

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»**

**НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

***МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И  
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ***

**Новотроицк  
2016**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»**

**НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

---

Кафедра металлургических технологий и оборудования

---

**Братковский Е.В., Шевченко Е.А.**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И  
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Новотроицк 2016

УДК 621.74 (075.8)

ББК

Б

**Рецензенты:**

*Заведующий кафедрой теплотехнических систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, д.т.н.  
Агапитов Е.Б.*

*Профессор кафедры обработки металлов давлением ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», профессор, к.т.н.  
Румянцев И.М.*

Братковский Е.В., Шевченко Е.А. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебное пособие для бакалавров по направлениям подготовки: 22.03.02 «Металлургия», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». – Новотроицк: НФ МИСиС, 2016. – 167 с.

Учебное пособие предназначено для изучения дисциплин «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов» для бакалавров по направлениям подготовки 22.03.02 «Металлургия», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения.

Приведены основные сведения о современных конструкционных материалах, рассмотрены теоретические и практические вопросы, связанные с важнейшими свойствами металлов, сплавов и неметаллических материалов. Изложены основы теории термической обработки черных и цветных сплавов.

*Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»*

© Новотроицкий филиал  
ФГАОУ ВПО «Национальный  
исследовательский  
технологический университет  
«МИСиС», 2016

## Содержание

1	Кристаллическое строение металлов .....	5
1.1	Кристаллические решетки металлов.....	5
1.2	Реальное строение металлов .....	7
1.3	Кристаллизация металлов. Построение кривых охлаждения.....	9
1.4	Реальное строение слитка спокойной стали .....	12
1.5	Аллотропические превращения металлов .....	13
2	Свойства материалов, способы их определения .....	15
2.1	Общие сведения .....	15
2.2	Определение механические свойства материала.....	17
2.3	Определение технологических свойств материала .....	27
2.4	Определение эксплуатационных свойств материала .....	28
3	Изучение структуры металлов .....	30
4	Основные теории сплавов .....	32
4.1	Твердый раствор .....	32
4.2	Химическое соединение.....	33
4.3	Механическая смесь .....	34
5	Диаграммы состояния сплавов .....	35
5.1	Диаграмма состояния сплавов первого рода.....	35
5.2	Диаграмма состояния сплавов второго рода.....	37
6	Железоуглеродистые сплавы .....	39
6.1	Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов.....	39
6.2	Диаграмма состояния сплавов железо-цементит (Fe-Fe <sub>3</sub> C).....	41
7	Стали.....	47
7.1	Классификация сталей.....	47
7.2	Маркировка сталей в России .....	50
7.3	Классификация углеродистых и легированных сталей .....	51
7.4	Влияние углерода и примесей на структуру и свойства сталей.....	54
8	Классификация конструкционных сталей .....	56
8.1	Цементуемые стали .....	56
8.2	Улучшаемые стали.....	57
8.3	Пружинные стали.....	59
8.4	Конструкционные стали высокой обрабатываемости резанием.....	60
8.5	Строительные стали.....	61
9	Инструментальные стали и сплавы .....	64
9.1	Классификация инструментальных сталей и сплавов и технические требования к ним.....	64
9.2	Легированные инструментальные стали (ГОСТ-59-2000) .....	65
9.3	Быстрорежущие стали .....	68
9.4	Твёрдые сплавы.....	70
9.5	Сверхтвёрдые материалы .....	70
10	Чугуны.....	71
10.1	Характерные особенности чугунов.....	71
10.2	Классификация чугунов .....	72
10.3	Серые чугуны .....	73
10.4	Ковкие чугуны.....	76
10.5	Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом.....	77

11 Основы термической обработки .....	79
11.1 Общие сведения .....	79
11.2 Критические температуры чугуна и стали .....	81
10.3 Превращения, происходящие в стали при нагреве и охлаждении.....	85
11.4 Отжиг .....	89
11.5 Нормализация.....	92
11.6 Закалка .....	93
11.7 Отпуск и старение.....	97
11.8 Обработка стали холодом .....	101
11.9 Термомеханическая обработка стали .....	101
12 Поверхностное упрочнение стали .....	103
12.1 Поверхностная закалка стали .....	103
12.2 Химико-термическая обработка стали .....	108
13 Цветные металлы и сплавы .....	121
13.1 Медь и её сплавы .....	121
13.2 Алюминий и его сплавы.....	124
13.3 Цинк и его сплавы.....	128
13.4 Магний и его сплавы .....	129
13.5 Титан и его сплавы .....	132
13.6 Антифрикционные (подшипниковые) и тормозные материалы.....	133
14 Неметаллические материалы .....	135
14.1 Полимеры.....	135
14.2 Пластмассы .....	139
14.3 Резины .....	146
14.4 Стекло, ситаллы, графит .....	149
15 Композиционные материалы .....	151
15.1 Основные свойства и классификация композиционных материалов.....	151
15.2 Композиционные материалы с алюминиевой матрицей .....	155
15.3 Композиционные материалы с никелевой матрицей .....	156
15.4 Композиционные материалы с одномерными наполнителями.....	156
15.5 Композиционные материалы с алюминиевой матрицей, армированные стальной проволокой и другими материалами .....	162
15.6 Композиционные материалы на никелевой матрице, упрочняемые нитевидными кристаллами, вольфрамовой и молибденовой проволокой и другими материалами .....	164
Библиографический список.....	166

# 1 Кристаллическое строение металлов

## 1.1 Кристаллические решетки металлов

Металлы и сплавы – основной машиностроительный материал. Они обладают многими замечательными свойствами, обусловленными в основном их внутренним строением. Свойствами металлов и сплавов можно управлять ими. Мягкий и пластичный металл или сплав можно сделать твердым, хрупким и наоборот.

Из 112 известных химических элементов таблицы Менделеева Д.И. 83 являются металлами. Они обладают рядом характерных свойств:

- способность к пластической деформации;
- высокая электропроводность;
- высокая теплопроводность;
- хорошая отражательная способность (металлический блеск);
- полиморфизмом (углерод в соединениях алмаза, графита, кокса) ;
- обрабатываемость резанием.

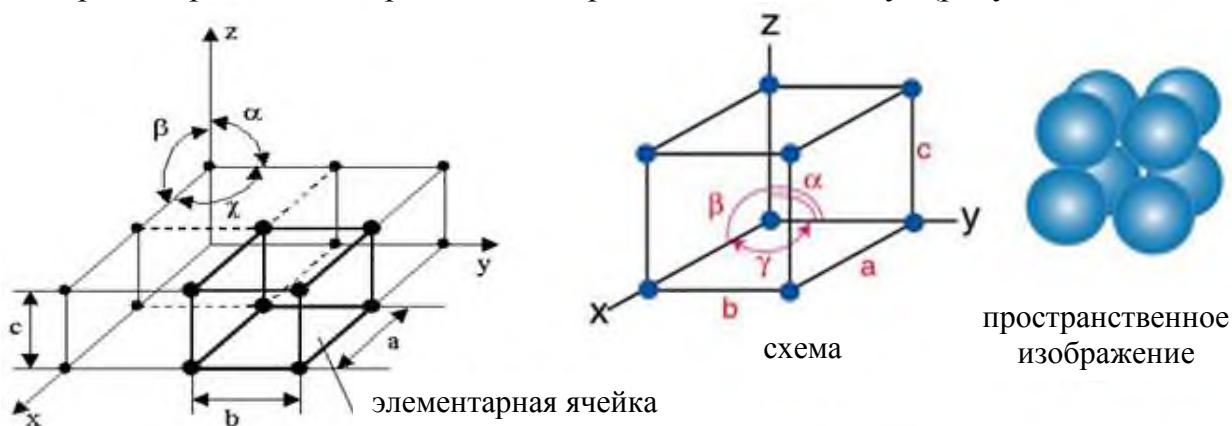
Согласно теории металлического состояния, любой металл представляет собой вещество кристаллического строения, состоящее из положительных ядер, вокруг которых по орбиталям вращаются электроны. На последнем уровне число электронов невелико и они слабо связаны с ядром. Эти электроны имеют возможность перемещаться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

Характерные особенности кристаллического строения металлов:

- на внешнем уровне небольшое число электронов (1 - 2 электрона);
- относительно большой радиус атомов т.к. расположены в начале периода;
- стремление к отдаче внешних электронов  $Me^0 - ne \rightarrow Me^{n+}$ .

Кристаллическая решетка металлов представляет собой воображаемую пространственную сетку, состоящую из элементарных ячеек, в узлах которой находятся атомы.

Наиболее простой и распространенной среди металлов, является кубическая система, при которой элементарная ячейка представляет собой куб (рисунок 1.1)



a, b, c – периоды решетки;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – углы между осями  
Рисунок 1.1 - Элементарная ячейка кубической решетки

Под элементарной кристаллической ячейкой (решеткой) понимается комплекс атомов, который при своем многократном повторении в пространстве позволяет воспроизвести пространственную кристаллическую решетку.

Элементарная ячейка характеризует особенности строения кристалла. Основными параметрами кристалла являются:

- размер ребра элементарной ячейки ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  – периоды решетки – расстояния между центрами ближайших атомов);

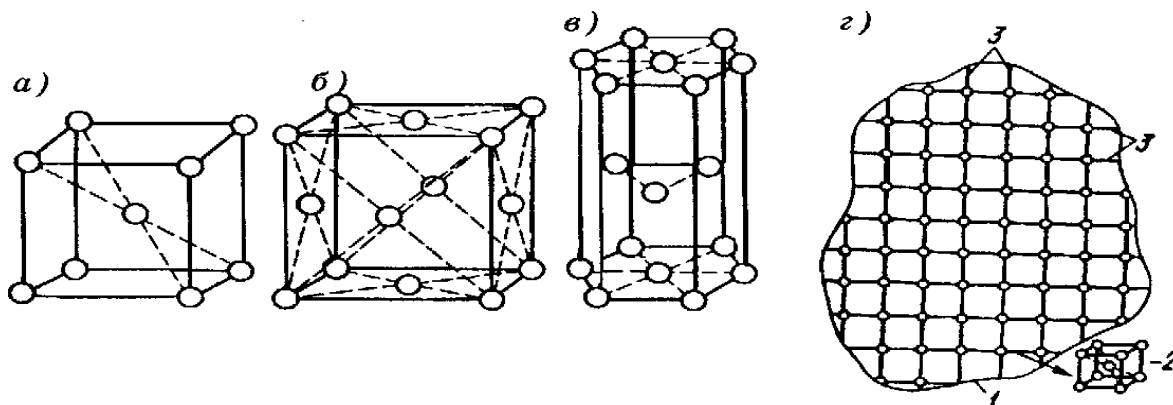
- координационное число ( $K$ ) указывает на число атомов, расположенных на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома в решетке;

- базис решетки (число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки);

- плотность упаковки атомов в кристаллической решетке – объем, занятый атомами, которые условно рассматриваются как жесткие шары. Ее определяют как отношение объема, занятого атомами к объему ячейки (для объемно-центрированной кубической решетки – 0,68, для гранецентрированной кубической решетки – 0,74).

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

Элементарные ячейки пространственной кристаллической решетки представлены на рисунке 1.2.



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

Рисунок 1.2 - Элементарные ячейки пространственной кристаллической решетки

В ячейке кубической ОЦК решетки атомы расположены в вершинах и в центре куба, она содержит девять атомов.

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

В ячейке кубической ГЦК решетки атомы находятся в вершинах куба и на пересечении диагоналей каждой плоскости, она имеет 14 атомов. Кубической ГЦК решеткой обладают свинец, никель, медь, золото, серебро, платина, железо при определенных температурах – и другие металлы.

В ячейке гексагональной решетки атомы располагаются в вершинах и в центре шестигранных оснований призмы, три атома – в средней ее плоскости. Ячейка гексагональной решетки содержит 17 атомов. Гексагональную кристаллическую решетку имеют магний, кадмий, цинк, бериллий, осмий и другие металлы. При определенных условиях у некоторых металлов (железо, титан, цирконий, стронций, кобальт, каль-

ций и др.) один вид кристаллической решетки может перестраиваться в другой, например кубическая объемно-центрированная – в гранецентрированную и даже в гексагональную. Элементарная ячейка отображает только один элемент или одну ячейку кристаллической решетки. Вся кристаллическая решетка в реальном металле состоит из большого числа многократно повторяющихся элементарных ячеек.

## 1.2 Реальное строение металлов

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, то есть, имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы называются зернами. Они имеют неправильную форму и различно ориентированы в пространстве.

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

- 1) Точечные дефекты (вакансии, дислоцированные и примесные атомы).
- 1) Линейные дефекты (винтовые, краевые и смешанные дислокации).
- 2) Поверхностные дефекты по границам зерен суб-зерен.
- 3) Объемные дефекты (поры, трещины, неметаллические включения и др.).

Точечные дефекты представлены на рисунке 1.3.

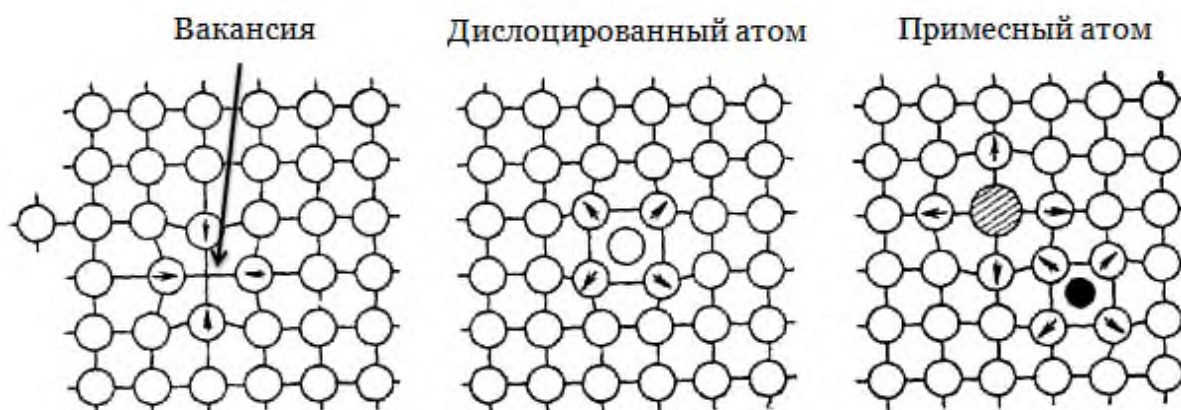


Рисунок 1.3 – Точечные дефекты кристаллической решетки

Вакансия – отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки. 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 (облучение в циклотроне или нейтронной облучение в ядерном реакторе).

Дислоцированный 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.

Примесные атомы всегда присутствуют в металле, так как практически невозможно выплавить химически чистый металл. Они могут иметь размеры больше или меньше размеров основных атомов и располагаются в узлах решетки или междоузлиях.



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.

Количество вакансий в кристаллической решетке может достигать огромных размеров, в  $1 \text{ см}^3$  кристаллической решетки кадмия при температуре  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  количество вакансий достигает  $10^{13}$ . Вакансии не остаются неподвижными. Они могут перемещаться и объединяться в группы, образуя большие линейные дефекты. Они называются дислокациями и представлены на рисунке 1.4.

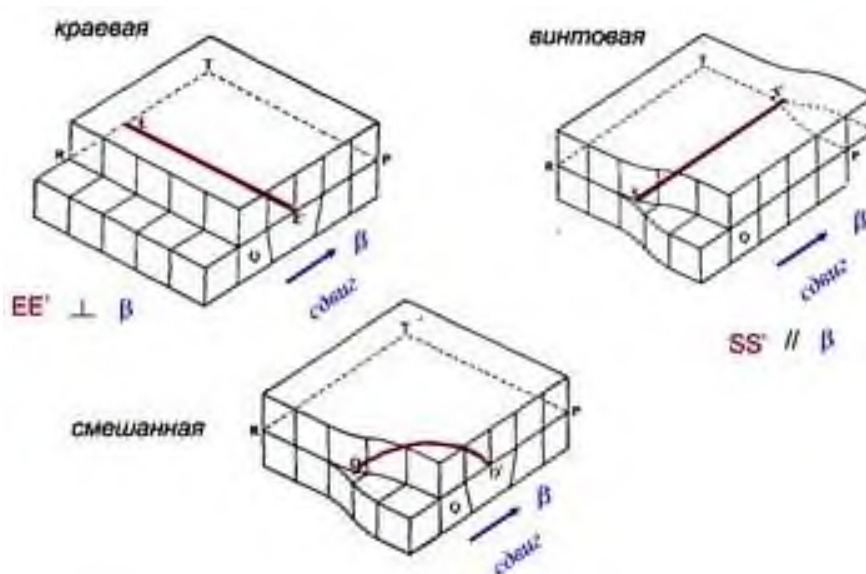


Рисунок 1.4 – Линейные дефекты кристаллической решетки

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

Выделяют 3 вида дислокаций: краевая, винтовая и смешанная.

Краевая дислокация представляет собой искажение кристаллической решетки, вызванное наличием «лишней» атомной полуплоскости.

Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то краевая дислокация – положительная ( $\perp$ ), если в нижней, то – отрицательная ( $\top$ ). Дислокации одного знака отталкиваются, а противоположные притягиваются.

Винтовая дислокация – представляет собой искажение кристаллической решетки, вызванное наличием границы незавершенного сдвига.

Винтовая дислокация не связана с какой-либо плоскостью скольжения, она может перемещаться по любой плоскости, проходящей через линию дислокации. Вакансии и дислоцированные атомы к винтовой дислокации не стекают.

В процессе кристаллизации атомы вещества, выпадающие из пара или раствора, легко присоединяются к ступеньке, что приводит к спиральному механизму роста кристалла.

Дислокации характеризуются вектором Бюргерса ( $b$ ), который показывает направление и величину смещения кристаллической решетки при движении дислокации.  $b$  имеет постоянное значение вдоль линии дислокации.

Кроме того важной характеристикой является плотность дислокаций  $\rho$ , характеризующая суммарное количество дислокаций в металле.

Плотность дислокаций в кристалле определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью  $1 \text{ м}^2$ , или как суммарная длина линий дислокаций в объеме  $1 \text{ м}^3$ .

Поверхностные (двумерные) дефекты – включают в себя главным образом границы зерен, между которыми имеется пограничный слой с сильно искаженной структурой и с высокой концентрацией точечных и линейных дефектов кристаллической решетки. В них скапливаются перемещающиеся изнутри зерен дислокации.

Данные несовершенства кристаллического строения образуются в процессе кристаллизации, а также при последующих обработках: обработке давлением, термообработке и т.д.

Объемные дефекты кристаллической решетки включают трещины и поры. Наличие данных дефектов, уменьшая плотность металла, снижает его прочность.

Кроме того, трещины являются сильными концентраторами напряжений, в десятки и более раз повышающими напряжения, создаваемые в металле рабочими нагрузками. Последнее обстоятельство наиболее существенно влияет на прочность металла.

Все металлы являются поликристаллами, поскольку они состоят из огромного количества анизотропных кристаллов. Кристаллы всегда анизотропны в отличие от аморфных тел (канифоль, стекло, смола, пластмассы и др.), свойства которых не зависят от направления, так как они имеют одинаковую плотность атомов.

В связи с тем, что кристаллы ориентированы по отношению друг к другу под незначительным углом ( $10^{-15}$ ), тело металла имеет во всех направлениях более или менее одинаковые свойства (усредненные). Поликристаллическое тело изотропное, но эта изотропность мнимая, называемая квазиизотропией (по-латыни *квази* – мнимый). В результате обработки металлов давлением в холодном состоянии (прокатка, штамповка) изотропная структура может получить частичную анизотропию свойств из-за того, что часть кристаллов будет ориентирована в определенном направлении.

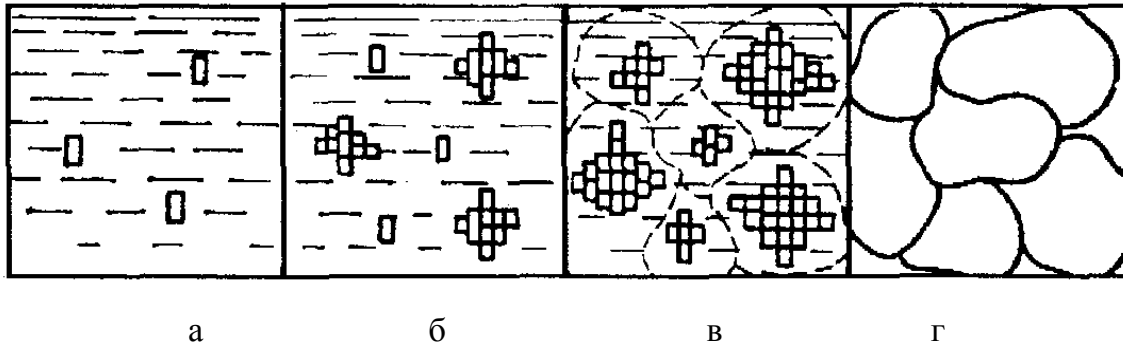
### **1.3 Кристаллизация металлов. Построение кривых охлаждения**

Процесс образования кристаллов при затвердевании металла называется кристаллизацией. При кристаллизации металла выделяется теплота, при переходе же металла из твердого состояния в жидкое происходит поглощение теплоты.

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

Последовательные этапы процесса кристаллизации показаны на рисунке 1.5.

Первый этап – появление зародышей кристаллов. По мере остывания металла к зародышам присоединяются все новые и новые атомы жидкого металла, которые группируются в определенном порядке один возле другого, образуя элементарные ячейки кристаллической решетки (элементарная ячейка изображена в виде прямоугольников). Этот процесс продолжается до тех пор, пока не закончится кристаллизация.



а - появление зародышей кристаллов; б - рост кристаллов и образование новых центров; в - рост кристаллов; г - границы кристаллов (зерен) затвердевшего металла  
Рисунок 1.5 - Последовательные этапы процесса кристаллизации

Процесс кристаллизации изучается по кривым охлаждения (рисунок 1.6).

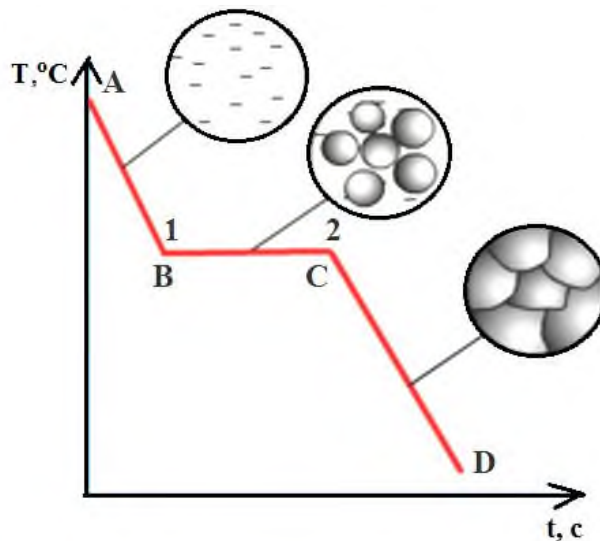


Рисунок 1.6 - Кривая охлаждения процесс кристаллизации

Понижение температуры вызывает охлаждение расплава (участок АВ). До точки 1 охлаждается металл в жидком состоянии, процесс сопровождается плавным понижением температуры. На участке ВС (точки 1 – 2) идет процесс кристаллизации, сопровождающийся выделением тепла, которое называется скрытой теплотой кристаллизации. Оно компенсирует рассеивание теплоты в пространство, и поэтому температура остается постоянной. После окончания кристаллизации в точке 2 температура снова начинает снижаться, металл охлаждается в твердом состоянии (участок CD).

Процесс кристаллизации складывается из двух процессов:

- 1) скорости зарождения центров кристаллизации - количество зародышей, образовавшихся в единице объема, за единицу времени.
- 2) скорости их роста - увеличения линейных размеров растущей грани кристалла в единицу времени.

Кинетика кристаллизации металла в зависимости от степени переохлаждения представлен на рисунке 1.7.

Чем больше скорость охлаждения металла, тем быстрее он затвердевает, тем больше возникает центров кристаллизации и, следовательно, тем меньшего размера получаются зерна. В тонких быстро охлаждающихся сечениях литых деталей металл имеет более мелкое зерно, чем в толстых массивных охлаждение медленнее

Однако скорость охлаждения не всегда можно регулировать. Мелкое зерно при затвердевании металла образуется в случае создания искусственных центров кристаллизации. Для этого в расплавленный металл вводят специальные вещества, называемые модификаторами. Процесс искусственного регулирования размеров зерен получил название модифицирования.

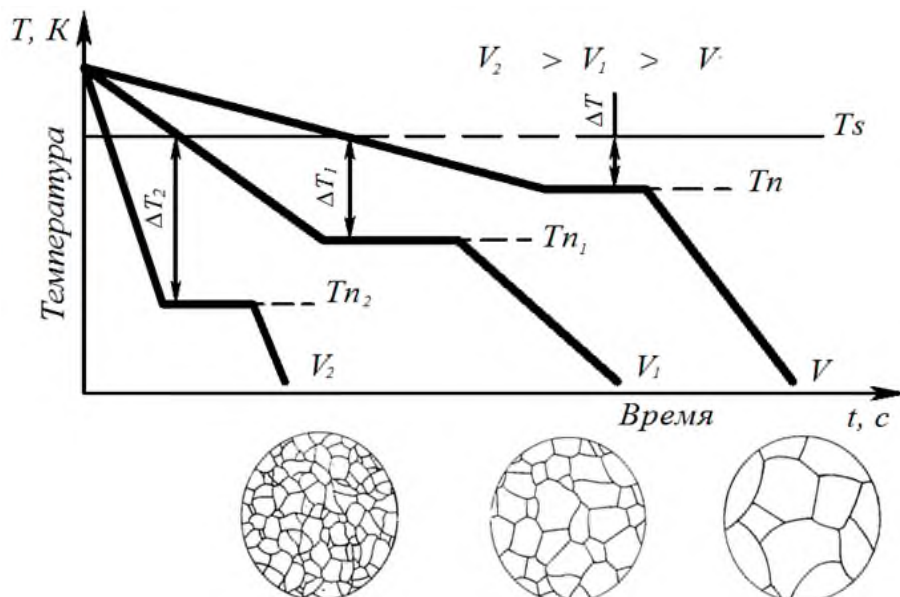
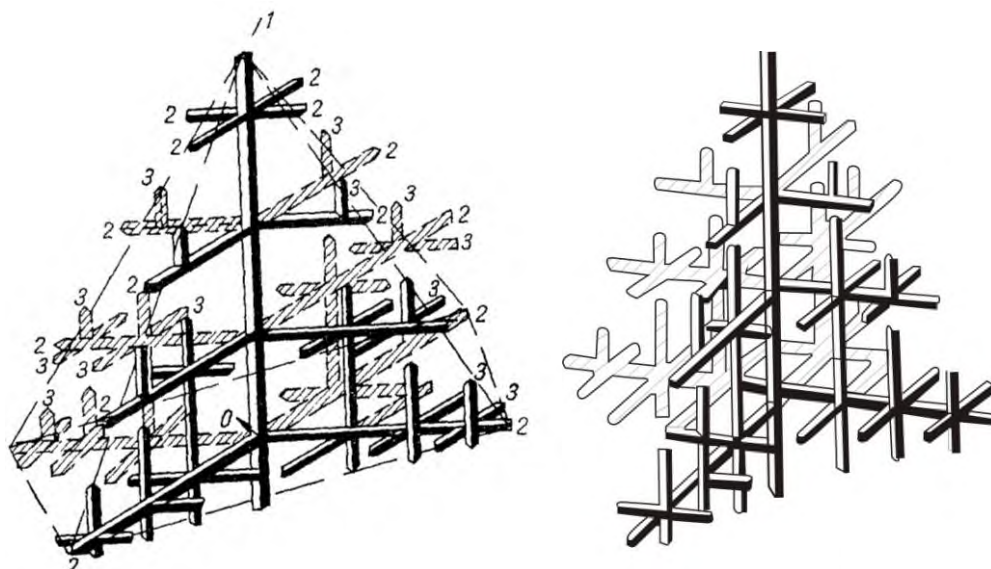


Рисунок 1.7 – Кинетика кристаллизации металла в зависимости от степени переохлаждения

Кристаллы затвердевшего металла имеют неправильную и разнообразную внешнюю форму, что объясняется условиями кристаллизации. В процессе кристаллизации увеличивается количество кристаллов (в  $1 \text{ мм}^3$  может образоваться свыше 1000 кристаллов). При соприкосновении грани смежных кристаллов мешают друг другу принять геометрически правильную внешнюю форму дендритного строения (рисунок 1.8).



1, 2 и 3 – оси соответственно первого, второго и третьего порядков

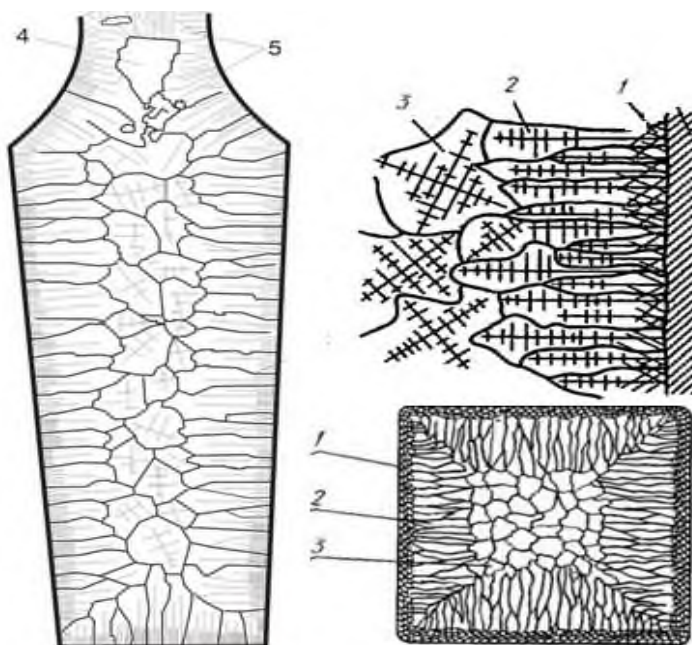
Рисунок 1.8 - Схема дендритного строения по Д. К. Чернову

Кристаллы, имеющие неправильную внешнюю форму, называются кристаллитами, или зернами. Размер зерен зависит от условий кристаллизации, и прежде всего, от скорости охлаждения металла.

Форма растущих кристаллов зависит не только от условий их столкновения между собой, но также от состава сплава, наличия примесей и условий охлаждения. Механизм образования кристаллов в большинстве случаев носит так называемый дендритный характер. При дендритной кристаллизации рост зародышей кристаллов происходит с неравномерной скоростью. После образования зародышей их развитие идет главным образом в тех направлениях решетки, которые имеют наибольшую плотность расположения атомов (минимальное межатомное расстояние). В этих направлениях возникают длинные ветви будущего кристалла – оси первого порядка. От осей первого порядка под определенными углами растут новые оси – оси второго порядка 1, от осей второго порядка – оси третьего порядка 2. По мере кристаллизации образуются оси более высокого порядка (четвертого, пятого, шестого и т. д.), которые постепенно заполняют нее промежутки, ранее занятые жидким металлом.

#### 1.4 Реальное строение слитка спокойной стали

Процесс кристаллизации реальных сплавов начинается у стенок изложницы, в местах где жидкий металл охлаждается в первую очередь и последовательно продвигается к центру слитка. Поэтому слиток спокойной стали состоит из трех зон кристаллов (рисунок 1.9).



1 – зона дезориентированных кристаллитов; 2 – зона столбчатых кристаллов; 3 – зона крупных равноосных кристаллитов; 4 – усадочная раковина; 5 – усадочная пористость

Рисунок 1.9 - Схема строения слитка спокойной стали

Первая образовавшаяся зона мелких дезориентированных кристаллитов формируется благодаря большой степени переохлаждения. Первичные кристаллы (оси первого порядка) растут перпендикулярно неровностям внутренней поверхности стенок

изложницы. Растущие кристаллы, сталкиваясь между собой образуют зону мелких, дезориентированных, беспорядочно направленных кристаллитов (зерен).

После образования первой зоны начинается рост второй зоны - столбчатых кристаллов. Рост этих кристаллов идет в направлении противоположном отводу тепла и поскольку все кристаллы растут одновременно, то получаются столбчатые, вытянутые кристаллиты, рост которых продолжается пока имеется направленный отвод тепла. В случае сильного перегрева и быстрого охлаждения, зона столбчатых кристаллов может заполнить весь объем слитка. Это явление называется транскристаллизацией.

Зона столбчатых кристаллов обладает высокой плотностью и прочностью, но соответственно пластичность этой зоны понижена, что часто является причиной образования трещин при обработке давлением. Для малопластичных металлов, в том числе и стали, развитие этой зоны нежелательно, а для пластичных металлов с гцк решеткой (медь, алюминий и др.) желательно развитие транскристаллизации. В центральной зоне слитка, в условиях медленного и фактически равновесного охлаждения, образуется зона равноосных произвольно ориентированных кристаллитов, размер которых зависит от степени переохлаждения, наличия примесей и т.д. Равноосные, произвольно ориентированные кристаллы получаются потому, что отвод тепла в этой части слитка идет во всех направлениях с одинаковой скоростью и поэтому оси первого порядка располагаются без определенной ориентировки.

В верхней части слитка, где металл застывает в последнюю очередь, образуются усадочные раковины, рыхлость, пористость которые подлежат отрезке и переплавке (около 15-20 % от длины слитка). Различными технологическими приемами (установкой прибылей) удается сконцентрировать усадочную раковину в верхней части слитка, которую обычно удаляют

### 1.5 Аллотропические превращения металлов

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

Модификации – структурные различные формы одного и того же металла – обозначаются буквами греческого алфавита:  $\alpha$  – альфа,  $\beta$  – бета,  $\gamma$  – гамма,  $\delta$  – дельта. Модификацию, устойчивую при низкой температуре, принято обозначать буквой  $\alpha$ , при повышенной температуре –  $\beta$ , при высокой –  $\gamma$  и при наиболее высокой –  $\delta$ .

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

Переход металла из жидкого состояния в твердое называют первичной кристаллизацией, аллотропические превращения – вторичной кристаллизацией. Полиморфизм железа представлен на рисунке 1.10.

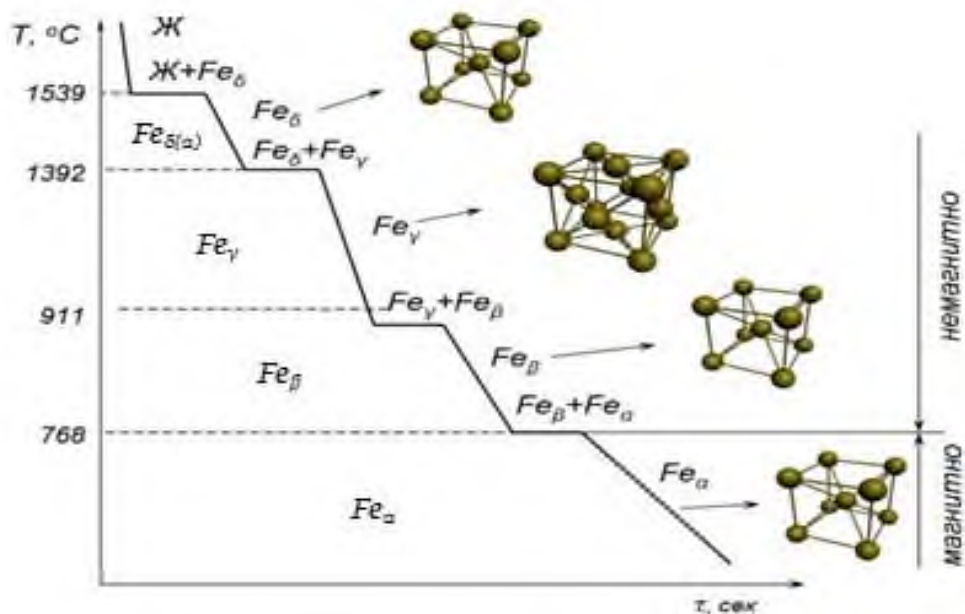


Рисунок 1.10 - Полиморфизм железа

Первичная кристаллизация железа происходит при 1539 °С с образованием объемно-центрированной кубической решетки  $\alpha$  ( $\beta$ )-железа, которая существует до температуры 1392 °С. При этой температуре наблюдаются аллотропические превращения  $\alpha$ -железо  $\rightarrow$   $\gamma$ -железо с образованием гранецентрированной кубической решетки, которая существует до температуры 911 °С. При данной температуре в результате аллотропических превращений  $\gamma$ -железо  $\rightarrow$   $\alpha$ -железо снова образуется объемно-центрированная кубическая решетка, которая существует вплоть до комнатной температуры. Критическая температура 768 °С к аллотропическим превращениям отношения не имеет. Она является границей существования магнитного и немагнитного железа. При температуре ниже 911 °С  $\alpha$ -железо может быть магнитным и немагнитным при одном и том же строении кристаллической решетки. Немагнитную область железа в интервале температур от 911 до 768 °С называют  $\beta$ -железом, а магнитную область от температуры 768 °С и ниже –  $\alpha$ -железом. Аллотропические превращения металла происходят при большинстве видов термической обработки стали.

### Контрольные вопросы

- 1) Назовите основные типы кристаллических решёток.
- 2) Перечислите и опишите дефекты кристаллического строения.
- 3) Кристаллизация. Кинетика протекания процесса кристаллизации.
- 4) Строение слитка спокойной стали.
- 5) Аллотропические превращения. Полиморфизм железа.

## 2 Свойства материалов, способы их определения

### 2.1 Общие сведения

К основным свойствам материалов относятся:

1) **Физические свойства материалов** (цвет, плотность, температуру плавления, электро- и теплопроводность, магнитные свойства, электрическое сопротивление, теплоемкость и т.д).

2) **Химические свойства материалов** (окисляемость, растворимость, коррозионная стойкость, жароупорность и др.).

3) **Механические свойства материалов:**

➤ Упругость – это свойство материала восстанавливать свою форму после прекращения действия внешних сил, вызывающих деформацию.

➤ Пластичность – способность металлов деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять новую форму и размеры после прекращения действия сил.

➤ Прочность – это способность материала сопротивляться разрушению и появлению остаточных деформаций под действием внешних сил.

➤ Твердость – это способность металла сопротивляться проникновению в него другого, более твердого тела.

➤ Вязкость – это способность материала поглощать механическую энергию и при этом проявлять значительную пластичность вплоть до разрушения.

➤ Хрупкость – это способность материала разрушаться при отсутствии пластической деформации.

➤ Технологичность – способность материала подвергаться различным методам горячей и холодной обработки.

4) **Технологические свойства материалов:**

➤ Жидкотекучесть – это способность металла заполнять литейную форму и воспроизводить очертания ее внутренней полости.

➤ Температура плавления – это температура перевода сплава из твердого кристаллического состояния в жидкое.

➤ Усадка сплавов – это сокращение объема и линейных размеров отливок в процессе кристаллизации.

➤ Деформируемость – это обрабатываемость давлением или способность материалов воспринимать пластическую деформацию в процессе изменения формы: при гибке, ковке, штамповке, прокатке и прессовании без нарушения целостности.

➤ Свариваемость – это свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия.

➤ Закаливаемость – это способность стали повышать твердость в результате закалки. Закаливаемость определяется в первую очередь содержанием в стали углерода. Чем больше углерода, тем твердость стали выше.

➤ Прокаливаемость – это способность стали получать закаленный слой с высокой твердостью на ту или иную глубину.

➤ Обработка металлов резанием – это процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла в виде стружки для получения необходимой геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхностей деталей.



### **5) Эксплуатационные свойства материалов:**

Износостойкость – способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения.

Коррозионная стойкость – способность материала сопротивляться действию агрессивных, кислотных и щелочных сред.

Жаростойкость – это способность материала сопротивляться окислению в газовой среде при высокой температуре.

Жаропрочность – это способность материала сохранять свои свойства при высоких температурах.

Хладостойкость – способность материала сохранять пластические свойства при отрицательных температурах.

Все детали машин в процессе эксплуатации в той или иной мере подвергаются воздействию внешних разнообразных нагрузок (растягивающих, сжимающих, изгибающих и т. д). При этом механические испытания классифицируют на 3 группы:

1) Статические, при которых воздействие на исследуемый объект происходит медленно и плавно возрастающей нагрузкой (испытания на растяжение, сжатие, кручение, изгиб и др.).

2) Динамические, при которых воздействие на исследуемый объект происходит быстро возрастающей нагрузкой (испытания на ударную вязкость и др.).

3) Циклические, при которых воздействие на исследуемый объект происходит циклической, изменяющейся во времени, нагрузкой (испытания на предел выносливости, усталостное разрушение и др.)

Воздействуя на деталь, внешние нагрузки изменяют ее форму, т. е. деформируют. Если к детали приложены сравнительно небольшие нагрузки, то после прекращения их действия она принимает свою первоначальную форму – деформация исчезает.

Свойство материалов принимать первоначальную форму после прекращения действия внешних сил называется упругостью, а деформация, исчезающая после снятия нагрузки, получила название упругой.

Если к детали приложить большие усилия, то после прекращения их действия она не примет своей первоначальной формы, а останется деформированной. Такая деформация называется пластической. Способность материала деформироваться под действием внешних нагрузок, не разрушаясь, и сохранять измененную форму после прекращения действия усилий называется пластичностью.

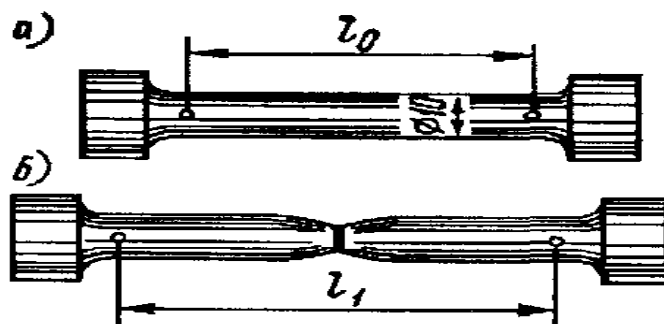
Материалы, не способные к пластическим деформациям, называются хрупкими, они при сильном нагружении или под действием удара разрушаются внезапно. К хрупким материалам относятся стекло, камень, чугун, сурьма, закаленная сталь и др. Важным свойством материалов, наряду с упругостью и пластичностью, является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

Наибольшее распространение получили следующие виды механических испытаний: на растяжение (по ГОСТ 1497-84), на ударный изгиб и ударную вязкость (по ГОСТ 9454-78), на твердость (по ГОСТ 9012-59, ГОСТ 9013-59, ГОСТ 2999-75 и ГОСТ 9450-76), на жаропрочность (по ГОСТ 9651-73).

## 2.2 Определение механические свойства материала

### 2.2.1 Определение прочности и пластичности материала

Прочность, упругость и пластичность определяются при испытании металлов на растяжение. Для проведения испытания изготавливают образцы плоской (из листового материала) или круглой формы (рисунок 2.1).



$l_0$  и  $l_1$  – расчетная длина до и после испытания

Рисунок 2.1 - Круглый образец испытания на растяжение до (а) и после (б)

В образце наиболее важны два размера: диаметр  $d$  испытываемой части и расчетная длина  $l_0$ . По результатам испытаний машина записывает диаграмму растяжения. По оси абсцисс в определенном масштабе указывается удлинение образца (в миллиметрах), по оси ординат – приложенная к нему нагрузка.

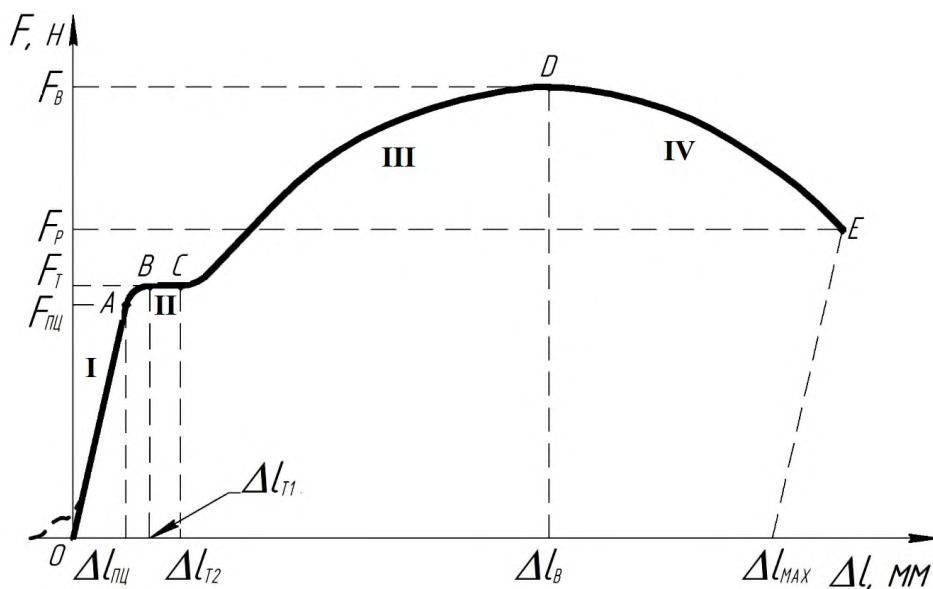
Для получения сравнимых результатов введено понятие нормальное напряжение.

Нормальным напряжением называется нагрузка на единицу площади поперечного сечения образца. Нормальное напряжение обозначается греческой буквой  $\sigma$ . Если нагрузка  $P$  выражена в ньютонах, а площадь поперечного сечения  $F$  в квадратных миллиметрах, то пользуясь диаграммой растяжения, можно определить показатели механических свойств металлов (Па):

$$\sigma_{\sigma} = \frac{P_{\max}}{F_0}.$$

На рисунке 2.2 представлена диаграммой растяжения зависимости между растягивающей силой  $F$  и удлинением образца  $\Delta \ell$ .

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



А - предел пропорциональности ( $\sigma_{пл}$ ); В - предел упругости ( $\sigma_{упр}$ );  
 С - предел текучести ( $\sigma_{т}$ ); D - предел прочности ( $\sigma_{в}$ ); E – разрыв образца  
 I - участок пропорциональности; II - участок текучести;  
 III - участок самоупрочнения; IV - участок разрушения.

Рисунок 2.2 - Диаграмма растяжения стального образца

В точке В образец получает заметное остаточное удлинение.

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

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

Отношением наибольшей нагрузки (в точке D), которую выдержал образец до разрыва, к первоначальной площади его поперечного сечения определяется предел прочности. Пределом прочности называется напряжение, отвечающее максимальной нагрузке, которую выдержал образец во время испытания. Предел прочности обозначается  $\sigma_{в}$  и выражается в паскалях.

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

Показателями пластичности, характеризующими способность металла деформироваться не разрушаясь, являются относительное удлинение и относительное сужение. Для получения этих показателей обе половинки разорванного образца плотно прижимают друг к другу и измеряют длину рабочей части  $l_k$ , а также диаметр образца

$d_k$  в том месте, где произошел разрыв. Относительное удлинение обозначают греческой буквой  $\delta$  и измеряют в процентах. Его определяют по формуле

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

где  $l_0$  – первоначальная расчетная длина;  
 $l_k$  – расчетная длина после испытания.

Относительное сужение поперечного сечения образца ( $\varphi$ , также измеряемое в процентах, находят по формуле

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

где  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца до испытания;  $\text{мм}^2$ ;  
 $F_k$  – площадь сечения образца в месте разрыва (в шейке),  $\text{мм}^2$ .

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

При испытании на растяжение одного образца можно установить шесть характеристик металла: предел упругости ( $\sigma_e$ ), предел текучести ( $\sigma_T$ ), предел прочности ( $\sigma_B$ ), относительное удлинение ( $\delta$ ), относительное сужение ( $\varphi$ ) и модуль упругости ( $E$ ). Эти характеристики дают разностороннее представление о механических свойствах металла.

### 2.2.2 Определение твердости материала

Твердость – одна из характеристик механических свойств металлов. Обычно ее определяют воздействием на поверхность металла наконечника, изготовленного из малодеформирующегося материала (твердая закаленная сталь, алмаз, сапфир или твердый сплав) и имеющего форму шарика, конуса, пирамиды или иглы. По сравнению с другими характеристиками механических свойств твердость измеряется достаточно просто несколькими способами, различающимися по характеру воздействия на наконечник. Твердость можно измерять вдавливанием наконечника (способ вдавливания) – сопротивление пластической деформации, царапаньем поверхности (способ царапанья) – сопротивление разрушению (для большинства металлов путем среза), ударом либо по отскоку наконечника (шарика) – упругие свойства.

Наибольшее распространение получило измерение твердости вдавливанием. В результате вдавливания с достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Особенность происходящей при этом деформации заключается в том, что она протекает в небольшом объеме, окруженном недеформированным металлом. Пластическую деформацию при вдавливании могут испы-

тывать не только пластичные, но и хрупкие металлы (например, серый чугун), которые при обычных механических испытаниях (на растяжение, сжатие, кручение, изгиб) разрушаются хрупко почти без макроскопически заметной пластической деформации. Таким образом, твердость, характеризующая сопротивление пластической деформации, представляет собой механическое свойство металла, отличающееся от других его механических свойств способом измерения.

Особенности испытаний твердости:

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

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

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

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

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

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

Способом вдавливания определяют твердость (макротвердость) и микротвердость. При измерении твердости (макротвердости) в исследуемый материал вдавливаются тело, проникающее на сравнительно большую глубину, зависящую от прилагаемой нагрузки и свойств металла. Часто вдавливаемое тело имеет значительные размеры (например, стальной шарик диаметром 10 мм), в результате чего в деформируемом

объеме оказываются представленными все фазы и структурные составляющие сплава, количество и расположение которых характерны для измеряемого материала. Измеренная твердость в этом случае будет характеризовать твердость всего испытываемого материала.

Выбор формы и размеров наконечника, а также нагрузки зависит от целей исследования, структуры, ожидаемых свойств, состояния поверхности и размеров испытываемого образца. Если металл имеет гетерогенную структуру с крупными выделениями отдельных структурных составляющих, различных по свойствам (например, серый чугун, цветные подшипниковые сплавы), то для испытания твердости следует использовать шарик большого диаметра. Если металл обладает сравнительно мелкой и однородной структурой, то малые по объему участки могут быть достаточно характерными для оценки свойств металла в целом и, в частности, его твердости. В таком случае испытания можно проводить вдавливанием тела небольшого размера (например, алмазного конуса или пирамиды) на незначительную глубину при небольшой нагрузке. Подобные испытания рекомендуются для металлов с высокой твердостью, например закаленной или низкоотпущенной стали, поскольку вдавливание стального шарика или алмаза с большой нагрузкой может вызвать деформацию шарика или скалывание алмаза. Вместе с тем значительное снижение нагрузки нежелательно, так как это может привести к резкому уменьшению деформируемого объема, тогда полученные значения твердости не будут характерными для основной массы металла. Поэтому нагрузки и размеры отпечатков на металле не должны быть меньше некоторых пределов.

Микротвердость измеряется в целях определения твердости отдельных зерен, фаз и структурных составляющих сплава, а также свойств очень малых по размерам деталей. Поэтому объем металла, деформируемого вдавливанием, должен быть меньше объема (площади) измеряемого зерна. Прилагаемая нагрузка не должна превышать 0,05 МПа (0,5 кгс/мм<sup>2</sup>).

