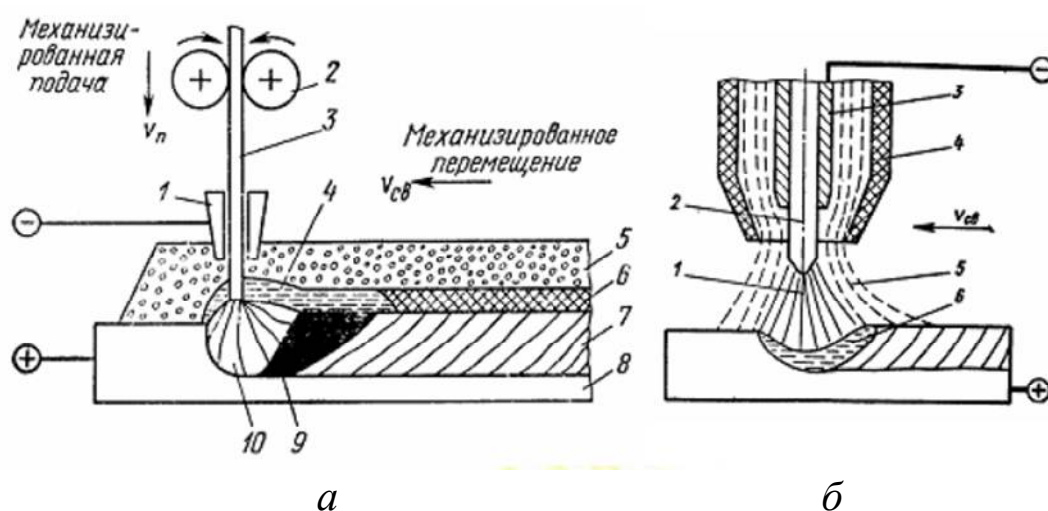


Рис. 2.2. Виды сварки:

а – автоматическая лотовая под слоем флюса:

- 1 – токоподводы; 2 – механизм подачи электродной проволоки;
 3 – электродная проволока; 4 – ванна жидкого шлака;
 5 – флюс; 6 – шлаковая корка; 7 – сварной шов;
 8 – основной металл; 9 – жидкий металл; 10 – дуга;

б – в атмосфере защитных газов:

- 1 – дуга; 2 – электрод; 3 – токоподвод; 4 – сопло;
 5 – защитный газ; 6 – сварочная ванна

Данный метод применяют в серийном и массовом производстве для выполнения длинных прямолинейных или кольцевых швов в нижнем положении на металле толщиной 2...100 мм. К недостаткам метода можно отнести возможность получать только горизонтальные швы (с небольшими отклонениями) и сложность оборудования.

2.4. Сварка в атмосфере защитных газов

Сварка в атмосфере защитных газов или газоэлектрическая сварка – это сварка, при которой электрод, зона дуги и сварочная ванна защищены струей защитного газа. Газ подают с помощью сварочной горелки через сопло из керамики или меди, в центре которого помещен электрод. Медное сопло охлаждается водой, и оно изолировано от других частей горелки и токоподвода (см. рис. 2.2, б). Защитные газы, как правило, легко ионизируются, поэтому дуга горит стабильно, в том числе и на малых токах. В качестве защитных газов у нас в стране применяют аргон и углекислый газ.

Преимущества сварки в атмосфере защитных газов:

1. Высокая степень защиты расплавленного металла от воздействия воздуха.
2. Для аргоновой сварки – отсутствие на поверхности шва оксидов и шлаковых включений.
3. Сварка осуществляется во всех пространственных положениях.
4. Визуальное наблюдение и регулирование.
5. Более высокая производительность, чем при ручной дуговой сварке.
6. Низкая стоимость при сварке в углекислом газе.

Аргоновая сварка обычно применяется для легких и тугоплавких металлов и сплавов, а также для конструкционных легированных и высоколегированных сталей. В углекислом газе варят углеродистую и низколегированную сталь.