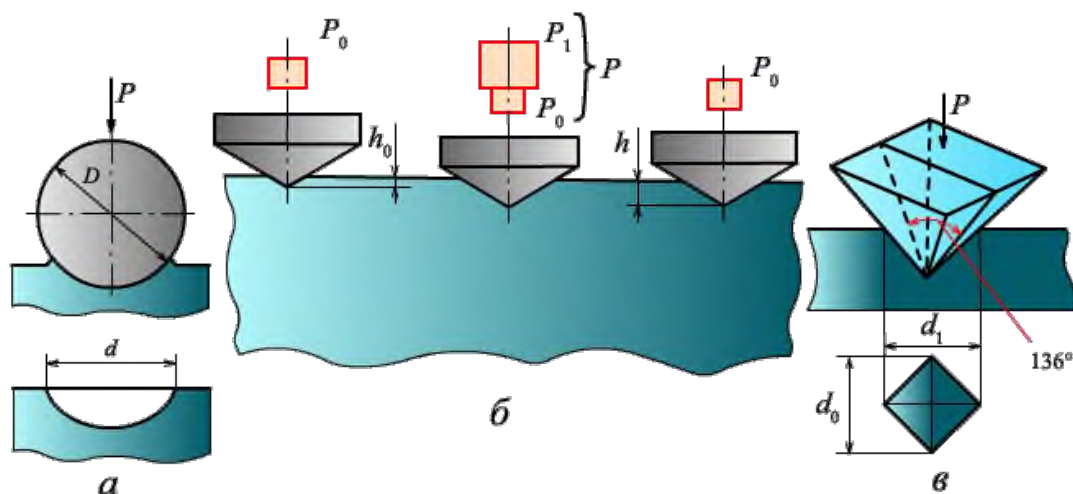
Измерение твердости полимерных материалов дает меньше информации об их свойствах, так как между твердостью и прочностью этих материалов нет определенной зависимости. Результаты таких измерений служат лишь дополнительной характеристикой свойств указанных материалов.

Значительное влияние на результаты испытаний твердости оказывает состояние поверхности исследуемого материала. Поэтому на поверхности должна быть шлифованная горизонтальная площадка, а при измерении микротвердости – полированная поверхность (в этом случае при изготовлении шлифа нельзя допускать наклепа в поверхностном слое).

Основные методы измерения твердости материала представлены на рисунке 2.3.

Для определения твердости как металлов, так и полимерных материалов используют метод Бринелля. Измерения осуществляют с помощью шарикового твердомера (ТБ) по ГОСТ 9012-59. Толщина образца  $S$  должна не менее чем в 8 раз превышать глубину отпечатка  $h$  и определяться по формуле.

Испытания вдавливанием шарика проводят с металлами небольшой и средней твердости (например, твердость стали должна быть не более 450 НВ). ГОСТом установлены нормы для испытаний по Бринеллю. Твердость полимерных материалов, как и их прочность, в большой степени зависит от длительности приложения нагрузки.



а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу  
Рисунок 2.3 - Методы определения твердости

В случае испытания шариком определенного диаметра при установленных нагрузках нет необходимости проводить расчеты. На практике пользуются заранее составленными таблицами, в которых приводится твердость НВ в зависимости от диаметра отпечатка и соотношения между нагрузкой  $F$  и площадью поверхности отпечатка  $A$ . Используя таблицы, твердость НВ можно перевести на твердость по Роквеллу и Виккерсу (условно).

Между пределом прочности и твердостью НВ различных металлов существует приблизительная зависимость: для стали твердостью 120-175 НВ  $\sigma_b \approx 0,34$  НВ; для стали твердостью 175-450 НВ  $\sigma_b \approx 0,35$  НВ; для меди, латуни, бронзы отожженной  $\sigma_b \approx 0,55$  НВ, наклепанных  $\sigma_b \approx 0,40$  НВ; для алюминия и алюминиевых сплавов твердостью 20-45 НВ  $\sigma_b \approx (0,33-0,36)$ .

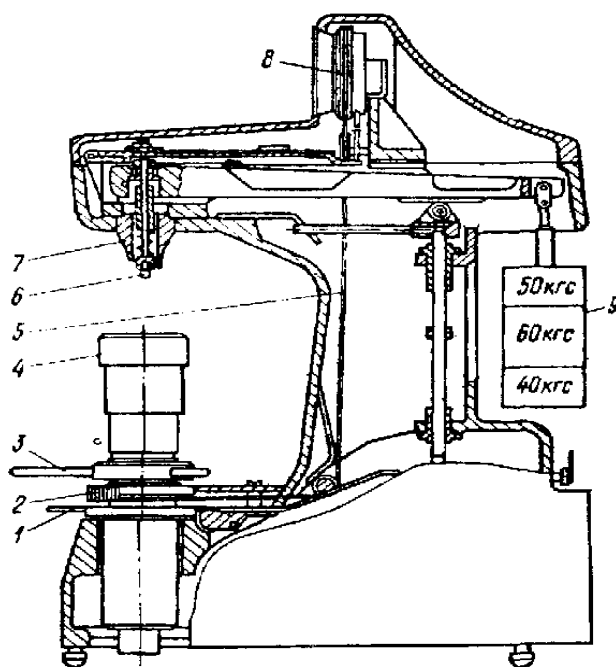
По площади отпечатка (лунки)  $A_l$  и площади проекции отпечатка  $A_{np}$  можно определить пластичность стали  $\psi_{вд}$  по формуле:

$$\psi_{вд} = \frac{A_l - A_{np}}{A_l}.$$

Величина  $\psi_{вд}$  связана с относительным сужением  $\psi$ . В меньшей степени соблюдается количественная зависимость между твердостью НВ и пределом выносливости. Сравнительно простая зависимость существует лишь для сплавов и равновесном (отожженном) состоянии.

Измерение твердости по глубине отпечатка, получаемого при вдавливании алмазного конуса или стального шарика – метод Роквелла с помощью конусного твердомера (ТР) по ГОСТ 9013-59. Этот метод позволяет изменять нагрузку в широких пределах без изменения значений твердости. Прибор для измерения твердости по методу Роквелла представлен на рисунке 2.4. Он имеет столик 4, установленный в нижней части неподвижной станины. В верхней части станины индикатор 8 и шпиндельный узел 7, в котором имеется наконечник с алмазным конусом 6 (с углом при вершине  $120^\circ$ ) или со стальным шариком. На индикаторе 8 нанесены две шкалы (черная и красная) и имеются две стрелки – большая (указатель твердости), вращающаяся по шкале, и маленькая, предназначенная для контроля предварительного нагружения,

сообщаемого вращением маховика 3. Поворотом маховика 3 по часовой стрелке столик 4 поднимают таким образом, чтобы наконечник мог вдавливаться в поверхность образца.



1- клавиша включения; 2 - барабан; 3 – маховик; 4 – столик; 5 - тросик; 6 – алмазный конус; 7 - шпиндельный узел; 8 – индикатор; 9 - груза

Рисунок 2.4 – Прибор для определения твердости по Роквеллу

При дальнейшем подъеме столика начинают вращаться стрелки на индикаторе. Подъем столика продолжают до тех пор, пока малая стрелка не примет вертикального положения (красная точка на индикаторе). Это означает, что наконечник вдавился в образец под действием предварительной нагрузки, равной 98,07 Н (10 кгс). Предварительное погружение проводят для того, чтобы исключить влияние упругой деформации и шероховатости поверхности образца на результаты измерений.

Когда образец, получит предварительную нагрузку, равную 98,07 Н или 10 кгс, большая стрелка на индикаторе примет вертикальное или близкое к нему положение. Для обеспечения точности измерения необходимо, чтобы большая стрелка совпала с нулем на черной шкале индикатора. Если большая стрелка не совпадает с нулем, не меняя предварительное нагружение и, следовательно, не вращая маховик, барабаном 2 через тросик 5 поворачивают шкалу (круг) индикатора таким образом, чтобы нуль на черной шкале индикатора совпал с большой стрелкой. Отклонение стрелки от вертикали допускается в пределах  $\pm 5$  единиц шкалы. Клавишей 1 включают механизма нагружения основной нагрузки, определяемой грузом 9. Один груз на рычаге сообщает образцу дополнительную нагрузку 490,3 Н (50 кгс), следовательно, общая нагрузка составит 588,4 Н (60 кгс), два груза – 882,6 Н (100 кгс) при общей нагрузке 980,7 Н (100 кгс), три груза – 1373 Н (140 кгс) при общей нагрузке 1471 Н (150 кгс). На приборе указана общая нагрузка. При нагружении большая стрелка перемещается по шкале влево, против часовой стрелки. Время приложения основной нагрузки 5-7 с. Стрелка возвращается в обратную сторону автоматически при снятии основной нагрузки (предварительная нагрузка остается). Цифра, которую указывает на шкале индикатора большая стрелка, является показателем твердости по Роквеллу. Записав эту



цифру, поворачивают маховик против часовой стрелки, опускают столик прибора с образцом (изделием) и снимают тем самым предварительную нагрузку.

Для каждой детали рекомендуется проводить не менее трех испытаний. С помощью прибора измеряют глубину отпечатка алмазного конуса (стального шарика) или, точнее, разность между глубинами отпечатков, полученных от вдавливания наконечника под действием основной и предварительной нагрузок. Твердость по Роквеллу возрастает с увеличением твердости материала, что позволяет сравнивать показатели твердости по Роквеллу и по Бринеллю. Твердость по Роквеллу не имеет той размерности и того физического смысла, который имеет твердость по Бринеллю. Однако показатель твердости по Роквеллу можно пересчитать на показатель твердости по Бринеллю с помощью диаграмм или таблиц, в результате которых твердость по Роквеллу измеряют, применяя следующие шкалы: А, В, С, D, E, F, G, H, К при температуре 20 °С.

При внедрении в поверхность образца алмазного конуса следует пользоваться шкалами А, С, D, а при внедрении стального сферического наконечника – шкалами В, E, F, G, H, К. Алмазный конусный наконечник типа НК по ГОСТ 9377-81 имеет угол при вершине 120°, радиус сферической части 0,2 мм. Номинальный диаметр шариков 1,588 мм (шкалы В, F, G) и 3,175 мм (шкалы E, H, К).

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

Изменяя нагрузки, методом Роквелла можно производить измерения твердости в очень широком диапазоне. Кроме того, после измерений на образцах остается незначительный след, практически не влияющий на его товарный вид.

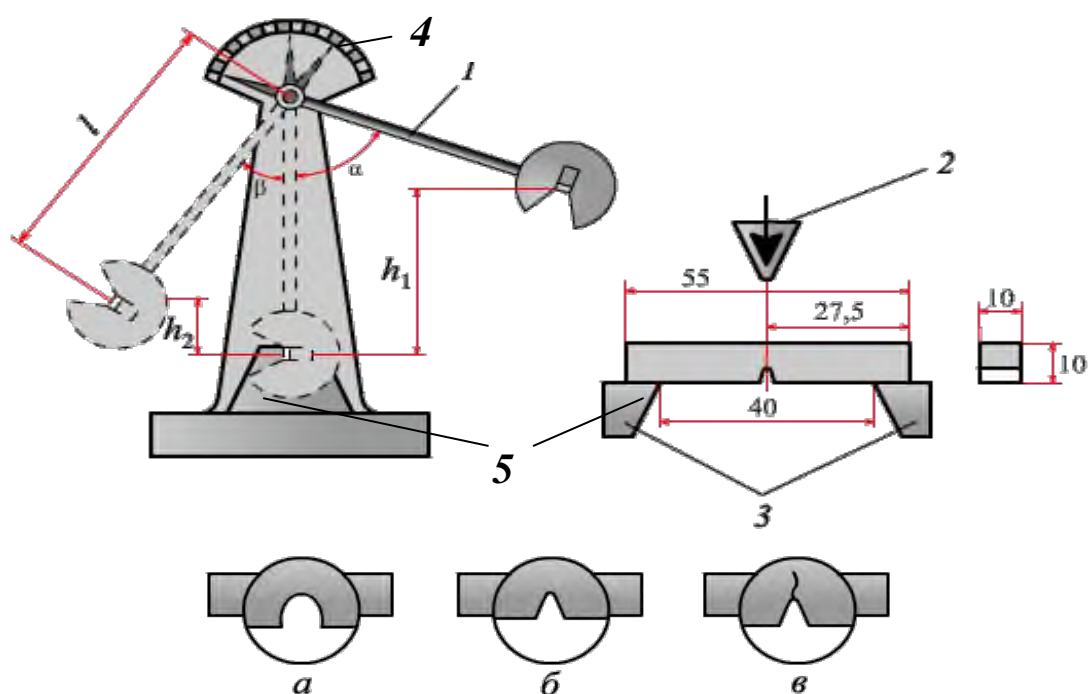
Измеряя твердость по Бринеллю, заранее учитывают, что на образце останутся визуально заметные лунки. Но в том и другом случае на чертеже указывают желательное место замеров твердости.

Методом Роквелла можно измерять твердость закаленной или низкоотпущенной стали (твердостью свыше 450 НВ), т. е. в условиях, когда вдавливание стального шарика (на приборах Бринелля или Роквелла) в твердый материал может вызвать деформацию стального или скол твердосплавного шариков, что даст искаженные результаты.

Твердость следует измерять не менее чем в трех точках (особенно алмазным конусом), т. е. не менее трех раз на одном образце. Для определения твердости по Роквеллу требуется меньше времени (30–60 с), чем по Бринеллю, причем результат измерения виден на шкале (указан стрелкой). При измерении твердости по Роквеллу остается меньший отпечаток на поверхности детали. Твердость очень тонких слоев металла (толщиной менее 0,3 мм) при нагрузках 588,4 и 1471 Н (60 и 150 кгс) измерять нельзя, так как алмазный конус проникает на глубину, превышающую толщину этих слоев. Вместе с тем с увеличением твердости измеряемого материала глубина отпечатка уменьшается, вследствие чего снижается точность измерения (особенно металлов твердостью более 60 HRC). Для этих целей иногда применяют приборы типа суперроквелл (тип TRC) по ГОСТ 22975-78 или Виккерс (тип ТВ) по ГОСТ 2999-75, с помощью которых измеряют твердость при меньшей нагрузке и с меньшей глубиной вдавливания. Предварительная нагрузка при этом составляет 29,42 Н (3 кгс). Каждое деление шкалы индикатора такого прибора соответствует глубине вдавливания, равной 1 мкм. Поэтому чувствительность данного прибора заметно выше.

### 2.2.3 Определение ударной вязкости материала

Ударная вязкость - отношение работы ударного разрушения образца к площади его поперечного сечения в месте концентратора, размерность в Дж/см<sup>2</sup> (кгс · м/см<sup>2</sup>). На рисунке 2.5 показаны образцы с концентраторами (надрезами). Размеры образца, форма концентратора и способ обработки места надреза оказывают большое влияние на результаты измерения ударной вязкости. Концентраторы следует выполнять в твердых металлах абразивом, а в мягких – фасонной фрезой с дополнительным шлифованием или доводкой дна концентратора (вида U, V и Т) по ГОСТ 9454-78. Результаты измерений зависят также от направления волокон металла. Поэтому место концентратора образца и его положение по отношению к направлению деформации при прокатке, ковке или штамповке, в частности вдоль прокатки (продольные образцы), поперек прокатки (поперечные образцы) или в радиальном направлении, определяют по техническим условиям.



а – U-образный надрез (КСУ); б – V-образный надрез (КCV);  
в – надрез с трещиной (КСТ)

1 – маятник; 2 – нож маятника; 3 – опоры; 4 – шкала; 5 – образец

Рисунок 2.5 - Схема испытания на ударную вязкость

Ударную вязкость определяют с помощью копров по ГОСТ 10708-82. Разрушение образца осуществляется маятником, свободно качающимся в опорах и имеющим нож определенной формы и размеров. Образец устанавливают на нижние опоры копра симметрично опорам, т. е. так, чтобы надрез был обращен в сторону, противоположную направлению удара. Маятник поднимают в верхнее положение и закрепляют защелкой. В таком положении маятник обладает потенциальной энергией  $Ph_1$ , где  $P$  – масса маятника;  $h_1$  – высота подъема. Затем маятник опускают. При падении он разрушает образец, после чего поднимается на некоторую высоту  $h_2$ , обладая при этом энергией  $Ph_2$ , меньшей энергии  $Ph_1$ . Разность между  $Ph_1$  и  $Ph_2$  определяет работу, затраченную на разрушение образца. Стрелка, установленная на станине копра, захва-

тывается маятником и указывает на шкале угол подъема маятника после разрушения образца. Работа удара  $K$  [Дж (кгс · м)] определяется по формуле:

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

где  $l$  – расстояние от оси маятника до его центра массы;

$a$  и  $\beta$  – углы подъема маятника соответственно до и после разрушения.

Угол  $a$  принимают постоянным, поэтому стрелку перед началом испытания переводят по шкале в положение, соответствующее нулю градусов. Расчет работы разрушения можно не проводить, так как копры снабжены таблицей, в которой против каждого значения угла указаны соответствующие значения  $K$ . Чем меньше работа разрушения  $K$ , тем более точными должны быть измерения.

Для образцов, требующих небольшую работу разрушения, следует применять менее мощный копер. У маятниковых копров можно изменять высоту подъема маятника и тем самым регулировать работу удара.

Зная работу удара  $K$ , можно найти ударную вязкость  $K_C$  образца с надрезом [Дж/см<sup>2</sup> (кгс·м/см<sup>2</sup>)]:

$$K_C = K/S_0,$$

где  $K$  – работа удара, Дж (кгс·м);

$S_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, см<sup>2</sup>, где  $S_0 = H'_1 B$ ,  $H'_1$  – начальная высота рабочей части образца, см;

$B$  – начальная ширина образца, см.

Работа удара  $K$  отнесена к площади поперечного сечения образца в месте надреза. Удар маятника воспринимается не площадью сечения образца, а определенным объемом вокруг места надреза, в котором происходит деформация. Чем больше этот деформируемый объем, тем выше способность металла рассредоточивать деформацию и тем больше ударная вязкость. Ударная вязкость снижается при повышении прочностных свойств металла (если одновременно повышается пластичность). Для более хрупких металлов при испытании используют образцы без надреза, тогда ударную вязкость обозначают  $K_5C$ .

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

За результат испытания принимают работу удара или ударную вязкость для образцов с концентраторами видов  $U$  и  $V$  и ударную вязкость для образцов с концентраторами вида  $T$ .

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

Например:

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

- КСТ<sup>+100</sup> 150/3/7,5 – ударная вязкость, определенная на образце с концентратором вида Т при температуре плюс 100 °С; максимальная энергия удара маятника 150 Дж, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

При исследовании вязкости металла в условиях динамического нагружения ограничиваются выявлением общей работы ударного разрушения, т.е. сопротивления образованию и развитию трещины. Работа разрушения определяется работой  $K_3$ , затрачиваемой на зарождение трещины, и работой  $K_p$  по ее распространению. Для более полной и надежной характеристики поведения металла в условиях динамического нагружения надо знать эти отдельные составляющие общей работы разрушения.

### 2.3 Определение технологических свойств материала

Технологические свойства металлов – это часть их общих физико-химических свойств. Знание этих свойств позволяет обоснованно проектировать и изготавливать изделия с улучшенными для данного металла (сплава) качественными показателями.

Испытание на изгиб в холодном и нагретом состояниях нормируется ГОСТ 14019-80 и производится на образцах по ГОСТ 7564-97.

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

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

где  $D$  – диаметр закругления (толщина) оправки, мм;

$a$  – толщина или диаметр (диаметр вписанной окружности для многоугольного сечения образца), мм.

Ширина оправки и опор должна быть больше ширины образца.

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

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

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

При испытании до заданного угла изгиба образец устанавливают на опоры или на матрицу и изгибают при помощи оправки до заданного угла. Угол изгиба можно измерять до и после снятия нагрузки. Испытание до появления первой трещины проводят по той же методике, что и изгиб до заданного угла. Угол изгиба измеряют без снятия нагрузки. На рисунке 2.6 показаны схемы испытания материалов на изгиб.

Испытания на изгиб до параллельности сторон проводят после предварительного изгиба образца на угол не менее 150° по рисунку 2.6 б, в, г. Далее догибают до соприкосновения сторон образца с прокладкой толщиной, равной толщине (диаметру) оправки с образованием естественной петли. Опорные поверхности должны быть больше половины длины образца.

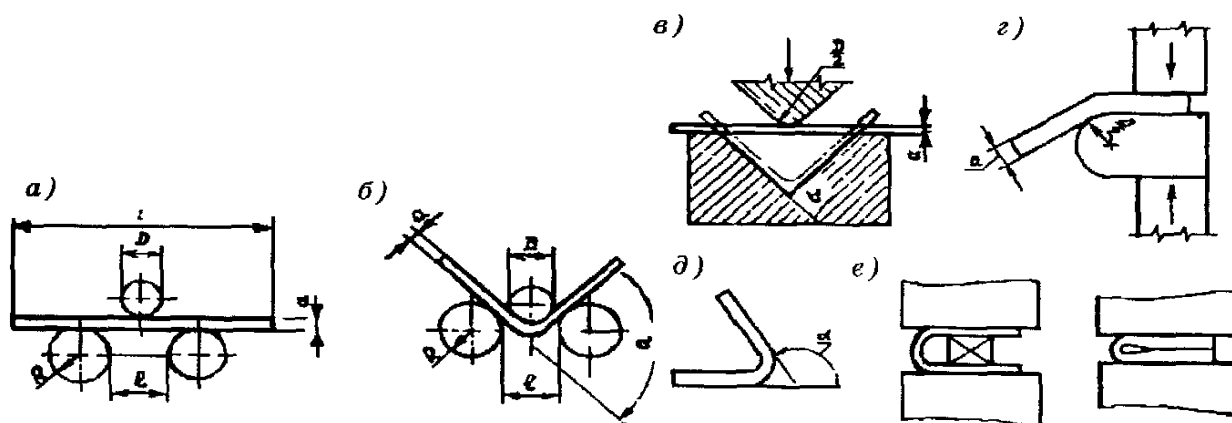


Рисунок 2.6 - Испытания материалов на изгиб

Признаком того, что образец выдержал испытание на изгиб, служит отсутствие излома, расслоений и трещин, видимых невооруженным глазом.

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

Испытание на перегиб лент, листов и полос толщиной до 4 мм и шириной 20 мм производят по ГОСТ 13813-68, а проволоки различных сечений – по ГОСТ 1579-80. Образец длиной 100-150 мм зажимают в тисках со специальными губками и перегибают сначала на  $90^\circ$  до соприкосновения с губкой, затем в противоположную сторону на  $180^\circ$ . После этого образец перегибают второй раз на  $180^\circ$ , третий раз и т. д. до его разрушения.

Испытание на выдавливание проводят по ГОСТ 10510-80 (метод Эриксона) на специальном приборе. В металле выдавливается сферическая лунка до момента уменьшения усилия вытяжки. Положительным результатом считается отсутствие нарушения целостности поверхностного слоя металла. Чем пластичнее материал, тем больше длина вытянутой лунки.

Свариваемость способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения при их плавлении. Хорошей свариваемостью обладают низкоуглеродистые стали. Для сваривания высокоуглеродистых и большинства легированных сталей, а также чугунов применяют сложные технологические процессы. Хорошая свариваемость характеризуется плотным швом в зоне сварки, без трещин и раковин. Качество сварного соединения определяется ГОСТ 13585-68, 6996-66, 3242 69, 7.42 75 и 10145-62.

## 2.4 Определение эксплуатационных свойств материала

В процессе работы многие детали машин нагреваются до высоких температур, достигающих  $1000^\circ\text{C}$  и более. Для них важной характеристикой является жаропрочность – способность материалов сохранять необходимую прочность при высоких температурах.

Характеристики, которые определяют при обычных испытаниях, не дают представления о возможности использования материалов при повышенных и высоких температурах. Зависимость предела прочности и текучести от температуры представлена на рисунке 2.7.

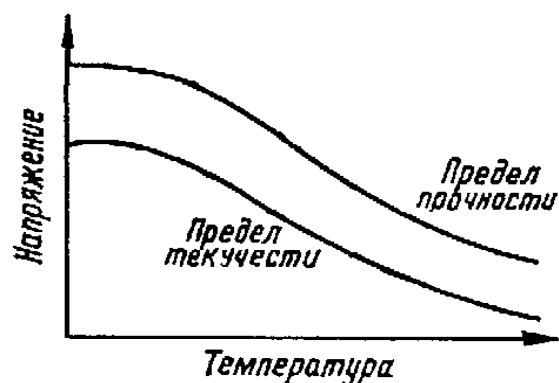


Рисунок 2.7 - Зависимость предела прочности и текучести от температуры

Это объясняется двумя причинами. Во-первых, с повышением температуры числовые значения предела прочности и предела текучести понижаются. Во-вторых, при повышенных температурах большое значение имеет длительность испытания. Дело в том, что у металлов и сплавов, работающих длительное время под нагрузкой при высоких температурах, наблюдается явление ползучести, т. е. непрерывная пластическая деформация под действием постоянной нагрузки (металл «ползет»). При работе под нагрузкой в условиях комнатной температуры ползучесть у большинства металлов отсутствует. Жаропрочность металлов и сплавов характеризуют три показателя: предел кратковременной прочности, предел длительной прочности и предел ползучести.

Предел кратковременной прочности ( $\sigma_B$ ) определяют, как и при обычных испытаниях, но с нагревом образца до заданной температуры. Эта характеристика служит для расчета на прочность деталей, работающих весьма непродолжительное время (секунды, минуты) при высоких температурах. Длительную прочность устанавливают для деталей, работающих при высоких температурах. Пределом длительной прочности называется напряжение, вызывающее разрушение образца при данной температуре через конкретный промежуток времени. Например, предел длительной прочности  $\sigma_{100}^{600} = 250$  МПа (25 кгс/мм<sup>2</sup>) означает, что при температуре 600 °С напряжение 250 МПа (25 кгс/мм<sup>2</sup>) вызывает разрушение образца через 100 ч. Для деталей, работающих при высоких температурах в течение очень длительного времени, устанавливают предел ползучести. Для этого проводят соответствующие испытания, записывая диаграмму ползучести (рисунок 2.8).

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

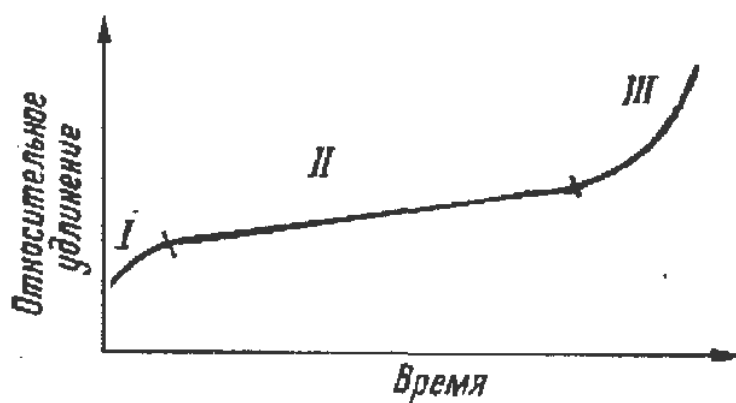


Рисунок 2.8 - Диаграмма ползучести

Таким образом, пределом ползучести называется напряжение, которое за конкретный промежуток времени при данной температуре вызывает заданное удлинение (например, 1 %). При расчете предела ползучести необходимо знать температуру испытания, деформацию, нагрузку и время ее действия. Например, предел ползучести составляет  $\sigma_{1/1000}^{600} = 200$  МПа (20 кгс/мм<sup>2</sup>). Это означает, что для удлинения образца на 1 % за 1000 ч при температуре 600 °С предел ползучести должен быть равен 200 МПа (20 кгс/мм<sup>2</sup>). Если увеличить напряжение, то суммарная деформация возрастет (будет выше 1 %).

### Контрольные вопросы

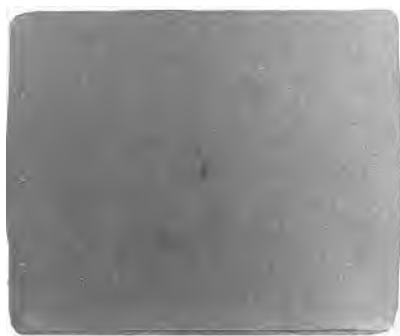
- 1) Перечислите и опишите основные механические свойства материалов.
- 2) Что называется прочностью и пластичностью материала?
- 3) Как определяются прочностные и пластические свойства материала?
- 4) Что называют твердостью материала?
- 5) Перечислите основные методы определения твердости материала?
- 6) Что называют ударной вязкостью материала?
- 7) Опишите основные способы определения ударной вязкости.
- 8) Перечислите основные технологические свойства материалов.

## 3 Изучение структуры металлов

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

Макроскопический анализ - заключается в изучении строения металла невооруженным глазом или при увеличении (через лупу) до 30 крат. Пример макроструктуры темплетов сортовой и блюмовой непрерывнолитых заготовок представлен на рисунке 2.9.

При таком анализе можно исследовать большую поверхность детали (заготовки). Чаще всего макроанализ является предварительным исследованием структуры металла. Он отличается простотой и доступностью, не требует значительных средств и времени.



сортовая



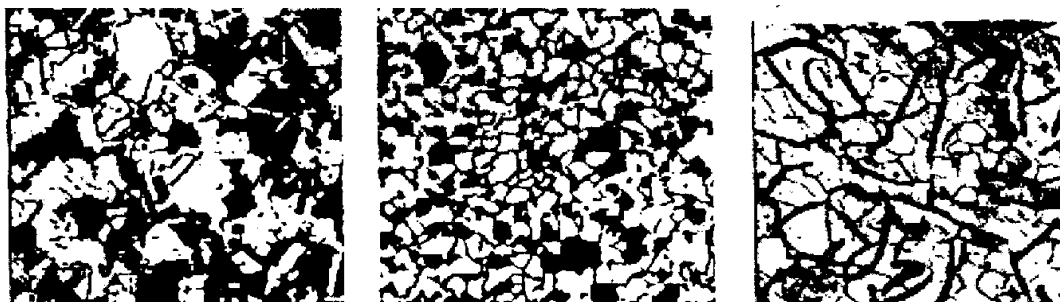
блужащая

Рисунок 2.9 - Макроструктура темплетов непрерывнолитой заготовки

Этим способом используются для выявления пористости металла, ликвации (неоднородности по химическому составу, структуре, неметаллическим и газовым включениям), пузырей, трещин, послойной кристаллизации, остатков усадочной раковины, рыхлоты, расслоения, обезуглероживания и науглероживания поверхности, газовых пузырей, флокенов неметаллических включений, раскатанных трещин, остатков окалина, шлифовочных трещин, направления волокон при обработке давлением и т. д.

Микроструктурный анализ заключается в исследовании структуры материалов при больших увеличениях с помощью микроскопов (рисунок 2.10).

Размер увеличения зависит от цели исследования и структуры сплавов. В одних случаях большие увеличения нецелесообразны, в других, наоборот, являются необходимыми.



а

б

в

а – оловянистая бронза после прокатки и отжига;

б – сталь с содержанием 0,4 % углерода (темные участки – перлит, светлые – феррит);

в – серый чугун (светлые участки – феррит, темные – графит)

Рисунок 2.10 - Микроструктура материала

Увидеть под микроскопом какую-либо структуру можно только в том случае, если металл содержит различные составляющие, различающиеся по своим оптическим свойствам. Для того чтобы на поверхности шлифа проявилось расположение мелких кристаллов (зерен), ее необходимо протравить (углеродистые стали и чугуны протравливают 2-4 % -ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте).

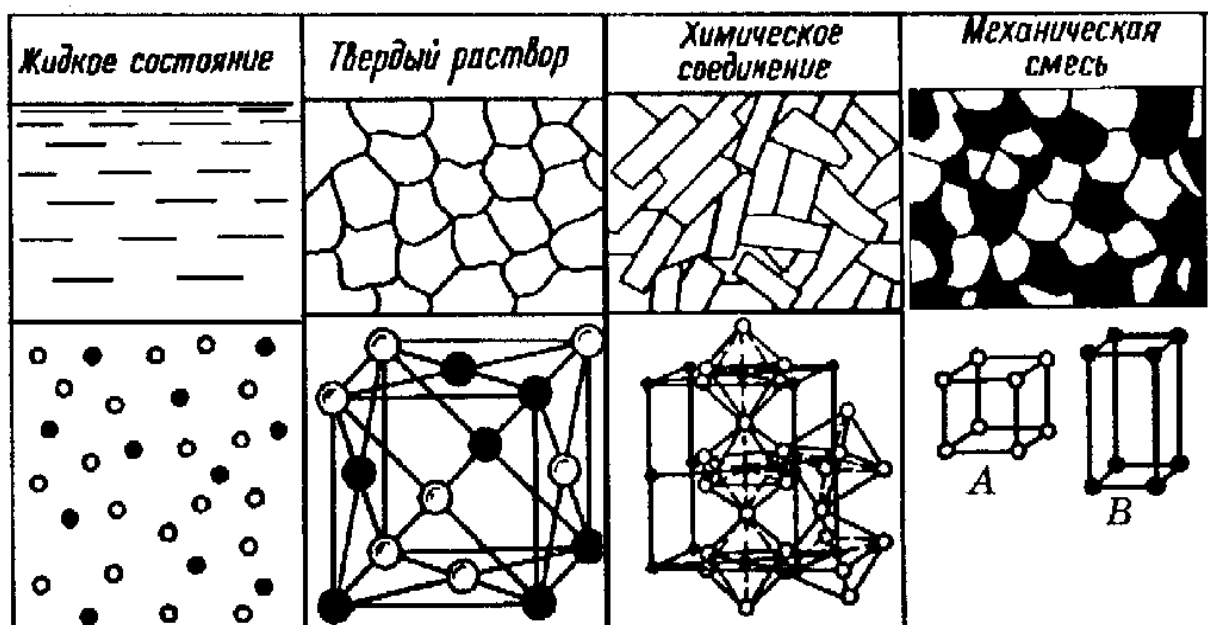
### Контрольные вопросы

- 1) В чем заключается макроскопический анализ структуры материала?
- 2) В чем заключается микроскопический анализ структуры материала?
- 3) На чем проводят микроскопический анализ структуры материала?



## 4 Основные теории сплавов

Чистые металлы редко применяют, так как они не обеспечивают необходимого комплекса механических и технологических свойств. Широко используют сплавы, состоящие из двух и более элементов (из двух металлов, например меди и цинка, или из металла и неметалла, например железа и углерода). Элементы, входящие в сплав, называются компонентами. Сплавы получают сплавлением компонентов, спеканием, электролизом и возгонкой. Компоненты, входящие в сплав, в жидком состоянии почти всегда растворяются друг в друге, образуя жидкий раствор. Атомы такого раствора равномерно перемешаны друг с другом. Свойства сплавов зависят главным образом от взаимодействия компонентов при затвердевании. При затвердевании сплавов образуются твердый раствор, химическое соединение или механическая смесь (рисунок 4.1).

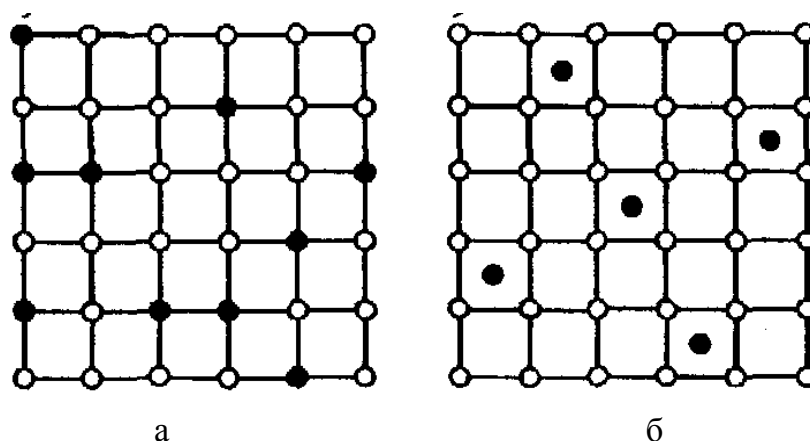


А – белые шарики; В – черные шарики

Рисунок 4.1 - Микроструктура и элементарные ячейки кристаллических решеток сплавов из двух компонентов

### 4.1 Твердый раствор

При переходе в твердое состояние в сплавах сохраняется однородность распределения атомов различных компонентов, а следовательно и свойство растворимости. При кристаллизации сплава атомы компонентов входят в единую ячейку кристаллической решетки, поэтому получаются однородные и одинаковые по составу зерна. Расположение атомов в кристаллической решетке твердых растворов представлено на рисунке 4.2.



а – твердый раствор замещения; б – твердый раствор внедрения  
 Рисунок 4.2 - Расположение атомов в кристаллической решетке твердых растворов

С помощью металлографического микроскопа различить компоненты, входящие в сплав, невозможно. Твердый раствор, как и чистый металл, имеет однообразную кристаллическую решетку. В кристаллической решетке чистого металла все узлы заняты атомами одного компонента, а в решетке твердого раствора – атомами компонентов, составляющих сплав. В твердых растворах растворимость компонентов неограниченна при любом их количественном соотношении (медь с никелем).

При образовании твердого раствора один компонент является растворителем, другой – растворимым. Растворителем становится тот компонент, кристаллическая решетка которого сохраняется, & растворимым – компонент, атомы которого располагаются в кристаллической решетке растворителя. В зависимости от расположения атомов в кристаллической решетке различают твердые растворы замещения и твердые растворы внедрения.

В твердом растворе замещения атомы растворимого компонента замещаются атомами растворителя, в твердом растворе внедрения атомы растворителя размещаются между атомами растворимого компонента в наиболее слабых местах элементов кристаллической решетки, т. е. там, где атомы наиболее удалены друг от друга. Свойства сплавов, образующих твердые растворы, изменяются плавно и отличаются от свойств компонентов, из которых они состоят.

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

## 4.2 Химическое соединение

Компоненты некоторых сплавов при кристаллизации могут входить в химическую связь, образуя химическое соединение. Например: железо с углеродом образуют химическое соединение  $Fe_3C$  – карбид железа (цементит); медь с магнием –  $Cu_2Mg$ ; магний со свинцом –  $Mg_2Pb$  и т. д. Химическое соединение, как и твердый раствор, обладает однородной структурой. Кристаллическая решетка его включает атомы обоих компонентов. Однако в кристаллической решетке химического соединения в отличие от твердого раствора атомы каждого компонента находятся в строго определенном количестве и расположены всегда одинаково.

Например, химическое соединение железа с углеродом  $Fe_3C$  всегда состоит из трех атомов железа и одного атома углерода, соединение  $Mg_2Pb$  всегда имеет два атома магния и один атом свинца. Таким образом, химическое соединение имеет постоянный состав и выражается химической формулой, а состав твердых растворов изменяется в широких пределах и твердый раствор не может быть выражен химической формулой. Кристаллическая решетка химического соединения отличается от решеток входящих в него компонентов, поэтому при образовании сплава оно рассматривается как самостоятельный компонент. Например, сталь – сплав, одним компонентом которого является железо, а другим – химическое соединение  $Fe_3C$  (цементит).

Химические соединения обладают очень высокой твердостью и хорошим электропротивлением. Иногда их твердость в 10 раз превышает твердость чистых компонентов. Например, железо с углеродом образует химическое соединение  $Fe_3C$ , твердость которого в 10 раз выше твердости железа. Химические соединения вольфрама и титана с углеродом (карбиды), отличающиеся очень высокой твердостью, используют для изготовления режущих инструментов. В отличие от твердых растворов химические соединения характеризуются высокой хрупкостью, для обработки давлением они непригодны.

### 4.3 Механическая смесь

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

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

Знание строения сплавов облегчает их выбор при изготовлении деталей машин и разработке технологических процессов. При изучении процессов, происходящих в металлах и сплавах в случае изменения их температуры и состава, пользуются такими понятиями, как компонент, система, фаза. О компоненте было сказано выше.

Фазой называется часть системы, имеющая однородное строение и отделенная от других частей поверхностью раздела. В состав фазы может входить любое число компонентов, из которых состоит система. Система может содержать одну фазу и более. Однокомпонентные системы «сера», «алюминий», «поваренная соль» при комнатной температуре имеют одну твердую фазу, система «вода» в этих же условиях содержит одну жидкую фазу, а система «водород» – одну газообразную фазу. При температурах ниже нуля система «вода» также однофазна, имеет одну твердую фазу лед. При нуле градусов эта система двухфазна, так как при этой температуре сосуществуют жидкая (вода) и твердая (лед) фазы.

## Контрольные вопросы

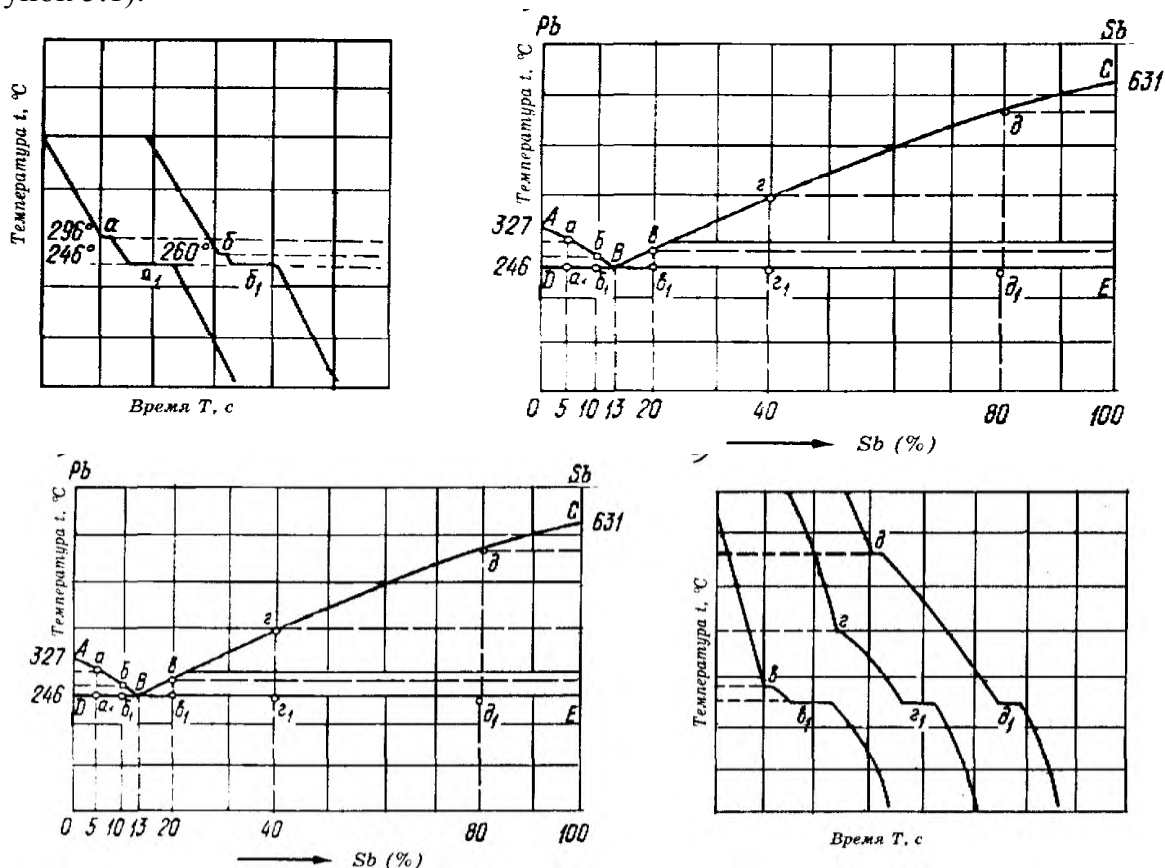
- 1) Перечислите основные структурные компоненты сплава.
- 2) Что называют твёрдым раствором?
- 3) Перечислите основные виды твёрдых растворов.
- 4) Что называют химическим соединением сплава?
- 5) Перечислите основные свойства химическим соединением сплава.
- 6) Что называют механической смесью в сплаве?
- 7) Приведите примеры механической смеси.
- 8) Перечислите основные свойства механической смеси.

## 5 Диаграммы состояния сплавов

### 5.1 Диаграмма состояния сплавов первого рода

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

Наиболее типичными для диаграмм первого рода являются сплавы свинца с сурьмой. На примере этих сплавов рассмотрим принцип построения таких диаграмм (рисунок 5.1).



а – кривые охлаждения доэвтектических сплавов; б – диаграмма состояния сплавов Pb–Sb; в – кривые охлаждения заэвтектических сплавов

Рисунок 5.1 - Диаграмма состояния сплавов Pb–Sb (первого рода)

По результатам термического исследования получим кривые охлаждения ряда сплавов свинца с сурьмой. Чем больше будет таких кривых, тем более точной получится диаграмма состояния сплавов. Для построения диаграммы возьмем пять сплавов свинца с сурьмой различной концентрации: а – 5 % сурьмы и 95 % свинца; б – 10 % сурьмы и 90 % свинца; в – 20 % сурьмы и 80 % свинца; г – 40 % сурьмы и 60 % свинца; д – 80 % сурьмы и 20 % свинца. Все они имеют две критические температуры: верхнюю и нижнюю. Изучение процессов кристаллизации этих сплавов показывает, что верхняя критическая температура соответствует началу а нижняя – концу затвердевания сплава.

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

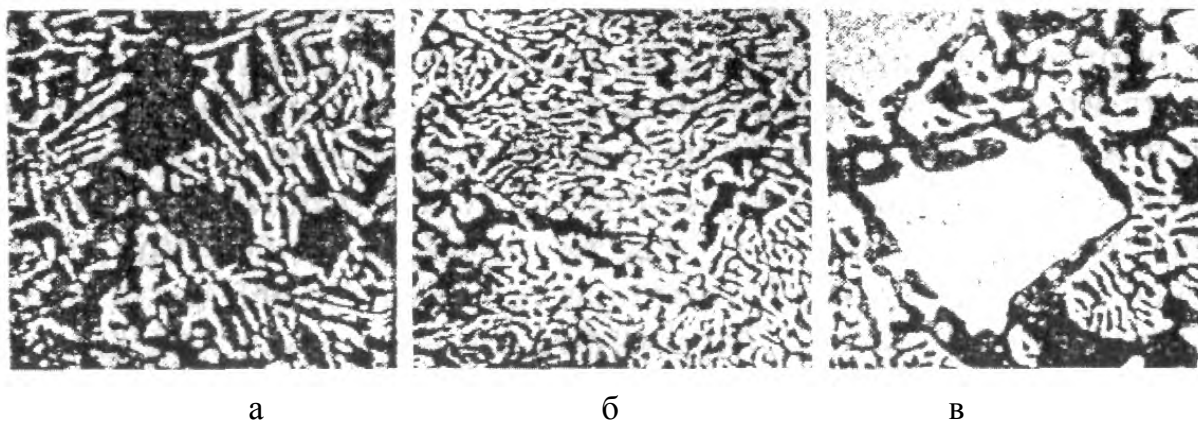
У сплавов в, г и д в избытке к эвтектическому составу находится сурьма, поэтому процесс кристаллизации начнется с выделения кристаллов сурьмы, а закончится при температуре 246 °С выделением эвтектики.

Эти сплавы в твердом состоянии будут состоять из кристаллов сурьмы и эвтектики.

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

Эта диаграмма имеет пять различных областей, дающих представление о состоянии любого сплава свинец–сурьма при любой температуре. Область выше линии

ABC – жидкий сплав; в интервале точек ABD – кристаллы свинца и жидкий сплав; в интервале точек BCE – кристаллы сурьмы и жидкий сплав; ниже линии DB – кристаллы свинца и эвтектика; ниже линии BE – кристаллы сурьмы и эвтектика. Линия ABC называется линией ликвидус (в переводе с греческого – жидкий). Выше этой линии любой сплав свинца с сурьмой находится в жидком состоянии. Линия DBE получила название линии солидус (в переводе с греческого – твердый), или эвтектической линии. Ниже этой линии все сплавы свинца с сурьмой будут в твердом состоянии. Между линиями ликвидуса и солидуса сосуществуют твердые кристаллы и жидкий сплав. Точка В показывает состав эвтектики. Сплавы, расположенные левее этой точки, называются доэвтектическими, правее ее – заэвтектическими. Микроструктура сплавов Pb–Sb представлена на рисунке 5.2.



а – доэвтектическая (эвтектика плюс темные кристаллы свинца); б – эвтектическая (эвтектика – механическая смесь свинца и сурьмы); в – заэвтектическая (эвтектика плюс светлые кристаллы сурьмы)

Рисунок 5.2 - Микроструктура сплавов Pb–Sb

В структуре доэвтектических сплавов кроме эвтектики всегда есть некоторое количество свинца, а в заэвтектических кроме эвтектики – сурьма.

## 5.2 Диаграмма состояния сплавов второго рода

Диаграммы состояния сплавов второго рода характерны для сплавов, компоненты которых обладают неограниченной взаимной растворимостью, как в жидком, так и в твердом состоянии. Следовательно, сплавы такого типа после затвердевания будут состоять из кристаллов твердого раствора. На примере сплавов меди с никелем рассмотрим принцип построения таких диаграмм (рисунок 5.3).

Получив кривые охлаждения для ряда сплавов меди с никелем, определим температуры начала и конца затвердевания этих сплавов. Диаграмму строят: на оси абсцисс - содержание никеля от 0 до 100 %.

Вертикальные линии указывают на температуры начала и конца затвердевания сплавов. Линией ликвидуса кривая, проведенная через точки а. Линией солидуса – кривая, проведенная через точки б. Диаграмма имеет три области: в области I все сплавы меди с никелем находятся в жидком состоянии, в области II сосуществуют кристаллы твердого раствора и жидкий сплав, в области III все сплавы состоят из кристаллов твердого раствора.



Рисунок 5.3 - Диаграмма состояния сплавов Cu–Ni второго рода

Диаграмма состояния этих сплавов принципиально отличается от диаграммы состояния первого рода: линия солидус диаграммы состояния сплава меди с никелем имеет криволинейный характер. На диаграмме состояния сплавов первого рода линия солидуса прямая, так как окончание затвердевания всех сплавов происходит при одной и той же температуре. Причина такого различия заключается в том, что у всех сплавов, образующих механические смеси (диаграмма первого рода), концентрация жидкости в конце кристаллизации всегда одинакова. У сплавов, образующих твердые растворы, концентрация жидкости в конце кристаллизации будет неодинаковой. Сплавы, создающие твердые растворы, как и чистые металлы, имеют микроструктуру из однородных зерен, по которой нельзя отличить твердые растворы от чистых металлов. Они различаются лишь строением кристаллической решетки: у чистых металлов кристаллическая решетка состоит из однородных атомов, у твердых растворов – из атомов двух или более компонентов.

Неограниченные твердые растворы образуют следующие пары компонентов: Си–Ni; Аи–Ag; Fe–Ni; Fe–Cr; Fe–Co; Fe–V и др. Рассмотренные диаграммы состояния сплавов являются наиболее простыми и вместе с тем наиболее важными. Встречаются и другие группы сплавов. Например, компоненты, входящие в сплав, могут образовывать химические соединения или компоненты могут в ограниченном количестве растворяться друг в друге в твердом состоянии. В таких случаях диаграммы состояния сплавов будут более сложными – они будут представлять собой ту или иную комбинацию диаграмм состояния первого и второго рода.