2.5. Плазменная сварка

Плазменная струя – это поток ионизированных частиц газа, имеющих температуру 10000...20000 °С. Плазму получают путем пропуска потока газа через столб электрической дуги, горячей между электродом и водоохлаждаемым соплом. Продуваемый газ почти полностью ионизируется, проходя через столб дуги. Плазменную струю, как высокотемпературный и концентрированный источник тепла, используют для сварки, наплавки, резки и различных видов тепловой обработки поверхности материалов.

Дуговые плазменные горелки (плазмотроны) бывают двух видов:

1. Плазмотроны с выделенной плазменной струей. В них дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и соплом, к которому подключен положительный полюс источника тока. Плазмообразующий газ пропускается по каналу через столб дуги. Из сопла выходит плазменная струя, контуры которой зависят от формы сопла, размеров канала и величины тока.

Горелки питаются постоянным током прямой полярности. Выделенная струя является независимым источником тепла, который можно использовать для обработки электропроводящих и неэлектропроводящих материалов (рис. 2.3, *а*).

2. Плазмотроны с совмещенной со столбом дуги струей. В них дуга горит между электродом и заготовкой. Между электродом и соплом постоянно горит вспомогательная маломощная дуга. В этом случае эффективная мощность плазменной струи возрастает (рис. 2.3, *б*).

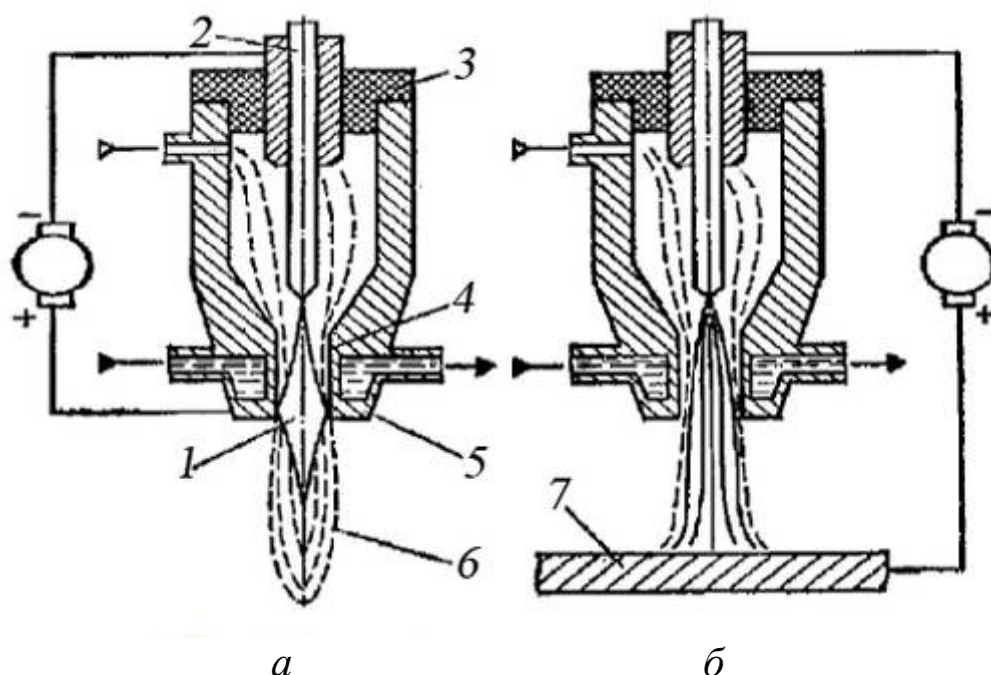


Рис. 2.3. Плазмотроны:

- а* — с плазменной струей, выделенной из дуги;
- б* — с плазменной струей, совмещенной с дугой;
- 1 — столб дуги; 2 — электрод; 3 — керамическая прокладка;
- 4 — водоохлаждаемый канал сопла; 5 — сопло;
- 6 — струя плазмы; 7 — заготовка

В качестве плазмообразующего газа обычно используется аргон, который обеспечивает устойчивый процесс образования плазмы, предохраняет электрод, канал и сопло от быстрого износа, служит защитной средой для обрабатываемого материала.