Диаграммы состояния сплавов дают картину изменения строения, а следовательно, и свойств сплава при изменениях его концентрации и температуры. Они позволяют без проведения опытов определить температуры, при которых происходят плавление и затвердевание сплавов, а также аллотропические превращения в них. Пользуясь диаграммами, можно установить режимы термической обработки сплавов, а также режимы их горячей обработки давлением. Существует определенная зависимость между типом диаграмм состояния сплавов и некоторыми свойствами сплавов (электросопротивлением, твердостью и др.).

## Контрольные вопросы

- 1) Что такое диаграмма состояния?
- 2) Основные типы диаграмм состояния.
- 3) Опешите диаграмму состояния сплавов первого рода.
- 4) Диаграмма состояния сплавов Pb–Sb. Перечислите и опешите основные компоненты диаграммы.
- 5) Опешите диаграмму состояния сплавов второго рода.
- 6) Диаграмма состояния сплавов Cu–Ni. Перечислите и опешите основные компоненты диаграммы.

## 6 Железоуглеродистые сплавы

### 6.1 Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов

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

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

Микроструктура железоуглеродистых сплавов представлена на рисунке 6.1.

Чугуна отличается от стали более высоким содержанием углерода (более 2,14 %). Наибольшее распространение получили чугуны, содержащие 3-3,5 % углерода. В состав чугунов входят те же примеси, что и в сталь, т. е. кремний, марганец, сера и фосфор, но в несколько больших количествах. Углерод в чугуне может находиться в химическом соединении с железом либо в свободном состоянии в виде графита. Чугуны, у которых весь углерод находится в химическом соединении с железом, называют белыми (по виду излома), а чугуны, весь углерод которых или большая его часть представляет собой графит называются серыми.

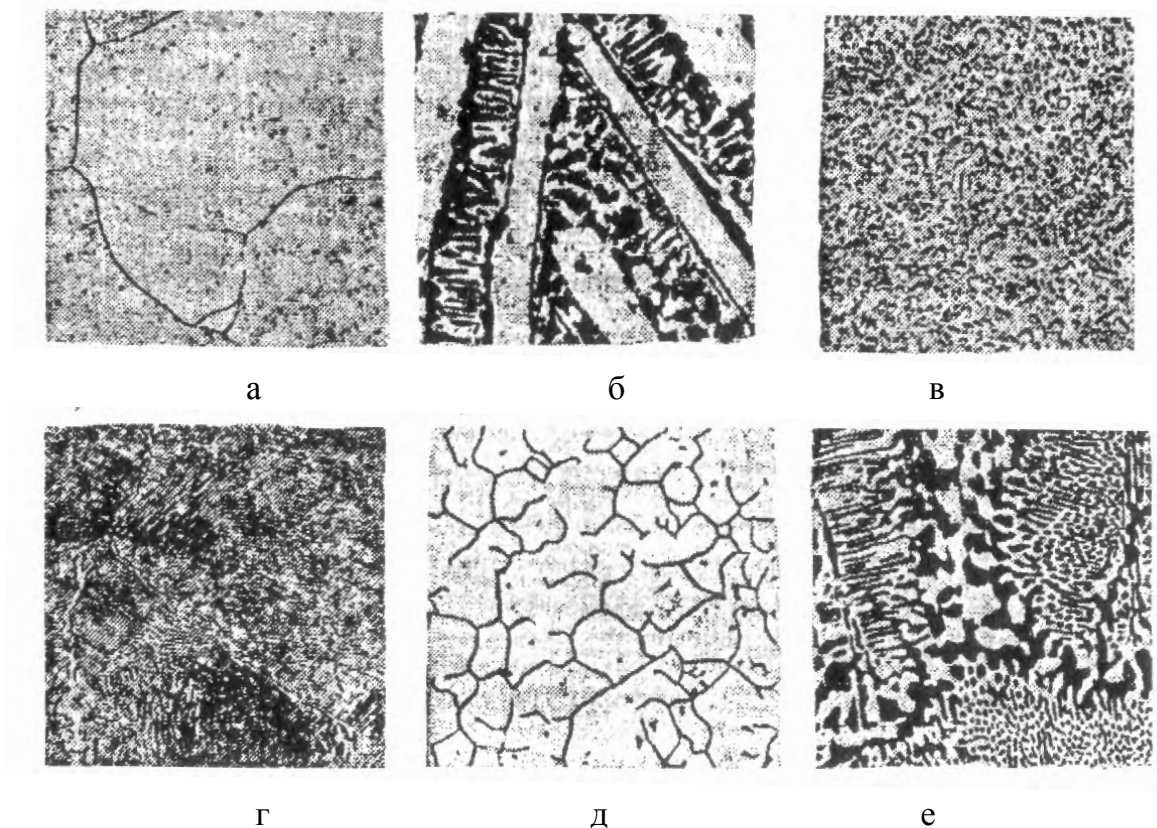
В железоуглеродистые сплавы входят различные структурные составляющие, свойства которых обуславливают свойства стали и чугуна.

Феррит – твердый раствор небольшого количества углерода (до 0,04 %) и других примесей в  $\alpha$ -железе – мягкая, пластичная и недостаточно прочная структурная составляющая. Относительное удлинение  $\delta$  равно 30 %, твердость – 50-80 НВ, предел прочности  $\sigma_b = 300$  МПа (30 кгс/мм<sup>2</sup>). Практически это чистое железо. Механические свойства феррита в большой степени зависят от размеров зерен. Феррит обладает магнитными свойствами (до температуры 768 °С).

Цементит – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа. Он содержит 93,33 % железа и 6,67 % углерода. Отличается большой твердостью (800 НВ, т. е. в 10 раз тверже феррита) и значительной хрупкостью. Цементит слабо магнитен, а при температурах выше 215 °С – немагнитен. Углерод может проникать в железо двумя способами. Атомы углерода могут занимать в пространственной решетке свободные места между атомами железа. Однако при комнатной температуре в пространственной решетке железа может поместиться всего 0,0001 % углерода. Остальные атомы углерода проникают в железо другим путем – вступают с ним в химиче-



скую связь. При этом образуется карбид железа  $Fe_3C$  (цементит), состоящий из трех атомов железа и одного атома углерода.



а – зерна феррита; б – светлые пластины цементита в заэвтектическом белом чугуна; в – зернистый перлит, зерна цементита; г – пластинчатый перлит, пластины цементита; д – зерна аустенита, установленные методом окисления при 925 °С; е – ледебурит эвтектического белого чугуна

Рисунок 6.1 - Микроструктуры железоуглеродистых сплавов

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

Перлит имеет две разновидности. Если цементит в перлите расположен в виде пластинок, его называют пластинчатым, если же цементит расположен в виде зерен, перлит называют зернистым. Под микроскопом пластинки цементита кажутся блестящими, потому что обладают большой твердостью, хорошо полируются и при травлении кислотами разъедаются меньше, чем мягкий феррит. После травления темные участки перлита в сочетании с ферритом или цементитом. Поскольку перлит состоит из феррита и цементита, его свойства определяются количеством этих составляющих. Содержание феррита в перлите в шесть раз больше, чем цементита. Механические свойства перлита зависят также от формы цементита. У пластинчатого перлита твердость 180-200 НВ, предел прочности  $\sigma_b=800$  МПа (80 кгс/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение  $\delta=10+12\%$ . У зернистого перлита прочность и твердость несколько ниже, а

пластические свойства выше. Так как перлит содержит  $\alpha$ -железо, он обладает магнитными свойствами.

Если железоуглеродистые сплавы нагреть до определенных температур, произойдет аллотропическое превращение  $\alpha$ -железа в  $\gamma$ -железо и образуется структурная составляющая, которая называется аустенитом.

Аустенит - твердый раствор углерода (до 2,14 %) и других примесей в  $\gamma$ -железе. Способность углерода растворяться в железе неодинакова при различных температурах. При температуре 1147 °С и выше в кристаллической решетке  $\gamma$ -железа может раствориться максимальное количество углерода (2,14 %). При температурах ниже 1147 °С растворимость углерода в  $\gamma$ -железе постепенно уменьшается, а избыточный углерод выделяется в виде цементита. При 727 °С  $\gamma$ -железо может растворять не более 0,8 % углерода. При этой температуре происходит распад аустенита с образованием перлита. Лишь в некоторых сталях, содержащих большое количество никеля или марганца, структура аустенита может сохраниться и при температурах ниже 727 °С (вплоть до комнатной). Аустенит – мягкая структурная составляющая (хотя и тверже феррита). Его твердость 180 НВ, относительное удлинение  $\delta = 40 + 50$  %. Он отличается большой пластичностью, магнитными свойствами не обладает.

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

Железоуглеродистые сплавы всегда состоят из двух структурных элементов: мягкого пластичного феррита и твердого цементита, упрочняющего сплав. Эти элементы могут образовать механическую смесь либо находиться в свободном состоянии.

## 6.2 Диаграмма состояния сплавов железо-цементит (Fe–Fe<sub>3</sub>C)

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов (рисунок 6.2) охватывает не все сплавы железа с углеродом, а лишь те, которые содержат до 6,67 % углерода. Железоуглеродистые сплавы, содержащие более 5 % углерода, не представляют практического интереса, 6,67 % углерода взято на том основании, что при таком его количестве образуется химическое соединение Fe<sub>3</sub>C (цементит), которое может рассматриваться как самостоятельный компонент сплава. Диаграмма состояния сплавов Fe–Fe<sub>3</sub>C разделена на две части: диаграмму углеродистых сталей и диаграмму белых чугунов. Углеродистые стали – это сплавы железа, содержащие до 2,14 % углерода.

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

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

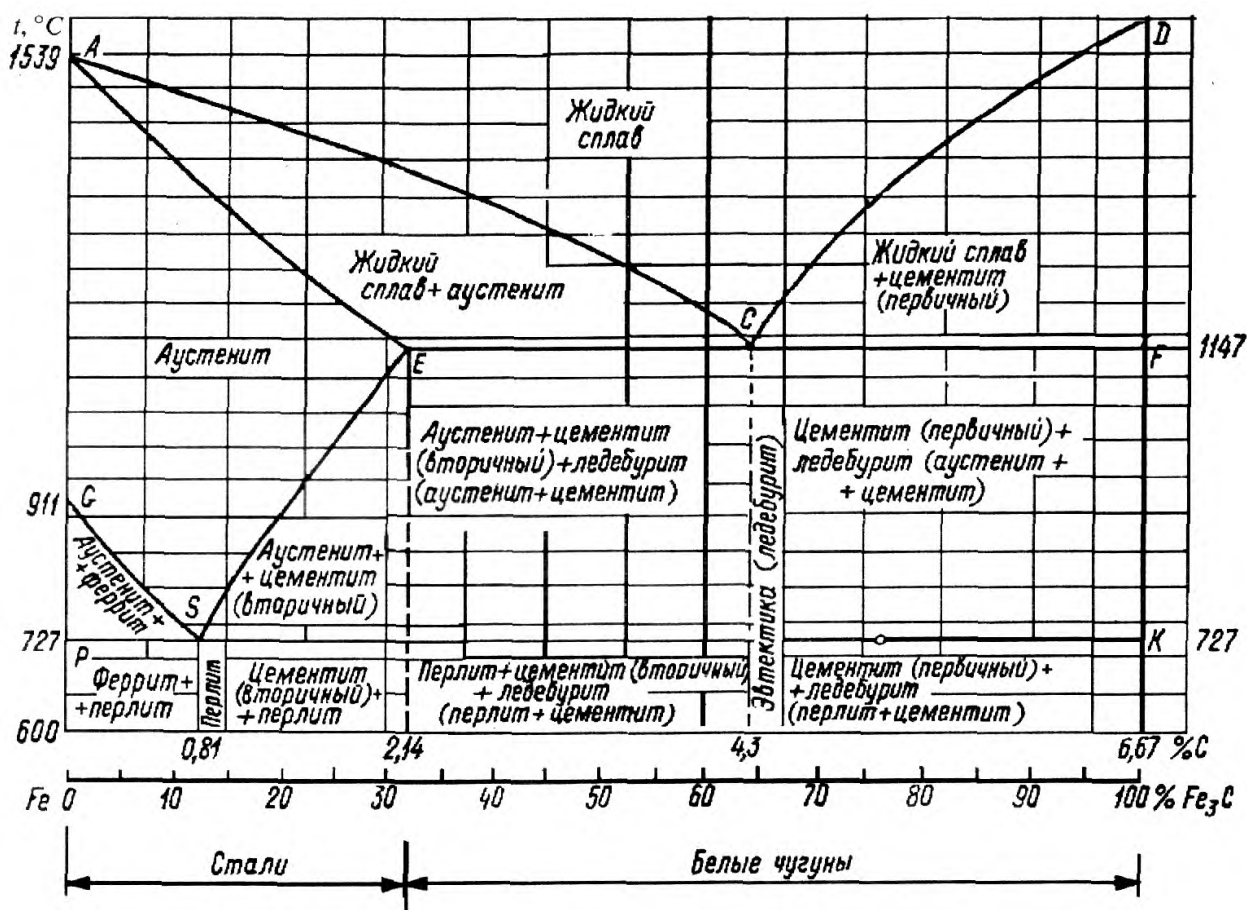


Рисунок 6.2 - Диаграмма состояния сплавов Fe-Fe<sub>3</sub>C в упрощенном виде

### 6.2.1 Процессы первичной кристаллизации железоуглеродистых сплавов

На диаграмме (рисунок 6.2) показано состояние Fe-Fe<sub>3</sub>C при первичной и вторичной кристаллизации. Эти процессы характеризуются кривыми ACD и AECF.

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

При первичной кристаллизации, по линии AC из жидкого сплава выделяются кристаллы твердого раствора углерода в  $\gamma$ -железе, т. е. аустенит. При содержании углерода в сплавах до 2,14% первичная кристаллизация закончится образованием однородного по составу аустенита. Для сплавов с содержанием углерода от 2,14 до 4,3 % (до-эвтектические чугуны) первичная кристаллизация закончится образованием аустенита, при понижении температуры на линии EC образуются эвтектика, содержащая 4,3 % углерода, т. е. ледебурит, и вторичный цементит, который выделится из переохлажденного углеродом аустенита при температурах ниже 1147 °C – в процессе

вторичной кристаллизации. В точке С при 1147 °С образуется эвтектика, содержащая 4,3 % углерода, т. е. ледебурит.

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

В результате первичной кристаллизации сталь получает структуру аустенита, характеризующуюся хорошей пластичностью и вязкостью. Поэтому такая сталь хорошо поддается обработке давлением при высоких температурах. Белые чугуны состоят из хрупкого и твердого ледебурита. Эта разница в технологических свойствах железоуглеродистых сплавов делает содержание углерода 2,14 % той границей между сталью и белыми чугунами, за которой при первичной кристаллизации появляется ледебурит.

### 6.2.2 Процессы вторичной кристаллизации стали

Если бы железо не испытывало структурных превращений в твердом состоянии, то диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов при всех температурах ниже 1147 °С (вплоть до комнатной) была бы одинаковой (линия AECF). Однако железо подвержено аллотропическим превращениям, поэтому эти сплавы не сохраняют своей первичной структуры. Рассмотрим процессы вторичной кристаллизации сталей. Выделим левую часть диаграммы, охватывающую процессы вторичной кристаллизации стали.

Первичная структура стали, включает зерна аустенита. Она сохраняется до линии GSE. Указанная линия соответствует температурам, при которых начинается вторичная кристаллизация сталей различного состава. Линия PSK характеризует температуру, при которой завершаются процессы вторичной кристаллизации эта температура равна 727 °С. При температурах ниже 727 °С превращений в сталях не наблюдается, структура, полученная при 727 °С, сохраняется при дальнейшем охлаждении сплава (вплоть до комнатной температуры). Линия PSK называется эвтектоидной. Точка S диаграммы соответствует составу эвтектоида – перлиту. Какие структурные превращения претерпевает сталь при твердом состоянии? Начнем изучение этих превращений с линии GS. Точка G соответствует превращениям, происходящим в чистом железе при 911 °С. При этой температуре  $\gamma$ -железо переходит в  $\alpha$ -железо. У сталей этот процесс также происходит, но ввиду того, что в решетке  $\gamma$ -железа имеется то или иное количество углерода, он протекает при более низких температурах, чем у чистого железа (рисунок 6.3).

Переход  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо у сталей происходит не при постоянной, а в интервале температур (между линиями GSE и PSK). Линия GS для сталей, содержащих до 0,8 % углерода, соответствует температурам, при которых начинается выделение феррита из аустенита (так как сталь содержит не чистое  $\gamma$ -железо, а твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе, т. е. аустенит).

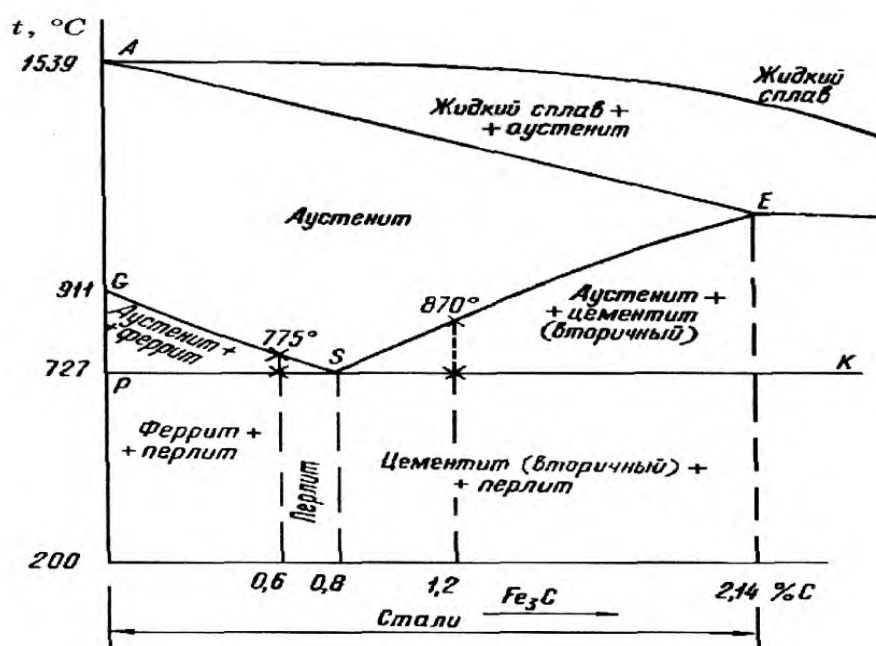


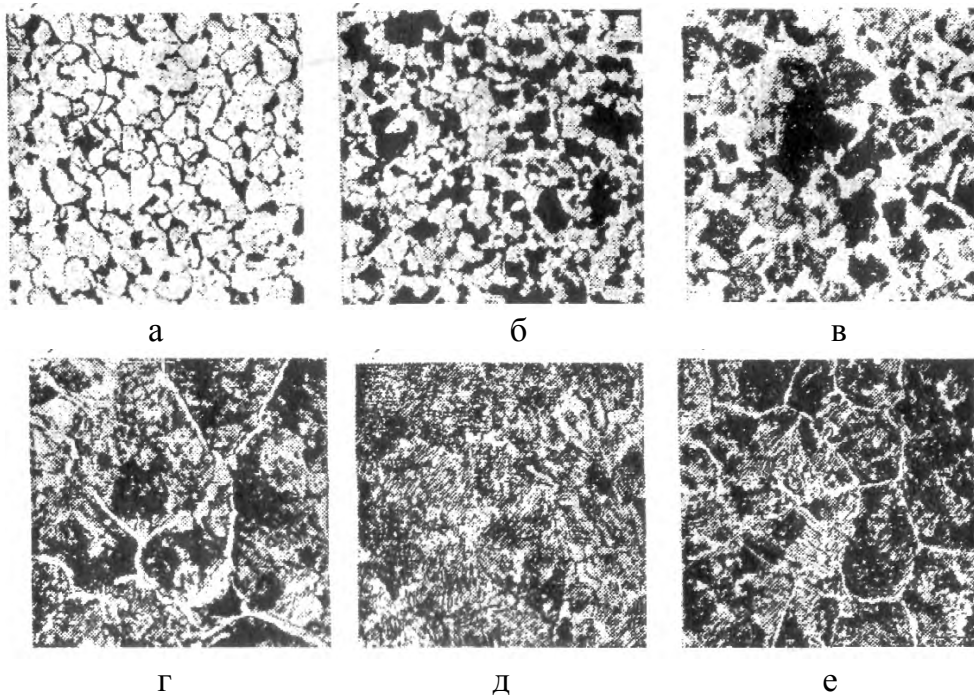
Рисунок 6.3 - Область сталей в диаграмме состояния сплавов Fe–Fe<sub>3</sub>C

Вторичная кристаллизация стали с 0,6 % углерода сохраняет первичную структуру аустенита до температуры 775 °С. При этой температуре начинается ее аллотропическое превращение, т. е. выделение феррита из аустенита. Так как в феррите содержится ничтожное количество углерода, оставшийся аустенит будет постепенно, по мере выделения феррита обогащаться углеродом. Когда концентрация углерода в оставшемся аустените достигнет 0,8 % при 727 °С, произойдет распад аустенита на равномерную механическую смесь феррита и цементита, которая называется перлитом. Таким образом, в интервале температур от 775 до 727 °С сталь, содержащая 0,6 % углерода, будет иметь в своем составе феррит и аустенит, а при температурах ниже 727 °С – феррит и перлит.

Структура феррит–перлит сохранится без значительных изменений и при дальнейшем охлаждении стали вплоть до комнатной температуры. Аналогичные превращения характерны для всех доэвтектоидных сталей (содержащих менее 0,8 % углерода). Разница будет лишь в температурах начала выделения феррита. Микроструктура сталей с различным содержанием углерода представлена на рисунке 6.4.

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

Вторичная кристаллизация стали с 1,2 % углерода. Она сохраняет первичную структуру аустенита при охлаждении до 870 °С. При более низкой температуре, аустенит не способен растворить 1,2 % углерода, поэтому при дальнейшем охлаждении сплава из кристаллической решетки аустенита будет выделяться избыточный углерод в виде цементита.



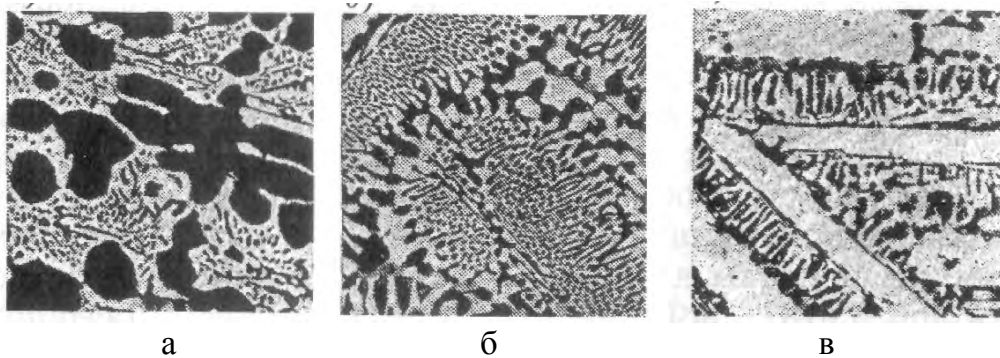
доэвтектоидные (а–г): а – 0,05 (светлое – феррит, темное – перлит); б – 0,25 (феррит + перлит); в – 0,5 (феррит+ перлит); г – 0,7 (перлит + ферритная сетка); эвтектоидная (д) – 0,8 (пластинчатый перлит); заэвтектоидная (е) – 1,2 (перлит + цементитная сетка)  
 Рисунок 6.4 - Микроструктуры сталей с различным содержанием углерода (%)

Так как этот цементит образуется в результате вторичной кристаллизации, его называют вторичным и обозначают  $Fe_3C_{11}$ . Вследствие выделения цементита содержание углерода в оставшемся аустените будет непрерывно снижаться и при температуре  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  достигнет 0,8 %. При этой температуре аустенит превратится в перлит. На этом вторичная кристаллизации закончится. Таким образом, рассматриваемая сталь в интервале температур от  $870$  до  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеет структуру аустенита и вторичного цементита, а при температурах ниже  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  состоит из вторичного цементита и перлита. Аналогичные превращения в твердом состоянии испытывают все заэвтектоидные стали, т. е. стали, содержащие более 0,8 % углерода, разница между ними лишь в температурах начала выделения вторичного цементита.

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

### 6.2.3 Процессы вторичной кристаллизации белых чугунов

Первичная структура белых чугунов может содержать ледебурит, аустенит и первичный цементит (рисунок 6.5). Так как ледебурит представляет собой механическую смесь аустенита и цементита, то и в структуру белого чугуна входят аустенит и первичный цементит. В твердом состоянии цементит не претерпевает структурных превращений, следовательно, вторичная кристаллизация чугунов связана только с теми превращениями, которые происходят в аустените при его охлаждении.



а – доэвтектического (перлит и ледебурит); б – эвтектического (ледебурит);  
 в – заэвтектического (ледебурит и цементит)  
 Рисунок 6.5 - Микроструктура белых чугунов

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

Анализ диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C позволяет сделать вывод: при комнатной температуре микроструктура доэвтектоидных сталей включает феррит и перлит, эвтектоидных сталей – перлит, заэвтектоидных сталей – вторичный цементит и перлит; в микроструктуру белых доэвтектических чугунов входят перлит, вторичный цементит и ледебурит, эвтектического чугуна – ледебурит, заэвтектического чугуна – первичный цементит и ледебурит.

При использовании диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов следует иметь в виду три важных обстоятельства. Структурные превращения, протекающие в процессе охлаждения железоуглеродистых сплавов, являются обратимыми.

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

### Контрольные вопросы

- 1) Назовите основные железоуглеродистые сплавы?
- 2) Чем отличается чугун от стали?
- 3) Приведите классификацию чугунов.
- 4) Для чего применяют диаграмму железо-цементит?
- 5) Опешите структурные и фазовые составляющие диаграммы железо-цементит.
- 6) Какую сталь называют эвтектоидной?
- 7) Какой чугун называют эвтектическим?
- 8) Приведите классификацию белых чугунов.

## 7 Стали

### 7.1 Классификация сталей

Наибольшее распространение получили углеродистые стали, в общем объеме производства сталей их доля составляет 80 %.

В настоящее время нет единой международной классификации сталей. К основным из них относят способ производства, химический состав, сортамент, качество, структуру в равновесном состоянии или после охлаждения на воздухе, основные свойства и области применения.

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

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

ВИ (ВИП) – переплав в вакуумных индукционных печах;

Ш (ЭШП) – электрошлаковый переплав;

ВД (ВДП) – переплав в вакуумных, дуговых печах;

ШД – вакуумно-дуговой переплав стали, полученной электрошлаковым переплавом;

ЭЛП – электронно-лучевой переплав;

ПДП – плазменно-дуговая плавка;

ОДП – обычная дуговая плавка.

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

В зависимости от типа плавильного агрегата сталь разделяют на мартеновскую, кислородно-конвертерную, электросталь, выплавленную в дуговых или индукционных печах.

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

По степени раскисленности (содержания кислорода в жидкой стали) нелегированную (углеродистую) сталь подразделяют на спокойную, кипящую и полуспокойную. Разработан ряд марок полуспокойной низколегированной стали (08ГФпс, 18ГФпс, 18Г2АФпс и др.)

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

В легированной стали кроме углерода и примесей вводят один или несколько легирующих элементов (хром, никель, молибден, марганец, кремний и др.) для обеспечения требуемых прочности, пластичности, вязкости и других технологических и эксплуатационных свойств. В зависимости от массовой доли введенных легирующих



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

В зависимости от доли легирующих элементов сталь называют марганцевой, кремнистой, хромистой, никелевой, а также хромоникелевой, хромомарганцевой, хромокремнистой, хромованадиевой, никельмолибденовой, хромоникельмолибденовой, хромомолибденованадиевой, хромокремнемарганцовоникелевой и т. п.

По качеству стали подразделяют на обыкновенную, качественную, высококачественную и особовысококачественную. Если марганец и кремний необходимы по условиям технологии выплавки, то сера и фосфор относятся к вредным примесям, не поддающимся полному удалению. В малом количестве в стали постоянно присутствуют примеси: кислород, водород, азот. Чем меньше вредных примесей, тем выше качество стали. Допустимые пределы, %: фосфора и серы соответственно не более 0,040 и 0,050 в стали обыкновенного качества, 0,035 и 0,035 – в качественной, 0,025 и 0,025 – в высококачественной, 0,025 и 0,015 – в особовысококачественной.

Категорию обыкновенного качества устанавливают только для нелегированной (углеродистой) стали. Остальные категории могут распространяться как на нелегированную, так и легированную сталь всех групп.

По структуре в равновесном состоянии (т. е. после отжига) стали подразделяют на доэвтектоидные, имеющие в структуре избыточный феррит, эвтектоидные с перлитной структурой, заэвтектоидные, имеющие в структуре избыточные (вторичные) карбиды, и ледебуритные, в которых первичные карбиды выделяются из жидкой фазы при кристаллизации. В литой ледебуритной стали карбиды совместно с аустенитом образуют эвтектику – ледебурит, который при горячем пластическом деформировании путемковки или прокатки преобразуется в строчки карбидных частиц различной толщины (карбидная неоднородность) вдоль направления вытяжки при деформировании прутка или полосы.

В соответствии с диаграммой состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C массовая доля (%) углерода составляет в нелегированной доэвтектоидной стали менее 0,8, в эвтектоидной – около 0,8, в заэвтектоидной – 0,8-2,0. Большинство легирующих элементов сдвигает эвтектоидную точку S (на диаграмме Fe–Fe<sub>3</sub>C) в сторону меньшей массовой доли углерода, поэтому границы между доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной областями в легированных сталях располагаются при меньшей массовой доле углерода, чем в нелегированных сталях. Благодаря смещению границ фазовых областей ледебурит в высокоуглеродистых легированных сталях появляется при меньших, чем 2,14 %, массовых долях углерода, в быстрорежущих сталях – при содержании менее 1 % углерода.

Другим структурным признаком, по которому классифицируют стали, является основная структура, полученная при охлаждении на воздухе образцов небольших сечений после высокотемпературного нагрева (900 °С). В зависимости от структуры сталь подразделяют на перлитную, бейнитную, мартенситную, ледебуритную, ферритную и аустенитную.

Перлитная и бейнитная структуры чаще всего формируются в нелегированной и низколегированной сталях, мартенситная – в средне- и высоколегированной, а ферритная и аустенитная – в высоколегированной.

Ледебуритные стали, как правило, являются разновидностью мартенситных сталей с высоким содержанием углерода и легирующих элементов. После нормализации структура стали представляет смесь мартенсита и ледебурита, наличие которого является причиной карбидной ликвации в поковках и прокате этих сталей.

Однако такая связь между структурой и химическим составом стали далеко неоднозначна. Наряду с перечисленными могут быть смешанные классы: ферритно-мартенситный, аустенитно-ферритный, аустенитно-мартенситный. Такую классификацию применяют при наличии в структуре объемной доли второй структурной составляющей не менее 10 %.

По основным свойствам стали классифицируют, чтобы определить эксплуатационные свойства. Такую классификацию используют в стандартах большинства стран.

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

К сталям общего назначения относят нелегированные (углеродистые) стали обыкновенного качества и качественные, показатели свойств которых в горячекатаном или термически обработанном (нормализованном) прокате регламентируются в следующих пределах:  $\sigma_b < 680$  МПа,  $\sigma_b < 285$  МПа,  $\delta < 20$  %; КСЧ  $< 49$  Дж/см<sup>2</sup> (при 20 °С), КСЧ  $< 29$  Дж/см<sup>2</sup> (при 0 °С), после механического старения КСЧ  $< 29$  Дж/см<sup>2</sup>.

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

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

Инструментальная сталь – для изготовления измерительных инструментов. Инструментальные стали обычно классифицируют на пять групп: нелегированные, низколегированные, средне- и высоколегированные для штампов холодного деформирования, среднелегированные для штампов горячего деформирования и быстрорежущие.

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

## 7.2 Маркировка сталей в России

В России принята буквенно-цифровая система обозначения марок сталей.

В обозначение марки нелегированной углеродистой конструкционной стали обыкновенного качества входят: Ст (сталь), цифра – условный номер в зависимости от химического состава стали и буквы, определяющие степень раскисления стали (кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная). Например: Ст1кп; Ст2пс; Ст3сп.

Нелегированные конструкционные качественные стали обозначают двузначным числом, указывающим среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента (например, 08; 10; 20). Для сталей, полностью не раскисленных, в обозначение добавляют буквы «кп», «пс» (например, 15кп; 20пс). Для спокойной стали буквы не добавляют.

В обозначение марки нелегированной углеродистой инструментальной стали входят: буква «У», цифра, указывающая среднюю массовую долю углерода в десятых долях процента (например, У7, У8, У10).

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

Цифры, стоящие после буквы в обозначении марки стали показывают примерную массовую долю элемента, округленную до целого числа. При средней массовой доле легирующего элемента до 1,5 % цифру за буквой не обозначают. Массовая доля углерода указывается вначале в сотых (конструкционные стали) или десятых (инструментальные стали) долях процента. Так, конструкционную сталь, содержащую (%):  $C = 0,42 \div 0,50$ ;  $Mn = 0,5 \div 0,8$ ;  $Cr = 0,8 \div 1,0$ ;  $Ni = 1,3 \div 1,8$ ;  $Mo = 0,2 \div 0,3$  и  $V = 0,10 \div 0,18$ , обозначают 45ХН2МФ. Инструментальную сталь для штампов горячего деформирования, содержащую (%):  $C = 0,32 \div 0,40$ ;  $Si = 0,80 \div 1,20$ ;  $Mn = 0,15 \div 0,40$ ;  $Cr = 4,5 \div 5,5$ ;  $Mo = 1,20 \div 1,50$  и  $V = 0,3 \div 0,5$ ,  $Si = 0,90 \div 1,2$ , обозначают 4Х5МФС.

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

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

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

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

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

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

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

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

Массовая доля углерода в марочном обозначении быстрорежущей стали не указывается, так как она пропорциональна массовой доле ванадия. Если быстрорежущая сталь легирована молибденом или кобальтом, их массовая доля указывается в марке. Например, быстрорежущую сталь, содержащую (%): С = 1,0÷1,1; Cr = 3,0÷3,6; W = 8,5÷9,6; V = 2,1 ÷ 2,5; Co=7,5÷8,5; Mo = 3,8 ÷ 4,3, обозначают Р9М4К8.

### 7.3 Классификация углеродистых и легированных сталей

К конструкционным сталям универсального назначения относятся стали, содержащие С = 0,08÷0,70 % и предназначенные для изготовления различных деталей машин и изделий

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

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

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

Прокаливаемость из-за малой устойчивости переохлаждения аустенита слишком мала, что является основным недостатком углеродистых сталей. Критический диаметр цилиндрического образца при закалке в воду (мартенситная структура) для различных углеродистых сталей составляет 10-20 мм и увеличивается при повышении содержания углерода от 0,3 до 0,8 %. В сечении диаметром около 40 мм даже при закалке в воду в центре происходит ферритно-перлитное превращение.

Оптимальное сочетание показателей прочности, пластичности и ударной вязкости обеспечивается отпуском закаленной стали.

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

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

### **7.3.1 Углеродистые стали**

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

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

#### **7.3.1.1 Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-94)**

В зависимости от технологии раскисления стали выпускаются трех разновидностей (ГОСТ 380-94):

- кипящие с  $C < 0,27\%$  (Ст1кп, Ст2кп, Ст3кп и Ст4кп);
- полуспокойные (Ст1пс, Ст2пс, Ст3пс, Ст4пс, Ст5пс и Ст6пс);
- спокойные (Ст1сп, Ст2сп, Ст3сп, Ст4сп, Ст5сп, Ст6сп).

К ним относятся также стали с повышенным содержанием марганца (Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст6Гпс):  $Mn = 0,8-1,10\%$ . Эти стали, имеют повышенную прочность по сравнению с прочностью сталей Ст3пс, Ст3сп и Ст6пс.

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

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

У горячекатаных сталей скорость охлаждения уменьшается при увеличении диаметра (толщины) проката от 10 до 100 мм. Уменьшение скорости охлаждения приводит к образованию более грубых ферритно-перлитных структур и уменьшению  $\sigma_T$  и  $\delta$ .

Прокат из углеродистых сталей в зависимости от назначения разделяют на три группы:

- I – все виды проката, которые будут использоваться без обработки поверхности;
- II – с обработкой резанием;
- III – с обработкой давлением.

В зависимости от условий эксплуатации изделий и сооружений показатели свойств сталей определяют в разном объеме. Прокат из углеродистых сталей обыкновенного качества разделяют на пять категорий. Обязательными для всех категорий являются испытания на растяжение (определяют  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$  и  $\delta$ ) и на изгиб. Химический состав определяют для 2, 3, 4 и 5-й категорий. Ударную вязкость КСЧ определяют при +20 °С (3-я категория); -20 °С (4-я категория) и после механического старения (5-я категория).

При более высоком допустимом содержании примесей эти стали содержат больше неметаллических включений, чем стали других групп. В прокатанной стали обычно образуется полосчатая или строчечная структура, ориентированная в направлении прокатки. Такую же ориентацию имеют цепочки частиц неметаллических включений, раскатанных ленточек и волокон этих включений. Полосчатая структура, выявляемая микро- и макротравлением, является признаком анизотропии.

### 7.3.1.2 Углеродистые качественные стали (ГОСТ 1050-88)

Марки стали: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55пп), 60.

Предусмотрен выпуск кипящих сталей марок: 08кп, Юкп, Нкп, 18кп, 20кп. Стали Пкп и 18кп используют для плакирования, от других кипящих сталей они отличаются содержанием серы ( $\leq 0,035$  %), фосфора ( $\leq 0,030$  %) и меди ( $\leq 0,20$  %).

Полуспокойные стали выпускают марок 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

Особенностями химического состава углеродистых качественных сталей являются суженный интервал содержания углерода (0,08 %), нормированное содержание хрома (0,10-0,25 %). Для предупреждения «подкаливания» при охлаждении проката и обеспечения его твердости не выше 255 НВ независимо от содержания углерода ограничено содержание серы и фосфора (до 0,035 % каждого элемента). Если стали предназначены для изготовления патентированной проволоки, то в них уменьшают содержание марганца (0,30-0,60 %) и примесей: хрома ( $< 0,15$  %), никеля ( $< 0,15$  %) и меди ( $< 0,20$  %), чтобы не увеличить устойчивость переохлажденного аустенита и не получить после патентирования нежелательную структуру с пониженной технологической пластичностью. Для проката сталей с  $C > 0,35$  % нормируется обезуглероживание, если детали из этих сталей будут подвергаться индукционной закалке. Допускается обезуглероживание на глубину не более 0,5-1,5 % диаметра (на сторону), включая слой феррита и переходную зону.

### 7.3.1.3 Инструментальные углеродистые стали (ГОСТ 1435-90)

Из инструментальных углеродистых сталей получают горячекатаную, кованую и калиброванную сталь, сталь серебрянку, сталь для сердечников, а также слитки, лис-

ты, ленту, проволоку и другую продукцию. Из этих сталей изготавливают режущий инструмент для обработки металлов, дерева и пластмасс, измерительный инструмент, штампы для холодного деформирования.

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

Инструментальные углеродистые стали условно можно разделить на две группы:

- качественные стали – У7, У8, У8Г, У9, У10, У11, У12 и У13;

- высококачественные стали – У7А, У8А, У8ГА, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А.

В качественных инструментальных углеродистых сталях допускается содержание 0,03 % серы и 0,035 % фосфора, в высококачественных – 0,02 % серы и 0,03 % фосфора. Стали, полученные методом электрошлакового переплава, содержат до 0,015 % серы. В зависимости от содержания хрома, никеля и меди инструментальные углеродистые стали подразделяют на пять групп:

1-я – качественные стали всех марок, предназначенные для изготовления продукции всех видов (кроме патентированной проволоки и ленты);

2-я – высококачественные стали всех марок, предназначенные для тех же целей, что и стали 1-й группы;

3-я – стали марок У10А и У12А для изготовления сердечников;

4-я – стали всех марок для производства патентированной проволоки и ленты;

5-я – стали марок от У7 до У13 для изготовления горячей холоднокатаных листов и лент, в том числе термически обработанных толщиной до 2,5 мм (кроме патентированной ленты), а также стали марок от У7А до У13А для производства горячекатаной и ковальной сортовой стали и холодноотянутой шлифованной стали (серебрянки).

Группа стали указывается в заказе потребителя. Нормы на поставляемую сталь обусловлены ГОСТ 1435-90.

Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, значительно превышающей твердость обрабатываемого материала, износостойкостью и теплостойкостью (способностью сохранять свойства при высоких температурах).

Из стали У9 производят деревообрабатывающий режущий инструмент (сверла, фрезы, ножи) и ножовочные полотна для обработки стали. Металлорежущий инструмент (фасонные резцы, сверла, метчики, плашки, развертки, фрезы, напильники и ходовые винты прецизионных станков) изготавливают из сталей У10, У11 и У12, бритвенные ножи, лезвийный хирургический инструмент и напильники – из стали У13, слесарные молотки, зубила, губки тисков – из сталей У7 и У8, шаблоны, скобы, детали микрометрического инструмента, гладкие и резьбовые калибры, цанги, фрикционные диски, пружины – из сталей У8, У9 и У10. Как правило, изготовлению инструмента предшествует отжиг на зернистый цементит, который способствует лучшей обрабатываемости резанием и уменьшает коробление деталей при закалке.

#### **7.4 Влияние углерода и примесей на структуру и свойства сталей**

Кроме железа и углерода стали в своем составе, имеют некоторое количество постоянных примесей. Они оказывают различное влияние на структуру, а следовательно, и на свойства сталей (сера, фосфор, марганец, кремний) а также углерод оказывающий основное влияние на их структуру и свойства. Чем больше содержание углерода, тем выше твердость и прочность стали, но тем ниже пластичность и вязкость (рисунок 7.1).

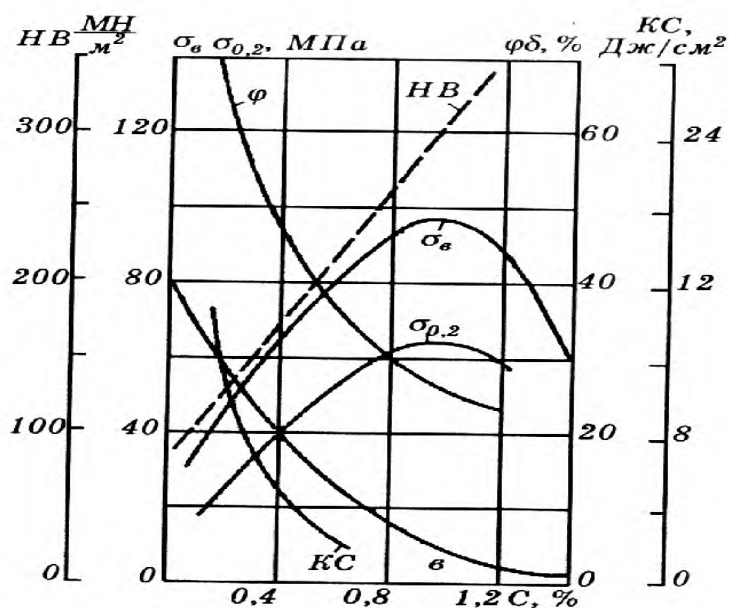


Рисунок 7.1 – Влияние содержания углерода на механические свойства стали

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

Сера попадает в сталь из чугуна, а в чугун – из руды и кокса. В железе она почти нерастворима, а в структуре стали образует химические соединения: с железом – (сульфид железа FeS) или с марганцем – (сульфид марганца MnS). Эти сульфиды, а также соединения кислорода с железом и с марганцем (FeO, MnO) называют неметаллическими включениями. Сульфид железа (FeS) располагается по границам зерен, температура его плавления 985 °С.

Температура горячей обработки давлением стали выше 1000 °С, поэтому каждое зерно находится в жидкой «рубашке» расплавленной эвтектики (сульфида железа), что служит причиной возникновения трещин.

Связь между зернами, разогретыми до температуры выше 1000 °С, ослабевает, и сталь разрушается. Такое явление называют красноломкостью, а сталь с повышенным содержанием серы – красноломкой (сульфид марганца MnS).

Сульфид марганца плавится при 1620 °С, он пластичен и при горячей обработке давлением вытягивается в направлении деформации. Это включение (MnS) нежелательно, так как оно снижает динамическую и усталостную прочность, а также износостойкость.

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

Фосфор попадает в сталь так же, как и сера. Атомы фосфора, располагаясь в кристаллической решетке железа, сильно искажают ее, повышая твердость. Фосфор значительно снижает пластичность стали, делая ее хрупкой, особенно при температу-



рах ниже нуля. Это явление называют хладноломкостью. Кроме того, фосфор, как и сера, склонны к образованию ликвационных зон, что отрицательно сказывается на свойствах стали. Содержание фосфора в зависимости от качества стали должно находиться в пределах 0,025–0,07 %. Как и сера, фосфор улучшает обрабатываемость стали резанием.

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

В сталях присутствуют газы (кислород, азот, водород), которые частично растворены и находятся в виде неметаллических включений (окислы и нитриды).

### **Контрольные вопросы**

- 1) Приведите классификацию сталей по содержанию углерода.
- 2) Классификация сталей по содержанию легирующих элементов.
- 3) Классификация сталей по области применения.
- 4) Классификация сталей по качеству.
- 5) Область применения инструментальных сталей.
- 6) Как влияет углерод на механические свойства сталей?

## **8 Классификация конструкционных сталей**

### **8.1 Цементуемые стали**

Для упрочнения поверхности стальных деталей используют химико-термическую обработку (цементацию, нитроцементацию, азотирование), а также поверхностную закалку. Цементация и нитроцементация обеспечивают максимальную несущую способность деталей.

Оптимальное сочетание прочности и износостойкости упрочненных слоев, а также прочности и вязкости сердцевины имеют цементуемые стали с  $C = 0,10\div 0,25$  %. После насыщения поверхности углеродом или одновременно углеродом и азотом детали подвергают закалке и низкому отпуску. Упрочненный слой должен иметь толщину не менее 0,5-0,6 мм. Толщиной слоя принято считать сумму толщин заэвтектоидной, эвтектоидной и переходной зон. Несущая способность детали определяется эффективной толщиной слоя, в которой  $C > 0,4$  %. На внутренней границе этой зоны твердость равна 50 HRC<sub>3</sub>, а на поверхности детали твердость должна быть равна 56-63 HRC<sub>3</sub>. Для того чтобы в упрочненном слое распределение углерода по толщине было равномерным, используют диффузионное выравнивание. Оптимальная структура упрочненного слоя представляет собой мартенситную матрицу с содержащимися в ней карбидами и остаточным аустенитом. Карбиды располагаются в виде мелких округлых частиц в заэвтектоидной зоне слоя на глубине 0,1-0,25 мм от поверхности. Эти карбиды увеличивают сопротивление деталей изнашиванию. Остаточный аустенит ускоряет приработку зубчатых пар, а в деталях под нагрузкой способствует релаксации напряжений, снижая их максимум. В этом отношении особенно эффективен азотистый аустенит, получаемый при нитроцементации. Допустимое количество остаточного аустенита определяется условиями эксплуатации деталей: при 10-15 % он не

сказывается существенно на долговечности зубчатых колес, при количестве около 40 % – снижает контактную выносливость тяжело нагруженных зубчатых колес.

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

Чем сложнее термическая обработка цементованных деталей, тем больше их деформация и трудоемкость шлифования для получения точных размеров. Для автомобильных зубчатых передач благодаря нитроцементации с непосредственной закалкой в масле можно или обойтись без шлифования, или существенно уменьшить припуски на шлифование. Деформация нитроцементованных колес меньше, чем цементованных, благодаря более низкой температуре процесса, меньшей толщине упрочненного слоя и меньшему содержанию в нем углерода (обычно  $C = 0,7\%$  и  $N=0,15-0,30\%$ ).

Механические свойства цементуемых сталей после закалки и низкого отпуска – высокая прочность в сочетании с высоким сопротивлением удару, поэтому они могут использоваться как конструкционные материалы без химико-термической обработки.

Теплопрочные стали используют для тяжело нагруженных шестерен летательных аппаратов. Несмотря на минимальные потери энергии в зубчатых передачах, благодаря повышению точности изготовления зубчатых колес температура на рабочих поверхностях достигает 200-300 °С при работе в масляных ваннах. Зубчатые колеса из этих сталей содержат повышенное количество карбидов в рабочем слое, так как при цементации содержание углерода доводят до 1,2-1,6 %. Карбиды в слое обеспечивают повышение износостойкости и предела контактной выносливости. Термическое упрочнение предусматривает высокий отпуск перед закалкой детали. Образовавшиеся во время отпуска карбиды не растворяются полностью при нагревании под закалку. Для предварительных расчетов зубчатых колес на долговечность регламентированы пределы контактной выносливости и пределы выносливости зубьев при изгибе (ГОСТ 21354-87) с учетом условий обработки колес.

## 8.2 Улучшаемые стали

Улучшаемые стали – легированные стали с  $C=0,35\div 0,50\%$ . Оптимальные свойства эти стали приобретают после закалки и высокого отпуска при 500-650 °С. Они имеют повышенную прочность при достаточно высокой пластичности и вязкости.

К улучшаемым сталям относятся следующие марки:

- хромистые – 30Х, 35Х, 38ХА, 40Х, 45Х, 50Х;
- марганцевые – 30Г2, 35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2;
- хромомарганцевые – 27ХГР, 40ХГТР;
- хромокремнистые – 33ХС, 38ХС, 40ХС;
- хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые – 30ХМ, 35ХМ, 38ХМ, 30ХЗМФ, 40ХМФА;
- хромованадиевая – 40ХФА;
- хромоникелевые – 40ХН, 45ХН, 50ХН;
- хромокремнемарганцевые, хромомарганцевоникелевые и хромокремнемарганцевоникелевые – 30ХГС, 30ХГСА, 30ХГСН2А;
- хромоникельмолибденовые – 38Х2Н2МА, 40ХН2МА, 38ХН3МА;
- хромоникельмолибденованадиевые – 38ХН3МФА, 45ХН2МФА;
- хромомолибденоалюминиевая – 38Х2МЮА.

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

После термического улучшения  $\sigma_{-1} = 0,5\sigma_B$ , что выше, чем после отжига или нормализации ( $\sigma_{-1} \approx 0,3\sigma_B$ ). При более высокой прочности ( $\sigma_B > 1300$  МПа) среднеуглеродистые стали со структурой троостита отпуска или мартенсита характеризуются пониженным сопротивлением распространению трещины. Кроме того, низкая пластичность сталей высокой прочности повышает их чувствительность к надрезам в наиболее напряженных зонах деталей. В результате в местах концентрации напряжений зарождаются усталостные трещины, быстро приводящие к поломке деталей. Вследствие повышенной чувствительности к надрезу происходит значительное рассеяние значений  $\sigma_{-1}$  и уменьшение  $\sigma_{-1}$  до  $(0,4 \div 0,3) \sigma_B$ . Несущая способность деталей из легированных сталей в высокопрочном состоянии может быть ниже, чем горячекатаных углеродистых сталей.

Влияние концентраторов на поверхности деталей может быть нейтрализовано дополнительным упрочнением поверхностных слоев пластическим деформированием, индукционной закалкой, азотированием. После такой обработки затруднено возникновение микропластических деформаций поверхностных слоев, приводящих к зарождению усталостных трещин. Кроме того, обработка создает в поверхностных слоях остаточные сжимающие напряжения, которые вместе с растягивающими напряжениями под действием внешней нагрузки нейтрализуют или уменьшают действие растягивающих напряжений. Комбинирование термического улучшения с обработкой поверхности деталей обеспечивает им повышенную эксплуатационную надежность.

Улучшаемые стали используют для изготовления зубчатых колес, хотя предел выносливости зубьев при изгибе у них меньше, чем у цементованных или нитроцементованных зубьев. Критический диаметр улучшаемых сталей при закалке.

Азотируемые стали являются разновидностью улучшаемых сталей. Они используются для изготовления коленчатых валов, шпинделей точных станков, гильз цилиндров, плунжеров топливных насосов, червяков и других деталей, которые должны иметь высокие сопротивление изнашиванию и предел выносливости. Высокие твердость и износостойкость азотированного слоя обеспечиваются благодаря образованию частиц нитридов, когерентно связанных с матричным ферритом. Необходимые свойства достигаются при азотировании легированных сталей, содержащих хром, алюминий и молибден, а также титан и ванадий.

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

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

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

Наиболее важными характеристиками улучшаемых сталей являются прокаливаемость и сопротивление усталости. Глубина прокаливаемого слоя у легированной стали 40X составляет 40 мм, а у сложнолегированных сталей 40XHM и 38XH3MA – 100 мм. Этого достаточно для термического улучшения деталей широкой номенклатуры, а для ряда осесимметричных деталей не требуется сквозная прокаливаемость. Например, конструкционная прочность валов обеспечивается, когда структура сорбита отпуска образуется в слое толщиной, равной половине радиуса вала. Недостатком ряда улучшаемых сталей является чувствительность к обратной отпускной хрупкости. К ней наиболее склонны хромомарганцевые и хромоникелевые стали с большой прокаливаемостью. Для предотвращения охрупчивания деталей из этих сталей при высоком отпуске принимают технологические меры. Улучшаемые стали, содержащие молибден, нечувствительны к отпускной хрупкости. После термического улучшения  $\sigma_{-1}$  не превышает 550 МПа. В результате расчета долговечности деталей по этим значениям  $\sigma_{-1}$ , получают большие размеры деталей, что неприемлемо из-за увеличения расхода металла и габаритных размеров механизмов. При расчете ограниченной долговечности деталей исходят из переменных напряжений, больших  $\sigma_{-1}$ . Это основано на живучести сталей после термического улучшения, когда главное значение имеют малые скорости распространения усталостных трещин. Проверка деталей средствами неразрушающего контроля позволяет обнаруживать усталостные трещины и заменять дефектные детали.

### 8.3 Пружинные стали

К механическим свойствам пружинных сталей предъявляют те же требования, что и к механическим свойствам конструкционных сталей – высокие прочность и сопротивление разрушению. Кроме того, они должны обладать сопротивлением малым остаточным деформациям в условиях кратковременного и длительного нагружения, которое характеризуется в первом случае пределом упругости, а во втором – релаксационной стойкостью. Эти последние свойства зависят от состава и структуры стали, а также от воздействия внешней среды – температуры, коррозионной активности и др. При выборе состава пружинных сталей и режимов их упрочняющей обработки (деформационной, термической и термомеханической) основное внимание уделяют получению максимального сопротивления малым пластическим деформациям (предел упругости). Это достигается в том случае, если в стали при этих видах обработки реализуются несколько одновременно действующих механизмов упрочнения на основе структурных и (или) фазовых превращений.

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

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

2 Стали, упрочняемые закалкой. К этой группе относятся в первую очередь углеродистые и легированные стали перлитного класса с  $C = 0,4 \div 1,0$  %, после закалки

которых обычно проводят среднетемпературный отпуск (30-450 °С), который обеспечивает максимальный уровень предела упругости при повышенных пределе выносливости и сопротивлении разрушению.

По назначению пружинные стали разделяют на два класса – стали общего и специального (или функционального назначения).

Высокими свойствами также характеризуются хромованадиевые стали – 50ХФА и 50ХГФА. В частности, применение для закалки стали электронагрева путем пропускания электрического тока, позволившего повысить скорость нагрева до 5000 °С/с, повышает предел упругости стали 60С2А до 1930 МПа (860 НВ), а после нагрева со скоростью 5-10 °С/с (что соответствует нагреву в печи) он составляет 1600 МПа (700 НВ). После скоростной закалки и скоростного отпуска (нагрев со скоростью 5000 °С/с) при 400 °С у стали 60С2А предел упругости  $a_{0,005} = 2030$  МПа, а  $\sigma_{-1} = 1370$  МПа. После нагрева с обычной скоростью при закалке и отпуске при 400 °С, предел упругости при остаточной деформации 0,005 %  $\sigma_{0,005} = 1530$  МПа и  $\sigma_{-1} = 1180$  МПа.

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

#### **8.4 Конструкционные стали высокой обрабатываемости резанием**

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

В зависимости от вида обработки автоматные стали подразделяют на горячекатаные, калиброванные, прокат круглого сечения со специальной отделкой поверхности или с обточенной поверхностью. В зависимости от назначения производят горячекатаные стали для последующей горячей обработки давлением, для обработки резанием, для волочения (подкат).

Эти стали производятся без термической обработки, термически обработанными (Т), нагартованными (Н).

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

Относительно небольшие добавки серы, свинца и кальция мало изменяют механические свойства автоматных сталей по сравнению со свойствами аналогичных, не содержащих этих добавок сталей. Углеродистые сернистые автоматные стали не используют для деталей, испытывающих значительные контактные нагрузки. В свинецсодержащих сталях из-за включений мягкого свинца рекомендуется ограничивать контактные напряжения до 1700 МПа. Кальцийсодержащие стали наиболее пригодны для нагруженных зубчатых колес и деталей, где сопротивление контактной усталости определяет эксплуатационную надежность.

Недостатком автоматных сталей является анизотропия механических свойств вследствие вытянутых по направлению прокатки включений. Анизотропия наиболее сильно проявляется в углеродистых сернистых сталях и в меньшей степени – в свинецсодержащих сталях с добавками серы. В поперечном направлении по отношению к направлению прокатки у этих сталей понижены  $\delta$  и КСЧ.

Углеродистые сернистые стали А11, А20 применяют для изготовления мелких малонагруженных деталей, где требуются высокая точность размеров и малая шероховатость поверхности. Кроме крепежных деталей из этих сталей изготавливают детали сложной формы. Стали А30 и А40Г используют для деталей, рассчитанных на более высокие нагрузки. Детали из автоматных сталей при необходимости подвергают различным видам термической обработки: нормализации, закалке и отпуску, индукционной закалке и т. п.

## **8.5 Строительные стали**

### **8.5.1 Свойства, разновидности и область применения**

Строительная сталь должна обладать высокими прочностью, свариваемостью, сопротивлением хрупкому разрушению, сопротивлением вязкому разрушению. Конструкции из нее должны обладать высокой прочностью.

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

Повышение содержания углерода и легирующих элементов увеличивает опасность появления в околошовной зоне закалочных микроструктур, хрупких холодных трещин и трещин задержанного хрупкого разрушения. Влияние содержания углерода, легирующих элементов и примесей характеризуется углеродным эквивалентом СЕ, который определяют по формуле:

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

где символы элементов выражают массовые доли этих элементов в %.

При  $CE = 0,35$  сварка не вызывает затруднений, а при  $CE = 0,35 \div 0,60$  сварка должна проводиться с соблюдением мер предосторожности. При  $CE > 0,60$  вероятность образования трещин возрастает и необходимы специальные меры предосторожности. Чем больше легирующих элементов содержит строительная сталь, тем выше класс прочности и больше СЕ. По ГОСТ 27772-88 по требованию потребителя

для сталей класса прочности 390 необходимо, чтобы  $SE \leq 0,49$ , а для класса прочности 440 -  $SE \leq 0,51$ .

От качества строительной стали зависит вероятность образования при сварке горячих (кристаллизационных) трещин в металле шва. На образование кристаллизационных трещин во многом влияют химический состав основного металла и его доля в металле шва. У проката с ликвацией, например из кипящей стали, появление кристаллизационных трещин наиболее вероятно.

Образованию слоистых трещин способствует наличие в основном металле неметаллических включений, особенно сульфидов в форме вытянутых частиц или строчечных скоплений. При сварке термически или термомеханически упрочненной стали наблюдаются локальные разупрочнения зоны термического влияния. Они характеризуются изменением твердости, которое обычно составляет 10-30 % от исходной твердости основного металла.

### **8.5.2 Низколегированные стали повышенной прочности**

Легированные стали с содержанием легирующих элементов не более 2-3 %, и с низким содержанием углерода, используемые для сварных металлоконструкций. Прокат из низколегированных сталей для строительных конструкций поставляют по ГОСТ 19281-89, ГОСТ 6713-91, ГОСТ 27772-88 и ТУ. В ГОСТ 27772-88 приведены такие стали, в обозначениях марок которых буква означает назначение стали или принадлежность ее к стандартной системе, цифры – предел текучести (нижний гарантированный или средний, МПа). Например, С345, С375, где С – строительная сталь, 345, 375 –  $\sigma_T$ , МПа. Высокий уровень легирования сдерживается ухудшением свариваемости, снижением сопротивления хрупкому разрушению и экономической эффективности.

Для унификации сокращено число марок низколегированных строительных сталей. Основным материалом для всех металлоконструкций массового применения является сталь 09Г2С, так как она обладает оптимальным сочетанием свариваемости, хладостойкости и технико-экономической эффективности. Ее недостаток: существенное снижение предела текучести и временного сопротивления с увеличением толщины проката. Его компенсируют корректировкой химического состава, небольшим увеличением содержания углерода, и сталь обозначают 12Г2С. В ГОСТ 27772-88 предусмотрены две марки (С345, С375) низколегированной стали повышенной прочности с химическим составом, соответствующим маркам 09Г2С и 12Г2С. Механические свойства сталей С345 и С375. Сталь изготавливают четырех категорий в зависимости от требований к ударной вязкости КСУ.

Для 1-й категории нормируется вязкость при  $-40\text{ }^\circ\text{C}$ , для 2-й категории – при  $-70\text{ }^\circ\text{C}$ , для 3-й категории при  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  и при  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  после механического старения, для 4-й категории – при  $-70\text{ }^\circ\text{C}$  и при  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  после механического старения.

Для конструкций авто- и железнодорожных мостов применяют низколегированные стали 15ХСНД и 10ХСНД по ГОСТ 6713-91 с повышенным сопротивлением атмосферной коррозии.

В зависимости от хладостойкости эти стали разделяют на три категории. Для стали 1-й категории гарантируется ударная вязкость при  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  и при  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  после механического старения, для 2-й категории – при  $-60\text{ }^\circ\text{C}$  и при  $+20\text{ }^\circ\text{C}$  после механического старения, для 3-й категории – при  $-70\text{ }^\circ\text{C}$  и при  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  после механического старения.

Прокат из низколегированной стали повышенной прочности поставляют после горячей прокатки. Он имеет ферритно-перлитную структуру, но возможна также поставка части листового проката после термической обработки – нормализации или термического улучшения.

### **8.5.3 Стали повышенной прочности с карбонитридным упрочнением**

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

Для этого используют карбонитриды ванадия и нитриды алюминия. Небольшие добавки ванадия, алюминия и азота (в сумме массовая доля не превышает 0,2 %) вводят в низколегированную сталь типа 14Г2. Готовый прокат подвергают нормализации с нагревом до 890-950 °С, в результате чего в стали формируются дисперсные частицы карбонитридов диаметром 10-100 мкм. Это позволяет получать сталь с  $\sigma_T = 400 \div 500$  МПа и низкой температурой хрупкости. Стали С390 и С440 поставляют в листах толщиной 4-50 мм, С390К – в листах толщиной 4-30 мм. Химический состав и механические свойства сталей С390, С390К и С440 те же, что и указанные в ГОСТ 19282-89 соответственно для сталей 9-й категории 14Г2АФ, 15Г2АФДпс и 16Г2АФ.

Сталь с карбонитридным упрочнением пригодна для всех видов холодной формовки, а также горячей гибки, вальцовки, штамповки. В последнем случае температуру нагрева и скорость охлаждения при горячем деформировании целесообразно выбирать по возможности близкими к этим параметрам при нормализации. Это позволит избежать заключительной термической обработки. Увеличение температуры нагрева или скорости охлаждения повышает прочность, но снижает пластичность, вязкость и хладостойкость вследствие образования неблагоприятной микроструктуры. Изменения температуры ниже точки  $A_1$ , включая кратковременные нагревы до 700 °С, дополнительный отпуск при 550-650 °С в течение 3-5 ч, выдержку до 1000 ч при 400-500 °С, мало влияют на механические свойства стали.

### **8.5.4 Закаленно-отпущенные экономнолегированные стали повышенной прочности**

Более высокую прочность при сохранении необходимого уровня свариваемости и хладостойкости можно достичь, подвергая сталь закалке и отпуску. Но значительная прочность достигается у сталей с карбонитридным упрочнением.

Для сварных строительных конструкций применяют высокопрочные закаленно-отпущенные стали 12Г2СМФ, 12ГН2МФАЮ, 14Х2ГМР и 12ГН2МФБАЮ.

Сталь 12Г2СМФ (С590) для конструкций, эксплуатируемых в обычных условиях при температуре до -40 °С, стали 12ГН2МФАЮ (С590К) и 12ХГН2МФБАЮ благодаря повышенной хладостойкости – для наиболее ответственных конструкций, в том числе эксплуатируемых при динамическом нагружении и расчетной температуре ниже -40 °С. Повышенную хладостойкость эти стали сохраняют и в околошовной зоне сварных соединений. Оптимальные свойства в околошовной зоне достигаются при сварке на тепловых режимах, которым соответствует скорость охлаждения 7-30 °С/с при  $T = 600$  °С.



Закаленно-отпущенная высокопрочная сталь поставляется только в виде листов толщиной 10-50 мм (табл. 7.9). У листов из сталей 12Г2СМФ и 12ГН2МФАЮ максимальная толщина не должна превышать 40 мм для достижения сквозной прокаливаемости. Остальные ограничения толщины обусловлены техническими возможностями термического оборудования.

Для сварки никелевых сталей используют способы, режимы и сварочные материалы, позволяющие получить хладостойкость соединений на уровне хладостойкости основного металла.

### **Контрольные вопросы**

- 1) Приведите классификацию конструкционных сталей.
- 2) Область применения цементуемых и улучшаемых сталей.
- 3) Опешите область применение автоматных сталей.
- 4) Область применения сталей повышенной прочности.

## **9 Инструментальные стали и сплавы**

### **9.1 Классификация инструментальных сталей и сплавов и технические требования к ним**

Инструментальные стали разнообразны по химическому составу, структуре и свойствам после термической или специально упрочняющей обработок.

Эти стали обычно квалифицируют на три группы:

- нелегированные;
- легированные;
- быстрорежущие.

Технические требования для каждой группы определяются конкретными условиями эксплуатации инструмента. К основным условиям относятся высокое давление на поверхности инструмента и разогрев его поверхностей.

Требуемый уровень основных и технологических свойств инструментальной стали должен обеспечивать необходимые конструктивную прочность (надежность) и эксплуатационную стойкость (износостойкость, живучесть) инструментов, а также наименьшую трудоемкость их изготовления. Все это определяется ее химическим составом, технологией изготовления и термической обработкой. Кроме перечисленных к инструментальным сталям предъявляются определенные требования по твердости, прочности, ударной вязкости, теплостойкости (красностойкости), износостойкости, прокаливаемости, обрабатываемости резанием и давлением, шлифуемости, обезуглероживанию и окислению при их нагреве без применения защитных сред, деформируемости при термической обработке, закаливаемости, чувствительности к перегреву.

Свойства и марки нелегированных инструментальных сталей (ГОСТ 1435-90) были рассмотрены выше.

## 9.2 Легированные инструментальные стали (ГОСТ-59-2000)

Легированные инструментальные стали разделяют на две группы. К группе I относятся следующие марки:

13X – для бритвенных ножей и лезвий, острого хирургического инструмента, шаберов, гравировального инструмента;

8XФ – для штемпелей при холодной работе; ножей при холодной резке металла; обрезных матриц и пуансонов при холодной обрезке заусенцев; кернеров;

9XФ – для рамных, ленточных, круглых строгальных пил; штемпелей при холодной работе; ножей при холодной резке металла; обрезных матриц и пуансонов при холодной обрезке заусенцев; кернеров;

11XФ – для метчиков и другого режущего инструмента диаметром до 30 мм, закаливаемого с охлаждением в горячих средах;

X – для зубил, применяемых при насечке напильников; очень твердых кулачков эксцентриков и пальцев; гладких цилиндрических калибров и калиберных колец; токарных, строгальных и долбежных резцов в лекальных и ремонтных мастерских;

9X1 – для валков холодной прокатки, дрессировочных валков, клейм, пробойников; холодновысадочных матриц и пуансонов; деревообрабатывающих инструментов;

12X1 – для измерительного инструмента (плиток, калибров, шаблонов);

6XC – для пневматических зубил и штампов небольших размеров для холодной штамповки; рубильных ножей;

9Г2Ф – для режущего и штамповочного инструмента (плашек, метчиков, ножей для ножниц, измерительного инструмента, штампов для прессования резины и пластмасс);

9XBГ – для резьбовых калибров, лекал сложной формы, сложных высокоточных штампов для холодных работ, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению;

6XBГ – для пуансонов сложной формы при холодной прошивке преимущественно фигурных отверстий в листовом и полосовом материале; небольших штампов для горячей штамповки, главным образом, когда требуется минимальное изменение размеров при закалке;

9XC – для сверл, разверток, метчиков, плашек, гребенок, фрез, машинных штемпелей, клейм для холодных работ;

B2Ф – для ленточных пил по металлу и ножовочных полотен;

XГC – для валков холодной прокатки, холодновысадочных матриц и пуансонов, вырубных штампов небольших размеров (диаметром или толщиной до 70 мм); сталь марки XГC не может заменить сталь марок XBГ, 9XC, XBСГФ при изготовлении режущих инструментов;

4XC – для зубил, обжимок, ножниц при холодной и горячей резке металла, штампов горячей вытяжки;

XBСГФ – для круглых плашек, разверток и другого режущего инструмента;

XBГ – для измерительных и режущих инструментов, для которых повышенное коробление при закалке недопустимо; резьбовых калибров, протяжек, длинных метчиков, длинных разверток, плашек и другого специального инструмента, холодновысадочных матриц и пуансонов, технологической оснастки;

6XB2C, 5XB2CФ – для ножей при холодной резке металла, для резбонакатных плашек, пуансонов и обжимных матриц при холодной работе, деревообделочных инструментов при длительной работе;

6Х3МФС – для пуансонов, работающих с повышенными динамическими нагрузками, для холодновысадочных штампов, штемпелей, клейм, чеканочных штампов и некоторых слесарно-монтажных инструментов (взамен марок 7Х3 и 6ХВ2С);

7ХГ2ВМФ – для штампов холодного объемного деформирования и вырубного инструмента сложной конфигурации, используемых при производстве изделий из цветных сплавов и низкопрочных конструкционных сталей;

9Х5ВФ, 8Х6НФТ – для ножей, применяемых при фрезеровании древесины, строгальных пил и других деревообрабатывающих инструментов подобного типа (например цельных фрез);

6Х4М2ФС – для вырубного и высадочного инструмента (штампов, пуансонов, пневматических зубил и др.), накатного инструмента;

Х6ВФ – для резьбонакатного инструмента (роликов и плашек), ручных ножовочных полотен, бритв, матриц, пуансонов, зубонакатников и других инструментов, предназначенных для холодной деформации; для дереворежущего фрезерного инструмента;

8Х4В2МФС2 – для матриц и пуансонов штампов холодного объемного деформирования, испытывающих в процессе эксплуатации давление до 2300 МПа; резьбонакатных роликов;

11Х4В2МФ3С2 – для вырубных штампов, в том числе для обработки холоднокатаных электротехнических сталей марок Э412 и Э413 с покрытиями типа «Карлит», пуансонов и матриц холодновысадочных автоматов, пуансонов и выталкивателей для холодного выдавливания, эксплуатируемых с удельными давлениями до 2000 МПа в условиях повышенного изнашивания и нагрева рабочих поверхностей до 400 °С; шлице- и резьбонакатного инструмента;

6Х6В3МФС – для резьбонакатных роликов, зубонакатников, шлиценакатников, обрезных матриц, пуансонов и других инструментов, предназначенных для холодной пластической деформации металлов повышенной твердости; ножей труборазрубочных машин, ножей гильотинных ножниц для резки высокопрочных сталей и сплавов, рубильных ножей, применяемых в деревообрабатывающей промышленности; шарошек для разрушения горных пород и других аналогичных инструментов;

Х12, Х12ВМФ – для холодных штампов высокой устойчивости против истирания (преимущественно с рабочей частью округлой формы), не подвергающихся сильным ударам и толчкам; для волочильных досок и волок, глазков для калибрования пруткового металла под накатку резьбы, гибочных и формовочных штампов, сложных секций кузовных штампов, которые при закалке не должны подвергаться значительным объемным изменениям и короблению; матриц и пуансонов вырубных и просечных штампов; штамповки активной части электрических машин и электромагнитных систем электрических аппаратов;

Х12МФ, Х12Ф1 – то же, что и для марки Х12, но при необходимости наличия большой вязкости; для профилировочных роликов сложных форм; секций кузовных штампов сложных форм; сложных дыропрошивочных матриц при формовке листового металла, эталонных шестерен, накатных плашек, волок и вырубных пуансонов, просечных штампов (в том числе совмещенных и последовательных) со сложной конфигурацией рабочих частей; штамповки активной части электрических машин.

К группе II относятся марки:

5ХНМ – для молотовых штампов паровоздушных и пневматических молотов массой падающих частей свыше 3 т; прессовых штампов и штампов машинной скоро-

стной штамповки при горячем деформировании легких цветных сплавов; блоков матриц для вставок горизонтальных машин;

5ХНВ, 5ХНВС – для молотовых штампов паровоздушных и пневматических молотов массой падающих частей до 3 т;

7ХЗ, 8ХЗ – для инструмента (пуансонов, матриц) горячей высадки крепежа и заготовок из углеродистых и низколегированных конструкционных сталей на горизонтально-ковочных машинах; деталей штампов (матриц, пуансонов, выталкивателей) для горячего прессования и выдавливания этих материалов на кривошипных прессах при мелкосерийном производстве; гибочных, обрезных и просечных штампов;

4ХМФС – для молотовых штампов паровоздушных и пневматических молотов массой падающих частей до 3 т при деформации легированных конструкционных и коррозионно-стойких сталей (вместо менее теплостойких сталей марок 5ХНМ, 5ХНВ); прессового инструмента для обработки алюминиевых сплавов;

5Х2МНФ – для цельных крупногабаритных штампов (со стороной квадрата или диаметром до 600 мм); для штамповки поковок из конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах и кривошипных прессах (вместо менее теплостойких сталей марок 5ХНМ, 4ХМФС); инструментов (зажимных и формирующих вставок, наборных и формовочных пуансонов) для высадки конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ); ножей горячей резки;

4Х3ВМФ – для мелких молотовых штампов, молотовых и прессовых вставок (толщиной или диаметром от 300 до 400 мм); инструмента горизонтально-ковочных машин при горячем деформировании конструкционных сталей и жаропрочных сплавов; инструмента для высокоскоростной машинной штамповки конструкционных сталей;

3Х3МЗФ – для инструмента горячего деформирования на кривошипных прессах и горизонтально-ковочных машинах, подвергающихся в процессе работы интенсивному охлаждению (как правило, мелкого инструмента); пресс-форм литья под давлением медных сплавов;

4Х5МФС – для мелких молотовых штампов; крупных (толщиной или диаметром более 200 мм) молотовых и прессовых вставок при горячем деформировании конструкционных сталей и цветных сплавов в условиях крупносерийного массового производства;

4Х4ВМФС – для инструмента высокоскоростной машинной штамповки, высадки на горизонтально-ковочных машинах; вставок штампов для горячего деформирования легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов на молотах и кривошипных прессах (вместо менее теплостойких сталей марок 4Х5В2ФС, 4Х5МФ1С, 4Х3ВМФ); пресс-форм литья под давлением медных сплавов;

4Х5МФ1С, 4Х5В2ФС – для пресс-форм литья под давлением цинковых, алюминиевых и магниевых сплавов; молотовых и прессовых вставок (толщиной или диаметром от 200 до 250 мм) при горячем деформировании конструкционных сталей; инструмента для высадки заготовок из легированных конструкционных и жаропрочных материалов на горизонтально-ковочных машинах;

4Х2В5МФ – для тяжело нагруженного прессового инструмента (мелких вставок окончательного штампового ручья, мелких вставных знаков, матриц и пуансонов для выдавливания и т. п.) при горячем деформировании легированных конструкционных сталей и жаропрочных сплавов;

5Х3В3МФС – для тяжело нагруженного прессового инструмента (прошивных и формирующих пуансонов, матриц и т. п.); инструмента для высадки на горизонтально-

ковочных машинах и вставок штампов напряженных конструкций; для горячего объемного деформирования конструкционных сталей и жаропрочных сплавов (вместо менее теплостойких сталей марок 3Х2В8Ф и 4Х2В5МФ); наиболее высокие прокаливаемость и теплостойкость имеет сталь марки 5Х3В3МФС;

05Х12Н6Д2МФСГТ – для инструмента формообразующих деталей пресс-форм формования резинотехнических и пластмассовых изделий.

Для получения необходимой твердости следует учесть, что каждая из перечисленных инструментальных легированных сталей имеет оптимальную температуру закалки и охлаждающую среду (таблица 14.1).

### 9.3 Быстрорежущие стали

Инструментальные быстрорежущие стали получили такое название потому, что в период их внедрения они работали на значительно больших скоростях резания, не утрачивая своих свойств, чем инструментальные углеродистые и легированные стали. С повышением скорости резания повышается температура нагрева режущей части инструмента. Углеродистые, а также большинство легированных инструментальных сталей при температурах 250-300 °С теряют свою твердость вследствие изменения структуры, поэтому не могут использоваться в качестве инструмента, работающего при больших скоростях резания.

Замечательное свойство быстрорежущих сталей – высокая красностойкость, т. е. способность сохранять высокую твердость и режущую способность при нагреве до 600-630 °С. Это свойство выделяет быстрорежущие стали из числа всех других инструментальных сталей. Красностойкость определяется в основном двумя факторами: химическим составом и термической обработкой. Быстрорежущие стали имеют сложный химический состав. Наиболее важным легирующим элементом их является вольфрам (6-18 %). Они содержат также ванадий (1-5 %). Вольфрам и ванадий почти целиком находятся в виде карбидов, которые, растворяясь в кристаллической решетке железа, обеспечивают красностойкость сталей. Во все быстрорежущие стали входит хром (3-4,5 %), большая часть которого растворяется в кристаллической решетке железа. Содержащиеся в быстрорежущих сталях легирующие элементы уменьшают критическую скорость закалки, в результате чего стали становятся самозакалывающимися – они закалываются даже при охлаждении на воздухе. Некоторые быстрорежущие стали содержат кобальт, который повышает их красностойкость, так как препятствует разрастанию карбидов при нагреве. Однако с увеличением содержания кобальта и ванадия шлифуемость сталей ухудшается, повышается их чувствительность к обезуглероживанию. Для того чтобы придать быстрорежущим сталям высокие режущие свойства, их подвергают термической обработке по специальному режиму, который отличается от термической обработки других инструментальных сталей (см. гл. «Основы термической обработки»).

Для быстрорежущих сталей принят следующий принцип маркировки: в начале марки стоит буква Р, следующая за ней цифра указывает среднюю массовую долю вольфрама в процентах, массовую долю ванадия (в процентах) показывает цифра, стоящая за буквой Ф, молибдена – цифра за буквой М, кобальта – цифра за буквой К. Массовую долю хрома в марке не указывают, так как она примерно одинакова у сталей всех марок. Если массовая доля ванадия менее 2 %, ее также не указывают. Быстрорежущие стали имеют в своем составе массовую долю углерода от 0,7 до 1,20 %

(тем выше, чем больше содержится ванадия). Например, в стали марки P18K5Ф2 содержится в массовых долях 18 % вольфрама, 5 % кобальта, 2 % ванадия.

ГОСТ 19265-73 регламентирует быстрорежущие стали, которые условно можно разделить на две группы: первая группа – стали, не содержащие кобальта, вторая группа – стали, содержащие повышенное количество кобальта и ванадия. Согласно стандарту быстрорежущие стали подразделяют на горячекатаную кованую, калиброванную и серебрянку. Нормы на химический состав распространяются на лист, ленту, поковки, штамповки и другую продукцию. ГОСТ 19265-73 нормирует также твердость, макроструктуру, карбидную неоднородность, глубину обезуглероженного слоя и другие параметры сталей. Далее приведены марки быстрорежущих сталей, их краткие характеристики и области применения:

P18 – хорошая вязкость и шлифуемость, хорошее сопротивление изнашиванию, широкий интервал оптимальных закалочных температур, красностойкость 620 °С; предназначена для изготовления всех видов режущего инструмента, используемого при обработке конструкционных материалов;  $T_{зак} = 1270 \div 1290$  °С,  $T_{отп} = 560 \div 570$  °С, 64-65 HRC<sub>э</sub>,  $\sigma_{изг} = 2600 \div 3000$  МПа, красностойкость (59 HRC<sub>э</sub>) 620 °С;

P6M5 – повышенная вязкость, значительная склонность к обезуглероживанию, более узкий интервал оптимальных закалочных температур, чем у стали марки P18, хорошо шлифуется и сопротивляется изнашиванию; назначение и красностойкость такие же, как и стали марки P18, однако сталь P6M5 предпочтительнее использовать для изготовления резбонарезного инструмента, работающего с ударными нагрузками;  $T_{зак} = 1200 \div 1230$  °С,  $T_{отп} = 540 \div 560$  °С, 65-66 HRC<sub>э</sub>,  $\sigma_{изг} = 3200 \div 3600$  МПа, красностойкость та же;

P18K5Ф2, P9M4K8, P6M5K5 – вязкость пониженная, у стали марки P6M5K5 хорошая; сопротивление изнашиванию повышенное; шлифуемость хорошая, у стали марки P9M4K8 пониженная; красностойкость 630 °С; повышенная склонность к обезуглероживанию; изготавливаемый из этих сталей инструмент применяют для обработки высокопрочных, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов в условиях повышенного нагрева режущей кромки;

Стоимость быстрорежущих сталей примерно в пять раз выше стоимости других легированных инструментальных сталей, поэтому ее следует применять в конкретных условиях, повышающих производительность труда или требующих определенной стойкости инструмента.

Структура и свойства быстрорежущих сталей повышенной красностойкости резко улучшаются при изготовлении их методом порошковой металлургии. Этот метод обеспечивает равномерное распределение дисперсных (диаметром не более 1,0 мкм) эвтектических карбидов по сечению заготовки любого размера и улучшает за счет этого шлифуемость стали. Порошковые быстрорежущие стали отличаются от аналогичных по химическому составу сталей, изготовленных по традиционной технологии, повышенными массовыми долями углерода и ванадия и более высокой объемной долей дисперсных высокотвердых карбидов типа MC в структуре. Благодаря этому порошковые быстрорежущие стали после термической обработки по оптимальным режимам приобретают повышенные значения вторичной твердости (на 1-3 HRC<sub>э</sub>). Их применяют при изготовлении тяжелонагруженных и высокопроизводительных режущих инструментов. Например, сталь P7M2Ф6-МП с наиболее высокими массовыми долями углерода и ванадия изготавливают только методом порошковой металлургии. Ее применяют взамен кобальтосодержащих сталей на чистовых операциях резания жаропрочных и коррозионностойких сталей и сплавов.

## 9.4 Твёрдые сплавы

В инструментальном производстве широкое распространение получили твердые спеченные сплавы (ГОСТ 3882-74). Они состоят из смеси порошков карбида вольфрама (основа) с массовой долей 66-97 % и кобальта (3-25 %). В зависимости от марки сплава в него добавляют такие компоненты, как карбид титана с массовой долей 3-30 % и карбид тантала (2-12 %). Физико-механические свойства сплавов:  $\sigma_{изг} = 1176 \div 2156$  МПа ( $120-220$  кгс/мм<sup>2</sup>), плотность  $\gamma = 9,6 \div 15,3$  г/см<sup>3</sup>, твердость 79-92 HRA. По массовой доле компонентов порошков в смеси твердые спеченные сплавы подразделяют на три группы: вольфрамовые, титановольфрамовые и титанотанталовольфрамовые; по области применения – на сплавы для обработки материалов резанием, для оснащения горного инструмента, для бесстружковой обработки металлов, для деталей и наплавки быстро изнашивающихся деталей машин, приборов и приспособлений.

Марки сплавов для обработки материалов резанием. ВКЗ – чистовое точение с малым сечением среза, окончательное нарезание резьбы, развертывание отверстий и других аналогичных видов обработки серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов (резины, фибры, пластмассы, стекла, стеклопластиков и т. д.); резка листового стекла.

## 9.5 Сверхтвёрдые материалы

ГОСТ 25003-81 регламентирует многогранные сменные керамические пластины марок ВОК-60, ВОК-71 и В-3. Пластины имеют различные конфигурацию, размеры и массу, а также буквенные и цифровые обозначения.

Основной частью минералокерамических материалов является оксид алюминия с добавкой вольфрама, титана, тантала и кобальта. Керамика отличается высокой, теплостойкостью (1200 °С) и износостойкостью. При чистовом обтачивании чугуна скорость резания доходит до 3700 м/мин, что в два раза выше, чем у твердых сплавов.

Введение в состав минералокерамики металлов или карбидов металлов улучшает ее физико-механические свойства при уменьшении хрупкости.

### Контрольные вопросы

- 1) Как классифицируются инструментальные стали?
- 2) Область применения инструментальных сталей.
- 3) Какие основные легирующие элементы используются в инструментальных сталях?
- 4) Какая структура обеспечивает максимальную твердость и износостойкость инструментальных сталей и сплавов?
- 5) Какие стали являются быстрорежущими и где они применяются?
- 6) Какие неметаллические материалы являются сверхтвердыми?

## 10 Чугуны

### 10.1 Характерные особенности чугунов

Чугун – самый распространенный железоуглеродистый литейный материал, содержащий свыше 2 % углерода, до 4,5 % кремния, до 1,5 % марганца, до 1,8 % фосфора и до 0,08 % серы. Чугун обладает высокими литейными свойствами, поэтому широко используется в литейном производстве в качестве конструкционного материала. Он хорошо обрабатывается резанием. Из чугуна, имеющего невысокий коэффициент трения, изготавливают подшипники скольжения. Высокопрочный чугун по показателям качества успешно конкурирует со стальным литьем и ковальной сталью.

В машиностроении 77 % отливок изготавливают из чугуна, 21 % – из стали и 2 % – из цветных металлов. 80 % выплавляемого чугуна идет для передела в сталь.

Недостаточная прочность и большая хрупкость чугуна объясняются наличием в нем крупных включений углерода в виде графита. Попытки размельчить его и распределить равномерно по всему объему металла долгое время не давали положительных результатов. Тогда в чугун добавили немного ферросилиция (сплав железа с кремнием) и получили размельченный графит. Прочность чугуна увеличилась, даже стала близка к малоуглеродистым сталям обыкновенного качества, но хрупкость осталась та же. Высокопрочный чугун по своему качеству не уступает конструкционным углеродистым сталям. Увеличить прочность чугуна, придать ему специальные свойства можно за счет введения в него легирующих элементов и термической обработки.

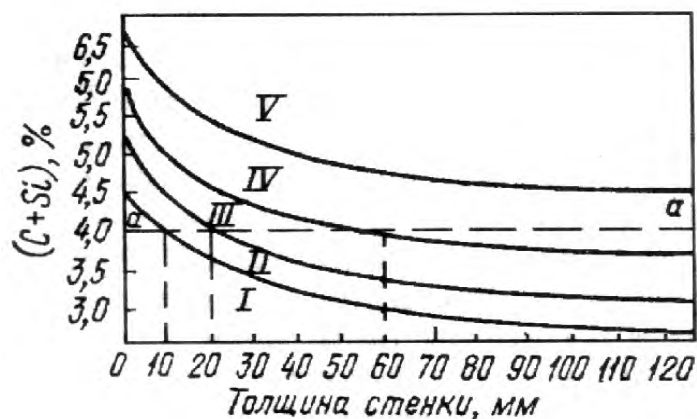
Углерод в чугунах может находиться в виде химического соединения – цементита (белые чугуны) или в свободном состоянии в виде графита – частично или полностью (серые). Получение того или иного вида чугуна зависит в основном от его химического состава и скорости охлаждения. Элементы: кремний, титан, никель, медь и алюминий, способствующие выделению графита, называют графитизирующими. Элементы: марганец, молибден, сера, хром, ванадий, вольфрам, углерод входит в химическое соединение с железом, образуя цементит ( $Fe_3C$ ) - антиграфитизирующие, или тормозящими графитизацию.

При одном и том же химическом составе структура чугуна может быть различной в зависимости от толщины отливки (рисунки 10.1).

Чтобы обеспечить необходимую структуру отливок разной толщины, надо знать их химический состав. Для определения химического состава отливок опытным путем строят структурные диаграммы. Например: отливка имеет химический состав  $C + Si = 4\%$ . При таком составе в отливке толщиной до 10 мм получится белый чугун, толщиной до 20 мм – половинчатый, толщиной до 60 мм – серый перлитный и толщиной свыше 60 мм – серый ферритно-перлитный. При толщине отливки свыше 120 мм и указанном химическом составе чугун будет серый ферритный. Наибольшее влияние на структуру чугуна оказывает кремний.

В серые чугуны его вводят в повышенных количествах (до 3,5 %), так как способствует получению графита. Марганец образует с углеродом прочное химическое соединение, поэтому его содержание в серых чугунах ограничивается (до 1 %). Соединяясь с серой в  $MnS$ , он уменьшает ее отбеливающее действие. Сера - вредная примесь чугуна, поскольку ухудшает его литейные и механические свойства. Содержание ее в чугуне не должно превышать 0,1%. Фосфор повышает жидкотекучесть и твердость отливок. В чугуне может содержаться до 0,4 % фосфора.





I – белый; II – половинчатый; III – серый перлитный; IV – серый ферритно-перлитный; V – серый ферритный

Рисунок 10.1 - Зависимость структуры чугуна от толщины стенки отливки и количества углерода с кремнием

Большое влияние на структуру чугуна оказывают условия затвердевания и охлаждения отливок. Быстрое охлаждение способствует получению белого чугуна, медленное – серого. Скорость охлаждения зависит от применяемой литейной формы (песчаная или металлическая), а также от толщины стенки отливки. В машиностроении используют отливки из серого, высокопрочного, с вермикулярным графитом и ковкого чугунов. Эти чугуны, как и сталь, состоят из металлической основы (перлита, феррита) и неметаллических включений графита. Они различаются главным образом формой графитовых включений. Чугун – наиболее дешевый конструкционный материал.

## 10.2 Классификация чугунов

Чугун самый распространенный литейный материал: примерно 75% отливок получают из чугунов, которые классифицируют следующим образом.

1. По форме углерода, обуславливающего вид излома.

1.1. Серый чугун с пластинчатым графитом (СЧПГ) – графит находится в основном в свободном состоянии.

1.2. Белый чугун (БЧ) – чугун, в котором весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита, имеет матово-белый излом. БЧ обладает высокой твердостью, хрупкостью, практически не поддается обработке режущим инструментом. Широко применяется для изготовления деталей дробильного оборудования (брони шаровых мельниц, мелющие шары), лопастей шнеков.

1.3. Отбеленный чугун (половинчатый) – внешняя часть состоит из БЧ, а внутренняя из СЧ.

1.4. Ковкий чугун (КЧ) – чугун с хлопьевидным графитом, получается в результате отжига белого чугуна. Обладает высокой прочностью и пластичностью. Изготавливают детали, работающие при ударных и вибрационных нагрузках.

1.5. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) используется для деталей ответственного назначения, работающих при высоких статических, ударных и циклических нагрузках под воздействием агрессивных сред. Получение шаровидного графита достигается введением в расплав сфероидизирующих модификаторов.

1.6. Чугун с вермикулярным (червеобразным) графитом (ЧВГ). Занимает промежуточное положение между чугунами с пластинчатым и шаровидным графитом, сочетает хорошие литейные свойства с более высокими, чем у серого чугуна, прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Получают обработкой расплава РЗМ-содержащими лигатурами (Ce, Y).

2. По химическому составу: низко-, средне- и высоколегированные.

3. По назначению в зависимости от условий эксплуатации: износостойкие, коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, ростоустойчивые, антифрикционные, кавитационностойкие, со специальными электрическими свойствами.

Классификация чугунов представлена в таблице 10.1.

Таблица 10.1 - Чугуны со свободным углеродом

Тип чугуна	Графит	Тип металлической матрицы*	Показатели свойств			Способ получения
			литейных	технологических	$\sigma_b$ , МПа	
Серый	Пластинчатый прямолинейный	Ф, Ф + П, П	Высокие	Высокие	150-480	Все виды плавки, модифицирование ферросилицием
	Пластинчатый завихренный					
	Пластинчатый игольчатый					
	Пластинчатый гнездобразный					
С вермикулярным графитом	Вермикулярный извилистый	Ф, П, Ф+ П	Высокие	Высокие или средние	320-500	Модифицирование лигатурами РЗМ
	Вермикулярный утолщенный					
Ковкие или модифицированный	Нитевидный	Ф или П	Пониженные	Высокие или средние	300-370 (ферритный), 450-600 (перлитный)	Графитизирующий отжиг белого чугуна, модифицирование РЗМ
	Хлопьевидный Компактный плотный					
С шаровидным графитом	Шаровидный разорванный	Ф, Ф + П, П	Высокие	Высокие или средние	380-1200	Модифицирование магнием, кальцием, РЗМ
	Шаровидный звездообразный					
	Шаровидный неправильный					
	Шаровидный правильный					

\*Ф – феррит; П – перлит.

### 10.3 Серые чугуны

Такое название он получил по серому цвету излома, который зависит от наличия в структуре чугуна свободного углерода в виде графита. По типу металлической основы различают серые чугуны перлитные, перлитно-ферритные и ферритные (рисунки 10.2).

Графит обладает низкими механическими свойствами. Он нарушает сплошность металлической основы, располагаясь между ее зернами, ослабляя связь между ними.



а – перлитная; б – ферритно-перлитная; в – ферритная  
Рисунок 10.2 - Микроструктура серых чугунов

Поэтому серый чугун плохо сопротивляется растяжению и имеет очень низкие пластичность и вязкость. Чем крупнее и прямолинейнее графитовые включения, тем хуже механические свойства чугуна. Твердость серого чугуна, а также его сопротивление сжатию близки показателям стали, имеющей такую же структуру, как металлическая основа чугуна. Графит оказывает и положительное влияние на свойства чугуна, он повышает его износостойкость, действуя аналогично смазке, облегчает обрабатываемость резанием, так как делает стружку ломкой, способствует гашению вибраций изделий, уменьшает усадку при изготовлении отливок.

Механические свойства серого чугуна можно улучшить, если обеспечить равномерное распределение мелкопластинчатого графита в отливке.

Это достигается модифицированием - в жидкий чугун перед его разливкой в формы вводят небольшое количество силикокальция или ферросилиция. Эти добавки образуют дополнительные центры графитизации, в результате чего получается мелкопластинчатый графит. Чугун с таким графитом называют модифицированным. Он отличается от обычного серого чугуна более высоким сопротивлением разрыву, однако пластичность и вязкость его при модифицировании не улучшаются.

Серые чугуны имеют очень хорошие литейные свойства, хорошо поддаются всем видам механической обработки. Белые чугуны обладают высокой твердостью, плохо обрабатываются, имеют более низкие технологические свойства.

По положению на диаграмме состояния различают чугуны доэвтектические, эвтектические и заэвтектические. Они различаются в основном соотношением в их структуре аустенита и графита (или аустенита и цементита) в области температур выше точки эвтектоидного превращения и феррита и графита (или феррита и цементита) в области температур ниже точки эвтектоидного превращения. Чугуны различаются также содержанием углерода и некоторых других элементов.

По форме включений графита различают чугуны: с пластинчатым, хлопьевидным, вермикулярным и шаровидным графитом.

В ГОСТ 3443-87 приведены 13 различных форм графита – от пластинчатой прямолинейной до шаровидной правильной. Кроме того, в одной отливке часто встречаются участки структуры с различными формами графита.

Размеры включений графита оценивают по их длине или диаметру. Приведены размеры 20 включений графита, а также предусмотрена оценка графита по распределению (девять форм) и количеству.

Роль металлической матрицы усиливается по мере перехода от пластинчатой формы графита к шаровидной. Шаровидный графит в значительно меньшей степени, чем пластинчатый, выполняет функцию концентратора напряжений и тем самым позволяет реализовать свойства матрицы на гораздо более высоком уровне.

По структуре металлической матрицы (ГОСТ 3443-87) различают чугуны: ферритные, с пластинчатым перлитом (Пт1), с зернистым перлитом (Пт2), трооститные, бей-нитные и мартенситные.

Если в чугуне имеется металлическая основа различных типов, следует визуально оценивать долю (%) каждого типа и указывать эти доли при обозначении структуры. Такая оценка обязательна для ферритно-перлитных чугунов, и ГОСТ 3443-87 предусматривает девять баллов для оценки соотношения перлита и феррита в чугуне. Дисперсность перлита оценивается пятью баллами. Предусматривается оценка включений фосфидной эвтектики, цементита, ледебурита и размеров эвтектического зерна.

По химическому составу различают чугуны обычные и легированные. Чугуны низколегированные (до 3 % легирующих элементов), среднелегированные (3-10 %) и высоколегированные (более 10 %).

Легированные чугуны подразделяют по назначению, химическому составу и структуре.

По назначению легированные чугуны различают на жаропрочные, жаростойкие, износостойкие, коррозионно-стойкие, с повышенной ударной вязкостью, немагнитные и др. По хим. составу легированные чугуны разделяют на алюминиевые, хромистые, никелевые, кремнистые, марганцовистые и др.

Структура для легированных чугунов является в меньшей степени классификационным признаком, чем для нелегированных, так как свойства легированных чугунов в большей степени зависят от их состава. Они имеют матрицы: аустенитные, бей-нитные, трооститные, мартенситные – и со структурой, похожей на структуру нелегированных чугунов, например алюминиевые чугуны с  $A1 < 4\%$ .

Алюминиевые чугуны ( $A1 < 4\%$ ) применяют чаще всего, для получения отливок с повышенной кавитационной стойкостью, а также вместо серого и высокопрочного чугунов для отливок с повышенными требованиями к вязкости, ударной стойкости. Чугун с  $A1 > 4\%$  применяют как жаростойкий и износостойкий.

Хромовые и хромоникелевые легированные чугуны применяют для изготовления износостойких, жаростойких и коррозионно-стойких изделий. С повышением содержания хрома и никеля улучшаются специальные свойства чугуна. Содержание хрома в таких чугунах 0,5-30 %, а никеля – 0,5-5,0 %.

Никелевые чугуны обычно содержат и хром, но с преобладанием никеля (0,3-20 %). С увеличением содержания никеля структура чугуна постепенно изменяется, при определенном его содержании становится аустенитной.

Аустенит немагнитен, поэтому никелевые чугуны применяют как немагнитные, а также коррозионно-стойкие (преимущественно в морской воде), жаропрочные и хладостойкие.

Кремнистый чугун содержит 4,5-18,0 % кремния и применяется в основном как окалиностойкий, ростоустойчивый и коррозионно-стойкий. Марганцевый чугун содержит до 12 % марганца и отличается аустенитной или мартенситной структурой

матрицы. Марганцовистые чугуны применяют в основном как антифрикционные и немагнитные.

По технологии производства различают чугуны ваграночной, индукционной, дуговой плавки, а также синтетические и модифицированные, подвергнутые внепечной обработке. Технология производства различных типов чугунов в значительной степени зависит от параметров чугуна, температуры, наличия и состава примесей и неметаллических включений в чугуне.

По механическим и специальным свойствам чугуны делят на серые, ковкие, высокопрочные и легированные со специальными свойствами.

#### 10.4 Ковкие чугуны

В структуре ковкого чугуна графит имеет хлопьевидную форму – такой графит называют углеродом отжига. По сравнению с серым чугуном ковкий чугун обладает более высокой прочностью, пластичностью и вязкостью. Своё название он получил потому, что имеет повышенную пластичность. Ковке в прямом понимании этого слова чугун не подвергается.

Процесс получения отливок из ковкого чугуна включает две стадии: изготовление фасонных отливок из белого чугуна и отжиг полученных отливок в целях графитизации цементита. При отжиге происходит разложение цементита белого чугуна с образованием графита хлопьевидной формы. В результате этого хрупкие и твердые отливки становятся пластичными и более мягкими. В зависимости от условий и режима отжига структура чугуна может иметь ферритную (Ф), перлитную (П) и ферритно-перлитную металлическую матрицу (рисунок 10.3). Наибольшее распространение получил пластичный ферритный ковкий чугун.

Отжиг ковкого чугуна – весьма продолжительный процесс, занимающий 70-80 ч. Однако его можно ускорить путем закалки отливок из белого чугуна перед графитизацией, а также модифицированием чугуна алюминием, бором, висмутом или титаном. Существуют и другие способы ускорения процесса отжига. Использование указанных способов позволяет сократить продолжительность отжига до 35-40 ч.

В маркировке ковкого чугуна первые две цифры обозначают временное сопротивление при растяжении, вторые – относительное удлинение в процентах.



Рисунок 10.3 - Микроструктура ковкого чугуна на ферритной основе.

Отливки из ковкого чугуна можно получить с сечением до 55 мм. При большем сечении в сердцевине отливок образуется пластинчатый графит, и чугун становится

непригодным для отжига. В машиностроении чаще применяют высокопрочный чугун или чугун с вермикулярным графитом, которые получают при менее сложных и более дешевых технологических процессах, чем получение ковкого чугуна.

ГОСТ 1215-79 предусматривает 11 марок ковкого чугуна. Чугуны ферритного класса КЧ35-10 и КЧ37-12 используют для производства деталей, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеров, редукторов, ступиц, крюков, скоб, задних мостов, кронштейнов), а чугуны марок КЧ30-6 и КЧ33-8 – для изготовления менее ответственных деталей (хомутов, гаек, вентилях, деталей сельскохозяйственных машин, глушителей, фланцев, муфт, тормозных деталей, педалей, гаечных ключей, колодок, кронштейнов). Ковкие чугуны перлитного класса марок КЧ45-7, КЧ50-4, КЧ50-5, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1.5 обладают высокой прочностью, умеренной пластичностью и хорошими антифрикционными свойствами. Из них получают вилки карданных валов, шестерни, червячные колеса, поршни, подшипники, звенья и ролики конвейерных цепей, втулки, муфты, тормозные колодки, коленчатые валы.