У плазменной струи большие технологические возможности: высокая температура, большая мощность и высокая производительность (можно сваривать материалы толщиной до 15 мм без разделки кромок), возможность регулировать мощность струи в широких пределах (при токе 0,5 А можно сваривать металл толщиной в несколько десятков микрон), при повышенном токе и расходе плазмообразующего газа можно проплавливать металл насквозь и выдувать его из зоны нагрева, осуществляя, таким образом, его резку, при использовании выделенной дуги можно обрабатывать неэлектропроводящие материалы. Поэтому плазменная струя используется для сварки, в том числе и неметаллов (стекла, керамики, металлокерамики), металлов с неметаллами, резки всех материалов (тугоплавких, с высокой теплопроводностью), наплавки, напыления, пайки и термической обработки.

2.6. Газовая сварка

Газосварка – это процесс сварки плавлением, при котором место соединения нагревают до расплавления высокотемпературным газовым пламенем. При нагревании газосварочным пламенем кромки свариваемых заготовок расплавляются, а зазор между ними заполняется присадочным материалом, который вводится в пламя газовой горелки извне (рис. 2.4, а). Газовое пламя получают при сгорании горючего газа в техническом кислороде. В качестве горючих газов применяют природный газ, водород, пары бензина или керосина, нефтяные газы, ацетилен и др. Основная масса газов применяется для резки металлов, а для сварки применяют ацетилен, так как он дает температуру пламени 3200 °С.

Газосварочная горелка используется для образования газосварочного пламени. Более широко распространены инжекционные горелки, так как они более безопасны и работают на низких средних давлениях. Кислород под давлением 0,1...0,4 МПа поступает в горелку и через регулировочный вентиль и трубку по-

дается к инжектору. Выходя с большой скоростью из инжекционного конуса, кислород создает значительное разрежение в камере и засасывает горючий газ в камеру смещения, где образуется горючая смесь. Горючая смесь поступает по наконечнику к мундштуку, на выходе которого при горении образуется сварочное пламя.

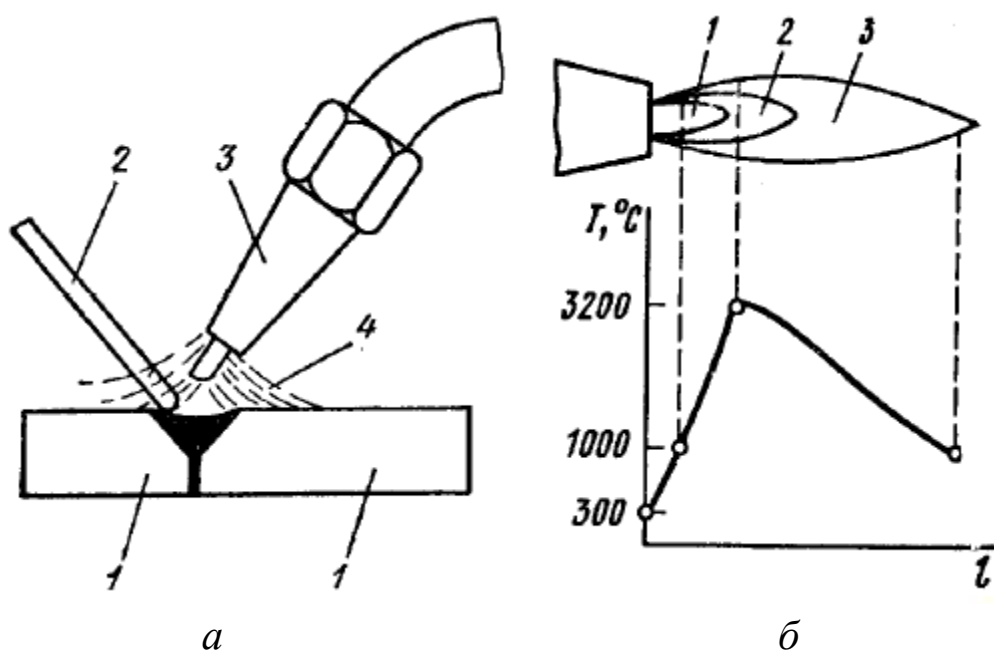


Рис. 2.4. Газосварка:

а – процесс газовой сварки:

1 – заготовки; *2* – присадочный материал;

3 – газовая горелка; *4* – газовое пламя;

б – строение газосварочного пламени:

1 – ядро пламени; *2* – средняя (сварочная) зона;

3 – факел пламени

Преимущество газовой сварки заключается в более плавном нагреве, возможности сваривать тонкие заготовки $S = (0,2 \div 3)$ мм и легкоплавкие цветные сплавы, производить пайку, осуществлять наплавку покрытий, подваривать дефекты в отливках. Газосварку удобно использовать в полевых условиях.

Недостатком способа является резкое падение производительности при увеличении толщины свариваемого металла, а медленный нагрев заготовки приводит к деформации (короблению) изделий.

3. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ

При сварке давлением заготовки соединяются путем совместной пластической деформации соединяемых поверхностей. Пластическая деформация осуществляется за счет внешних усилий, а материал в зоне соединения, как правило, нагревают для снижения сопротивления деформации. При деформации происходит смятие поверхностей, течение металла, разрушение и удаление оксидных пленок, в результате чего обеспечивается плотный контакт и условия для возникновения межатомных связей.

3.1. Электрическая контактная сварка

Электроконтактная сварка относится к способам сварки давлением с нагревом места соединения без оплавления или с оплавлением. Разогрев осуществляется проходящим по металлу электрическим током, причем максимальное количество тепловой энергии выделяется в месте контакта. После приложения давления в месте контакта наблюдается пластическая деформация и образуется сварное соединение. По типу этого соединения различают следующие виды контактной сварки:

1. Стыковая сварка.
2. Точечная сварка.
3. Шовная (роликовая) сварка.
4. Газопрессовая сварка.

3.1.1. Стыковая сварка

При контактной стыковой сварке методом сопротивления (рис. 3.1, *а*) заготовки свариваются по всей поверхности контакта. Для формирования прочного соединения процесс должен протекать в определенной последовательности. Цикл стыковой сварки (последовательность изменения тока и давления) представлен на рис. 3.1, *б*. Заготовка закрепляется в зажимах, сдавливается небольшим усилием, затем включается ток. Металл разогревается до пластического состояния или оплавления, и прикладывается основное усилие. Параметрами режима сварки являются: плотность тока, давление, усилие сжатия и время прохождения тока. Таким способом сваривают заготовки одинаковой простой фор-

мы небольшого сечения – до 100 мм из низкоуглеродистых, низколегированных конструкционных сталей, алюминиевых и медных сплавов.