Твердость ферритных ковких чугунов – до 163 НВ, перлитных – до 320 НВ.

### 10.5 Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧШГ) характеризуется сочетанием высоких технологических, физикомеханических и эксплуатационных свойств. Изделия из него широко применяют вместо стальных отливок, поковок, штамповок, отливок из серого и ковкого чугунов. Он отличается высокой надежностью при различных режимах эксплуатации. У ЧШГ по сравнению со сталью более высокое отношение предела текучести к пределу прочности при растяжении – 0,70-0,80 (у стали – 0,50-0,65), более низкая чувствительность к концентраторам напряжений повышенная циклическая вязкость (в 1,5-3,5 раза). Поэтому применение его более эффективно, чем применение стали, особенно в условиях действия динамических нагрузок.

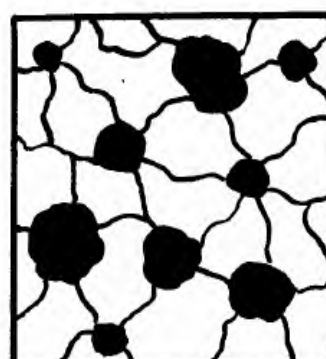
Технология получения ЧШГ состоит из следующих операций обработки расплава чугуна: десульфурации (обессеривание), сфероидизирующей обработки и вторичного, или позднего, модифицирования. Схемы микроструктуры высокопрочного чугуна представлена на рисунке 10.4



Перлитного



Ферритно-перлитного  
класса



Ферритного

Рисунок 10.4 - Схемы микроструктуры высокопрочного чугуна

Изделия из ЧШГ, в отличие от изделий из других железоуглеродистых сплавов, находят все большее применение в различных отраслях промышленности. Сохраняется тенденция к расширению объемов их производства.

По экономическим показателям производства, технологическим и эксплуатационным характеристикам ЧШГ в значительной степени превосходит другие конструкционные материалы на основе железа. Его используют при производстве широкой номенклатуры деталей ответственного назначения в различных отраслях промышленности вместо серого и ковкого чугуна, литой и ковкой стали, проката.

При замене деталей из серого чугуна с пластинчатым графитом на ЧШГ достигается существенное снижение металлоемкости изделий при одновременном повышении надежности деталей.

При использовании ЧШГ вместо легированных чугунов дополнительно экономятся дефицитные легирующие элементы.

Применение ЧШГ вместо ковкого чугуна позволяет сокращать объем или полностью исключать термическую обработку при одновременном повышении уровня механических свойств и коррозионной стойкости изделий.

При использовании ЧШГ вместо сталей снижаются трудоемкость и энергозатраты производства, повышается износостойкость, на 7-8 %, снижается масса деталей за счет меньшей плотности ЧШГ.

Применение в автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Марки ВЧ60, ВЧ70 заменяют стальной прокат. Из этих чугунов изготавливают распределительные и коленчатые валы карбюраторных двигателей малофорсированных дизелей, крышки и стаканы подшипников, коробок передач, лапки свеклоуборочных комбайнов и т. п.

Марки ВЧ45, ВЧ50 заменяют литую сталь. Рекомендуются для изготовления корпусов редукторов, барабанов, кронштейнов, бугелей, тормозных колодок, корпусов подшипников и муфт комбайнов, упоров, пружин, дисков катков и т. п.

Марка ВЧ50 заменяет серый нелегированный чугун. Из этой марки чугуна изготавливают блок-картеры, головки цилиндров, крышки коренных подшипников, картеры маховиков, корпуса распределителей, коробок передач задних мостов и муфт сцепления, детали турбин, насосов и дождевальных агрегатов, выхлопные коллекторы и т. п.

Марку ВЧ40 применяют вместо ковкого чугуна. Из него изготавливают ступицы колес автомобилей, кронштейны, корпуса дифференциалов автомобилей, бортовых редукторов комбайнов, рычаги, корпуса подшипников опоры и головки зерноуборочных комбайнов, держатели, накладки, колпаки культиваторов.

Рекомендации по применению для базовых, корпусных и других деталей, требующих высоких прочности и износостойкости. Марки ВЧ45, ВЧ50 рекомендуется применять для деталей, которые должны обладать высокой прочностью: корпусов зажимных и поводковых патронов, корпусов тисков, шпинделей токарно-карусельных станков и токарных полуавтоматов, звездочек, роликов, полумуфт, дисков ленточно-пильных станков и т. д.; плит гидравлических прессов, поршней, дисков тормоза и муфт, ползунов механических прессов, направляющих и плунжеров и т. п.; водил мотор-редукторов и т. п.

Марки ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70 рекомендуется применять для деталей, которые должны обладать повышенной износостойкостью: деталей суппортной группы токарно-винторезных станков, деталей узла люльки, корпусов барабанов управления зуборезных станков, задних плит и платформ столов агрегатных станков, салазок, столов, ползунов, долбяков строгальных и долбежных станков, направляющих металлообра-

батывающих станков; дисков тормоза, муфт и направляющих кузнечно-прессовых машин и автоматов, букс, колец поршневых молотов, водил.

### **Контрольные вопросы**

- 1) Дайте определение понятию чугун.
- 2) Приведите классификацию чугунов.
- 3) В чем различие между видами чугунов?
- 4) Серые чугуны. Особенности химического состава, область применения.
- 5) Ковкие чугуны. Особенности химического состава, область применения.
- 6) Высокопрочные чугуны. Особенности химического состава, область применения.

## **11 Основы термической обработки**

### **11.1 Общие сведения**

Термическая обработка – один из важнейших технологических процессов, используемый во всех отраслях машиностроения.

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

Выделяют следующие основные виды термической обработки:

- 1) отжиг;
  - отжиг I рода (без фазовых превращений);
  - отжиг II рода (с фазовыми превращениями);
- 2) нормализация;
- 3) закалка;
- 4) отпуск;
- 5) химико-термическая обработка (ХТО);
- 6) термомеханическая обработка (ТМО).

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

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

Таким образом, процесс термической обработки зависит, прежде всего, от температуры и времени. Следовательно, любой процесс термической обработки можно изобразить в виде графика, на котором по оси ординат указывают температуру, а по оси абсцисс – время (рисунок 11.1).





Рисунок 11.1 - График термической обработки

Регулируя температуру и время, можно осуществлять следующие виды термической обработки стали: отжиг, нормализацию, закалку и отпуск (рисунок 11.2 и 11.3).

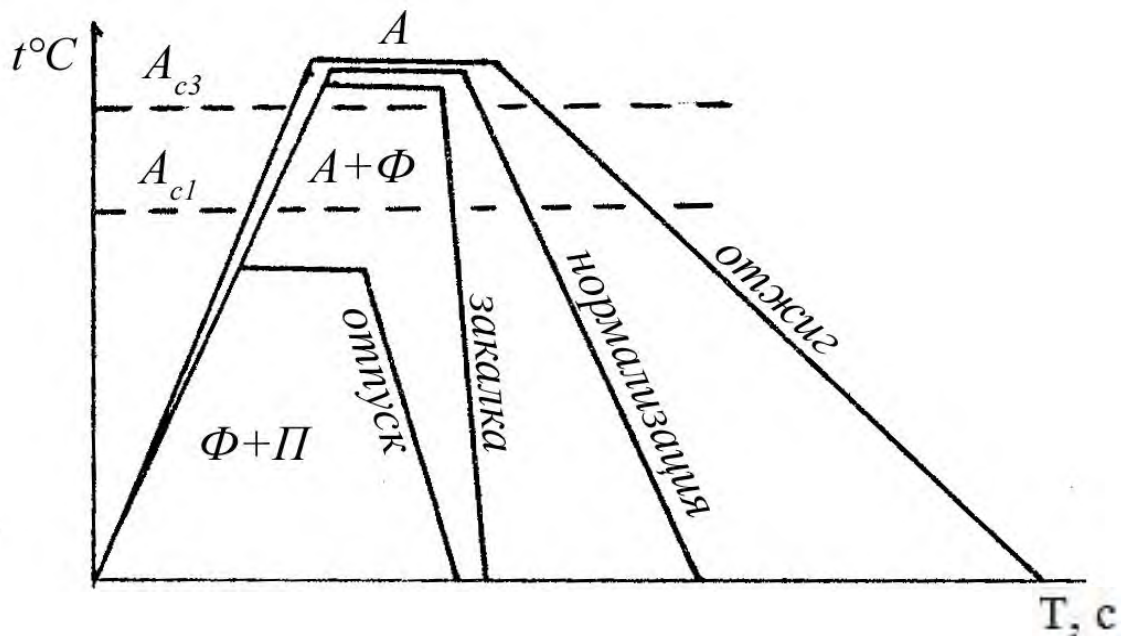


Рисунок 11.2 – Вид термической обработки от времени охлаждения

В исходном состоянии углеродистая сталь может иметь различную структуру в зависимости от содержания углерода: доэвтектоидная – феррит и перлит; эвтектоидная – перлит; заэвтектоидная – перлит и цементит вторичный.

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

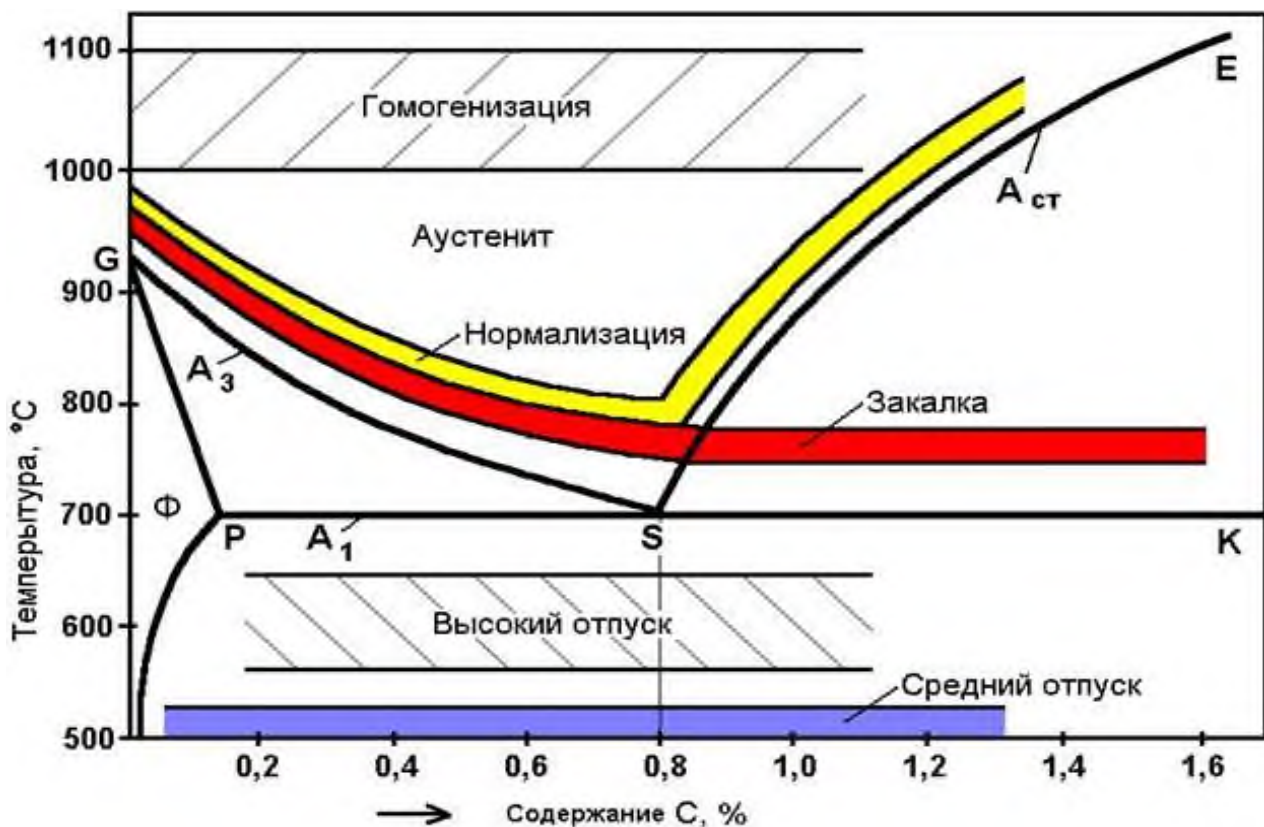


Рисунок 11.3 - Диапазон оптимальных температур нагрева при различных видах термообработки

С помощью термической обработки могут быть получены неустойчивые или неравновесные структуры.

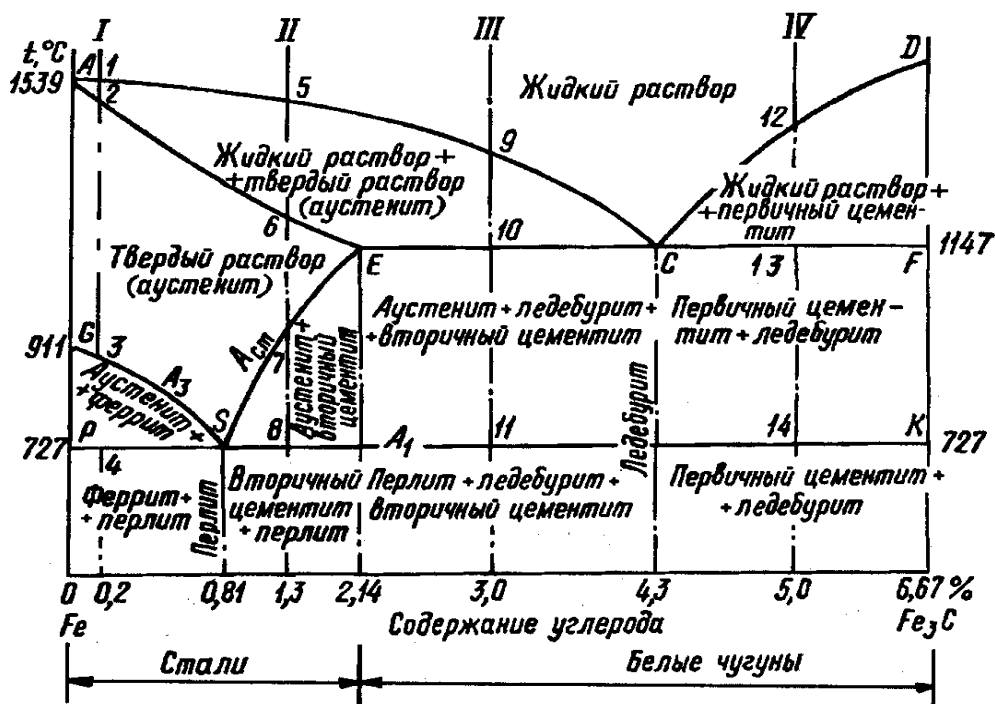
## 11.2 Критические температуры чугуна и стали

Нагрев стали и чугуна под заливку и термическую обработку, а также нагрев стали для обработки давлением производят с учетом так называемых особых температур или критических точек этих сплавов. Критические точки свойственны не только стали и чугуну – они имеются у всех сплавов, а также у ряда веществ. Всем, например, известно, что вода, если ее охлаждать, при 0 °С превращается в твердое тело – лед, а если нагревать лед, то он при той же температуре (0 °С) превратится в жидкость. При 100 °С и нормальном атмосферном давлении вода закипает и начинает бурно превращаться в пар. Температуры 0 и 100 °С для воды являются критическими точками. Таким образом, критическими точками называются те вполне определенные температуры, при которых в процессе нагрева или охлаждения начинает (заканчивается) резко, скачкообразно изменяться состояние (твердое или жидкое) и свойства сплава (или какого-нибудь вещества). У сталей и чугунов в процессе нагрева и охлаждения наблюдается несколько критических точек (рисунок 11.4).

При температуре около 1550 °С эта сталь находится в жидком состоянии. При охлаждении до температуры, соответствующей точке 1, лежащей на линии AC (которая характеризует начало затвердевания всех сплавов с содержанием углерода от 0 до 4,3 %), указанная сталь начнет кристаллизоваться. При данной температуре в жидкой стали появится новое вещество (новая фаза) – твердые кристаллы аустенита. Этот момент и будет первым критическим моментом, характеризующим изменение со-

стояния стали при ее охлаждении, а точка 1 будет первой критической точкой (точкой начала кристаллизации). При температуре, соответствующей точке 2, затвердевание стали полностью закончится, жидкое вещество (жидкая фаза) исчезнет, вся сталь перейдет в твердое состояние, при котором она будет состоять из кристаллов одной твердой структурной составляющей (фазы) – кристаллов аустенита. Это будет вторым критическим моментом изменения состояния стали при охлаждении – моментом исчезновения жидкой части, а точка 2 будет второй критической точкой (точкой конца затвердевания).

В довольно обширном интервале температур – от точки 2 до точки 3 – однородная структура аустенита совершенно устойчива. В этом интервале температур он не подвергается структурным изменениям. Но при температуре, соответствующей точке 3, аустенит оказывается перенасыщенным железом. При этой температуре он начинает распадаться, выделяя по границам своих зерен новую твердую структурную составляющую (новую фазу) – феррит (железо), обладающий по сравнению с аустени- том, из которого он выделился, совершенно иными свойствами.



I – 1, 2, 3, 4; II – 5, 6, 7, 8; III – 9, 10, 11; IV – 12, 13, 14

Рисунок 11.4 – Критические точки на диаграмме состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C в сплавах

В качестве примера рассмотрим критические температуры стали, содержащей 0,2 % углерода (сплав I рисунок 10.4).

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

При температуре, соответствующей точке 4, аустенит стали, выделивший весь избыток феррита в интервале температур от точки 3 до точки 4 и содержащий 0,81 % углерода, перестанет существовать и полностью превратится в перлит. Следова-

но, при температуре, соответствующей точке 4 (727 °С), в структуре стали, содержащей 0,2 % углерода, произойдут коренные изменения. Полностью исчезнет аустенит (немагнитная структурная составляющая), а на его месте и из него образуется новая структурная составляющая сложного строения – перлит, состоящий из пластинчатых кристаллов феррита и таких же кристаллов новой твердой фазы – карбида железа Fe<sub>3</sub>C или цементита. Поэтому точка 4 также будет критической (перлитной) точкой данной стали. Дальнейшее охлаждение стали, содержащей 0,2 % углерода (от 727 °С до комнатных температур), не приведет к видимым под микроскопом изменениям ее структуры.

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

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

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

Из сказанного выше следует, что критические точки тесно связаны с линиями диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов, более того, эти линии соединяют критические точки, лежащие в пределах диаграммы, весьма большого числа сплавов. На линии GS из аустенита доэвтектоидных сталей при охлаждении начинает выделяться феррит. При этом чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем ниже температура начала распада аустенита. В заэвтектоидных сталях, содержащих больше углерода (от 0,81 до 2,14 %), на наклонной линии ES начинается распад аустенита

(при этом из аустенита выделяется не феррит, а цементит). Он начинается при тем более низкой температуре, чем меньше углерода содержится в заэвтектоидных сталях. В эвтектоидной стали, соответствующей по своему составу (0,81 % углерода) точке S, в которой пересекаются наклонные линии GS и ES, распад аустенита начинается при самой низкой температуре (727 °C) с одновременным выделением из аустенита мелких кристаллов (пластинок) феррита и цементита (смесь этих пластинок, как известно, образует сложную структурную составляющую – перлит). Критические точки, характеризующие начало распада аустенита сталей при охлаждении, называются верхними критическими точками ( $A_3$ ,  $A_{сr}$ ). Они лежат на линиях GS и ES диаграммы. Критические точки, которые при медленном охлаждении стали и чугуна характеризуют момент полного распада аустенита, т. е. момент образования перлита, для всех сталей и всех чугунов при одной и той же температуре лежат на линии PSK диаграммы. При медленном охлаждении эта температура равна 727 °C. Критические точки, характеризующие при охлаждении полный распад аустенита и образование перлита из аустенита, называются нижними критическими точками или точками перлитного превращения ( $A_1$ ).

Для эвтектоидной стали, содержащей 0,81 % углерода, верхняя и нижняя критические точки совпадают в точке S, поэтому температура начала и конца распада аустенита у этой стали будет одна и та же (727 °C). Все другие стали (за исключением стали, содержащей 0,81 % углерода) между верхней и нижней критическими точками имеют определенный температурный интервал. В этом интервале, начинающемся при температуре верхней критической точки и заканчивающемся при температуре нижней критической точки, и совершаются структурные превращения в твердой стали при ее охлаждении. Этот температурный интервал называется критическим интервалом.

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

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

Чугуны в твердом состоянии имеют только одну, нижнюю критическую точку при температуре 727 °C (линия PSK). При этой температуре в чугунах, как и во всех сталях, при нагреве перлит переходит в аустенит. При дальнейшем нагреве твердого чугуна (линия ECF диаграммы – линия начала плавления чугуна) в аустените происходит постепенное растворение углерода (цементита), выпавшего из него при охлаждении (наклонная линия CD). Однако растворение цементита в аустените твердого

чугуна полностью не завершается, так как прежде чем твердый чугун достигнет этого критического состояния (полного растворения в аустените цементита), он начнет плавиться. Таким образом, в твердом чугуне невозможно существование верхней критической точки.

Положение критических точек у железоуглеродистых сплавов зависит не только от содержания в них углерода, но и от скорости их охлаждения, а у специальных сталей и чугунов – также и от содержания в них легирующих элементов. Чем больше скорость охлаждения, тем ниже температуры критических точек чугуна и стали. Поэтому для каждой марки стали температуры критических точек устанавливают при определенной скорости охлаждения (с помощью специальных приборов – дилатометров). Скорость же нагрева на положение критических точек практически не оказывает влияния, за исключением весьма больших скоростей (например, при нагреве стали под поверхностную закалку токами высокой частоты весьма большие скорости нагрева приводят к сильному повышению температуры критических точек).

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

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

### 10.3 Превращения, происходящие в стали при нагреве и охлаждении

Структура доэвтектоидной стали при нагреве ее до критической точки  $A_{c1}$  (см. рисунок 11.4) представляет собой смесь перлита и феррита. В точке  $A_{c1}$  начинается фазовая перекристаллизация перлита, т. е. превращение его в мелкозернистый аустенит (рисунок 11.5). При дальнейшем нагреве (от точки  $A_{c1}$  до точки  $A_{c3}$ ) избыточный феррит растворяется в аустените, при достижении точки  $A_{c3}$ , (линия GS) этот процесс заканчивается. Выше точки  $A_{c3}$  структура стали становится аустенитной.

При нагреве заэвтектоидной стали выше температуры точки  $A_{c1}$  в аустените начинает растворяться избыточный цементит. Выше точки  $A_{ct}$  (линия ES) сталь состоит только из аустенита, неоднородного по химическому составу. В тех местах, где был цементит, аустенит богаче углеродом, а там, где был феррит, – беднее. Поэтому при термической обработке для выравнивания химического состава аустенита сталь нагревают до температуры, немного выше верхней критической точки  $A_{c3}$ , и выдерживают при этой температуре.

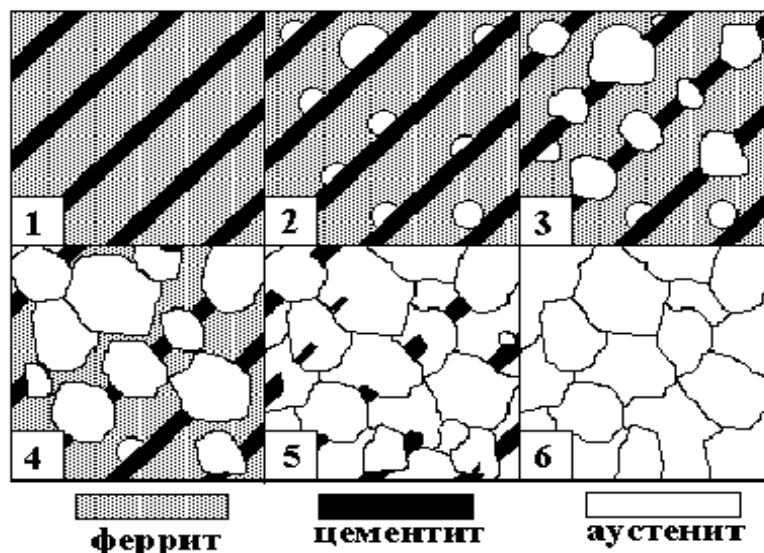


Рисунок 11.5 - Схема превращения перлита в аустенит

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

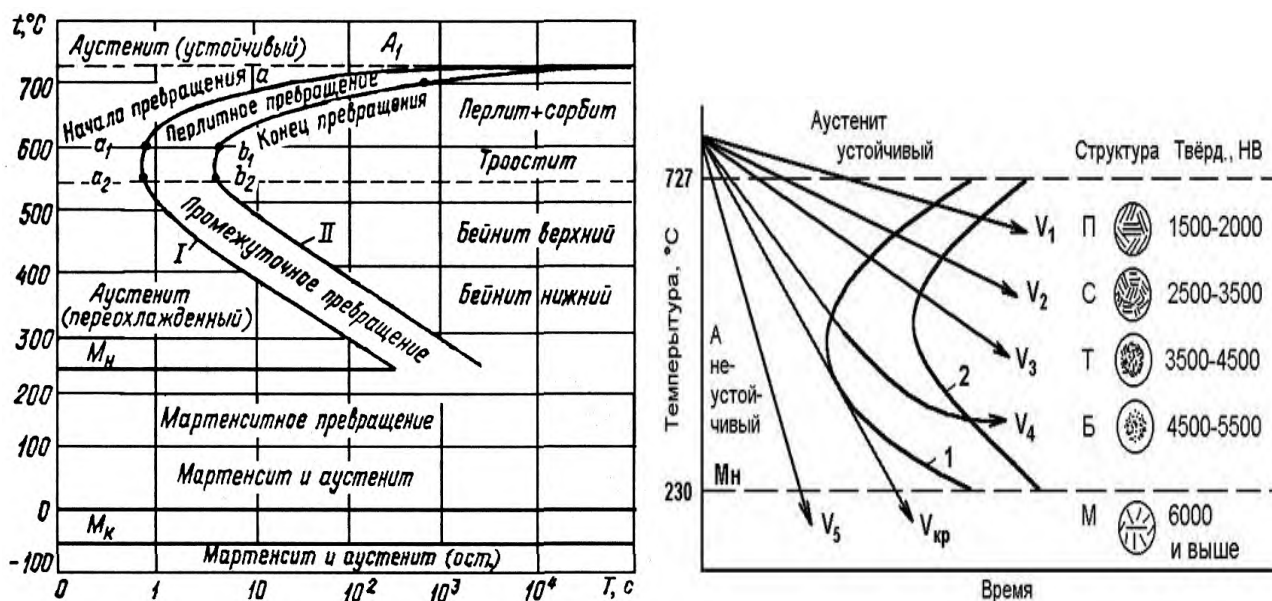
Весьма ответственной характеристикой структуры стали является размер зерна аустенита. При охлаждении стали аустенит испытывает превращения и формирование новой структуры, что существенно зависит от размера зерна аустенита. Чем меньше зерна аустенита, тем меньше будут размеры зерен феррита и перлита,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

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

Аустенит устойчив только при температурах выше  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рисунок 11.4, точка  $A_{r1}$ ). При охлаждении стали, нагретой до аустенитного состояния, ниже точки  $A_{r1}$  начинается распад аустенита. Как уже было сказано (см. диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов), при медленном охлаждении эвтектоидной углеродистой стали (0,81 % углерода) при температуре, соответствующей линии PSK происходит превращение аустенита в перлит. Кристаллическая решетка  $\gamma$ -железа перестраивается в  $\alpha$ -железо, выделяется цементит. Изучение процесса превращения аустенита в перлит проводится при постоянной температуре (в изотермических условиях) и непрерывном охлаждении.

На рисунке 11.6 показана диаграмма изотермического превращения аустенита при постоянной температуре. По оси ординат указана температура, по оси абсцисс –

время. Для удобства построения диаграммы время распада обычно дают по логарифмической шкале, так как оно может колебаться в широких пределах – от долей секунды до десятков минут и даже часов.



1 - кривая начала диффузионного распада аустенита; 2 - кривая конца диффузионного распада аустенита;  $M_n$  - линия начала мартенситного превращения;  $V_{кр}$  - критическая скорость охлаждения

Рисунок 11.6 – Диаграмма изотермического превращения аустенита стали, содержащей 0,8 % углерода

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

На диаграмме видны две С-образные кривые. Кривая I указывает время начала превращения, кривая II – время конца превращения переохлажденного аустенита. Период времени до начала распада аустенита называют инкубационным. При 700 °C превращение аустенита начинается в точке a и заканчивается в точке b, в результате этого процесса образуется перлит (рисунок 11.7, а). При 650 °C распад аустенита происходит между точками  $a_1$  и  $b_1$ . В этом случае образуется сорбит – тонкая (дисперсная) механическая смесь феррита и цементита (рисунок 11.7, б). Сталь, в которой доминирует структура сорбита, имеет твердость 30-40 HRC<sub>3</sub>. Такая сталь обладает высокой прочностью и пластичностью.

Устойчивость аустенита в значительной мере зависит от степени переохлаждения. Наименьшую устойчивость аустенит имеет при температурах, близких к 550 °C. Для эвтектоидной стали время устойчивости аустенита при 550-560 °C – около 1 с. По мере удаления от температуры 550 °C устойчивость аустенита возрастает. Время устойчивости при 700 °C составляет 10 с, а при 300 °C – около 1 мин. При охлаждении стали до 550 °C (точки начала и конца распада –  $a_2$  и  $b_2$  соответственно, аустенит превращается в троостит – смесь феррита и цементита, которая отличается от перлита и



сорбита высокой степенью дисперсности составляющих и обладает повышенной твердостью (40-45 HRC<sub>3</sub>), прочностью, умеренной вязкостью и пластичностью. Ниже температуры 550 °С в результате промежуточного превращения аустенита (в температурном интервале, расположенном ниже перлитного, но выше мартенситного превращения) образуется структура бейнита, состоящая из смеси перенасыщенного углеродом феррита и карбидов (цементита). Различают верхний бейнит перистого строения, появляющийся при 500-350 °С, и нижний (пластинчатого, игольчатого строения), образующийся при 350-250 °С.



а – перлит; б – сорбит; в – троостит

Рисунок 11.7– Микроструктура, полученная с помощью электронного микроскопа (×500)

Верхний бейнит имеет пониженную прочность, невысокую пластичность и вязкость, твердость его 43-46 HRC<sub>3</sub>. У нижнего бейнита показатели прочности, пластичности и вязкости более высокие, твердость 52-55 HRC<sub>3</sub>. Превращения аустенита при температурах  $A_r$  550 °С называют перлитными, при температурах 550 °С –  $M_n$  – промежуточными и при температурах  $M_n$  –  $M_k$  – мартенситными. Если на диаграмму изотермического распада переохлажденного аустенита нанести кривые охлаждения, то можно проследить превращение аустенита при непрерывном охлаждении.

При медленном охлаждении аустенит превратится в перлит. При большей скорости охлаждения переохлажденный аустенит полностью перейдет в сорбит. При еще больших скоростях охлаждения образуется новая структура – троостит. По мере ускорения охлаждения лучи будут становиться все круче, поэтому превращение аустенита в троостит не закончится. Кроме троостита в структуре стали появится мартенсит. При наибольших скоростях охлаждения образуется только мартенсит (рисунок 11.8), т. е. пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе. При образовании мартенсита происходит перестройка гранцентрированной решетки аустенита в объемно-центрированную решетку  $\alpha$ -железа. Избыточное количество углерода, находящегося в  $\alpha$ -железе, искажает эту решетку и превращает ее в тетрагональную, в которой отношение параметров  $c/a$  не равно единице (рисунок 11.9), как у куба. Степень тетрагональности тем выше, чем больше углерода в стали. Скорость охлаждения, при которой из аустенита образуется только мартенсит, называют критической скоростью закалки. При закалке стали ее охлаждают со скоростью больше критической.

Мартенситное превращение протекает при непрерывном охлаждении аустенита ниже точки  $M_n$ . По достижении определенной температуры (точка  $M_k$ ) превращение аустенита в мартенсит заканчивается. Температуры в точках  $M_n$  и  $M_k$  зависят от химического состава стали. Углерод и легирующие элементы (за исключением кобальта и алюминия) понижают эти температуры. Мартенсит обладает самой высокой твердостью наряду со значительной хрупкостью. Он имеет пластинчатое строение, но в

плоскости микрошлифа пластинки приобретают вид игл, поэтому мартенсит часто называют игольчатым.

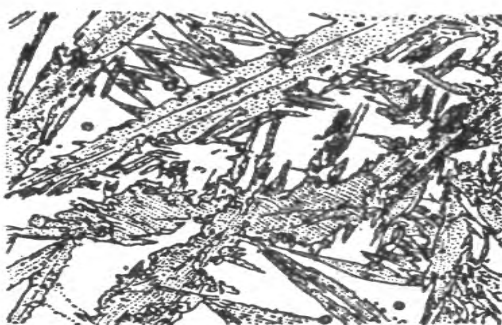


Рисунок 11.8 – Микроструктура мартенсита

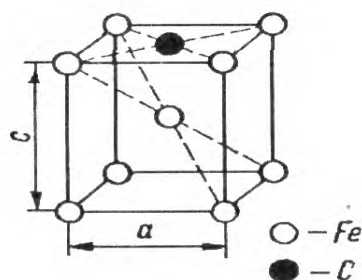


Рисунок 11.9 – Элементарная ячейка кристаллической решетки мартенсита

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

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

## 11.4 Отжиг

Отжигом называется процесс термической обработки, при котором металл сначала нагревают до определенной температуры, выдерживают при этой температуре, а затем медленно охлаждают, чаще всего вместе с печью. В результате отжига в стали образуются равновесные структурные составляющие (см. диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов, рисунок 11.4).

**Отжиг I рода** – термическая операция, состоящая в нагреве металла в неустойчивом состоянии, полученном предшествующими обработками, для приведения металла в более устойчивое состояние. Отжиг I рода не связан с фазовыми превращениями. Различают гомогенизационный (диффузионный), рекристаллизационный отжиг и отжиг, уменьшающий напряжения.

**Диффузионный отжиг** – это термическая обработка, при которой главным процессом является устранение последствий дендритной ликвации. Это достигается за счет диффузионных процессов. Для обеспечения высокой скорости диффузии сталь нагревают до высоких (1000–1200 °С) температур в аустенитной области. При этих температурах делается длительная выдержка (10–20 час.) и медленное охлажде-

ние. При гомогенизационном отжиге вырастает крупное аустенитное зерно. Избавиться от этого нежелательного явления можно последующей обработкой давлением или отжигом II рода. Выравнивание состава стали при гомогенизационном отжиге положительно сказывается на механических свойствах, особенно пластичности. Диффузионный отжиг применяют в основном для стальных слитков, после диффузионного отжига они должны пройти повторный отжиг для получения мелкозернистой структуры.

**Рекристаллизационный отжиг**, применяемый для сталей после холодной обработки давлением, – это термическая обработка деформированного металла или сплава, при котором главным процессом являются возврат и рекристаллизация соответственно. Возвратом называют все изменения в тонкой структуре, которые не сопровождаются изменениями микроструктуры деформированного металла (размер и форма зерен не изменяется). Возврат сталей происходит при относительно низких (300–400 °С) температурах.

Рекристаллизацией называют зарождение и рост новых зерен с меньшим количеством дефектов кристаллического строения. В результате рекристаллизации образуются совершенно новые, чаще всего равноосные кристаллы. Между температурным порогом рекристаллизации и температурой плавления имеется простое соотношение:  $T_R \approx (0,3 - 0,4)T_{пл.}$ , что составляет для углеродистых сталей 670–700 °С.

**Отжиг, для снятия остаточных напряжений** – это термическая обработка, при которой главным процессом является полная или частичная релаксация остаточных напряжений. Такие напряжения возникают при обработке давлением, литье, сварке, шлифовании, обработки резанием и других технологических процессах. Внутренние напряжения сохраняются в деталях после окончания технологического процесса и называются остаточными.

Избавиться от нежелательных напряжений можно путем нагрева сталей от 150 до 650 °С в зависимости от марки стали и способа обработки.

**Отжиг II рода** основан на использовании фазовых превращений сплавов и состоит в нагреве выше температуры превращения с последующим медленным охлаждением для получения устойчивого структурного состояния сплавов.

**Полный отжиг** производится для доэвтектоидных сталей. Для этого стальную деталь нагревают выше критической точки А3 на 30–50 °С и после прогрева проводят медленное охлаждение. Скорость нагрева в среднем составляет 100 °С/ч, продолжительность выдержки – от 0,5 до 1 ч на 1 т нагреваемого металла. Как правило, детали охлаждают вместе с печью со скоростью 30–100 °С/час. Температурный интервал нагрева для полного отжига показан на стальной части диаграммы «Железо–цементит» (выше линии GS, рисунок 10.4). Структура доэвтектоидной стали после отжига состоит из избыточного феррита и перлита.

Основные цели полного отжига:

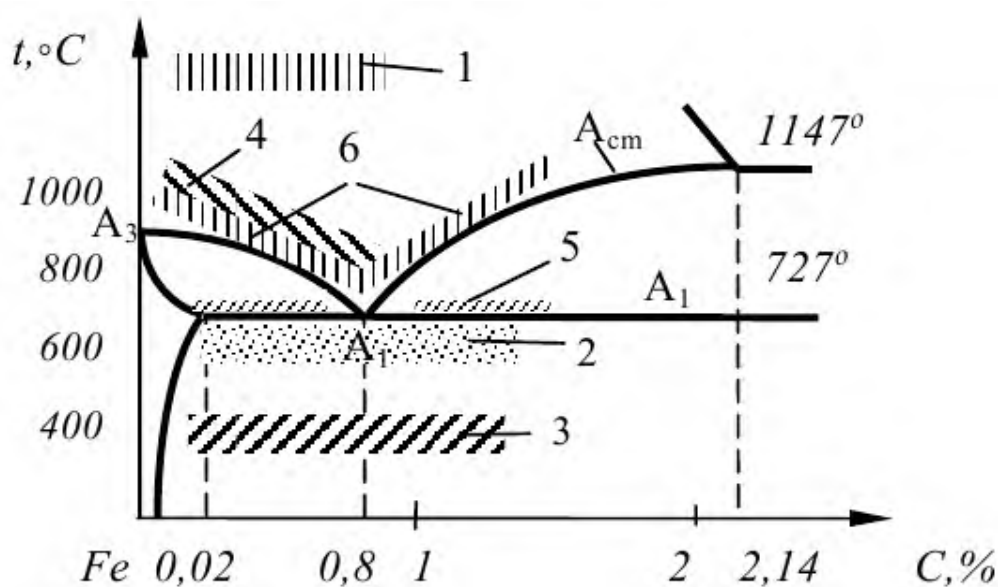
- устранение пороков структуры, возникших при предыдущей обработке (литье, горячей деформации, сварке, термообработке), – крупнозернистости и видманштеттовой структуры;
- смягчение стали перед обработкой резанием – получение крупнозернистости для улучшения качества поверхности и большей ломкости стружки низкоуглеродистых сталей;
- уменьшение напряжений.

**Неполный отжиг** отличается от полного тем, что нагрев производится на 30–50 °С выше критической точки А1 (линия PSK на диаграмме железо–цементит). Эта

операция производится как для доэвтектоидных сталей, так и для заэвтектоидных сталей. Охлаждение проводят так же, как и при полном отжиге (вместе с печью). При неполном отжиге не происходит изменение ферритной составляющей структуры в доэвтектоидной стали и цементитной составляющей в заэвтектоидной стали, поэтому полного исправления структуры не происходит. Неполный отжиг доэвтектоидной стали используют для смягчения ее перед обработкой резанием, снятия внутренних напряжений.

В заэвтектоидных сталях в результате неполного отжига образуется структура зернистого перлита, обладающая наименьшей твердостью и позволяющая облегчить обработку резанием углеродистых и легированных инструментальных и подшипниковых сталей. Кроме того, зернистый перлит является оптимальной структурой перед закалкой, т. к. обладает меньшей склонностью к росту аустенитных зерен, широким интервалом закалочных температур, меньшей склонностью к растрескиванию при закалке, а также повышенной прочностью и вязкостью.

Температурные интервалы различных видов отжига и нормализации представлены на рисунке 11.10 и 11.11.

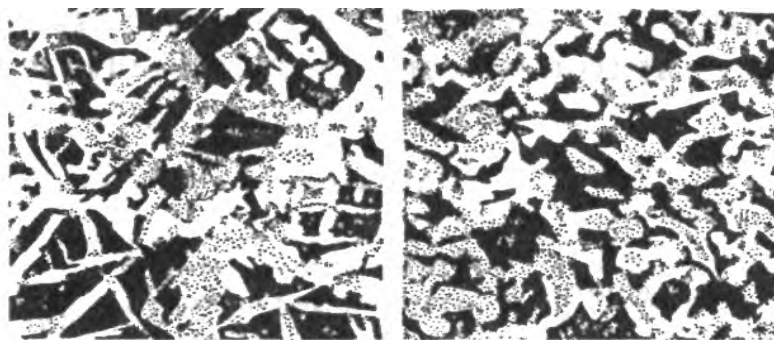


1 – диффузионный; 2 – рекристаллизационный; 3 – для снятия напряжений;  
4 – полный; 5 – неполный; 6 – нормализация

Рисунок 11.10 – Температурный интервал основных видов отжига

У стальных отливок процесс перекристаллизации протекает труднее, чем у ковальной и катаной стали, поэтому выдержка стальных отливок при температуре отжига должна быть более длительной. Охлаждение их производится со скоростью 80-120 °C/ч, т. е. несколько медленнее, чем кованных и катаных изделий, которые можно охлаждать со скоростью 100-200 °C/ч. Если при таких условиях не удастся получить мелкозернистую структуру, применяют двойной отжиг, причем первый отжиг выполняют при повышенной температуре (950 °C), а второй – при температуре  $A_{c3} = 30 \div 40$  °C. Особенно благоприятное влияние отжиг оказывает на ударную вязкость стали.

На рисунке 11.11 представлена микроструктура стали 35Л до и после отжига.



до отжига

после отжига

Рисунок 11.11 – Микроструктура литой стали 35Л

**Изотермический отжиг** заключается в нагреве стали до температуры  $A_3 + (30-50 \text{ }^\circ\text{C})$ , последующего ускоренного охлаждения до температуры изотермической выдержки ниже точки  $A_1$  и дальнейшего охлаждения на спокойном воздухе. Изотермический отжиг по сравнению с обычным отжигом имеет два преимущества:

- большой выигрыш во времени, т. к. суммарное время ускоренного охлаждения, выдержки и последующего охлаждения может быть меньше медленного охлаждения изделия вместе с печью;
- получение более однородной структуры по сечению изделий, т. к. при изотермической выдержке температура по сечению изделия выравнивается и превращение во всем объеме стали происходит при одинаковой степени переохлаждения.

При таком отжиге изделия нагревают до требуемой температур ( $A_{с3} = 20 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и после некоторой выдержки охлаждают с печью до  $680 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$  либо переносят в другую печь (или соляную ванну) с той же температурой. При температуре  $680 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$  изделия выдерживают столько времени, сколько необходимо для полного превращения аустенита в перлит. Время выдержки устанавливают по диаграмме изотермического превращения аустенита. Обычно оно составляет от 2 до 5 ч. По окончании выдержки изделия вынимают из печи и охлаждают на воздухе.

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

## 11.5 Нормализация

Нормализация: нагрев до температур, на  $30-50 \text{ }^\circ\text{C}$  превышающих верхние критические температуры  $A_{с1}$  или  $A_{ст}$  (см. рисунок 11.10, 11.12), выдерживают при этих температурах и затем охлаждают на спокойном воздухе для получения тонкопластинчатой перлитной структуры.

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

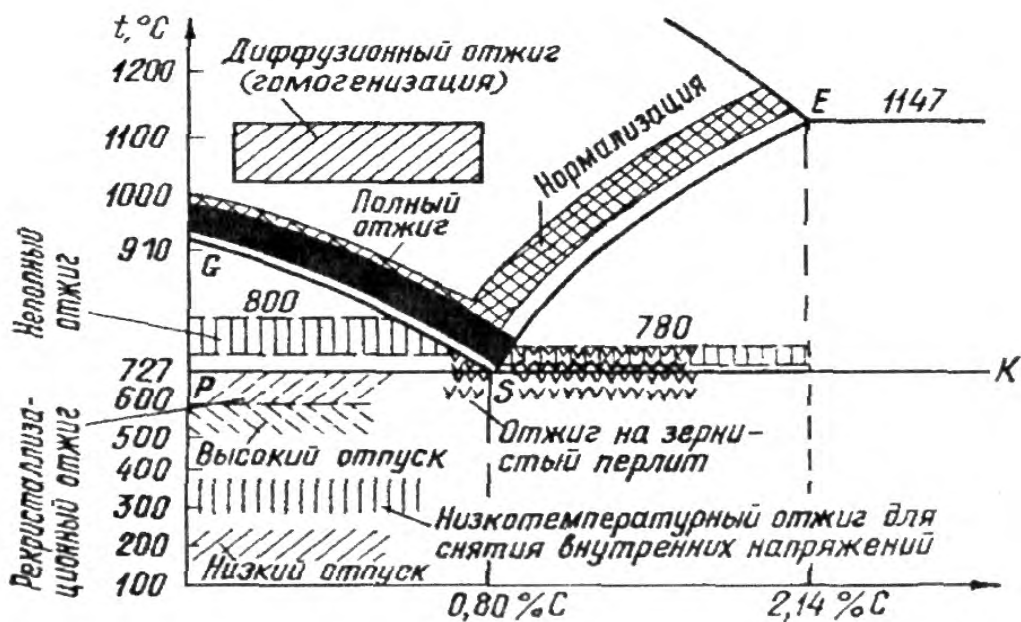


Рисунок 11.12 – Температурный интервал отжига и нормализации углеродистой стали

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

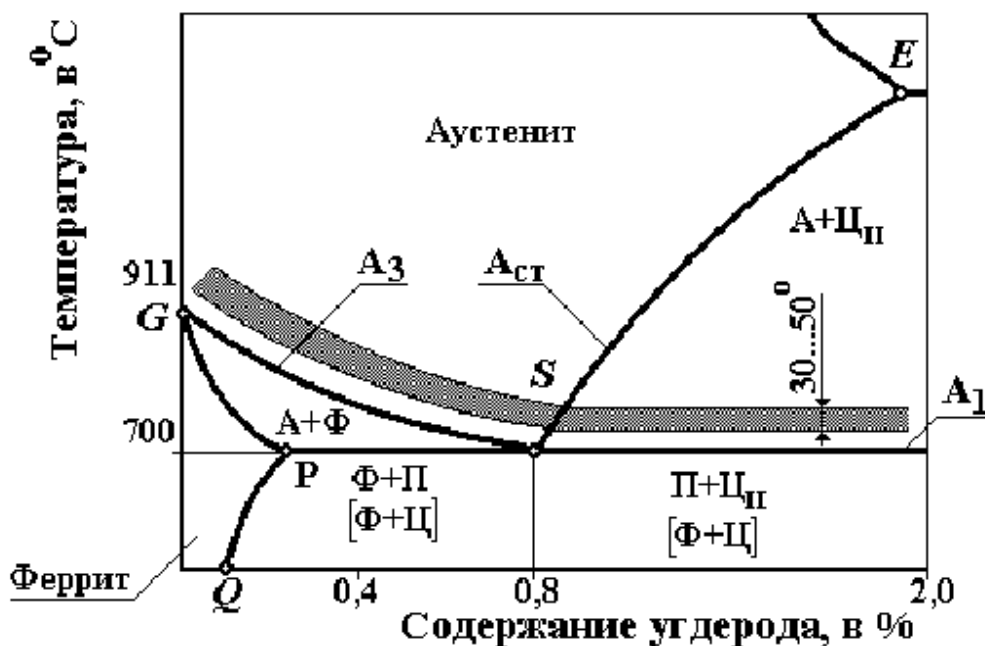
## 11.6 Закалка

Закалка – самый распространенный и сложный вид термической обработки, так как она протекает при очень больших скоростях охлаждения, что приводит к образованию значительных внутренних напряжений. При закалке стали нагревают до температуры получения структуры аустенита (выше критических точек  $A_{c3}$  или  $A_{c1}$ ), выдерживают некоторое время при этой температуре, а затем быстро охлаждают в воде, масле, растворах солей, кислот, щелочей, на воздухе и в других средах. Охлаждение применяют для повышения твердости и прочности. Максимальная твердость при этом достигается за счет получения структуры мартенсита. Закалка с последующим отпуском позволяет изменять свойства стали в широком диапазоне.

Для того чтобы закалить сталь, ее необходимо нагреть до определенной температуры. Если углеродистую сталь нагреть до температуры ниже критической ( $A_{c1}$ ), то твердость ее по сравнению с исходным состоянием мало изменится, в структуре такой стали не будет мартенсита. Структуру мартенсита можно получить только в результате распада аустенита.

Температура нагрева стали при закалке зависит, прежде всего, от содержания в ней углерода (рисунок 11.13). Доэвтектоидные стали при закалке нагревают до тем-

ператур, на 40 - 50 °С превышающих критическую  $A_{c3}$ . При таком нагреве структура стали становится аустенитной. Последующее быстрое охлаждение приводит к превращению аустенита в мартенсит. Такая закалка называется полной. Заэвтектоидные стали при закалке нагревают до температур, на 40-50 °С превышающих критическую  $A_{c1}$  т. е. до 760-780 °С. При данной температуре структура стали будет состоять из аустенита и цементита. В результате быстрого охлаждения аустенит перейдет в мартенсит, а цементит сохранится в структуре закаленной стали, так как он не претерпевает превращений при охлаждении.



A – аустенит; Ф – феррит; П – перлит; Ц – цементит

Рисунок 11.13 – Температурный интервал закалки углеродистых сталей

Следовательно, после закалки сталь будет иметь структуру мартенсита и цементита. Такая закалка называется неполной.

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

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

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

Скорость охлаждения при закалке оказывает решающее влияние. Для каждой стали существует критическая скорость закалки - наименьшая скорость охлаждения,

необходимая для переохлаждения аустенита до температуры мартенситного превращения. Чем ниже критическая скорость закалки, тем легче закалить сталь.

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

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

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

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

Самая распространенная закалочная среда – вода. Ее охлаждающая способность зависит от температуры. Чем выше температура воды, тем меньше ее закалочная способность, поэтому при работе рекомендуется систематически следить за температурой воды. Обычно при закалке применяют воду с температурой 20-30 °С. Закаливающая способность воды может быть уменьшена путем добавления в нее мела, извести, мыла, глицерина и других подобных веществ или увеличена при введении в нее хло-



ристого натрия (поваренной соли) или едкого натра (каустической соды). Вода, в которой растворены хлористый натрий или едкий натр, имеет более высокую скрытую теплоту парообразования. Частицы соли, соприкасаясь с раскаленным металлом, взрываются и разрушают паровую рубашку, тем самым увеличивая закаливающую способность воды. В качестве охлаждающей среды применяют минеральное масло, подогретое до 50-60 °С, обладает более высокой закаливающей способностью, чем холодное т. к., при нагреве масло становится менее вязким, его паровая рубашка разрушается быстрее. Недостатки масла – огнеопасность (температура вспышки 150-200 °С) и способность к загустеванию с течением времени.