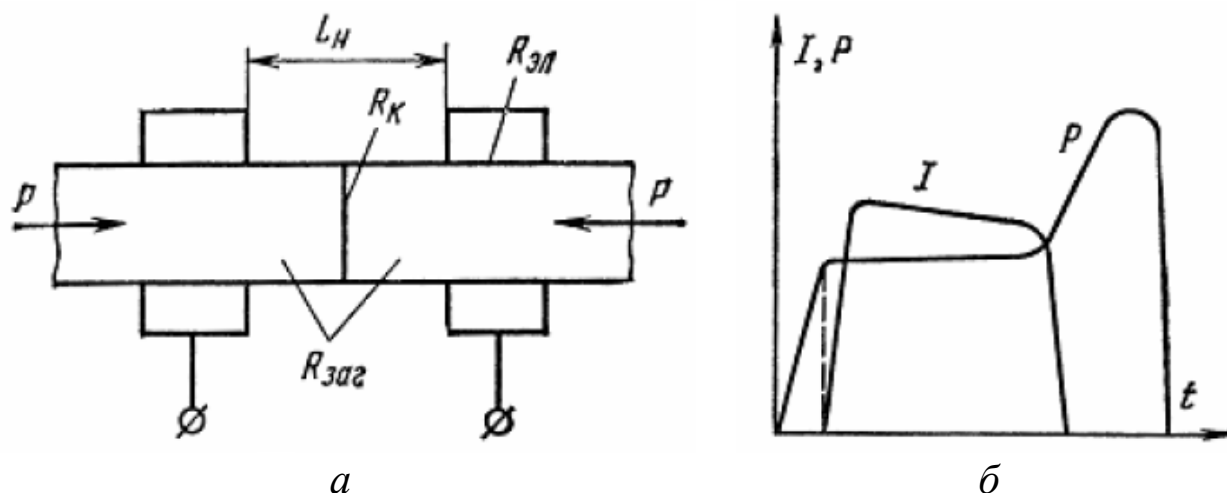


Рис. 3.1. Контактная сварка:

а – схема контактной сварки;

б – цикл контактной стыковой сварки сопротивлением

3.1.2. Точечная сварка

Точечная сварка – разновидность контактной сварки, при которой заготовки соединяются в отдельной точке или в нескольких точках. При этом заготовки собираются внахлестку и зажимаются с усилием между медными электродами, подводщими ток. Основное тепло выделяется в месте контакта заготовок, так как там максимальное электрическое сопротивление, а медные контакты нагреваются менее интенсивно за счет своей высокой теплопроводности. В месте разогрева металл становится пластичным, внутренние слои оплавляются, и образуется сварная точка. После этого выключают ток и снимают давление.

Точечная сварка в зависимости от взаимного расположения электродов может быть двусторонней (рис. 3.2, *а*) и односторонней (рис. 3.2, *б*). Регулируемыми параметрами процесса являются: усилие сжатия (до 150 МН/м²), плотность тока (до 360 А/мм²) и время протекания тока (0,001...0,5 с). Толщина свариваемого металла составляет 0,5...5 мм.

Циклограмма точечной сварки (рис. 3.2, *в*) состоит из четырех участков – стадий:

1. Сжатие электродами свариваемых заготовок.
2. Включение тока и разогрев места контакта до температуры плавления.
3. Выключение тока и увеличение усилия сжатия.
4. Снятие усилия с электродов.

В массовом производстве используется многоточечная сварка, когда за один цикл создается до 100 пар (до 200) точек.

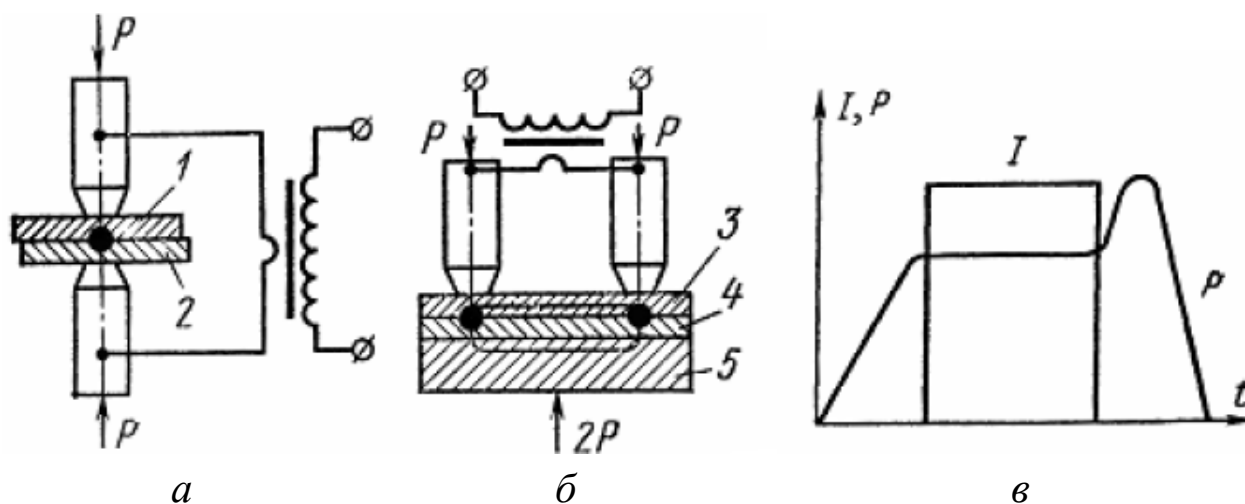


Рис. 3.2. Контактная точечная сварка:
а – двусторонняя; *б* – односторонняя;
в – цикл контактной точечной сварки;
 1, 2 – заготовки; 3, 4 – нижний и верхний листы;
 5 – медная подкладка