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

Данные о скорости охлаждения стали в различных закалочных средах при температурах 550-650 и 200-300 °С приведены в таблице 9.5. Вода и растворы солей в воде при температурах 550-650 °С обладают большой закаливающей способностью. Недостаток этих охлаждающих сред – высокая скорость охлаждения в интервале температур от 200 до 300 °С.

Закалочная способность масла при 550-650 °С в четыре-пять раз меньше, чем холодной воды, однако при 200-300 °С масло охлаждает изделия в 10 раз медленнее, чем вода, поэтому при закалке изделий в масле значительно уменьшается опасность их коробления и появления трещин. Углеродистые стали, у которых критическая скорость закалки составляет 400-600 °С/с, для получения мартенсита следует закаливать только в воде при комнатной температуре и в водных растворах солей (рисунки 11.13 и 11.14). Большинство легированных сталей закаливают в масле.

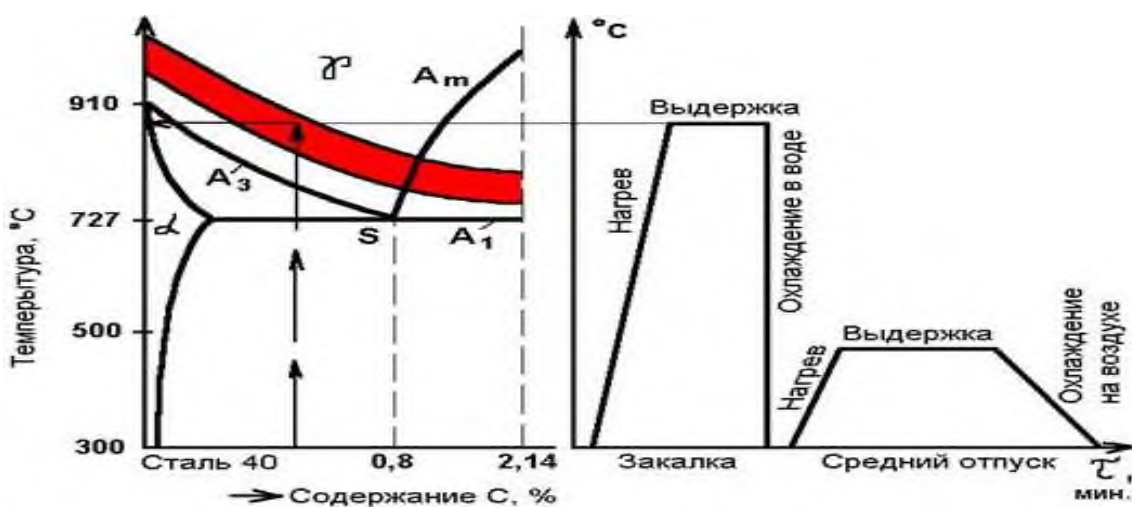


Рисунок 11.14 - Выбор оптимальных режимов закалки в водной среде

Закаливаемость и прокаливаемость - важнейшие характеристики стали, подвергаемой закалке.

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

Прокаливаемость – глубина проникновения закалки. Различные слои изделия при закалке охлаждаются неодинаково. Поверхностный слой, который непосредственно соприкасается с закалочной жидкостью, охлаждается с большей скоростью, чем внутренние слои. Наименьшая скорость охлаждения – в центре изделия. Чем выше критическая скорость закалки стали, тем ниже ее прокаливаемость. Углеродистые стали имеют высокую критическую скорость закалки, поэтому у них низкая прокаливаемость. Из углеродистой стали не изготавливают массивные изделия, у которых должны быть высокие механические свойства по всему сечению. Такие изделия обычно выполняют из легированной стали, имеющей более высокую прокаливаемость.

На прокаливаемость стали, кроме химического состава, оказывают влияние и другие факторы, например размер зерна аустенита и охлаждающая среда. Под глубиной закалки понимают расстояние от поверхности изделия до того слоя, где структура состоит из 50 % мартенсита и 50 % троостита, или слоя, содержащего не менее 95 % мартенсита. Прокаливаемость характеризуется критическим диаметром (диаметр прутка, прокаливаемого насквозь). Для определения прокаливаемости исследуют микроструктуру или измеряют твердость образцов, подвергнутых закалке.

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

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

## 11.7 Отпуск и старение

Отпуском называется процесс термической обработки, при котором закаленная сталь нагревается ниже критической точки  $A_{c1}$ , выдерживается при этой температуре и затем охлаждается. В процессе отпуска уменьшаются или устраняются внутренние напряжения, повышаются вязкость и пластичность стали, снижается ее твердость, улучшается структура.

При отпуске в стали происходят определенные структурные превращения. Первое превращение совершается при температурах 80-200 °С. Из раствора выделяется углерод, при этом исчезает искажение кристаллической решетки. Образующийся в процессе отпуска мартенсит, имеющий кубическую решетку, называют отпущенным. Второе превращение происходит при температурах 200-300 °С. Остаточный аустенит переходит в отпущенный мартенсит, который является менее напряженной структурой, чем мартенсит закалки. И, наконец, третье превращение происходит при температурах 300-400 °С. В этот период завершается процесс выделения углерода из раствора, образуется цементит Fe<sub>3</sub>C, одновременно уменьшаются внутренние напряжения в стали. При 400 °С сталь состоит из ферритно-цементитной смеси (троостит отпуска). При дальнейшем повышении температуры начинается коагуляция – частицы феррита и цементита разрастаются и приобретают округлую форму. Отпущенная при 350-500 °С сталь имеет структуру троостита, при 500-600 °С – структуру сорбита и при 600-700 °С – структуру перлита.

В зависимости от температуры нагрева различают три вида отпуска – низкотемпературный, среднетемпературный и высокотемпературный. Изменение структуры аустенита в процессе разных видов отпуска представлено на рисунке 11.15.

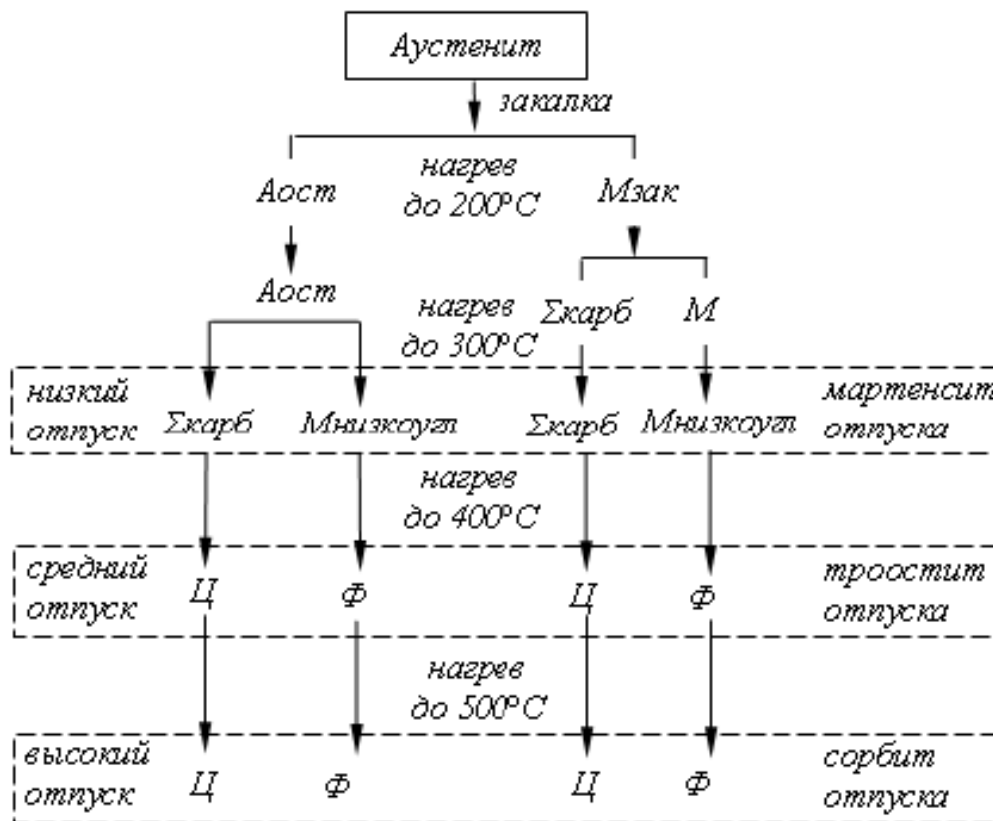


Рисунок 11.15 – Изменение структуры аустенита в процессе отпуска

Низкотемпературный (низкий) отпуск проводят с нагревом до 150-300 °С. Этот отпуск снижает внутренние напряжения в стали при сохранении высокой твердости (58-63 HRC<sub>2</sub>). Его применяют преимущественно для инструмента из углеродистых и низколегированных сталей, а также для деталей, подвергаемых поверхностной закалке, цементации и нитроцементации, к которым предъявляются высокие требования по твердости и износостойкости.

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

Высокотемпературный (высокий) отпуск проводят при температурах 550-680 °С. Сталь при этом приобретает структуру сорбита (сорбит отпуска). Твердость закаленной стали снижается до 250-350 НВ, прочность уменьшается в 1,5-2 раза, пластичность и вязкость увеличиваются в несколько раз, внутренние напряжения полностью снимаются. Закалка с высоким отпуском называется улучшением. Улучшенная сталь по сравнению с отожженной или нормализованной имеет более высокие показатели прочности, пластичности и вязкости. Улучшению подвергают изделия из конструкционных сталей марок 40, 45, 40Х, 40ХНМ, 40ХМФ и др. (полуоси, коленчатые валы, шатуны, поворотные кулаки, рычаги, балки передних осей грузовых автомобилей, а также болты, гайки, винты и др.), испытывающие большие нагрузки.

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

Температура отпуска и время выдержки зависят от марки стали, требований, предъявляемых к свойствам изделий из этой стали, и их массы. Отпуск закаленных изделий, особенно инструмента, рекомендуется проводить непосредственно после закалки в целях предотвращения образования трещин из-за возникших внутренних напряжений и снижения высокой твердости изделия (рисунок 11.16).

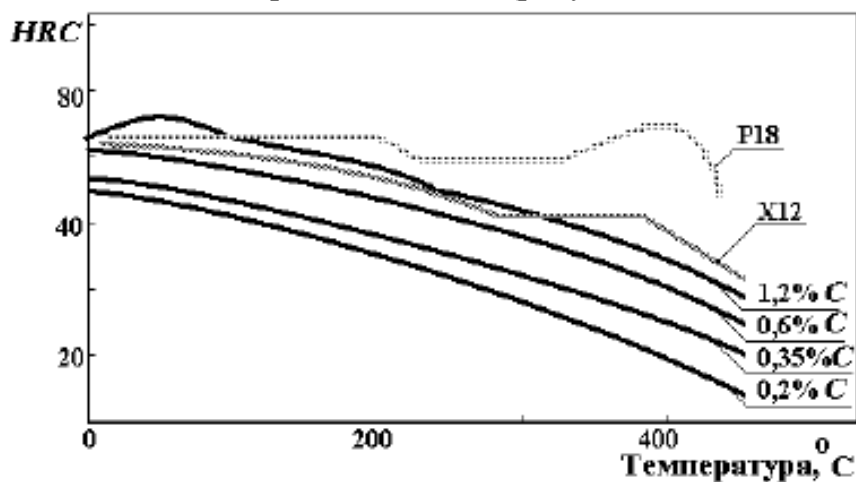


Рисунок 11.16 - Изменение твердости закаленной стали при отпуске

При заниженных температурах отпуска или сокращении времени выдержки в стали сохраняется повышенная хрупкость, для устранения которой производят повторный отпуск. Повышенная температура отпуска приводит к снижению твердости и прочности. Эти недостатки устраняют отжигом изделий и повторной их закалкой с последующим отпуском. Температуру отпуска можно определить по цветам побежалости.

На рисунке 11.17 показана зависимость механических свойств стали 40 от температуры отпуска

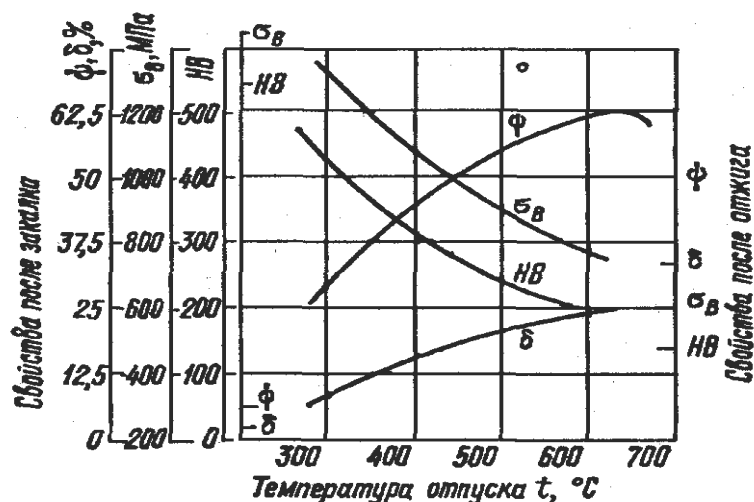


Рисунок 11.17 – Зависимость механических свойств стали 40 от температуры отпуска

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

Известны два вида старения – термическое и деформационное (механическое). Термическое старение происходит в результате изменения растворимости углерода в  $\alpha$ -железе в зависимости от температуры. Деформационное старение протекает в сплаве, подвергнутом пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации. Процесс этого старения длится 15 суток и более при комнатной температуре и всего несколько минут при температурах 200-350  $^{\circ}\text{C}$ .

Искусственное старение закаленных и отпущенных при низкой температуре изделий производят после предварительной механической обработки при 100-180  $^{\circ}\text{C}$  с выдержкой в течение 18-35 ч и медленным охлаждением. Естественное старение осуществляется на открытом воздухе под навесом, где на изделия воздействуют температурные изменения, влажность и давление воздуха. Оно длится от 3 месяцев до 2 лет. Естественному старению подвергают станины прецизионных станков, корпусные детали весьма ответственного назначения, рамы роялей и пианино. Его результатом является снижение внутреннего напряжения, стабилизация размеров и геометрической формы изделий.

## 11.8 Обработка стали холодом

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

Температурный режим обработки холодом определяется положением нижней мартенситной точки  $M_k$ . Более глубокое охлаждение не вызовет дополнительного превращения. Обработку холодом производят в специальных камерах с хорошей тепловой изоляцией немедленно после закалки, так как выдержка стабилизирует аустенит и, следовательно, снижает эффект обработки. Необходимую температуру получают с помощью сухого льда (твердая углекислота), жидкого кислорода или жидкого воздуха. Выдержка при низких температурах должна быть непродолжительной. Термообработку с применением холода осуществляют по схеме: закалка – обработка холодом – низкий отпуск.

## 11.9 Термомеханическая обработка стали

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

ТМО позволяет получить у стали более высокие прочностные и вязкостно-пластические свойства, чем после обычной закалки и низкого отпуска. Положительный дополнительный эффект при ТМО объясняется предварительным наклепом аустенита во время пластической деформации. Последствия этого наклепа передаются мартенситу в виде дополнительных, возникших при наклепе дислокаций, которые, складываясь с дислокациями, возникающими при последующем мартенситном превращении, создают более плотную (до  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) дислокационную структуру.

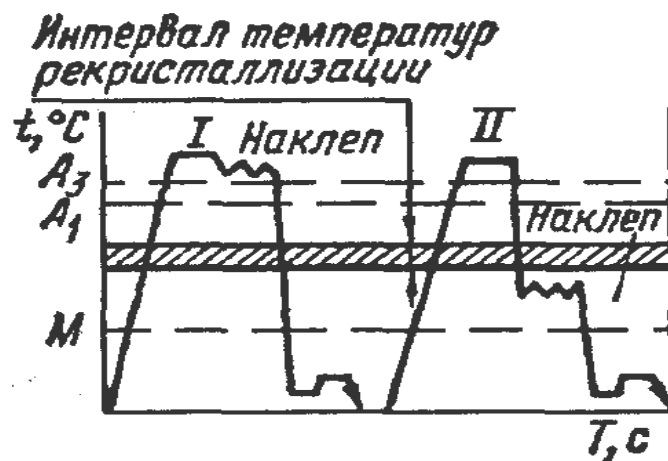
Поскольку формирование дислокаций первого и второго поколений происходит одновременно, такая высокая плотность дислокаций не порождает возникновения трещин при закалке. Образовавшийся таким путем мартенсит из-за повышенной плотности дислокаций приобретает благоприятное напряженно-деформированное состояние,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

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

Существуют две разновидности ТМО (рисунок 10.18): высокотемпературная – ВТМО, низкотемпературная – НТМО.

При ВТМО аустенит деформируют при температуре несколько выше  $A_{c3}$  до степени деформации 20-30 %.

При НТМО производится деформация переохлажденного до 400-600 °С аустенита. Степень деформации 75-90 %.



I - VTMO; II - NTMO

Рисунок 11.18 – Диаграмма ТМО

Более предпочтительна VTMO. При ней, в дополнение к сказанному, сталь приобретает более высокие значения вязкости разрушения  $K_{Ic}$  (трещиностойкости), работы распространения трещины КСТ и сопротивления усталости при пониженной критической температуре, хрупкости  $t_{50}$  и меньшей чувствительности к концентраторам напряжений.

### Контрольные вопросы

- 1) Что называют термической обработкой стали?
- 2) Как влияет температура нагрева на величину зерна аустенита?
- 3) Что называют отжигом?
- 4) Перечислите основные виды отжига.
- 5) Что называют закалка?
- 6) Какие охлаждающие среды используют при закалке сталей?
- 7) Перечислите основные виды закалки стали.
- 8) Что называют отпуск?
- 9) Как влияет температура отпуска на твердость закаленной стали?
- 10) Какие структуры образуются при перлитном превращении аустенита?
- 11) Перечислите основные виды термомеханической обработки стали.

## 12 Поверхностное упрочнение стали

### 12.1 Поверхностная закалка стали

#### 12.1.1 Поверхностная закалка токами высокой частоты

Поверхностной называется такая закалка, при которой высокую твердость приобретает лишь часть поверхностного слоя стали. Она отличается от всех рассмотренных ранее способов закалки методом нагрева. При такой обработке до температуры закалки нагревают только поверхностный слой изделия. При быстром охлаждении лишь этот слой подвергается закалке. Остальная часть не закаливается и сохраняет структуру и свойства, которые были до закалки. Наибольшее распространение получила поверхностная закалка с индукционным нагревом токами высокой частоты. Этот высокопроизводительный, прогрессивный метод термической обработки обеспечивает повышение механических свойств стали, в том числе предела текучести, усталости и твердости, исключает возможность обезуглероживания, уменьшает опасность окисления поверхности изделий и их деформации, создает предпосылки для комплексной механизации и автоматизации процесса закалки.

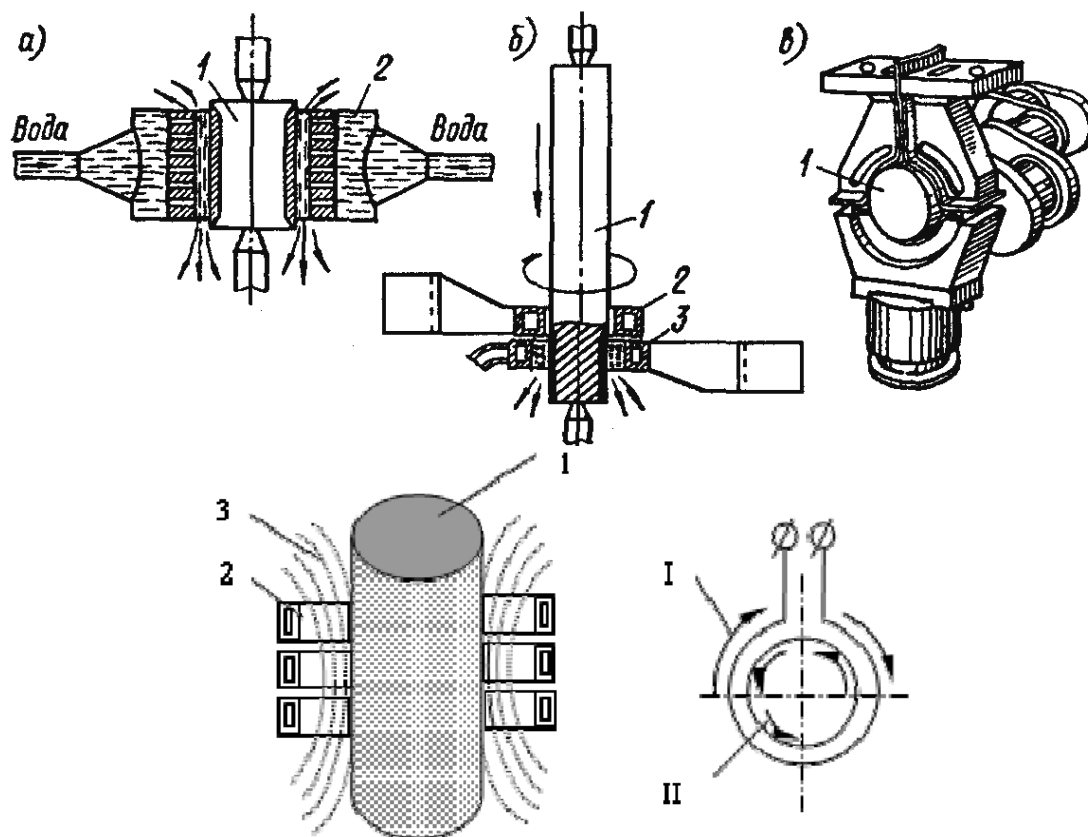
Индукционный нагрев металла достигается путем индуцирования вихревых токов. Электромагнитное поле создается индуктором, подключенным через трансформатор напряжения к источнику переменного тока. Источниками питания током могут служить машинные генераторы и тиристорные преобразователи (до 10 000 Гц). Чем больше частота тока, тем меньше глубина проникновения его в проводник и, следовательно, тем меньше глубина закалки. Нагрев токами высокой частоты осуществляется следующим образом. Изделие, подлежащее нагреву, помещают внутри спирали из медной трубки (рисунок 12.1), т. е. в индуктор. Через индуктор пропускают ток высокой частоты большой силы, который создает вокруг изделия мощное переменное магнитное поле, в результате чего изделие перемещается много раз в секунду, в нем возникают короткозамкнутые вихревые токи. Вследствие явления поверхностного эффекта токи сосредотачиваются в поверхностном слое изделия и нагревают его на определенную глубину. Продолжительность нагрева токами высокой частоты весьма мала – она исчисляется секундами. Таким образом, изделие нагревается находящимися в нем электрическими токами, роль индуктора – возбудить эти токи.

Способ поверхностной закалки с использованием токов высокой частоты выбирают в зависимости от размеров и формы изделия, а также предъявляемых к изделию требований. При закалке небольших изделий производят нагрев и охлаждение всей их поверхности. Изделие 1 (рисунок 12.1, а) помещают в индуктор 2 и сначала нагревают, а затем охлаждают всю поверхность, подлежащую обработке. Охлаждение может быть душевым. Для этой цели применяют индукторы, на внутренней поверхности которых имеются многочисленные отверстия (спреер). После окончания нагрева через эти отверстия на поверхность изделия поступает вода и охлаждает его.

Закалку изделий значительной длины проводят непрерывно-последовательным нагревом. Изделие 1 (рисунок 12.1, б) устанавливают в центрах и для равномерности нагрева непрерывно вращают с определенной скоростью. Закалка происходит при вертикальном перемещении изделия сверху вниз. При таком перемещении в магнитное поле индуктора 2 последовательно поступает один участок изделия за другим и нагревается до температуры закалки. Под индуктором расположено охлаждающее устройство 3, представляющее собой согнутую кольцом трубку с многочисленными



отверстиями на внутренней поверхности. Через отверстия на нагретые участки изделия поступает вода и охлаждает их. Так непрерывно-последовательно нагревается и охлаждается вся поверхность изделия.



I – направление тока в индукторе; II – направление тока в детали  
 а – одновременный нагрев и охлаждение; б – непрерывно-последовательный нагрев вдоль оси вала; в – последовательный нагрев и охлаждение каждой шейки коленчатого вала

Рисунок 12.1 – Поверхностная закалка деталей токами высокой частоты

При необходимости закалки отдельных частей изделия целесообразно применять последовательную закалку, при которой обрабатываемая поверхность нагревается и охлаждается по частям. Таким образом осуществляется, например, закалка шейки коленчатого вала 1 (рисунок 12.1, в), зуба крупномодульного зубчатого колеса, отдельных поверхностей шпинделя и др. После закалки для уменьшения внутренних напряжений изделия подвергают низкому отпуску (при 160-200 °С). Глубина закалки – 3-5 мм.

Для точной установки изделий в индукторе, обеспечения равномерного нагрева и охлаждения используют специальные приспособления, установки, станки-полуавтоматы и автоматы различных конструкций.

Стационарный и вращательный способы закалки включают две операции: одновременный нагрев всей закаливаемой поверхности и охлаждение всей нагретой поверхности. При поступательном и комбинированном способах поверхность подвергается закалке при непрерывном перемещении через зону нагрева и охлаждения. Для нагрева пламенем служат обычные сварочные горелки, в которых вместо мундштука используют специальные наконечники – щелевые и многопламенные. Толщина закаленного слоя составляет 2 - 5 мм, твердость его достигается такая же, как при обыч-

ной закалке. В крупносерийном и массовом производствах при установившемся технологическом процессе, когда длительное время изготавливаются одни и те же изделия из стали определенных марок, например, ведущие колеса гусеничных тракторов, используют поверхностную закалку в электролите – 14 - 16%-ном водном растворе кальцинированной соды.

### 12.1.2 Поверхностная закалка лазерным упрочнением

Сущность лазерного упрочнения состоит в мощном импульсном (или непрерывном) воздействии светового пучка чрезвычайно большой плотности энергии, что вызывает мгновенный нагрев поверхности до высоких температур, превышающие температуры структурно-фазовых превращений металла и температуру плавления. С учетом чрезвычайно высоких скоростей охлаждения, которые в 10–100 раз превышают скорости охлаждения при закалке, в поверхности материала формируются особомелкозернистая или даже псевдоаморфная структура, имеющая повышенную твердость (20–30%).

Технологические процессы лазерной обработки имеют ряд неоспоримых достоинств по сравнению с другими способами поверхностного упрочнения:

- простота транспортировки лазерного луча при отсутствии механического контакта упрочняемой поверхности с источником энергетического воздействия;
- возможность дозированного энергетического воздействия;
- возможность реализации процесса упрочнения в вакууме, газовой и жидкостной средах;
- широкий спектр энергетических и комбинированных физико-химических воздействий на упрочняемую поверхность.

Технологические процессы лазерной обработки определяются взаимодействием лазерного облучения с материалом и зависят от теплофизических

и оптических свойств обрабатываемых материалов. Основные стадии взаимодействия лазерного излучения с материалом сводятся к следующим процессам: поглощению светового потока электронами и передаче энергии кристаллической решетке твердого тела, нагреву вещества без его разрушения, разрушению вещества в зоне воздействия светового потока, разлету продуктов разрушения и остыванию после окончания действия светового импульса. Параллельно с этими процессами в обрабатываемом материале происходят активные диффузионные и химические реакции, а также фазовые превращения, существенно меняющие исходную структуру и оказывающие влияние на само взаимодействие лазерного излучения с материалом (рисунок 12.2).

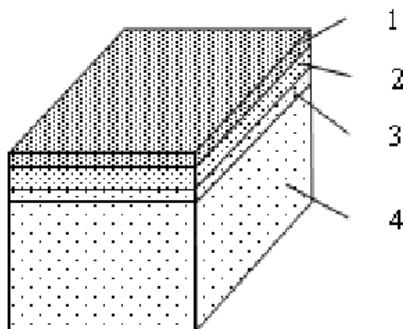


Рисунок 12.2 – Схема композиционной структуры при лазерной термической обработке

Из рисунка 12.2 видно, что упрочненная поверхность представляет собой композиционную структуру: 1 – зона расплавленного и быстро закристаллизовавшегося металла, 2 – зона термического влияния, в которой все структурные изменения происходят в твердом состоянии. Затем наблюдается переходный слой 3 и 4 – материал основы.

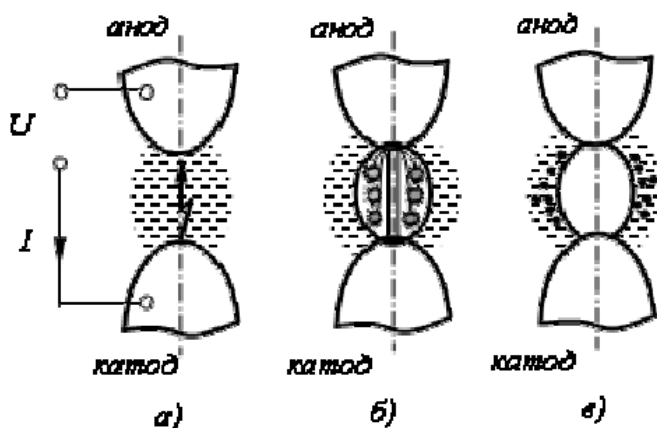
Лазерная термическая обработка позволяет повысить твердость и износостойкость упрочняемых материалов. Твердость зависит от концентрации углерода и легирующих элементов в стали. Хорошо упрочняются средне- и высоколегированные углеродистые и инструментальные стали.

Стали с низким содержанием углерода и высокопрочные низколегированные стали при лазерной обработке, упрочняются плохо. Лазерная термическая обработка не влияет на пределы прочности и текучести сталей.

### 12.1.3 Поверхностная закалка электроискровым легированием

Электроискровое легирование (ЭИЛ) относится к технологиям упрочнения, основывающимся на взаимодействии материалов с высококонцентрированными потоками энергии и вещества. Образование упрочненного слоя происходит в результате сложных плазмохимических, теплофизических и механотермических процессов, реализуемых на микролокальных участках взаимодействия материала с единичным искровым разрядом.

Процесс ЭИЛ включает следующие этапы (рисунок 12.3):



а) этап оплавления; б) электрическая эрозия;  
в) физико-химическое взаимодействие

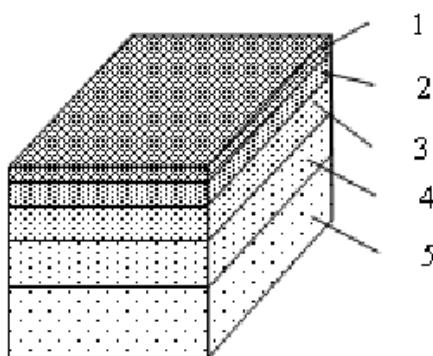
Рисунок 12.3 – Схема физических процессов в межэлектродном промежутке при электроискровом легировании

1. **Оплавление.** При сближении на определенное расстояние электрода-инструмента с упрочняемой металлической поверхностью происходит импульсный электрический разряд длительностью 10–6–10–3 с. В результате на поверхностях анода (легирующий электрод) и катода (упрочняемая деталь) образуются локальные очаги электроэрозионного разрушения.

2. **Электрическая эрозия.** Представляет собой комплексный процесс разрушения, включающий в себя оплавление, испарение, термохрупкое разрушение и другие механизмы. Эродированная масса легирующего электрода, имея избыточный положительный заряд и попадая в межэлектродное пространство, устремляется

к поверхности катода-детали, ускоряясь и нагреваясь за счет электрического поля анода и катода.

3. Физико-химическое взаимодействие. При движении анодная эродированная масса вступает в физико-химическое взаимодействие с межэлектродной средой и летучими продуктами эрозии катода-детали. К моменту осаждения фрагменты эродированной массы несут в себе электрическую, кинетическую и тепловую энергии, которые при взаимодействии с упрочняемой поверхностью выделяются в виде теплового импульса большой мощности. Вслед за осаждением эродированной массы упрочняемая поверхность подвергается контактно-деформационному воздействию вибрационного характера. Энергетическое воздействие высокой концентрации стимулирует протекание сопутствующих ЭИЛ микрометаллургических конвекционно-диффузионных процессов энергомассопереноса. Упрочненная поверхность представляет собой композиционную структуру (рисунок 12.4).



1 – зона тонкопленочных или сплошных формирований; 2 – зона смеси материалов анода и катода; 3 – зона сформированная за счет диффузии элементов легирующего электрода в упрочняемой матрице катода-детали; 4 – зона термического воздействия, плавно переходящая в структуру основного материала; 5 – основной металл.

Рисунок 12.4 – Схема композиционной структуры материала после электроискрового легирования:

Самый верхний слой состоит из тонкопленочных «островковых» или сплошных формирований, образованных из материала анода, и межэлектродной среды. Сплошность этого слоя зависит от режимов и условий упрочнения. Под верхним слоем располагается зона, представляющая собой смесь материалов анода и катода, образованную в результате конденсации ионно-плазменной и капельной фаз на упрочняемой поверхности.

Далее следует слой, сформированный за счет диффузии элементов легирующего электрода в упрочняемой матрице катода-детали. Под ним располагается зона термического воздействия, представляющая собой трансформированную структуру исходного материала с измененной плотностью дефектов кристаллического строения по причине импульсного теплового воздействия. С перемещением вглубь структура зоны термического воздействия плавно переходит в структуру основного материала. В зависимости от режимов электроискрового легирования величина и степень упрочнения каждого слоя могут варьироваться в широком диапазоне, но наибольшую толщину всегда имеет зона термического воздействия, которая в большинстве случаев и определяет эксплуатационные свойства поверхности.

Наличие тесной связи между плотностью дефектов кристаллического строения, диффузионно-адгезионной активностью модифицированной структуры и коэффициентом переноса является основой для разработки оригинальных технологий повышения качества упрочнения при ЭИЛ.

К таковым, в частности, можно отнести последовательную комбинацию поверхностно–пластического деформирования с электроискровым легированием, позволяющую повысить толщину легированного покрытия до нескольких десятых долей миллиметра, снизить уровень остаточных напряжений и стабилизировать структуру за счет уменьшения пористости.

## **12.2 Химико-термическая обработка стали**

Существует большое количество деталей, к свойствам поверхностного слоя металла которых предъявляются иные требования, нежели к свойствам внутренних слоев. Например, зубья шестерен в процессе работы испытывают сильное трение, поэтому они должны обладать большой твердостью. Однако ступица и внутренняя часть зубьев должны иметь небольшую твердость и хорошую вязкость, с тем чтобы зубья не разрушались от толчков и ударов. Следовательно, зубья шестерен должны быть твердыми на поверхности и вязкими в сердцевине. Если деталь работает в морской воде или в среде кислот и щелочей, ее поверхность должна хорошо сопротивляться коррозии. Для повышения устойчивости детали против коррозии требуется определенный химический состав ее поверхностного слоя.

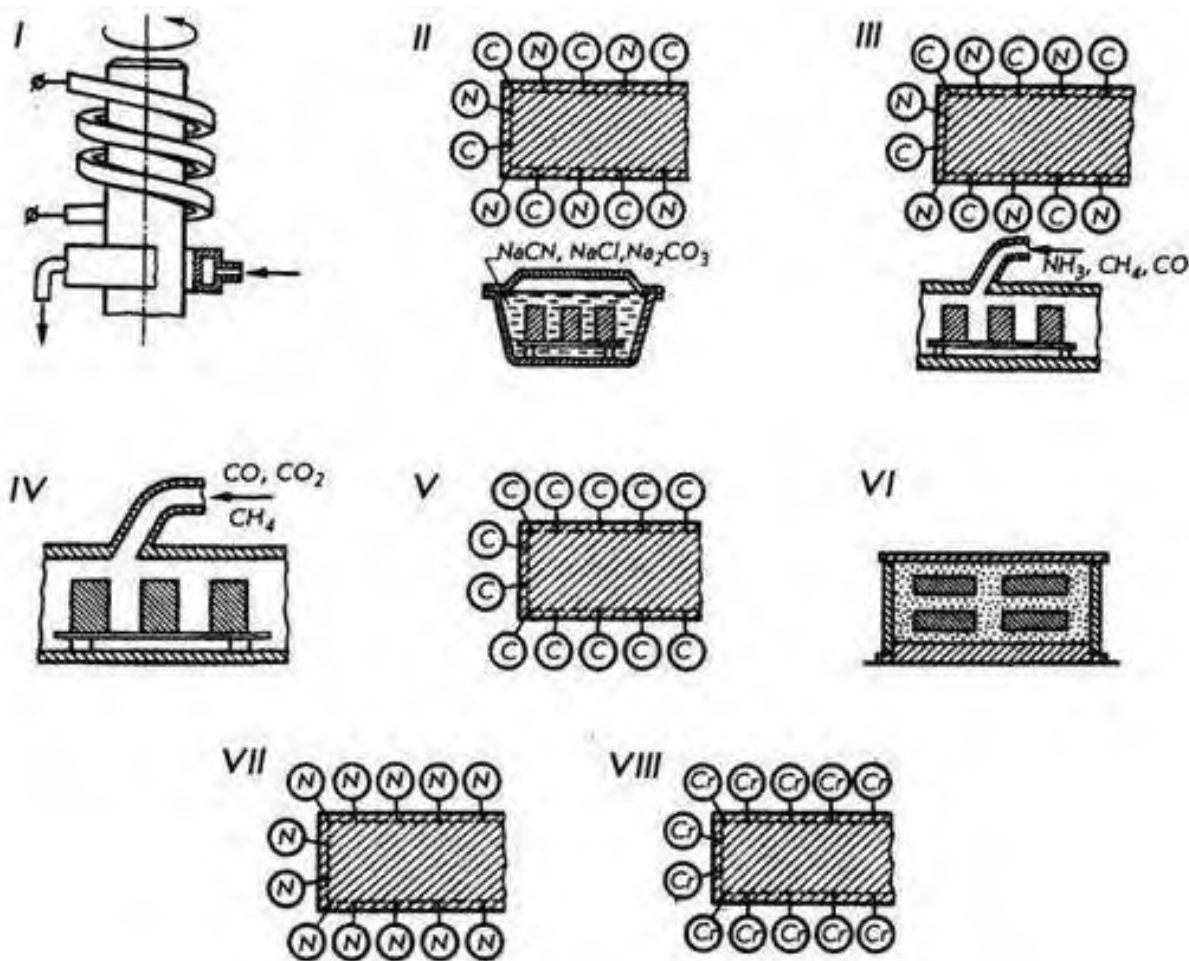
Основные виды химико-термической обработки стали представлены на рисунке 12.5.

Вместе с тем внутренние слои металла не входят в соприкосновение с указанными средами, поэтому могут иметь обычный химический состав. Для изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя деталей осуществляется их тепловая обработка в химически активной среде, называемая химико-термической обработкой.

При химико-термической обработке происходят следующие процессы: распад молекул и образование атомов диффундирующего элемента (диссоциация), поглощение атомов поверхностью (адсорбция) и проникновение атомов в глубь металла (диффузия).

### **12.2.1 Цементация**

Цементация – диффузионное насыщение поверхностного слоя детали углеродом. После цементации выполняют термическую обработку – закалку и низкий отпуск. Цементации подвергают детали, работающие на истирание, испытывающие при работе вибрацию и удары. Такие детали должны иметь твердую закаленную поверхность, хорошо сопротивляющуюся истиранию, и вязкую сердцевину, способную выдерживать динамические нагрузки. Если подобные детали изготовить из стали с высоким содержанием углерода, то после термической обработки поверхность их будет твердой и износоустойчивой, а сердцевина – твердой и хрупкой. В результате ударных нагрузок такие детали могут разрушиться. Детали из малоуглеродистой стали будут мягкими и вязкими, выдержат вибрацию и удары, но зато быстро изнашиваются при истирании. Оптимальные свойства достигаются в том случае, если детали изготавливаются из малоуглеродистой стали, а затем подвергают цементации с последующей закалкой.



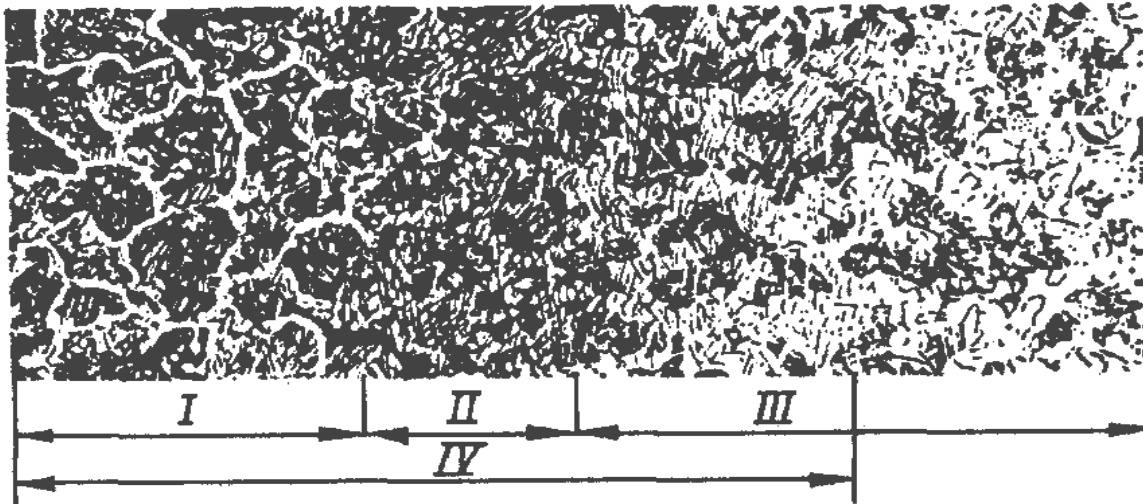
I – индукционная закалка, II – цианирование, III – нитроцементация, IV – газовая цементация, V – цементация, VI – цементация в твердом карбюризаторе, VII – азотирование, VIII – диффузное хромирование  
Рисунок 12.5 - Виды химико-термической обработки стали

На поверхности цементированной стали образуется заэвтектоидная зона (перлит и сетка цементита), далее располагается эвтектоидная зона (перлит) и при переходе к сердцевине – переходная зона (феррит и перлит). За толщину цементированного слоя принимают сумму толщин заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной зон (рисунок 12.6). С повышением температуры и времени выдержки толщина цементированного слоя увеличивается, глубина его достигает 0,5– 2 мм. На каждые 0,1 мм толщины слоя требуется выдержка около 1 ч.

К недостаткам твердой цементации следует отнести большую трудоемкость и продолжительность процесса, сложность регулирования толщины цементированного слоя и содержания углерода в нем, загрязнение воздуха угольной пылью.

Цементацию в твердом карбюризаторе применяют в мелкосерийном и единичном производствах.

При массовом и крупносерийном производствах применяется газовая цементация в специальных герметически закрытых печах. По сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе газовая цементация дает возможность повысить скорость процесса, увеличить пропускную способность оборудования и производительность труда, улучшить условия работы, осуществить автоматизацию и регулирование процесса насыщения металла углеродом.



I – заэвтектоидная; II – эвтектоидная; III – доэвтектоидная; IV – глубина цементированного слоя

Рисунок 12.6 – Микроструктура цементированной стали по зонам

Общая схема процесса цементации представлена на рисунке 12.7.

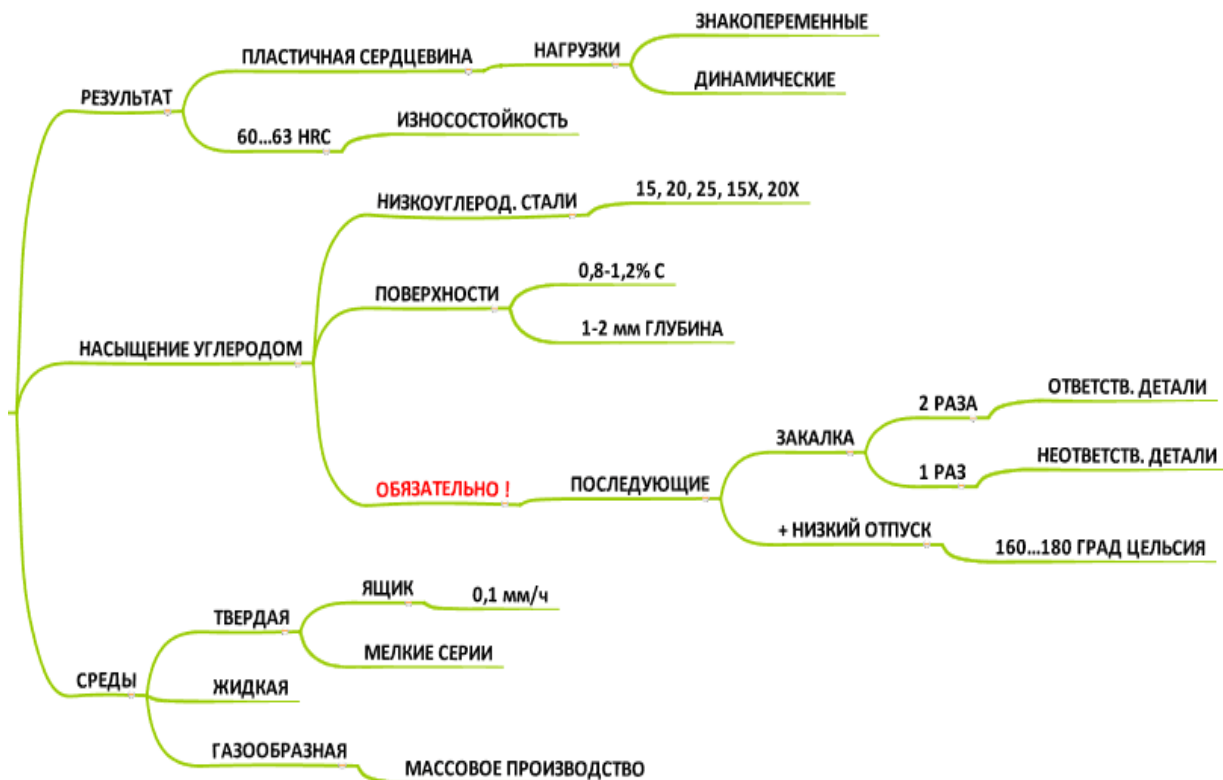


Рисунок 12.7 – Схема технологического процесса цементации стали

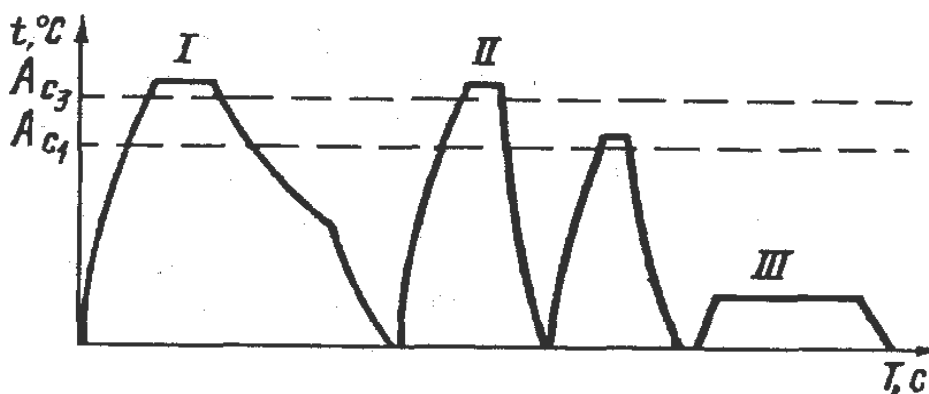
В ходе газовой цементации атомарный углерод образуется при разложении углеводородов и окиси углерода. Основным углеводородом является метан  $\text{CH}_4$ , разложение которого идет по реакции:  $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$ . Окись углерода диссоциирует по формуле  $2\text{CO} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$ .

Заданную концентрацию углерода в поверхностном слое получают путем автоматического регулирования состава газа (применяют газ-разбавитель, например эндо-

газ). Обычно для цементации используют смесь природного газа с эндогазом, что повышает активность газовой среды, характеризуемой углеродным потенциалом (под углеродным потенциалом атмосферы понимают ее науглероживающую способность, обеспечивающую определенную концентрацию углерода на поверхности цементированного слоя). Для цементирования слоя глубиной 1 мм при газовой цементации требуется 3-4 ч (при цементации в твердом карбюризаторе – 10 ч).

Защита участков поверхности от цементации и нитроцементации производится путем гальванического меднения, забивкой отверстий и внутренних полостей смесью шамотного или кварцевого песка с порошком окислы. Наиболее трудоемким и сложным является способ гальванического меднения. В последние годы довольно успешно применяют антицементационную пасту АЗЛК.

После цементации детали подвергают термической обработке для обеспечения высокой твердости поверхности, исправления структуры перегрева и устранения карбидной сетки в цементированном слое. Закалку производят при 780-850 °С с последующим отпуском при 150-200 °С. При этом происходит измельчение зерна цементированного слоя и частично зерна сердцевины. После цементации в твердом карбюризаторе в целях получения мелкозернистой структуры поверхностного слоя и сердцевины выполняют двойную закалку (рисунок 12.8).



I – цементация; II – двойная закалка; III – низкий отпуск

Рисунок 12.8 – Схема термической обработки деталей машин ответственного назначения после цементации

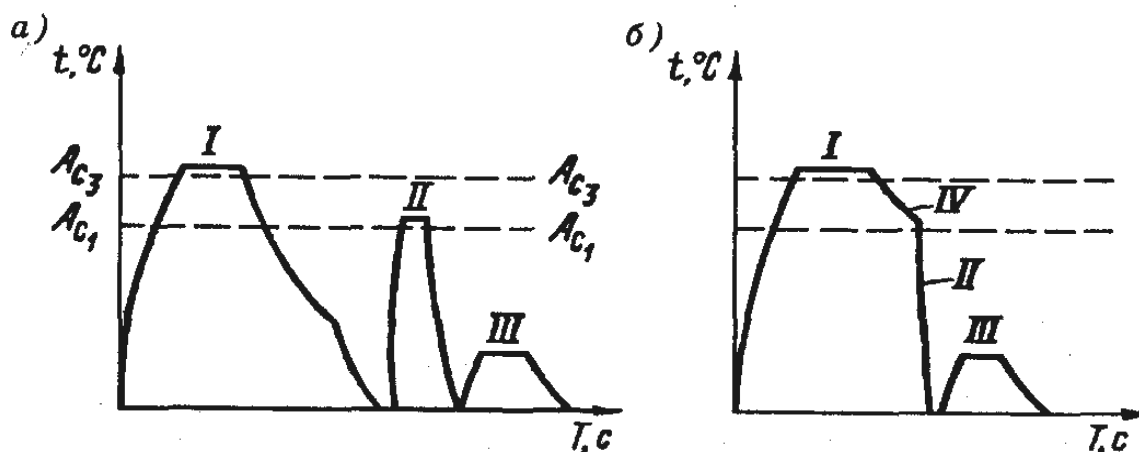
В процессе первой закалки деталь нагревают выше температуры точки  $A_{c3}$  на 30-50 °С, в результате чего измельчается структура сердцевины и устраняется цементитная сетка в поверхностном слое. При второй закалке деталь нагревают выше температуры точки  $A_{c1}$  на 30-50 °С, вследствие чего измельчается структура цементованного слоя, обеспечивается высокая твердость. Двойная закалка способствует повышению механических свойств деталей, но увеличивает их коробление, окисление и обезуглероживание. Окончательной операцией термической обработки является низкий отпуск при 150-200 °С, уменьшающий остаточные напряжения и не снижающий твердости стали.

После двойной закалки поверхностный слой имеет структуру мартенсита с равномерно распределенными карбидами и небольшим количеством остаточного аустенита. Двойную закалку применяют для тяжелонагруженных деталей машин, от которых требуются высокая твердость, прочность и ударная вязкость.

При газовой цементации детали из мелкозернистой стали подвергают закалке сразу из цементационной печи с предварительным подстуживанием до 840-860 °С



(рисунок 12.9), а затем отпуску. Подстуживание позволяет уменьшить коробление и количество остаточного аустенита, за счет чего повышается поверхностная твердость. Такой способ закалки исключает возможность окисления и обезуглероживания поверхностных слоев, уменьшает коробление, создает предпосылки для механизации и автоматизации процессов цементации, закалки и отпуска, снижает стоимость термообработки.



а – после охлаждения от цементационной температуры до комнатной;

б – с подстуживанием;

I – цементация; II – закалка; III – отпуск; IV – подстуживание

Рисунок 12.9 – Схема закалки стали после цементации

Для уменьшения количества остаточного аустенита в цементированном слое высоко- и среднелегированных сталей после закалки рекомендуется их обработка холодом (чаще проводят высокий отпуск при 600-640 °С). В целях уменьшения коробления цементированные детали (например, зубчатые колеса) следует закалывать в горячем масле при 160-180 °С либо в штампах.

В случае нарушения технологии цементации возможно появление брака – при чрезмерной глубине цементированного слоя, наличии мягких пятен на поверхности, возникновении цементированного слоя на защищенных поверхностях. При недостаточной глубине цементированного слоя, его неравномерности, пониженном количестве углерода в слое или резком перепаде его концентрации проводят повторную цементацию. Повторная закалка цементированных деталей необходима при низкой твердости поверхности, большом количестве остаточного аустенита, феррита или троостомартенсита в их сердцевине.

### 11.2.2 Азотирование

Азотирование – это химико-термическая обработка, при которой происходит диффузионное насыщение поверхностного слоя азотом. В результате азотирования обеспечиваются высокая твердость поверхностного слоя (до 72 HRC<sub>3</sub>), высокие усталостная прочность, теплостойкость, минимальная деформация, большая устойчивость против изнашивания и коррозии. Азотирование проводят при температурах 500-520 °С в течение 8-90 ч. Глубина азотированного слоя – 0,1-0,8 мм. По окончании процесса азотирования детали охлаждают до 200-300 °С вместе с печью в потоке ам-

миака, а затем на воздухе. Повышение температуры ускоряет процесс, но снижает твердость азотированного слоя.

Для нагрева деталей служат специальные герметичные печи, в которые подают аммиак  $\text{NH}_3$ . При нагреве аммиак разлагается:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}_{\text{ат}}$ . Атомарный азот  $\text{N}$  поглощается поверхностью стали и проникает в глубь ее. В поверхностном слое азот образует химические соединения – нитриды (железа  $\text{Fe}_2\text{N}$ , хрома  $\text{CrN}$ , молибдена  $\text{MoN}$ , алюминия  $\text{AlN}$ ), которые придают стали большую твердость (до 1200 HV). Поверхностный слой не поддается травлению. Глубже него находится сорбитообразная структура.

Азотирование проводят по одноступенчатому и двухступенчатому режимам. По одноступенчатому режиму азотируют инструмент из быстрорежущей стали (метчики, зенкеры, сверла, фрезы). Стойкость такого инструмента после обработки увеличивается в два-три раза. Двухступенчатое азотирование применяют для упрочнения штампов горячей штамповки и штамповых вставок. Стойкость штампового инструмента в результате азотирования повышается в 1,5-2 раза. Двухступенчатый режим азотирования позволяет сократить время обработки деталей в два раза. На первой ступени процесс ведут при 500-510 °С с выдержкой 8-10 ч, на второй ступени – при 570-590 °С в течение 18-20 ч. Детали охлаждают вместе с печью до 200 °С. При двухступенчатом режиме азотированный слой получается с меньшей хрупкостью.

Азотированию в целях повышения твердости поверхности подвергают зубчатые колеса, гильзы, валы и другие детали из сталей 38ХМЮА, 38ХВФЮА, 18Х2Н4ВА, 40ХНВА и др.

Общая схема процесса азотирования представлена на рисунке 12.10.

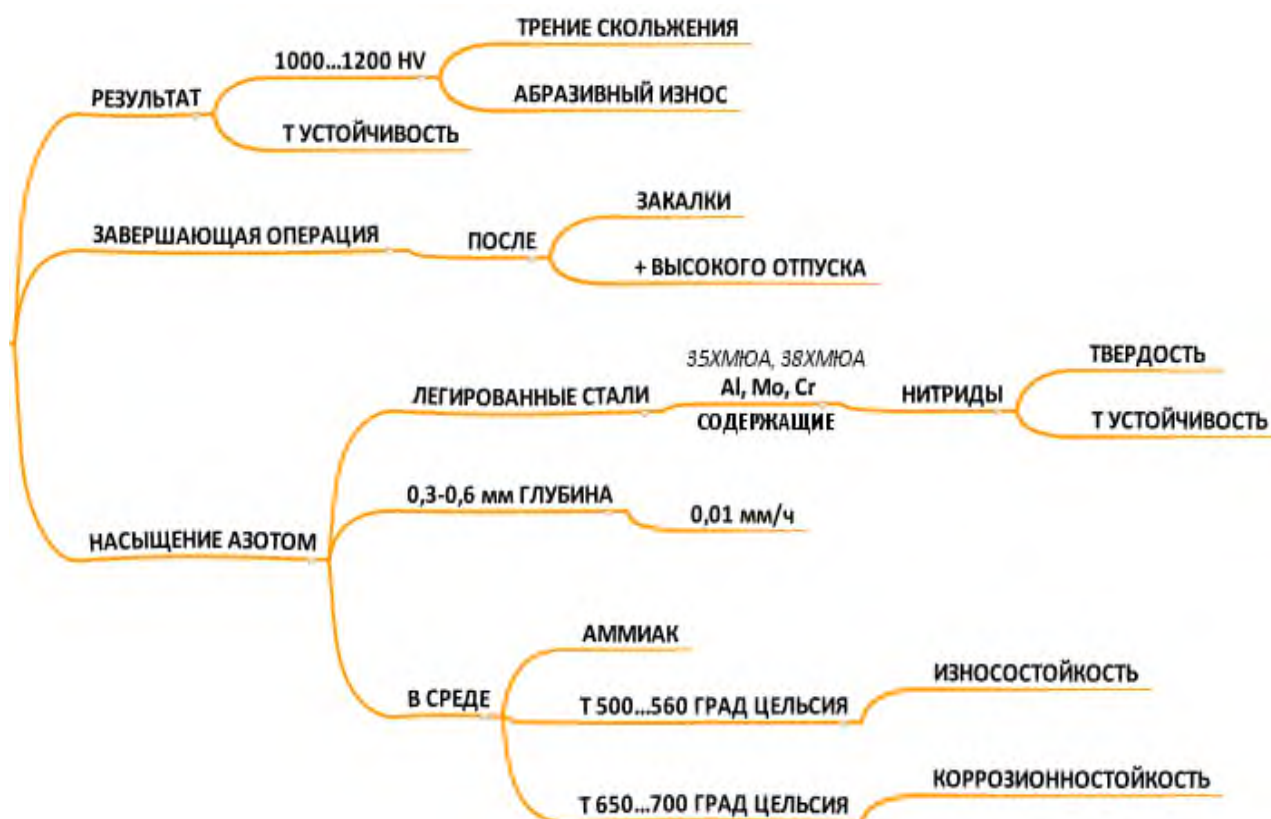


Рисунок 12.10 – Технологическая схема процесса азотирования стали

Азотирование – последняя операция в технологическом процессе изготовления деталей. Перед азотированием проводят полную термическую и механическую обра-

ботку (даже шлифование), после азотирования допускается только доводка со съемом металла до 0,02 мм на сторону.

Антикоррозионное азотирование любых сталей выполняют на небольшую глубину при температурах 600-700 °С в течение 1-2 ч. Такое азотирование часто совмещают с закалкой при 770-850 °С (стали У8, У10 и др.) с выдержкой 10-15 мин и охлаждением в воде или масле.

В ряде отраслей промышленности используют ионное азотирование, ионитрирование или азотирование в плазме тлеющего разряда. Благодаря своим преимуществам эти виды азотирования постепенно вытесняют газовое азотирование.

Ионное азотирование осуществляют в герметичном контейнере, в котором создается разреженная азотосодержащая атмосфера. Для этой цели применяют чистый азот, аммиак или смесь азота и водорода. Размещенные внутри контейнера детали подключают к отрицательному полюсу источника постоянной электродвижущей силы. Они выполняют роль катода. Анодом служит корпус контейнера. Между анодом и катодом включают высокое напряжение (500-1000 В) – происходит ионизация газа. Образующиеся положительно заряженные ионы азота устремляются к отрицательному полюсу – катоду. Электрическое сопротивление газовой среды вблизи катода резко возрастает, вследствие чего почти все напряжение, подаваемое между анодом и катодом, падает на сопротивление вблизи катода (на расстоянии нескольких миллиметров от него). Возле катода создается высокая напряженность электрического поля. Ионы азота, входя в эту зону высокой напряженности, приобретают большие скорости и, ударяясь о деталь (катод), внедряются в ее поверхность. Высокая кинетическая энергия, которой обладали ионы азота, переходит в тепловую. Деталь за короткое время (15-30 мин) разогревается до 470-580 °С, происходит диффузия азота в глубь металла, т. е. азотирование. При соударении ионов с поверхностью детали ионы железа выбиваются с ее поверхности, за счет чего обеспечивается очистка поверхности от окисных пленок, препятствующих азотированию. Это особенно важно для азотирования коррозионно-стойких сталей, у которых пассивирующая пленка обычными способами удаляется с большим трудом.

Ионное азотирование по сравнению с азотированием в печах позволяет сократить общую продолжительность процесса в два-три раза, уменьшить деформацию деталей за счет равномерного нагрева, создает возможность регулирования процесса в целях получения азотированного слоя с заданными свойствами. Азотирование коррозионно-стойких сталей и сплавов достигается без дополнительной депассивирующей обработки. Достигается толщина азотированного слоя 1 мм и более, твердость поверхности – 500-1500 НV. Ионному азотированию подвергают детали насосов, форсунок, ходовые винты станков, валы и многое другое.

### **12.2.3 Цианирование**

Цианирование – процесс химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом и азотом в расплавленных цианистых солях. Результаты цианирования определяются глубиной слоя, а также концентрацией углерода и азота в поверхностном слое и зависят от температуры и продолжительности процесса. Повышение температуры приводит к увеличению содержания углерода в слое, снижение – к росту содержания азота. Глубина цианированного слоя с повышением температуры возрастает. В зависимости от температуры различают три вида цианирования: низко-, средне- и высокотемпературное.

Низкотемпературное цианирование производят при 550-570 °С в соляных ваннах, содержащих 40 % цианистого калия (KCN) и 60 % цианистого натрия (NaCN), через которые пропускают сухой воздух. Насыщение стали азотом в этом случае происходит в большей степени, чем углеродом. Низкотемпературное цианирование применяют в целях повышения твердости, износостойкости и теплостойкости инструмента из быстрорежущей стали, а также деталей из среднеуглеродистых сталей. Продолжительность процесса 0,5-3 ч. Глубина цианированного слоя 0,015-0,04 мм. Среднетемпературное цианирование выполняют при 800-820 °С в расплавленных солях, содержащих 40 % цианистого натрия (NaCN), 40 % хлористого натрия (NaCl) и 20 % кальцинированной соды (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Продолжительность процесса 30-90 мин. Глубина цианированного слоя 0,15-0,35 мм. Детали закаливают прямо из цианистой ванны, а затем отпускают при 180-200 °С. Твердость цианированного слоя после термической обработки 52-62 HRC<sub>3</sub>. Планируемый слой содержит 0,8-1,2 % азота и 0,6-0,7 % углерода. Высокотемпературное цианирование проводят при 930-960 °С в расплавленных солях, содержащих 8 % цианистого натрия, 10 % хлористого натрия и 82 % хлористого бария (BaCl<sub>2</sub>). Продолжительность процесса 1,5-6 ч. Глубина цианированного слоя 0,15-2 мм. Поскольку высокая температура цианирования вызывает рост размеров зерна аустенита, непосредственную закалку не производят. Детали сначала охлаждают на воздухе, а затем подвергают закалке и низкому отпуску. Твердость цианированного слоя после термической обработки 63-65 HRC<sub>3</sub>. Цианированный слой содержит 0,2-0,3 % азота и 0,8-1,2 % углерода. По сравнению с цементацией высокотемпературное цианирование уменьшает возможность деформации и коробления деталей сложной формы, обеспечивает более высокое их сопротивление изнашиванию и коррозии, требует меньше времени для проведения процесса. Недостатки цианирования – сильная ядовитость цианистых солей (для каждой ванны необходимо иметь отдельное помещение и совершенные вентиляционные устройства) и относительно высокая стоимость процесса.

#### 12.2.4 Нитроцементация

Нитроцементацией называется процесс химико-термической обработки, при котором происходит одновременное насыщение поверхностных слоев стальных изделий углеродом и азотом в газовой среде. Процесс осуществляют в газовой смеси из науглероживающего газа и диссоциированного аммиака при 850-870 °С, время выдержки 2-10 ч, толщина получаемого слоя 0,2-1 мм. После нитроцементации детали закаливают и затем подвергают низкому отпуску при 160-180 °С. Твердость поверхностного слоя 60-62 HRC<sub>3</sub>, при нитроцементации совмещают процессы газовой цементации и азотирования. В газовую смесь входят эндогаз, до 13 % природного газа и до 8 % аммиака. В рабочее пространство шахтной печи вводят в виде капель жидкий карбюризатор – триэтанолламин.

При глубине слоя больше 1 мм трудно предотвратить его пересыщение азотом и образование дефектов структуры, снижающих усталостную прочность. Поэтому для легированных сталей процесс выполняют в атмосфере с минимальным количеством аммиака (до 3 %). В этом случае насыщение слоя углеродом происходит значительно интенсивней, чем азотом. Такой процесс называют карбонитрованием. Нитроцементации подвергают преимущественно малолегированные и углеродистые стали при повышенном содержании в них аммиака. По сравнению с газовой цементацией нитроцементацию проводят при более низкой температуре с меньшей продолжительностью.

стью процесса, что обеспечивает большую износостойкость деталей, меньшее их коробление, позволяет регулировать насыщение поверхностного слоя.

Общая схема процесса нитроцементации представлена на рисунке 12.11.

По сравнению с жидкостным цианированием нитроцементация имеет следующие преимущества: 1) безопасность процесса (отсутствуют ядовитые цианистые соли); 2) возможность регулирования процесса (изменение количеств подаваемого цементующего газа и аммиака); 3) дешевизна процесса (стоимость цементующего газа и аммиака ниже стоимости цианистых солей).



Рисунок 12.11 – Схема технологического процесса нитроцементации стали

По сравнению с газовой цементацией нитроцементация также имеет преимущества: более низкая температура процесса (840–860° С вместо 900–950° С), меньшая продолжительность процесса, меньшее выделение сажи, большая износостойкость деталей, увеличение срока службы печи и уменьшение расхода топлива (удешевление процесса). Нитроцементацию разделяют на высокотемпературную (для деталей из конструкционных сталей) и низкотемпературную (для режущего инструмента из быстрорежущих сталей).

Высокотемпературную нитроцементацию деталей из углеродистых и легированных сталей проводят при температуре 820–870° С (иногда до 950° С). Высокотемпературная нитроцементация широко внедряется в промышленность, вытесняя не только жидкостное цианирование, но и газовую цементацию благодаря повышенной износостойкости и коррозионной стойкости, возможности комплексной механизации с автоматическим регулированием процесса, более высокой прокаливаемости и закаливаемости нитроцементированного слоя, что позволяет заменять сложнолегированные стали менее легированными и углеродистыми. На результат нитроцементации влияют температура, продолжительность выдержки и соотношение цементующего газа и аммиака. С повышением температуры увеличиваются толщина слоя и содержание углерода, а содержание азота в поверхностном слое уменьшается. Газовым карбюризатором

ром при нитроцементации является смесь эндотермического газа, природного газа и аммиака.

После нитроцементации детали подвергают непосредственной закалке (с подстуживанием). Для уменьшения коробления целесообразно проводить ступенчатую закалку в щелочной или масляной ванне, имеющей температуру 180 - 200° С. Так как азот увеличивает устойчивость переохлажденного аустенита и уменьшает критическую скорость закалки, можно применять ступенчатую закалку в горячих средах для крупных деталей.

В нитроцементированном слое при охлаждении в процессе закалки до температуры 20° С аустенит превращается в мартенсит; при этом в слое сохраняется большое количество остаточного аустенита (20–40%). Для более полного превращения остаточного аустенита в мартенсит применяют обработку холодом и дробеструйный наклеп (возможно одновременное применение этих методов), что позволяет повысить не только твердость, но и предел выносливости (в нитроцементированном слое возникают напряжения сжатия).

После нитроцементации и закалки детали подвергают низкому отпуску. Для деталей, твердость которых должна быть выше HRC 60, температура отпуска принимается равной 160–170 °С; для деталей твердостью HRC 57–58, работающих в условиях значительных ударных нагрузок, температура отпуска не ниже 200–210 °С.

### 12.2.5 Борирование

Борирование – диффузионное насыщение поверхностного слоя стали бором при нагреве в соответствующей среде в целях повышения твердости, коррозионной стойкости, теплостойкости и жаростойкости поверхностей стальных деталей. Различают два способа борирования: электролизное и газовое. При электролизном борировании в тигель с расплавленной бурой (950 °С) помещают графитовый стержень (анод) и обрабатываемое изделие (катод). Бура разлагается, образуя атомарный бор, диффундирующий в поверхность детали. Газовое борирование осуществляют при 850-900 °С в газовой смеси, состоящей из диборана  $B_2H_6$  и водорода. Толщина борированных слоев не превышает 0,3 мм. Твердость 1800-2000 HV. Недостаток борированного слоя – высокая хрупкость. Борированию подвергают траки, втулки грязевых и нефтяных насосов и другие сильно изнашивающиеся детали

#### *Классификация методов борирования:*

##### *1. Борирование в порошках в герметизируемых контейнерах.*

В качестве насыщающих сред при этом способе борирования можно использовать порошки аморфного и кристаллического бора, карбида бора, ферробора, боридов переходных металлов. С целью предотвращения спекания порошков в них часто вводят инертные добавки ( $Al_2O_3$ , MgO и др.) в количестве от 20 до 60% , а для ускорения процесса - активаторы (NaF,  $AlF_3$ ,  $KBF_4$  и др.) в количестве 1-5% от массы смеси. Из известных смесей для борирования в порошках предпочтение следует отдать следующим смесям на основе карбида бора: 1) 100 %  $B_4C$ ; 2) 98,5...98 %  $B_4C$  + 1,5...2,0 %  $AlF_3$ . Перед использованием компоненты порошковых смесей подсушивают, измельчают, просеивают, дозируют в необходимых количествах и смешивают. Карбид бора перед употреблением рекомендуется прокалить при температуре 350-400°С в течение 1,5-2 ч. Отработанные смеси регенерируются путем добавления 20-30% свежей смеси. Температура формирования плавкого затвора должна находиться в пределах 500-700°С. Насыщение проводят при температуре 900-1000°С в течение 2-6 ч. Дли-

тельность выдержки выбирают исходя из требуемой толщины боридного слоя. Как показывает опыт, для подавляющего большинства изделий боридный слой толщиной 80-150 мкм оказывается вполне достаточным. Длительность прогрева тигля устанавливается из расчета 30 мин на 100 мм сечения тигля. После истечения времени выдержки контейнеры выгружают из печи, охлаждают на воздухе и распаковывают. С целью устранения припекания смеси к поверхности деталей рекомендуется их извлекать из контейнера при температуре не ниже 80°C.

### **2. Газовое борирование.**

Газовое борирование проводят в специальных установках за счет разложения газообразных соединений бора: диборана ( $B_2H_6$ ), треххлористого бора ( $BCl_3$ ), трехбромистого бора бора ( $BBr_3$ ), триметил  $[(CH_3)_3B]$  и других веществ. В технологическом отношении процесс газового борирования подобен процессам газовой цементации или азотирования. Борируемые детали собирают, как правило, на специальных приспособлениях и загружают в реакционную камеру, нагретую до заданной температуры, после чего реактор герметизируя установку продувают (3-5 мин) инертным газом и создают избыточное давление (200-400 мм. рт. ст.). После достижения указанного давления через инжекторный смеситель в реактор подают борсодержащий газ. Наиболее часто для борирования применяют диборан и треххлористый бор, который разбавляют водородом, аргоном, очищенным азотом или аммиаком. Наибольшая скорость процесса наблюдается при использовании смесей  $B_2H_6$  и  $BCl_3$  с водородом. Соотношение диборана и водорода должно быть в пределах 1/25-1/225, а треххлористого бора и водорода - 1/15- 1/20. Замена водорода азотом или аммиаком уменьшает скорость процесса, но уменьшает и его взрывоопасность, поэтому такую замену следует считать целесообразной. Насыщение проводят при температурах 800-850°C. Время выдержки варьируется от 2 до 6 ч. Существенное влияние на результаты борирования оказывает скорость газового потока. Для каждой установки она подбирается индивидуально. При рекомендованных режимах борирования на углеродистых сталях формируется боридный слой толщиной 50-200 мкм. По окончании процесса борирования подачу борсодержащего газа прекращают, а газ- разбавитель пропускают через установку еще 5-10 мин. По истечении указанного времени давление в реакторе уменьшают до атмосферного, прекращают подачу инертного газа, разгерметизируют установку и извлекают борированные детали.

### **3. Электролизное борирование.**

Электролизное борирование проводят на специальных установках, основными составными частями которых являются печь-ванна с металлическим тиглем, система питания постоянным током, система автоматического контроля и регулирования температуры. Подготовленные к насыщению детали монтируют на специальных приспособлениях и подключают в цепь электролиза в качестве катода. Анодами служат графитовые (реже силиконовые) стержни. Перед началом процесса детали прогревают в электролите 10-30 мин, затем включают ток электролиза, величина которого устанавливается из расчета  $1 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^3$  А/м<sup>2</sup> борируемых деталей и приспособления, и ток защиты тигля  $1 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^2$  А/м<sup>2</sup> поверхности тигля, находящейся в расплаве. Режим процесса электролизного борирования выбирают в зависимости от требуемой толщины слоя. Электролизное борирование применяется преимущественно в массовом производстве при обработке однотипных изделий.

### **4. Жидкостное (безэлектролизное) борирование.**

Жидкостное (безэлектролизное) борирование можно проводить в любых печаваннах, обеспечивающих получение требуемой температуры. Обычно для этих целей

применяют те же печи, что и для электролизного борирования. В качестве насыщающих сред используют расплавы на основе боратов щелочных металлов (преимущественно  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), в которые добавляют электрохимические восстановители: химически активные элементы (Al, Si, Ti, Ca, Mn, B и др.) или ферросплавы, лигатуры и химические соединения на их основе - ферромарганец (ФМн95), силикомарганец (СМн17), силикоцирконий (СиЦр50), карбид бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ), карбид кремния (SiC), силикокальций (СК25). Указанные вещества вводят в расплав в виде порошка с размером частиц 0,05-0,6 мм (в зависимости от природы и удельной массы восстановителя). Оптимальное содержание восстановителя в расплаве колеблется от 20 до 40% по массе. Для получения двухфазных ( $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ ) слоев можно рекомендовать следующие расплавы: 1) 60-70 %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + 40-30 %  $\text{B}_4\text{C}$ ; 2) 80 %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + 20 % СК25, а для получения однофазных ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) слоев: 1) 70 %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + 30 % SiC; 2) 70 %  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + 30 % СМн17. Наиболее рационально применение данного способа борирования в мелкосерийном и серийном производствах.

#### **5. Борирование в обмазках (из паст).**

Борирование в обмазках (из паст) целесообразно применять при упрочнении крупногабаритных изделий, а также при необходимости местного борирования. Развитие этого направления в борировании стимулируется также возможностью совмещения борирования с применяемыми на предприятиях режимами термической обработки упрочняемых деталей. Технология процесса борирования из паст предусматривает выполнение следующих операций: приготовление обмазки, подготовка упрочняемой поверхности к насыщению, нанесение и сушка обмазки, борирование деталей по заданному режиму, охлаждение и очистка деталей от пасты. Основные компоненты пасты тщательно смешивают в специальных смесителях и разбавляют связующим до требуемой консистенции. В качестве связующих используют гидролизованый этилсиликат, жидкое стекло, сульфитно-спиртовую барду, декстриновый клей и т. д. Консистенция пасты определяется в основном выбранной технологией ее нанесения на детали: пульверизацией, окунанием, кистью. После завершения режима насыщения детали охлаждают на воздухе или подвергают непосредственной закалке.

При сравнительной оценке существующих методов борирования в первую очередь необходимо учитывать их технологические достоинства и недостатки, производительность (скорость насыщения) и стоимость (экономическую эффективность). В таблице 12.1 представлена сравнительная характеристика методов борирования.

В настоящее время не существует метода борирования, который бы по своим технико-экономическим показателям значительно превосходил все остальные. Каждый из методов борирования имеет достоинства и недостатки. Выбор метода должен проводиться с учетом характера обрабатываемых изделий, условий их работы, массы изготовления экономичности и т.д.



Таблица 12.1 – Сравнительная характеристика методов борирования

№	Метод	Достоинства	Недостатки
1	Жидкостное борирование (безэлектролизное)	Технологическая простота, отсутствие специального оборудования	Повышенная вязкость применяемых расплавов по сравнению с чистой бурой
2	Электролизное борирование	Высокое качество боридных слоев, высоко-производительное	Необходима специальная энергоемкая установка
3	Борирование в порошковых средах	Простота технологического оборудования, упрочнение изделий сложных форм, минимальная деформация при обработке	Наибольшие денежные затраты на порошковую смесь
4	Газовое борирование	Упрочнение изделий сложных форм	Взрывоопасен

### Контрольные вопросы

- 1) Назовите основные виды поверхностного упрочнения стали?
- 2) Опишите метод поверхностной закалки токами высокой частоты.
- 3) Опишите метод поверхностной закалки лазерным упрочнением.
- 4) Опишите метод поверхностной закалки электроискровым легированием.
- 5) Что называют химико-термической обработкой стали?
- 6) Перечислите основные виды химико-термической обработкой стали.
- 7) Что называют цементацией?
- 8) Что называют азотированием?
- 9) Что называют борированием?

## 13 Цветные металлы и сплавы

Ценные свойства цветных металлов обусловили их широкое применение в различных отраслях современного производства.

### 13.1 Медь и её сплавы

Медь обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, прочностью, вязкостью и коррозионной стойкостью. Физические свойства ее обусловлены структурой. Она имеет кубическую гранцентрированную пространственную решетку. Температура плавления ее 1083 °С, кипения – 2360 °С. Средний предел прочности зависит от вида обработки и составляет от 220 до 420 МПа (22-45 кгс/мм<sup>2</sup>). Относительное удлинение 4-60 %, твердость 35-130НВ, плотность 8,94 г/см<sup>3</sup>. При 20°С удельная теплоемкость равна 0,092 кал/(ч·°С), теплопроводность – 0,94 кал/(с·см·°С). Удельное электрическое сопротивление 0,0178 Ом/(мм<sup>2</sup> · м), линейная усадка 2,1 %. Прочность меди увеличивается в 1,5 раза после холодной деформации (наклепа), но при этом относительное удлинение ее снижается до 8-10 %. В зависимости от степени чистоты и состояния поверхности цвет меди изменяется от светло-розового до красного.

#### 13.1.1 Медь (ГОСТ 859-78)

Обладая замечательными свойствами, медь в то же время как конструкционный материал не удовлетворяет требованиям машиностроения, поэтому ее легируют, т. е. вводят в ее состав такие металлы, как цинк, олово, алюминий, никель и др., за счет чего улучшаются ее механические и технологические свойства. По химическому составу медные сплавы подразделяют на латуни, бронзы и медноникелевые, по технологическому назначению – на деформируемые, используемые для производства полуфабрикатов (проволоки, листа, полос, профиля), и литейные, применяемые для литья изделий.

#### 13.1.2 Латунь

Латуни сплавы меди с цинком и другими компонентами, они содержат кроме цинка другие легирующие элементы, называются сложными, или специальными, и именуются по вводимым, кроме цинка, легирующим компонентам. Например: железомарганцевая (ЛЖМц59-1-1), алюминиевоникелькремнистомарганцевая (ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5) и др.

Латуни получили широкое распространение благодаря сочетанию высоких механических и технологических свойств. Структура и свойства латуней определяется диаграммой состояния «Cu - Zn» (рисунок 13.1).

Содержание цинка в кристаллической решетке может достигать 39%. Латуни, состоящие из меди и цинка, называют *простыми*. Они могут быть однородными (до 39% цинка) и двухфазными (более 39% цинка). Однофазные латуни имеют высокую пластичность, т. к. состоят из однофазного  $\alpha$ -твёрдого раствора. Двухфазные латуни при наличии Р-фазы имеют более высокую прочность, но пластичность при этом снижается (рисунок 13.2).

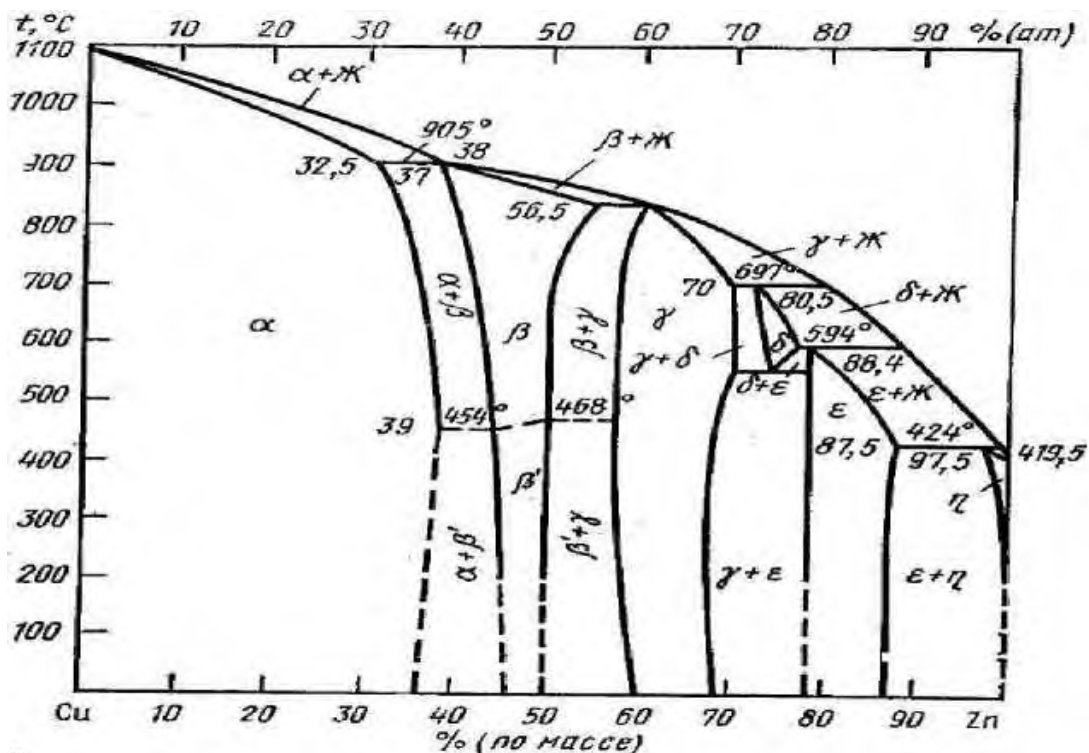


Рисунок 13.1 - Диаграмма состояния системы «Cu - Zn»

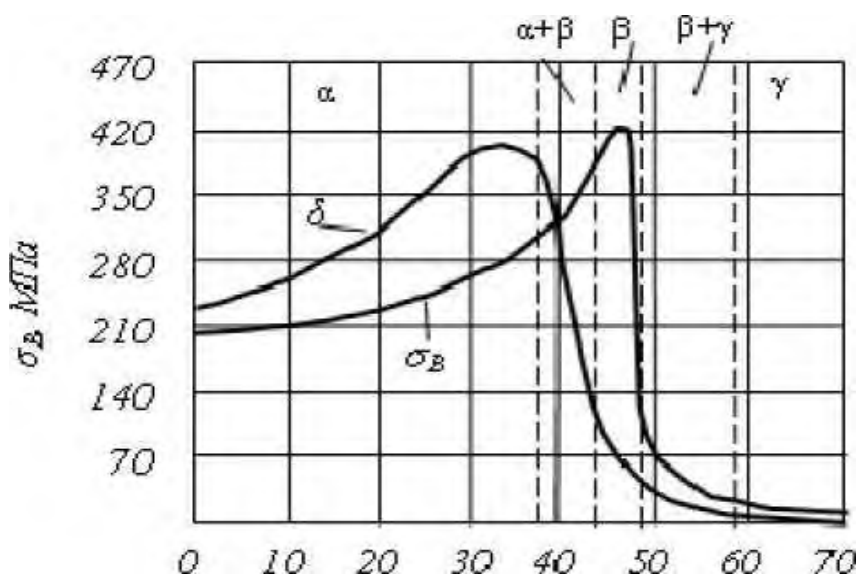


Рисунок 13.2 - Влияние содержания цинка на свойства латуней

Специальные (многокомпонентные) латуни содержат и другие легирующие элементы: алюминий (Al), никель (Ni), Марганец (Mn), олово (Sn) и др. Алюминий, кремний, марганец и никель повышают механические свойства латуни и сопротивляемость коррозии, а свинец улучшает обрабатываемость резанием.

В обозначении марок латуней принята буквенно-цифровая система. Первая буква означает «латунь», остальные буквы соответствуют условным обозначениям химических элементов, входящих в латунь; первая цифра указывает на содержание меди, остальные цифры – на содержание других легирующих элементов. Содержание цинка в обозначении марки не указывается.

Для того чтобы определить содержание цинка в латуни, необходимо от 100 % вычесть процентное содержание меди и других химических элементов, входящих в

данную латунь. Например: томпак Л90 – это латунь, содержащая 90 % меди, остальное – цинк; латунь алюминиевая ЛА77-2 – 77 % меди, 2 % алюминия, остальное – цинк; латунь алюминированноникелькремнистомарганцовая ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5 – 75 % меди, 2 % алюминия, 2,5 % никеля, 0,5 % кремния, 0,5 % марганца, остальное – цинк.

Для обозначения марок латуней по СТ СЭВ 379-76 приняты латинские буквы. За латинской буквой, соответствующей химическому элементу, следует цифра, определяющая его процентную долю. Например: CuZn40 – 40 % цинка, остальное – медь; CuZn28Sn1 – 28 % цинка, 1 % олова, остальное – медь; CuZn40AlMn – 40 % цинка, 1% алюминия, около 1% марганца, остальное – медь.

Области применения и механические свойства наиболее массовых марок латуней представлены в таблице 13.1

Таблица 13.1 - Области применения и механические свойства латуней

Сплав	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Назначение
Деформируемые			
ЛАЖ60-1-1	450	8	Тубы, прутки
ЛЖМц59-1-1	450	10	Полосы, прутки, мелкие поковки
ЛС59-1	400	6	Мелкие поковки
Литейные			
ЛЦ40С	215	12	Втулки, сепараторы
ЛЦ40Мц5Ж	440	10	Винты, лопасти
ЛЦ30А3	300	12	Коррозионно-стойкие детали

По сравнению с медью латуни обладают большей прочностью, коррозионной стойкостью и упругостью. Они обрабатываются литьем, давлением и резанием. По технологическому назначению их подразделяют на обрабатываемые давлением и литейные.

Латуни, обрабатываемые давлением. Из них изготавливают полуфабрикаты (листы, ленты, полосы, трубы конденсаторов и теплообменников, проволоку, прутки, фольгу, поковки, штамповки), медали и значки, художественные изделия, музыкальные инструменты, сифоны, гибкие шланги, застежки-молнии, подшипники скольжения и разную фурнитуру.

### 13.1.3 Бронзы

Бронзы – это сплавы на основе меди, в которых в качестве добавок используют олово, алюминий, бериллий, кремний, свинец, хром и другие элементы. Как и латуни, бронзы подразделяют на литейные и обрабатываемые давлением. В обозначении марок бронз принята та же система, что и у латуней, только в начале проставляют буквы Бр, означающие – «бронза».

Области применения и механические свойства наиболее массовых марок бронз представлены в таблице 13.2

Химический состав и механические свойства оловянных литейных бронз регламентированы ГОСТ 613-79. Эти бронзы получают литьем в песчаные формы или в кокиль.

Таблица 13.2 - Области применения и механические свойства бронз

Сплав	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	Назначение
Деформируемые			
БрОФ6,5-0,4	400	5	Арматура
БрОЦ4-3	330	4	Пружины
БрОЦС4-4-2,5	350	2	Антифрикционные детали
Литейные			
ЛЦ40С	200	8	Арматура
ЛЦ40Мц5Ж	175	4	Вкладыши подшипников
ЛЦ30А3	150	5	Антифрикционные детали

Безоловянные литейные бронзы в чушках применяют в качестве шихтового материала для получения бронз по ГОСТ 493-79. Этот стандарт полностью соответствует рекомендациям СЭВ (РС 1586-75). ГОСТ 493-79 предусмотрены марки безоловянных бронз, а также изделия, изготавливаемые из этих бронз:

Бериллиевые бронзы. БрБ2 (CuBe2Ni[Co]), БрБНТ1,9 (CuBe2NiTi), БрБНТ1,9Mg – обладают высокой прочностью и износостойкостью, хорошими пружинящими и антифрикционными свойствами, средними электропроводностью и теплопроводностью, деформируются в закаленном состоянии. Из этих бронз изготавливают пружины и пружинящие детали ответственного назначения, износостойкие детали всех видов, искрящий инструмент.

Кремниевые бронзы. БрКМц3-1 (CuSi3MnI) – коррозионностойкая, жаропрочная, имеет высокое сопротивление сжатию, пригодна для сварки. Применяется для изготовления деталей для химических аппаратов, пружин и пружинящих деталей, сварных конструкций и деталей для судостроения.

БрКН1-3 – обладает высокими механическими, технологическими и антифрикционными свойствами. Предназначена для производства ответственных деталей в моторостроении, а также направляющих втулок.

Марганцевая бронза. БрМц5 – имеет высокие механические свойства, хорошо деформируется в горячем и холодном состояниях, коррозионностойкая, жаропрочная. Из этой бронзы изготавливают детали, работающие при повышенных температурах.

Кадмиевая и магниевая бронзы. БрКд1 (CuCdI) и БрMg0,3 – отличаются высокой электропроводностью и жаропрочностью. Их используют при производстве коллекторов электродвигателей и деталей машин контактной сварки.

Из безоловянистых бронз, обрабатываемых давлением, изготавливают полуфабрикаты: листы, полосы, ленты, прутки профили, трубы, проволоку и поковки.

### 13.2 Алюминий и его сплавы

Алюминий - серебристо-белый пластичный металл. В воздушной среде он быстро покрывается окисной пленкой, которая надежно защищает его от коррозии. Алюминий химически стоек против воздействия азотной и органических кислот, но разрушается щелочами, а также соляной и серной кислотами. Важнейшее свойство алюминия – небольшая плотность (2,7 г/см<sup>3</sup>), т. е. он в три раза легче железа. Температура плавления 660 °С, теплоемкость 0,222 кал/г, теплопроводность при 20 °С 0,52 кал/(см·с·°С), удельное электрическое сопротивление при 0 °С составляет 0,286 Ом/(мм<sup>2</sup> · м). Механические свойства алюминия невысоки: сопротивление на разрыв 50-90 МПа (5-9 кгс/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение 25-45 %, твердость 13-

28 НВ. Высокая пластичность (максимальная пластичность достигается отжигом при температурах 350-410 °С) этого металла позволяет прокатывать его в очень тонкие листы (фольга имеет толщину до 0,003 мм). Алюминий хорошо сваривается, однако трудно обрабатывается резанием, имеет большую линейную усадку – 1,8 %. Для повышения прочности в алюминий вводят кремний, марганец, медь и другие компоненты. Кристаллическая решетка алюминия – куб с центрированными гранями,  $a = 0,404 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (4,04 Å).

Значительные природные запасы алюминия, его небольшая плотность, высокие антикоррозионные свойства, хорошая электропроводность способствовали широкому распространению этого металла в различных отраслях техники: самолето- и машиностроения, строительства зданий, линий электропередач, подвижного состава железных дорог. В металлургии алюминий служит для получения чистых и редких металлов, а также для раскисления стали. Из него изготавливают различные емкости и арматуру для химической промышленности. В пищевой промышленности применяют упаковочную фольгу, алюминиевая посуда. Алюминий хорошо подвергается различным тонким покрытиям и окраске, поэтому его используют как декоративный материал.

Исходным материалом для получения алюминиевых сплавов является первичный алюминий (иногда с добавками вторичного – металлолома). Первичный алюминий нормируется ГОСТ 11069-74. Этот стандарт распространяется на алюминий, изготавливаемый в форме чушек, слитков, катанки и ленты. В зависимости от химического состава первичный алюминий подразделяют на алюминий особой, высокой и технической чистоты его марки:

- особой чистоты – А999;
- высокой чистоты – А995, А99, А97, А95;
- технической чистоты – А85, А8, А7, А7Е, А6, А5, А5Е, А0.

Алюминиевые сплавы подразделяют на литейные и деформируемые. Литейные алюминиевые сплавы в чушках (рафинированные и нерафинированные) предназначены для изготовления фасонного литья и подшихтовки. Они нормируются ГОСТ 1583-93. Стандарт предусматривает химический состав сплавов, технические требования к ним, правила приемки, методы испытаний, маркировки, упаковки, транспортирования, хранения и определения газовой пористости. Для получения определенных механических свойств стандарт рекомендует режимы термической обработки.

Основными легирующими элементами алюминиевых сплавов являются медь, магний, кремний, марганец, цинк, реже литий, никель, титан. Диаграмма состояния «Алюминий - легирующий элемент» представлена на рисунке 13.3.

Многие легирующие элементы образуют с алюминием твердые растворы ограниченной переменной растворимости и промежуточные фазы  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и др. Это даёт возможность подвергать сплавы упрочняющей термической обработке, состоящей из закалки на пересыщенный твердый раствор и естественного или искусственного старения.

Легирующие элементы повышают температуру рекристаллизации алюминия (рисунок 13.4).

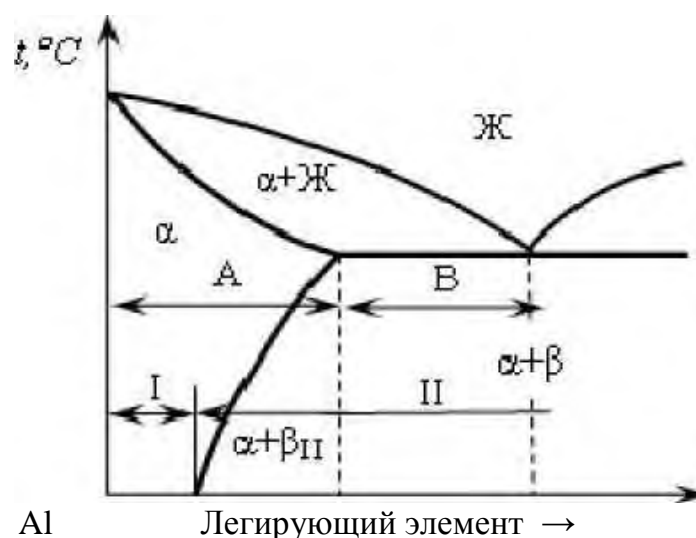


Рисунок 13.3 - Диаграмма состояния «Алюминий - легирующий элемент»

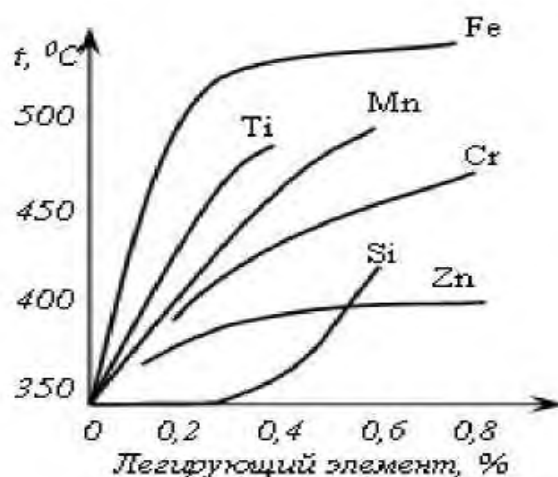


Рисунок 13.4 - Влияние легирующих элементов на температуру рекристаллизации алюминия

К деформируемым сплавам неупрочняемым термической обработкой относятся сплавы АМц и АМг.

Сплавы типа АМц (АМц1) относятся к системе «А1 - Мп»; структура состоит из а-твёрдого раствора и вторичных выделений фазы  $MnAl_6$ , переходящих в твёрдый раствор при повышении температуры. При легировании железом вместо  $MnAl_6$  образуется сложная тройная фаза  $(Mn, Fe)Al_6$ , которая не растворяется в алюминии, поэтому эти сплавы не упрочняются термической обработкой. В отожженном состоянии обладают высокой пластичностью ( $\delta = 18-22\%$ ) и низкой прочностью ( $\sigma_B = 130$  МПа).

Сплавы типа АМг (АМг1, АМг5) относятся к системе «А1 - Мг». Магний образует с алюминием а-твёрдый раствор, концентрация которого при повышении температуры увеличивается от 1,4 до 17,4% в результате растворения фазы  $Mg_2Al_3$ . Сплав АМг в отожженном состоянии имеет  $\sigma_B = 190$  МПа,  $\delta = 23\%$

Сплавы типа АМц и АМг упрочняют с помощью пластической деформации и используют в нагартованном (80% наклёпа) и полунгартованном (40% наклёпа) состояниях. Применение наклёпа ограничено из-за резкого снижения пластичности, поэтому в большинстве случаев их используют в отожженном состоянии. Температу-

ра отжига: 350-420 °С.

Сплавы типа АМц и АМг применяют для изделий, получаемых глубокой вытяжкой или сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость (трубопроводы для бензина и масла, сварные баки и т. п.).

К деформируемым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы системы «Al - Cu». Они характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности. Наиболее характерными представителями этих сплавов являются дуралюмины, широко применяемые в авиа-, судо- и ракетостроении. Согласно диаграмме «Al - Cu» (рисунок 13.5), медь с алюминием образуют твёрдый раствор, максимальная концентрация меди в котором 5,65% при эвтектической температуре. С понижением температуры растворимость меди уменьшается, достигая 0,1% при 20 °С. Из твёрдого раствора выделяется  $\theta$ -фаза -  $\text{CuAl}_2$ , содержащая 54,1% Cu. Она имеет объёмноцентрированную тетрагональную кристаллическую решетку и обладает сравнительно высокой твёрдостью. В сплавах дополнительно легированных магнием образуется ещё с-фаза ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) с ромбической кристаллической решеткой.

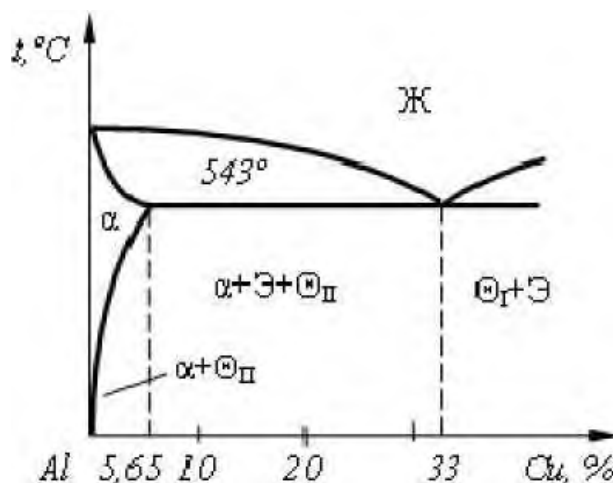


Рисунок 13.5 - Диаграмма состояния «Al - Cu»

Маркируются дуралюмины буквой «Д» и цифрой, означающей номер сплава, например: Д1, Д16, Д20 и т. д. Поставляются в виде сортового проката в отожженном и термически упрочненном состоянии. Упрочняющая термическая обработка состоит из закалки и естественного старения. При закалке дуралюмины охлаждают в воде при 40 °С. После закалки структура состоит из пересыщенного раствора и нерастворимых фаз, образуемых примесями. При естественном старении образуются зоны Гинье-Престона, богатые медью и магнием.

Алюминий и алюминиевые деформируемые сплавы (ГОСТ 4784–97). Предназначены для изготовления полуфабрикатов (листов, лент, полос, плит, профилей, панелей, прутков, труб, проволоки, штамповок и поковок) методом горячей и холодной деформации.