3.1.3. Шовная (роликовая) сварка

При шовной сварке один или оба электрода выполняются в виде роликов. Ролики вращаются, и между ними пропускаются свариваемые заготовки, которые соединены внахлестку. При пропускании тока образуется вытянутая сварная точка по форме ролика. Так как ролики вращаются, то точки перекрывают друг друга, и образуется сплошной герметичный шов. Шовную сварку можно выполнять при двустороннем (рис. 3.3, *а*) и одностороннем положении электродов (рис. 3.3, *б*). Циклограмма шовной сварки состоит из тех же стадий, что и у точечной сварки. Шовную сварку применяют при изготовлении сосудов в массовом производстве. Толщина свариваемых заготовок 0,3...3 мм.

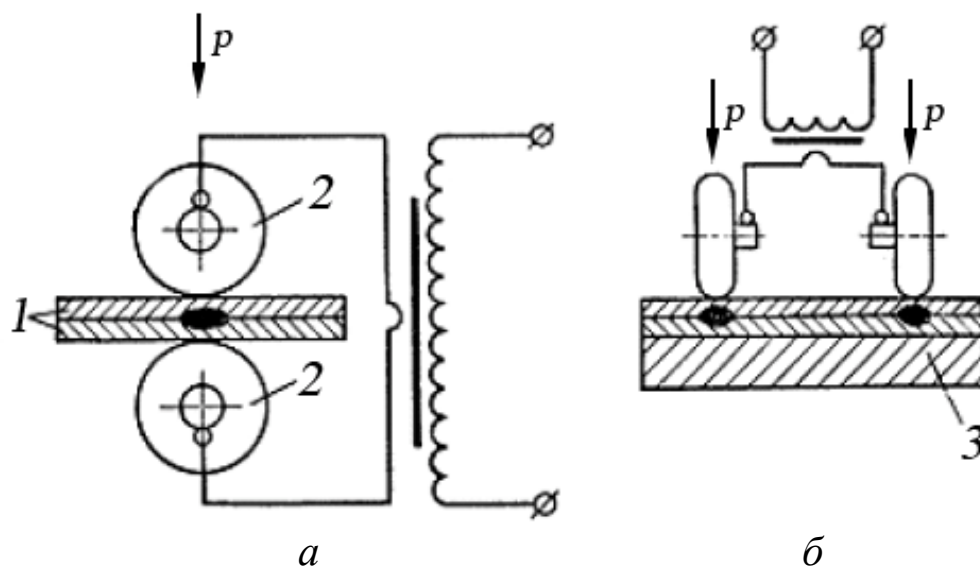


Рис. 3.3. Шовная сварка:

a – двусторонняя; *б* – односторонняя;
 1 – заготовка; 2 – электроды; 3 – медная подкладка

3.1.4. Пайка

Пайка – процесс соединения заготовок без их расплавления путем введения в зазор между ними легкоплавкого сплава – припоя, который в расплавленном состоянии хорошо смачивает поверхности деталей и при застывании соединяет их за счет взаимного растворения и диффузии припоя и основного материала. Припой имеет температуру плавления меньше температуры плавления основных металлов. Качество паяного шва зависит от прочности связки припоя с основными металлами. Эта связь образуется либо путем растворения металлов в жидком припое, либо за счет диффузии элементов припоя в металл и образования твердого раствора, либо образования интерметаллических соединений, либо в результате межатомных взаимодействий. Паять можно углеродистую и легированную сталь, чугуны, цветные металлы и сплавы.

При пайке используют флюсы для очистки поверхностей, снижения поверхностного натяжения, улучшения растекания и смачивания. *Флюсы* – канифоль, стеарин, бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), борная кислота (H_3BO_3) и другие.

Преимущество пайки в том, что основной металл не расплавляется и таким образом сохраняет свои структуру и механические свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В горной промышленности используется большая группа конструкционных материалов – металлические (черные и цветные металлы и сплавы) и неметаллические (древесные материалы, искусственные каменные материалы из неорганических минеральных веществ). Изучение этих материалов, а также основных условий формирования их эксплуатационных свойств является одной из важных составных задач при подготовке инженеров горного профиля.

Способы получения заготовок отличаются большим разнообразием, в том числе литейное производство (литье в одноразовые и многоразовые формы), обработка металлов давлением (прокатное производство, ковка, штамповка, прессование, волочение), сварочное производство (сварка давлением, сварка плавлением). Перечисленное многообразие методов получения заготовок из различных конструкционных материалов вызывает необходимость их обобщения и систематизации.

В рассматриваемом учебном пособии решена задача комплексного подхода к рассмотрению вопросов производства заготовок и свойств конструкционных материалов, используемых в горной промышленности.

Учебное пособие подготовлено с учетом современного состояния вопроса в области материаловедения и технологии конструкционных материалов; оно решает задачу формирования у студентов комплекса знаний в этой области.

Учебная информация в пособии представлена в виде схем, таблиц, графиков и фотографий структур. Наглядность излагаемого материала способствует более полному и углубленному освоению курса при обучении студентов. Отличается оригинальным методологическим подходом.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ, 2001. – 648 с.
2. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка / Ю. М. Лахтин. – М. : Metallurgy, 1993. – 527 с.
3. Материаловедение и технология материалов / Г. П. Фетисов [и др.]. – М. : Высш. шк., 2002. – 638 с.
4. Зуев, В. М. Термическая обработка металлов / В. М. Зуев. – М. : Высш. шк., 2001. – 288 с.
5. Ржевская, С. В. Материаловедение : учеб. для вузов / С. В. Ржевская. – М. : Унив. кн., 2006. – 424 с.
6. Попов, К. Н. Строительные материалы и изделия : учебник / К. Н. Попов, М. Б. Каддо. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Высш. шк., 2005. – 438 с.
7. Основин, В. Н. Справочник по строительным материалам и изделиям / под ред. В. Н. Основина, Л. В. Шулякова. – 3-е изд. – Ростов н/Д : Феникс, 2006. – 443 с.
8. Горчаков, Г. И. Строительные материалы : учеб. для вузов / под ред. Г. И. Горчакова, Ю. М. Баженова. – М. : Стройиздат, 1986. – 688 с.
9. Береснев, Р. С. Распиловка бревен / Р. С. Береснев, А. А. Тихомиров. – М. : Лесн. пром-сть, 1970. – 84 с.
10. Григорьев, М. А. Материаловедение для столяров и плотников / М. А. Григорьев. – М. : Высш. шк., 1977. – 176 с.
11. Справочник по древесине / под ред. Б. Н. Уголева. – М. : Лесн. пром-сть, 1989. – 294 с.
12. Буйвидович, Ф. В. Технология столярно-плотничных и паркетных работ / Ф. В. Буйвидович. – Минск : Высшая шк., 2000. – 470 с.
13. Технология конструкционных материалов : учеб. для вузов / А. М. Дальский [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – 5-е изд. – М. : Машиностроение, 2004. – 512 с.
14. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учеб. для вузов / Ю. П. Солнцев [и др.]. – М. : МИСИС, 1996. – 622 с.

Видин Денис Владимирович
Шатько Дмитрий Борисович
Лацинина Светлана Викторовна
Бакулин Евгений Владимирович

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Редактор О. А. Вейс

Подписано в печать 29.12.2011. Формат 60×84/16
Бумага белая писчая. Отпечатано на ризографе
Уч.-изд. л. 10,00. Тираж 200 экз. Заказ

ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет
им. Т. Ф. Горбачева». 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Типография ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический
университет им. Т. Ф. Горбачева». 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а