Стандартом предусмотрены:

- марки алюминия: АД000 (Al 99,8; 1080A); АД00, 1010 (Al 99,7; 1070A); АД00Е, 1010Е (EA1 99,7; 1370); (Al 99,6; 1060); АД0, 1011 (A198.5; 1050A); АД0Е, 1011Е (EA1 99,5; 1350); АД1, 1013 (Al 99,3); АД, 1013 (Al 99,0, 1200) АД1пл (буква Е – сплав с гарантированными электрическими характеристиками);



- марки алюминиевых сплавов системы алюминий–медь–магний и алюминий–медь–марганец: Д1, 1110 (AlCu<sub>4</sub>Mg1, 2017);

Д16, 1160 (AlCuMg1, 2024); Д16ч (212ч); В65; 1165; Д18, 1180 (AlCu<sub>2,5</sub>Mg, 2117); Д19; 1190; Д19ч; АК4; 1140; АК4-1; 1141; АК4-1ч; 2618; 1201 (AlCuMn, 2219); АК6, 1360, АК8, 1380 (AlCu<sub>4</sub>SiMg, 2014); 1105;

- марки алюминиевых сплавов системы алюминий–марганец: ММ, 1403, (AlMnMg<sub>0,5</sub>; 3005), АМц, 1400 (AlMnCu, А1 3003; АмцС, 1401; Д12, 152 (AlMnMg1, 3004);

- марки алюминиевых сплавов системы алюминий–магний: АМг<sub>0,5</sub>, 1505; АМг1, 1510 (AlMg1, 5005); АМг<sub>1,5</sub> (AlMn<sub>1,5</sub>, 5050); АМг<sub>2</sub>, 1520 (AlMg<sub>2</sub>, 5251); АМг<sub>2,5</sub> (AlMn<sub>2,5</sub>, 5052); АМг<sub>3</sub>, 1530 (АШп<sub>3</sub>, 5754); АМг<sub>3,5</sub> (AlMg<sub>3,5</sub>, 5154); АМг<sub>4,0</sub>, 1540 (AlMg<sub>4</sub>, 5086); АМг<sub>4,5</sub> (AlMg<sub>4,5</sub>, 5083); (AlMg<sub>5</sub>Cr, 5056); АМг<sub>5</sub>, 1550; АМг<sub>6</sub>, 1560;

- марки алюминиевых сплавов системы алюминий–магний–кремний: АД31, 1310 (AlMg<sub>0,5</sub>Si, 6063); АД31Е, 1310Е (Е-AlMgSi, 6101); АД33, 1330 (AlMg<sub>1</sub>SiCu, 6061); АД35, 1350 (AlSiMgMn, 6082); АВ, 1340; (6151) (буква Е применяется для алюминиевого сплава с электрическими характеристиками);

- марки алюминиевых сплавов системы алюминий–цинк–магний: 1915 (AlZn<sub>4,5</sub>Mg<sub>1,5</sub>Mn, 7005); 1925 (AlZnMg<sub>1,5</sub>Mn); В95оч; В95пч; В95, 1950 (AlZn<sub>5,5</sub>MgCu, 7075); (7175); В93пч; В95-1; В95-2; АЦпл;

- марки алюминиевых сплавов, предназначенных для изготовления проволоки при холодной высадке: ДШ, 1117, Д16П, 1167, Д19П, 1197, АМг5П, 1557, В95П, 1957;

- марки алюминиевых сплавов, предназначенных для изготовления сварочной проволоки: СвА99, СвА97, СвА95Т, СвА5, СвАМц, СвАМг3, СвАМг5, Св1557, Св1577пч, СвАМгб, СвАМгб3, СвАМг61, СвАК5, СвАКЮ, Св1201.

Алюминиевые антифрикционные сплавы (ГОСТ 14113-78). Применяют для изготовления монометаллических и биметаллических подшипников методом литья, а также монометаллических и биметаллических лент и полос путем прокатки с последующей штамповкой из них вкладышей. В зависимости от химического состава стандартом предусмотрены марки сплавов с указанием назначения каждого сплава:

АОЗ-7, А09-2 – отливки монометаллических вкладышей и втулок;

АОб-1, А09-1, АО20-1 – биметаллические ленты и вкладыши; толщина антифрикционного слоя 1 мм;

А012-1 – для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки;

АН2,5 – отливки вкладышей, монометаллические и биметаллические ленты; толщина антифрикционного слоя менее 0,5 мм;

АСМ, АМСТ – биметаллические ленты и вкладыши; толщина антифрикционного слоя менее 0,5 мм;

АМК – для получения биметаллической ленты со сталью методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей с толщиной антифрикционного слоя менее 1мм.

Стандартом определены условия работы изделий, изготовленных из сплавов этих марок: нагрузка от 19,5 до 39,2 МН/м<sup>2</sup> (200-400 кгс/см<sup>2</sup>), скорость скольжения от 10 до 20 м/с, температура от 100 до 120 °С, твердость от 200 до 320 НВ.

### 13.3 Цинк и его сплавы

Цинк – металл светло-серо-голубоватого цвета, хрупкий при комнатной температуре и при 200 °С, при нагреве до 100-150 °С становится пластичным. В соответст-

вии с ГОСТ 3640-94 цинк изготавливают и поставляют в виде чушек и блоков массой до 25 кг. Стандарт устанавливает марки цинка и области их применения. Кроме того, на тару или ярлык наносят полосы различного цвета, зависящие от марки цинка:

В промышленности широко применяют цинковые сплавы: латуни, цинковые бронзы, сплавы для покрытия стальных изделий, изготовления гальванических элементов, типографские и др.

Цинковые сплавы в чушках для литья под давлением нормируются ГОСТ 19424 - 74. Эти сплавы используют в автомобиле- и приборостроении и других отраслях промышленности. Стандартом установлены марки сплавов, их химический состав, определены изготавливаемые из них изделия:

ЦАМ4-10 – особо ответственные детали; маркировка – черная полоса;

ЦАМ4-1 – ответственные детали; маркировка – зеленая полоса;

ЦАМ4-1в – неответственные детали; маркировка – черная и красная полосы;

ЦА4о – ответственные детали с устойчивыми размерами; маркировка – красная полоса;

ЦА4 – неответственные детали с устойчивыми размерами; маркировка – две красные полосы;

ZnAl4A, ZnAl4Cu1A, ZnAl4Cu3A, ZnAl4Cu3 – для деталей автомобильной, электротехнической и машиностроительной промышленности.

Цинковые антифрикционные сплавы, предназначенные для производства монометаллических и биметаллических изделий, а также полуфабрикатов методами литья и обработки давлением, нормируются ГОСТ 21437-95. Механические свойства сплавов зависят от их химического состава: предел прочности  $\sigma_b = 250 \div 350$  МПа (25-35 кгс/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение  $\delta = 0,4 \div 10$  %, твердость 85-100 НВ. Стандарт устанавливает марки этих сплавов, области их применения и условия работы:

ЦАМ9-1.5Л – отливка монометаллических вкладышей, втулок и ползунов; допустимые нагрузка 10 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>), скорость скольжения 8 м/с, температура 80 °С; если биметаллические детали получают методом литья при наличии металлического каркаса, то нагрузка, скорость скольжения и температура могут быть увеличены до 20 МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>), 10 м/с и 100 °С соответственно;

ЦАМ9-1,5 – получение биметаллической ленты (сплав цинка со сталью и дюралюминием) методом прокатки для изготовления вкладышей путем штамповки; допустимые нагрузка до 25 МПа (250 кгс/см<sup>2</sup>), скорость скольжения до 15 м/с, температура 100 °С;

ЦАМ10-5Л – отливка подшипников и втулок; допустимые нагрузка 10 МПа (100 кгс/см<sup>2</sup>), скорость скольжения 8 м/с, температура 80 °С;

ЦАМ10-5 – прокатка полос для направляющих скольжения металлорежущих станков и других изделий; рабочие нагрузка до 20 МПа (200 кгс/см<sup>2</sup>), скорость скольжения до 8 м/с, температура 80 °С.

### **13.4 Магний и его сплавы**

Магний – пластичный металл серебристо-белого цвета. Это один из наиболее легких цветных металлов, его плотность составляет 1,74 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления магния 651 °С. Он имеет компактную гексагональную кристаллическую решетку. Магний неустойчив против коррозии, особенно во влажной среде (поверхностная окисная пленка не защищает его). Растворим во многих минеральных и органических кислотах. Горюч (сгорая, дает ослепительное пламя), самовоспламеняем (однако маг-

ний в виде слитков неогнеопасен). Устойчив против щелочей, фтористых солей, плавиковой кислоты. Механические свойства его зависят от чистоты и способа изготовления образцов для испытания (литые, деформированные). Предел прочности магния  $\sigma_B = 110 \div 196$  МПа ( $11,5-20$  кгс/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение  $\delta = 8 \div 11,5$  %, твердость 35-130 НВ.

Чистый магний как конструкционный материал не применяют. В промышленности используют магниевые сплавы. В металлургии с помощью магния осуществляют раскисление и обессеривание некоторых металлов и сплавов, модифицируют серый чугун в целях получения графита шаровидной формы, производят трудно восстанавливаемые металлы (например, титан). Смеси порошка магния с окислителями служат для изготовления осветительных и зажигательных ракет в реактивной технике и пиротехнике. Соединения магния применяют в производстве строительных материалов (цемента, ксилолита, фибролита и др.).

Первичный магний в чушках предназначен для переплавки в слитки, производства сплавов и других целей.

ГОСТ 804-93 предусматривает три марки первичного магния: МГ98, МГ95 (Mg99,95), МГ90 (Mg99,9). Массовая доля примесей в каждом из этих металлов соответственно составляет 0,04, 0,05 и 0,1 %. Цифра после запятой обозначает содержание магния в процентах.

Свойства магния значительно улучшаются за счет легирования. Алюминий и цинк с массовой долей до 7 % повышают его механические свойства, марганец улучшает его сопротивление коррозии и свариваемость, цирконий, введенный в сплав вместе с цинком, измельчает зерно, повышает механические свойства и сопротивление коррозии, торий улучшает жаропрочность, бериллий уменьшает окисляемость при плавке, литье и термической обработке.

По технологии изготовления изделий магниевые сплавы разделяются на литейные МЛ и деформируемые МА.

В литых магниевых сплавах повышения механических свойств добиваются измельчением зерна модифицированием добавками мела или магнезита. При литье в песчаные формы в смесь вводят специальные добавки (фториды алюминия) для уменьшения окисления магния.

Среди литейных магниевых сплавов широкое применение имеют сплавы МЛ5, МЛ6, МЛ 10, МЛ 12 и др. Химический состав и свойства приведены в таблице 13.3.

Сплавы системы «Mg - Al - Zn» (МЛ4, МЛ5, МЛ6) - отличаются наилучшими литейными свойствами: малой линейной усадкой, хорошей жидкотекучестью, малой склонностью к образованию рыхлот. Из этих сплавов изготавливают сложные ответственные отливки. Структура этих сплавов состоит из 8-твердого раствора алюминия и цинка в магнии с включениями по границам зерен соединения Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> (в виде мелких частиц голубоватого цвета). После литья сплавы подвергают гомогенизационному отжигу.

Жаропрочные магниевые сплавы (МЛ9 - МЛ11, МЛ14, ВМЛ-1 и ВМЛ-2) разработаны на основе системы Mg - Zn - Zr» и используются для длительной эксплуатации при температурах 250-350°C и кратковременной - до 400 °С. Жаропрочные свойства определяются присутствием интерметаллидных фаз. Эти сплавы упрочняются с помощью закалки и старения. Температура закалки от 540-545 °С, охлаждение в воде при температуре 80 °С, старение при 205 °С.

Таблица 13.3 - Химический состав и механические свойства магниевых сплавов

Сплав	Содержание элементов (средние значения), %				Режим термической обработки	σв, МПа	δ, %
	Al	Zn	Mn	Другие элементы			
Литейные сплавы							
МЛ1	8,25	05	0,35	-	закалка и естественное старение	226	5
МЛ6	9,6	0,9	0,12	-	закалка и искусственное старение в течение 3-5 ч.	216	1
МЛ 10	-	0,4	-	0,7 Zr; 2,5 Nd		230	3
МЛ 12	-	4,5	-	0,85 Zr	условное старение	225	5
Деформируемые сплавы							
МА1	-	-	1,9	-	-	205	7,5
МА2-1	4,4	1,15	0,5	-	-	300	14
МА14	-	5,5	-	0,55	закалка и искусственное старение в течение 2-3 ч.	330	10

Жаропрочные магниевые сплавы часто применяются для деталей, подвергающихся одновременному воздействию статических и усталостных нагрузок.

Коррозионная стойкость магниевых жаропрочных сплавов зависит от их состава, структуры и содержания примесей. Эти сплавы обладают хорошими технологическими литейными свойствами, высокой герметичностью (до 450 атм.), способностью сохранять высокую стабильность размеров. Отличаются малой склонностью к образованию микрорыхлот, горячих трещин в отливках.

Дополнительное легирование сплавов на основе «Mg - Zn - Zr» редкоземельными элементами, например в сплавах: МЛ 12, МЛ 15, МЛ 18, уменьшает склонность к трещинообразованию, чувствительность к толщине сечения литой детали и повышает прочностные характеристики.

Деформируемые магниевые сплавы обозначаются МА1, МА2, МА8 и др. Среди деформируемых сплавов наибольшей прочностью обладают сплавы систем «Mg - Al», «Mg - Mn», «Mg - Zn», легированные цирконием, кадмием, серебром, редкоземельными металлами.

Алюминий и цинк обладают высокой растворимостью в магнии. В промышленные сплавы вводят до 10% алюминия и до 6% цинка. Прочность увеличивается сначала за счет возрастания концентрации твердого раствора, затем за счет появления вторичных фаз  $Mg_4Al_3$  и  $Mg_3Zn_3Al_2$ .

Цинк и алюминий придают сплавам хорошую технологическую пластичность, что позволяет изготовить из них кованные и штампованные детали сложной формы. Для устранения вредного влияния железа и повышения коррозионной стойкости вводят марганец. Максимальная коррозионная стойкость достигается при добавке около 1,3% Мп.

Кадмий неограниченно растворяется в магнии и не образует собственных фаз. Легируя твердый раствор, кадмий повышает прочность и технологическую пластич-

ность сплавов.

Серебро обладает значительной (до 15,5%) растворимостью в магнии. Высокая прочность сплавов системы «Mg - Al», легированных кадмием и серебром объясняется наличием высоколегированного твердого раствора и большого количества упрочняющей фазы  $Mg_4Al_3$ .

Магниевого сплавы системы «Mg - Zn» дополнительно легируют цирконием, редкоземельными металлами. Содержание цинка ограничивается 5-6%, при больших значениях в структуре сплава появляется интерметаллидная фаза  $MgZn_2$ , которая ведет к упрочнению, но снижению пластичности.

Цирконий оказывает рафинирующее и модифицирующее действие. Вступая в соединение с водородом, он уменьшает пористость, измельчает структуру, повышает временное сопротивление и пластичность.

Деформируемые сплавы производят в виде поковок, штамповых заготовок, горячекатаных полос, прутков и профилей. Температурные интервалы технологических процессов обработки давлением магниевых сплавов находятся в пределах: прессование при 300-480 °С, прокатка при 440-225 °С, штамповка в закрытых штампах при 480-280 °С.

Большинство магниевых сплавов термической обработкой не упрочняется. Они применяются в отожженном состоянии или в состоянии после горячей деформации

### 13.5 Титан и его сплавы

Титан – металл серебристо-белого цвета. Это – один из наиболее распространенных в природе элементов. Среди других элементов по распространенности в земной коре (0,61 %) он занимает десятое место. Титан легкий (плотность его 4,5 г/см<sup>3</sup>), тугоплавкий (температура плавления 1665 °С), весьма прочен и пластичен. На поверхности его образуется стойкая окисная пленка, за счет которой он хорошо сопротивляется коррозии в пресной и морской воде, а также в некоторых кислотах. Титан устойчив против кавитационной коррозии и под напряжением. При температурах до 882 °С он имеет гексагональную плотно упакованную решетку, при более высоких температурах – объемно-центрированный куб. Механические свойства листового титана зависят от химического состава и способа термической обработки. Предел прочности  $\sigma_b = 300 \div 1200$  МПа (30-120 кгс/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение  $\delta = 4 \div 30$  %. Предел прочности титановых сплавов  $\sigma_b = 350 \div 1000$  МПа (35-100 кгс/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение  $\delta = 4 \div 10$  %.

Вредными примесями титана являются азот, углерод, кислород и водород. Они снижают его пластичность и свариваемость, повышают твердость и прочность, ухудшают сопротивление коррозии. При температурах свыше 500 °С титан и его сплавы легко окисляются, поглощая водород, который вызывает охрупчивание (водородная хрупкость). При нагреве до температуры выше 800 °С титан энергично поглощает кислород, азот и водород – эта способность его используется в металлургии для раскисления стали. Титан хорошо обрабатывается давлением и сваривается, но плохо поддается резанию. Он служит легирующим элементом для других цветных металлов и стали.

Благодаря своим замечательным свойствам титан и его сплавы нашли широкое применение в самолето-, ракетно- и судостроении. Из титана и его сплавов изготавливают полуфабрикаты; листы, трубы, прутки и проволоку. Двуокись титана применяют при производстве белил и эмалей.

Основными промышленными минералами для получения титана являются: ильменит, рутил, неровскит и сфен (титанит). Промышленный титан – один из «молодых» конструкционных материалов. В нашей стране его производство начато в 1954 г. Технология получения титана сложна, трудоемка и длительна: сначала вырабатывают титановую губку, затем путем переплавки в вакуумных печах из нее производят ковкий титан.

Губчатый титан, получаемый магниетермическим способом (ГОСТ 17746-79), служит исходным материалом для производства титановых сплавов и других целей. В зависимости от химического состава и механических свойств стандартом установлены следующие марки губчатого титана: ТГ-90, ТГ-100, ТГ-110, ТГ-120, ТГ-130, ТГ-150, ТГ-Тв.

Буквы ТГ означают – титан губчатый, Тв – твердый; цифры означают твердость по Бринеллю. В губчатый титан входят примеси: железо – до 0,2 %, кремний – до 0,04 %, никель – до 0,05 %, углерод – до 0,05 %, хлор – до 0,12 %, азот – до 0,04 %, кислород – до 0,1 % (титан ТГ-Тв имеет более широкий допуск по массовой доле примесей).

Для изготовления полуфабрикатов предназначены титан и титановые сплавы, обрабатываемые давлением (ГОСТ 19807-91). В зависимости от химического состава стандарт предусматривает следующие марки: ВТ1-00, ВТ1-0, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ1-2, ВТ5, ВТ5-1, ВТ6, ВТ6с, ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ14, ВТ20, ВТ22, ПТ-7М, ПТ-3В, АТЗ.

Основные компоненты сплавов: алюминий – 0,2-0,7 %, марганец – 0,2-2 %, молибден – 0,5-5,5 %, ванадий – 0,8-5,5 %, цирконий – 0,8-3 %, хром – 0,5-2,3 %, олово – 2-3 %, кремний – 0,15-0,40 %, железо – 0,2-15 %. Примесями являются: углерод – до 0,1 %, железо – до 0,30 %, кремний – до 0,15 %, цирконий – до 0,3 %, кислород – до 0,2 %, азот – до 0,05 %, водород – до 0,015 %. Железо, кремний и цирконий в зависимости от марки сплава могут быть основными компонентами или примесями.

### **13.6 Антифрикционные (подшипниковые) и тормозные материалы**

Антифрикционные материалы используют для изготовления деталей, работающих в условиях трения (скольжения): подшипников, втулок, направляющих, вкладышей. Условно эти материалы делят: на сплавы на основе олова, свинца; меди, железа, цинка и алюминия; спеченные сплавы – бронзографит, железографит; пластмассы – текстолит, фторопласт, древесно-слоистые пластики; сложные композиции – металл – пластмасса и др. Такие материалы должны обладать хорошей прирабатываемостью, износостойкостью, низким коэффициентом трения при работе в паре с материалом изделия, малой склонностью к заеданию (схватыванию), способностью обеспечивать равномерную смазку трущихся поверхностей, прочной, но относительно вязкой и пластичной основой, удерживающей твердые опорные включения.

#### **13.6.1 Баббиты**

Широко распространенным антифрикционным легкоплавким материалом являются баббиты. Особенность баббитов – они не оставляют надиров на поверхностях сопрягаемых деталей. Их основные компоненты – пластичные олово и свинец, в которые добавляют более твердые материалы – медь, сурьму и никель.

Кальциевые баббиты в чушках (ГОСТ 1209-78) применяют для заливки подшипников скольжения. Их основу составляет свинец, в который добавляют кальций (0,3-1,15 %), натрий (0,2-0,9 %), магний (0,01-0,09 %), олово (1,5-2,1 %) и алюминий (до 0,2 %). Масса чушек от 24 до 28 кг. В зависимости от химического состава стандарт определяет марки баббитов и области их применения:

Для заливки подшипников скольжения и других деталей служат оловянные и свинцовые баббиты (ГОСТ 1320-74). В зависимости от химического состава стандарт предусматривает определенные марки этих баббитов и примерное их назначение:

Баббиты марок Б88, Б83 и Б83С имеют оловянную, а Б16, БН и БС6 – свинцовую основу. Основные компоненты сплавов: олово (5,5-17 %), свинец (1-1,5 %), сурьма (5,5-17 %), медь (0,1-6,5 %), кадмий (0,1-1,2 %), никель (0,1-0,5 %) и мышьяк (0,5-0,9 %).

Механические и физические свойства баббитов зависят от марки сплавов. Плотность от 7,35 до 10,05 г/см<sup>3</sup>, твердость по Бринеллю НВ 5/62, 5/60, НВ 2,5/15, при 20 °С, 27-30 НВ, в сплаве БС6 15-17 НВ. Предел текучести при сжатии 7-86 кгс/мм<sup>2</sup>, предел прочности при сжатии 11-14,7 кгс/мм<sup>2</sup>. Температура начала расплавления 240-247 °С. Температура плавления 320-410 °С, для сплава БС6 – 280 °С. Температура заливки 380-500 °С.

### 13.6.2 Антифрикционные латуни и бронзы

Для изготовления монометаллических подшипников применяются антифрикционные латуни (ГОСТ 17711-93, 17711-72 и 15527-70) следующих марок: ЛЦ40С (ЛС59-1Л), ЛЦ40Сд (ЛС59-1ЛД) – свинцовые; ЛЦ40Мц1,5 (ЛМЦ58-2Л) – марганцовая; ЛЦ38Мц2С2 (ЛМЦ58-2-2) – марганцовосвинцовая; ЛЦ25С2 (ЛВОС) – оловянносвинцовая; ЛЦ23А6Ж3Мц2 (ЛАЖМцбб-6-3-2) – алюминевожелезомарганцовая; ЛЦ16К4 (ЛК80-3Л) – кремнистая.

Оловянные бронзы (ГОСТ 614-73) марок БрОЗЦ8С4Н1, БрОЗЦ13С4, Бр04Ц7С5 и Бр05Ц6С5 предназначены для изготовления различных антифрикционных деталей. Для изготовления антифрикционных монометаллических деталей и вкладышей, в том числе высоконагруженных подшипников скольжения, служат оловянные литейные бронзы (ГОСТ 613-79) Бр04Ц7С5, Бр04ЦС4С17, Бр05Ц5С5, Бр05С25, Бр06Ц6С3, Бр010Ф1, Бр010Ц2 и БрОЮС10.

### Контрольные вопросы

- 1) Назовите области применения алюминия и его сплавов.
- 2) Назовите области применения меди и её сплавов.
- 3) Назовите области применения цинка и его сплавов.
- 4) Назовите области применения титана и его сплавов.
- 5) Назовите области применения магниевых сплавов.
- 6) Что называют баббитами?
- 7) Что это за сплавы: ВТ5-1, ОТ-4, БрОФ10-1?

## 14 Неметаллические материалы

Неметаллические материалы находят все возрастающее применение в различных отраслях техники. Достаточные прочность, жесткость, эластичность при низкой плотности, химическая стойкость во многих агрессивных средах, уровень диэлектрических свойств при их технологичности делают неметаллические материалы незаменимыми.

По происхождению неметаллические материалы подразделяют на природные, искусственные и синтетические.

К природным относятся такие органические материалы, как натуральный каучук, древесина, смолы (янтарь, канифоль), хлопок, шерсть, лен и др. Неорганические природные материалы включают графит, асбест, слюду и некоторые горные породы.

Искусственные органические материалы получают из природных полимерных продуктов (вискозное волокно, целлофан, сложные и простые эфиры, целлюлозы).

Синтетические материалы получают из простых низкомолекулярных соединений.

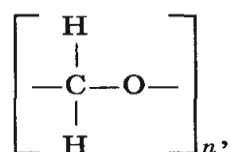
### 14.1 Полимеры

#### 14.1.1 Молекулярная структура

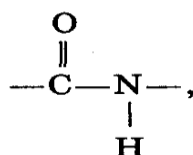
Полимерами называют вещества, макромолекулы которых состоят из многочисленных повторяющихся элементарных звеньев, представляющих собой одинаковую группу атомов. Молекулярная масса таких молекул составляет от 500 до 1 000 000. В молекулах полимеров различают главную цепь, построенную из большого числа атомов. Боковые цепи имеют значительно меньшую протяженность.

В боковых цепях заместителями атома водорода могут быть химические радикалы  $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{C}_3\text{H}_7$ ,  $-\text{C}_6\text{H}_5$  или функциональные группы  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$  и др.

Полимеры, главная цепь которых содержит одинаковые атомы, называют гомоцепными, а если атомы углерода – карбоцепными. Полимеры, в главной цепи которых содержатся различные атомы, называют гетероцепными, например: полиформальдегид, содержащий в главной цепи гетероатом кислорода



а также полиамиды (капрон, нейлон), имеющие в главной цепи амидную группу,



содержащую в главной цепи гетероатом азота. Полимеры, содержащие в главной цепи помимо атомов углерода другие атомы, отличаются от карбоцепных полимеров более широким диапазоном свойств.

Атомы главной цепи связаны прочной химической ковалентной связью, энергия которой составляет 330-360 кДж/моль.



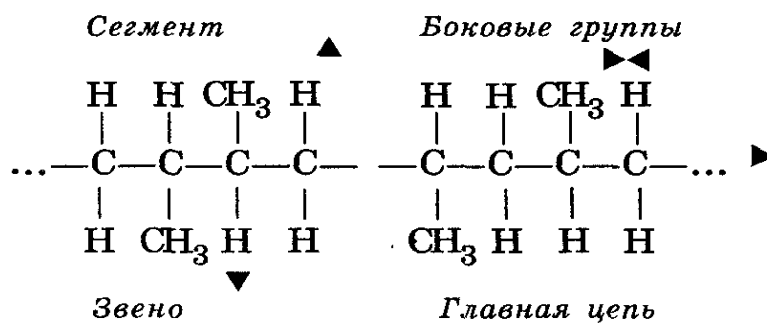


Рисунок 14.1 – Схема строения линейной макромолекулы

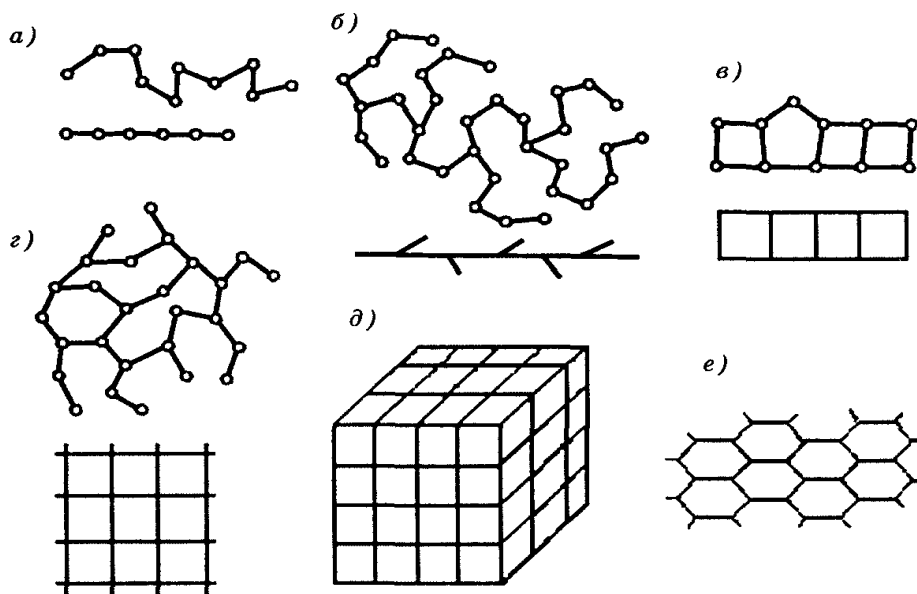
Макромолекулы полимеров делят по форме на линейные, разветвленные, плоские, ленточные, пространственные или сетчатые (рисунок 14.2). Линейные макромолекулы полимера – длинные зигзагообразные и скрученные в спираль цепочки (рисунок 14.2, а). Длина линейной макромолекулы в несколько тысяч раз больше ее поперечного сечения. Макромолекулам поэтому присуща гибкость, которая ограничивается жесткими участками – сегментами, состоящими из нескольких звеньев. Такие макромолекулы, обладая достаточно высокой прочностью вдоль главной цепи, слабо связаны между собой и обеспечивают высокую эластичность материала. Нагрев вызывает размягчение, а последующее охлаждение – затвердевание полимера (полиамид, полиэтилен). Разветвленная макромолекула содержит боковые ответвления (рисунок 14.2, б), что затрудняет сближение макромолекул и понижает межмолекулярное взаимодействие. Полимеры с подобной формой макромолекул отличаются пониженной прочностью, повышенной плавкостью и рыхлостью. Межмолекулярное взаимодействие имеет физическую природу. Энергия такой связи достигает 5-40 кДж/моль.

Сшитые формы макромолекул (лестничная, сетчатая, рисунок 14.2, в, г) свойственны более прочным, нерастворимым и неплавким полимерам, которые склонны к набуханию в растворителях и размягчению при нагреве. Полимеры со сшитой трехмерной формой макромолекулы (рисунок 14.2, д) отличаются хрупкостью и высокой стойкостью к внешним воздействиям (неспособны размягчаться и набухать). Макромолекулы полимеров обладают гибкостью, т. е. способностью перемещения их отдельных участков друг относительно друга. Гибкость ограничивается жесткими участками-сегментами, состоящими из нескольких звеньев главной цепи. Сегменты гибких макромолекул содержат 10-20 звеньев. На гибкость макромолекул оказывает влияние, с одной стороны, тепловое движение атомов, а с другой – энергия связи межмолекулярного взаимодействия.

Тепловое движение полимерной молекулы связано с изменением ее формы и состоит во вращении атомов друг относительно друга при сохраняющихся постоянных валентных углах (рисунок 14.3).

В результате полимерная цепь редко бывает предельно вытянутой и чаще имеет зигзагообразную или глобулярную форму.

Увеличение химической связи между макромолекулами очень сильно сказывается на их гибкости. Так, натуральный каучук, вулканизированный 3 % серы, имеет относительное удлинение при разрыве 800-900 %, прочность на разрыв 29-32 МПа. Эбонит, тот же каучук, но отвержденный до 30 % серы, имеет относительное удлинение при разрыве менее 20 % и прочность на разрыв 52-54 МПа.



а – линейная; б – разветвленная; в – лестничная; г – сетчатая;  
 д – пространственная; е – паркетная  
 Рисунок 14.2 – Формы макромолекул полимеров

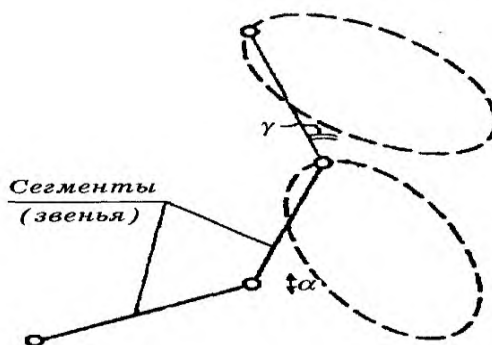
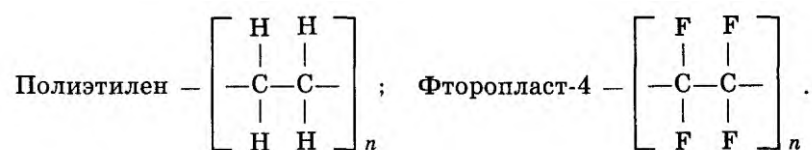


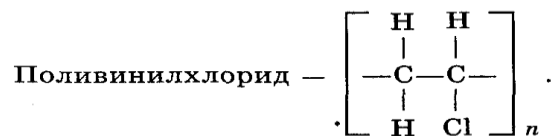
Рисунок 14.3 – Схема вращения звеньев цепи относительно химических связей в молекуле полиэтилена

Увеличивая количество вулканизатора – серы, мы тем самым повышаем энергию межатомной связи. Повысить ее можно путем увеличения полярности полимерных звеньев. По полярности полимеры подразделяют на полярные и неполярные. В макромолекулах неполярных полимеров центры тяжести разноименных зарядов совпадают. У полярной макромолекулы центр тяжести электронов сдвинут в сторону более электроотрицательного атома, и центры тяжести разноименных зарядов не совпадают.

Неполярные полимеры имеют симметричное расположение функциональных групп, и дипольные моменты связей атомов взаимно компенсируются:



В молекулах полярных полимеров присутствуют или полярные связи группировок ( $-\text{Cl}$ ,  $-\text{F}$ ,  $-\text{OH}$ ), или несимметрия в их структуре:



За счет полярности энергия межмолекулярных связей в поливинилхлориде больше, чем в полиэтилене. Поливинилхлорид, имея прочность при растяжении 100-200 МПа, прочнее полиэтилена (20-45 МПа). Полярные полимеры жесткие, теплоустойчивые, но в отличие от неполярных их морозостойкость низкая.

Аморфные полимеры могут быть построены из молекул, свернутых в глобулы. Глобулярная структура аморфного полимера придает им невысокие механические характеристики в связи с хрупким разрушением по границам глобул. Под воздействием температуры глобулы способны распрямляться в линейные образования, что способствует повышению механических свойств полимеров.

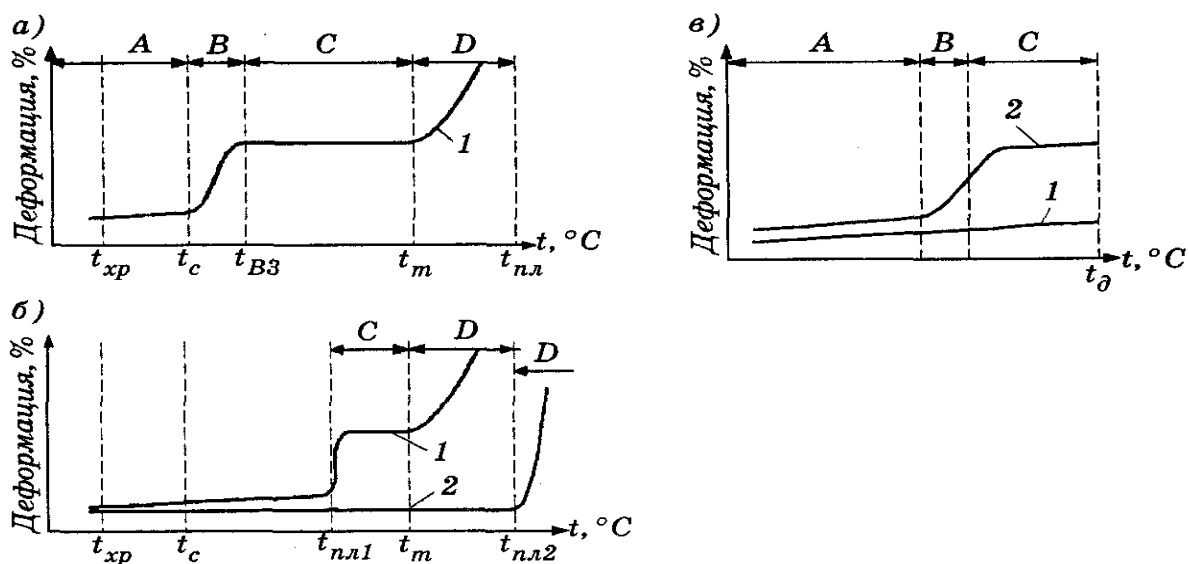
#### 14.1.2 Термомеханические свойства

Полимеры при нагреве ведут себя по-разному. Полимеры с линейными и разветвленными макромолекулами пластичны, способные размягчаться при повышении температуры и затвердевать при охлаждении, называются термопластами. Свойства термопластов обратимы при повторном нагреве. Обратимость свойств, достаточно низкая прочность (1-10 МПа) термопластов обусловлены слабыми межмолекулярными силами связи. Структура таких полимеров может быть аморфной, частично кристаллической и кристаллической. Изделия из термопластов способны перерабатываться.

Термореактивные полимеры на начальной стадии нагрева, имея линейную структуру, размягчаются, а затем затвердевают в результате протекания химических реакций и образования пространственной структуры.

Изделия из термореактивных полимеров при повторном нагреве не размягчаются и не могут повторно перерабатываться.

Различие в физическом или фазовом состоянии полимеров обнаруживается на термокинетических кривых, отображающих изменение деформации материала пластика в результате приложения постоянной нагрузки при нагреве с постоянной скоростью. На кривых можно выделить три участка, соответствующих трем физическим состояниям (рисунок 14.4, а). В области А полимер находится в твердом аморфном стеклообразном состоянии. Атомы и молекулы полимера, имеющего температуру, меньшую температуры стеклования  $t$  совершают только тепловые колебательные движения около своих равновесных положений. Материалу при деформировании присущи упругие свойства. При температуре ниже температуры хрупкости  $t$  полимер становится хрупким и его разрушение связано с разрывом химических связей в макромолекуле. Повышение температуры полимера выше  $t_c$  увеличивает в нем частоту тепловых колебаний атомов, и отдельные сегменты макромолекул перемещаются, скрученные участки макромолекул выпрямляются. Макромолекулы ориентируются в направлении действия приложенного напряжения. Материал деформируется упруго.



а – некристаллический линейный полимер;

б – кристаллизирующийся полимер с различными температурами плавления кристаллической составляющей (1 –  $t_c < t_{пл} < t_r$ ; 2 –  $t_{пл} > t_r$ ) сетчатый (1) и редкосетчатый (2) полимеры

Рисунок 14.4 – Термомеханические кривые

После снятия нагрузки макромолекулы под действием сил межмолекулярного взаимодействия принимают первоначальную форму. Материал находится в высокоэластическом состоянии. Для полимеров, например резины, находящихся в высокоэластическом состоянии, обратимая деформация может достигать 500-800 %. Вблизи температуры текучести  $t_r$  возможна и пластическая деформация. При температуре выше  $t_r$  материал переходит в вязкотекучее состояние. Отдельные звенья (сегменты) макромолекул постепенно поворачиваются, и целые макромолекулы получают подвижность. Полимер переходит в вязкотекучее состояние. В этом состоянии полимеры перерабатывают в изделия.

Вид термомеханических кривых полимеров зависит от степени их кристалличности, температуры кристаллизации и степени сшитости макромолекул.

Полимеры, с кристаллической составляющей в структуре, сохраняют твердость до температуры плавления  $t_{пл}$  кристаллической составляющей (рисунок 12.4, б). В этом случае имеет суженную область полимер С, если  $t_c < t_{пл} < t_r$ . В полимере же, у которого  $t_{пл} > t_r$  (рисунок 12.4, кривая 2), область С отсутствует, и он из твердого состояния переходит в вязкотекучее.

## 14.2 Пластмассы

Пластмассы (пластики) представляют собой органические материалы на основе полимеров, способные при нагреве размягчаться и под давлением принимать определенную устойчивую форму. Простые пластмассы состоят из одних химических полимеров. Сложные пластмассы помимо полимеров включают добавки: наполнители, пластификаторы, красители, отвердители, катализаторы и др.

Наполнители в пластмассы вводят в количестве 40-70 % для повышения твердости, прочности, жесткости, а также придания особых специфических свойств, напри-

мер фрикционных, антифрикционных и др. Наполнителями могут быть ткани, а также порошкообразные и волокнистые вещества.

Пластификаторы (стеарин, олеиновая кислота, дибутилфталат) повышают эластичность, пластичность и облегчают обработку пластмасс. Их содержание колеблется в пределах 10-20 %.

Отвердители (амины) и катализаторы (перекисные соединения) в количестве нескольких процентов вводят в пластмассы для отверждения, т. е. создания межмолекулярных связей и внедрения молекул отвердителя в общую молекулярную сетку.

Красители (минеральные пигменты, спиртовые растворы органических красок) придают пластмассам определенную окраску и снижают их стоимость. Состав компонентов, их сочетание и количественное соотношение позволяют изменять свойства пластмасс в широких пределах.

### 14.2.1 Классификация

Пластмассы классифицируют по следующим признакам.

1. По виду наполнителя: с твердым наполнителем; с газообразным наполнителем.

Твердые наполнители выпускают в виде порошков, (графит, древесная мука, кварц, гипс и др.), волокон (очесы хлопка и льна, волокна из стекла и асбеста), слоистых материалов (хлопчатобумажная, стеклянная, асбестовая ткани, бумаги).

2. По реакции связующего полимера к повторным нагревам: термопластичные и терморезистивные. Термопластичные пластмассы на основе термопластичного полимера размягчаются при нагреве и затвердевают при последующем охлаждении. Чаще это чистые полимеры или композиции полимеров с пластификаторами, противостарителями. Термопласты отличаются низкой усадкой (1-3 %). Для них характерны малая хрупкость, большая упругость и способность к ориентации.

Терморезистивные пластмассы на основе терморезистивных полимеров (смола) после тепловой обработки – отверждения – переходят в термостабильное состояние. Терморезистивные пластмассы отличаются хрупкостью, имеют большую усадку 10-15 % и содержат в своем составе наполнители.

3. По применению пластмассы можно подразделить: на конструкционные – для силовых деталей и конструкций, для несиловых деталей; прокладочные, уплотнительные; фрикционные и антифрикционные; электроизоляционные, радиопрозрачные; теплоизоляционные; стойкие к воздействию огня, масел, кислот; облицовочно-декоративные.

Области применения и способы переработки пластмасс представлен в таблице 14.1.

Один и тот же пластик часто обладает свойствами, характерными для нескольких групп. Например, текстолит может быть одновременно конструкционным, электроизоляционным и прокладочным материалом.

Таблица 14.1 - Области применения и способы переработки пластмасс

Вид пластмассы	Область применения	Вид переработки
Полиэтилен низкой плотности ПЭНП (высокого давления)	Пленки, трубы, изделия, работающие при обычных температурах	Литье под давлением, экструзия, пневмо-вакуум-формирование, прессование, спекание, сварка.
Полиэтилен высокой плотности ПЭВП (низкого давления)	Пленки, трубы, антифрикционные и защитные покрытия	Литье под давлением, экструзия, вакуум-формирование, прессование, спекание, сварка.
Блок-сополимеры пропилена с этиленом БСПЭ	Трубы, фитинги, корпусные детали, панели	Литье под давлением, экструзия, прессование.
Полистирол (АБС – пластики)	Тара, крупногабаритные корпусные детали.	Литье под давлением, экструзия, прессование.
Полиметилметакрилат ПММА	Остекление кабин, герметики.	Литье под давлением, экструзия, прессование, сварка, склеивание.
Фторопласты	Детали антифрикционного назначения, прокладочные материалы.	Прессование, экструзия, литье под давлением.
Полиамиды ПА66, 6, 610, 612, 11, 12	Детали, работающие под нагрузкой, корпуса, гибкие детали.	Литье под давлением, экструзия.
Полиформальдегид ПФ, СФ	Шестерни, втулки, Антифрикционные детали	Литье под давлением, сварка, склеивание

### 14.2.2 Термопластичные пластмассы

Основу термопластичных пластмасс составляют полимеры с линейной и разветвленной структурой. Помимо основы они иногда содержат пластификаторы. Термопласты способны работать при температурах не выше 60-70 °С, поскольку выше этих температур их физико-механические свойства резко снижаются. Некоторые термостойкие пластмассы способны работать при 150-200 °С, а термостойкие полимеры с жесткими цепями и циклической структурой устойчивы до 400-600 °С.

Предел прочности термопластов составляет 10-100 МПа, модуль упругости – (1,8-5-3,5) 10<sup>3</sup> МПа. Длительное статическое нагружение термопластов вызывает появление вынужденно-эластической деформации и снижает их прочность. С увеличением скорости деформирования вынужденно-эластическая деформация отсутствует, и появляются жесткость и хрупкое разрушение.

Наличие в структуре полимеров кристаллической составляющей делает их более прочными и жесткими.

Полиэтилен получают полимеризацией бесцветного газа этилена при низком и высоком давлении.

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) (ГОСТ 16337-77). Это продукт полимеризации этилена, получаемый при высоком давлении в трубчатых реакторах и реакторах с перемешивающим устройством с применением инициаторов радикального типа. Выпускается в виде гранул размером 2-5 мм. Это один из самых дешевых полимеров, обладающий высокими физико-механическими и технологическими свойствами. Он поддается всем видам переработки, свойственным термопластам, относительно прочен, пластичен, является хорошим диэлектриком. Стоек к щелочам и кислотам (серной, соляной и плавиковой), но разрушается в азотной кислоте, хлоре и фторе.

Макромолекулы полиэтилена низкого давления имеют более разветвленное строение. В результате ПЭНД отличается пониженной плотностью. С увеличением плотности и кристалличности полиэтилена возрастают его прочность и теплостойкость. Полиэтилен способен длительное время работать при 60-100 °С. Морозостойкость достигает -70 °С и ниже. Химически стоек и нерастворим в растворителях при 20 °С. Полиэтилен применяют для изоляции защитных оболочек кабелей проводов, деталей высокочастотных установок и для изготовления коррозионно-стойких деталей – труб, прокладок, шлангов. Его выпускают в виде пленки, листов, труб, блоков.

Полиэтилен подвержен старению. Для защиты от старения в полиэтилен вводят сажу (2-3 %), замедляющую старение в 30 раз.

Отходы производства полиэтилена и отработанные изделия из него используют для повторной переработки.

Сополимеры стирола (ГОСТ 12271-76). Это трехкомпонентные сополимеры с акрилатами, предназначенные для изготовления изделий технического и бытового назначения методом литья под давлением. Выпускают в виде гранул размерами 3 × 5 мм, окрашенными и неокрашенными.

Стандарт регламентирует марки сополимеров стирола:

МСН, МСН-Л – продукты сополимеризации стирола с метилметакрилатом и нитрилом акриловой кислоты. Предназначены для изготовления изделий автомобильной, радиотехнической и приборостроительной промышленности.

Сополимер стирола марки МСН-Л имеет высокие показатели текучести расплава, что дает возможность изготавливать крупногабаритные и тонкостенные изделия.

Свойства сополимеров стирола, а также красители для них нормируются стандартом.

Полистирол общего назначения (ГОСТ 20282-86). Это продукт полимеризации стирола в массе или в суспензии, или в эмульсии. Предназначен для изготовления изделий различными методами термоформирования.

Полистиролу присущи высокие диэлектрические свойства, удовлетворительная механическая прочность, невысокая рабочая температура (до 100 °С), химическая стойкость в щелочах, минеральных и органических кислотах, маслах. Он набухает в 65 %-ной азотной, ледяной уксусной кислотах, бензине и керосине. При температурах выше 200 °С разлагается, образуя стирол.

Полистирол применяют для производства слабонагруженных деталей и высокочастотных изоляторов.

Недостатками полистирола являются его хрупкость при пониженных температурах, склонность к постепенному образованию поверхностных трещин.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) (ГОСТ 24222-80). Неполярен, имеет аморфно-кристаллическую структуру. Скорость кристаллизации зависит от температуры в очень малой степени до 250 °С и не влияет на его механические свойства. Температурный порог длительной эксплуатации фторопласта-4 ограничивается

250 °С. Он относительно мягок, так как аморфная фаза находится в высокоэластическом состоянии. Фторопласт-4 отличается чрезвычайно высокой стойкостью к действию агрессивных сред: соляной, серной, плавиковой, азотной кислот, царской водки, пероксида водорода, щелочей. Разрушается под действием расплавов щелочных металлов, а также фтора и фтористого хлора при повышенных температурах. Фторопласт-4 не горит и не смачивается водой и многими жидкостями. Политетрафторэтилен не становится хрупким до -269 °С. Сохраняет гибкость при температуре ниже -80 °С. Фторопласт-4 имеет низкий коэффициент трения (0,04), не зависящий от температуры плавления (327 °С) кристаллической составляющей.

Недостатками фторопласта-4 следует считать его токсичность вследствие выделения фтора при высоких температурах, хладотекучесть и трудность переработки из-за отсутствия пластичности.

Фторопласт-4 применяют для изготовления мембран, труб, вентилях, насосов, уплотнительных прокладок, сильфонов, манжет, антифрикционных покрытий на металлах, а также электрорадиотехнических деталей.

### 14.2.3 Полярные термопласты

Трифторхлорэтилен (ГОСТ 13744-87). Представляет собой линейный аморфно-кристаллический полимер белого цвета. Присутствие атома хлора нарушает симметрию звеньев макромолекулы, и в результате полимер становится полярным. Кристаллическость полимера зависит от условий охлаждения. Максимальное количество кристаллической составляющей (до 80 %) выделяется при медленном охлаждении из расплава до 150 °С, а при быстром охлаждении степень кристаллическости составляет 30-40 %. Фторопласт-3 с высокой степенью кристаллическости имеет повышенные плотности, твердость. Полимер с низкой степенью кристаллическости более пластичен. Фторопласт-3 имеет диапазон рабочих температур от -105 до 70 °С, а при эксплуатации изделий – от -195 до +125 °С. Нагрев выше 300 °С вызывает его деструкцию с образованием токсичного газообразного фтора. Фторопласт-3 по химической стойкости несколько уступает фторопласту-4, но все же его стойкость к действию органических растворителей кислот, щелочей и других агрессивных сред высокая. Полимер легко перерабатывается в изделия методами прессования, литья под давлением и др.

Стандарт предусматривает следующие марки:

А – для композиций специального назначения;

Б – для получения масел и смазочных материалов, суспензий, композиций специального назначения, изделий, изготовляемых методом экструзии, прессованием, литьем под давлением и для порошкового насыщения;

В – для получения изделий специального назначения методом прессования и композиций специального назначения.

Пример условного обозначения фторопласта-3 марки Б:

Фторопласт-3, Б, ГОСТ 13744-87.

Фторопласт-3 применяют для изготовления труб, клапанов, насосов, шлангов, а также используют в качестве низкочастотного диэлектрика.

Полиметилметакрилат (органическое стекло) – пластифицированный и непластифицированный полимер (сополимер) метилового эфира метакриловой кислоты, широко применяемый в различных отраслях промышленности. Аморфный, бесцветный, прозрачный термопласт. При нагреве до 80 °С начинает размягчаться, а при 105-150 °С становится пластичным. Основным критерием, определяющим его пригод-



ность, является прочность. Механические свойства органических стекол повышают путем двухосного растяжения при нагреве до температуры, превышающей температуру размягчения. От степени ориентации звеньев макромолекул вдоль направления действия внешнего усилия зависит степень упрочнения материала. Стекла с ориентированными макромолекулами менее чувствительны к концентраторам напряжений, более стойки против «серебрения». «Серебро» органических стекол – результат появления на поверхности и внутри материала мелких трещин, образующих полости с полным внутренним отражением. Дефект является результатом действия внутренних напряжений, возникающих в связи с низкой теплопроводностью и высоким температурным коэффициентом линейного расширения. Проблема повышения ударной вязкости и термостойкости органических стекол помимо их вытяжки в пластическом состоянии (ориентированные стекла) решается сополимеризацией полиметилметакрилата с другими полимерами и применением многослойных стекол (триплексов), полученных склеиванием двух и более листов из органического стекла с помощью бутварной пленки.

Органические стекла не подвержены действию разбавленных кислот, щелочей, углеродных топлив и смазочных материалов, растворяются в органических кислотах (уксусной, муравьиной), хлорированных углеводородах.

Техническое органическое стекло (ГОСТ 17622-72). Стандартом предусмотрены две марки стекла:

ТОСП – стекло техническое органическое пластифицированное;

ТОСН – стекло техническое органическое непластифицированное.

В зависимости от толщины, состояния внешней поверхности и физико-механических свойств техническое органическое стекло выпускают первого и второго сортов, бесцветным прозрачным, цветным прозрачным и цветным непрозрачным в виде листов прямоугольной формы толщиной 1-200 мм, длиной 500-1600 мм, шириной 100-500 мм.

Физико-механические свойства технического органического стекла: температура размягчения (в зависимости от толщины) 92-130 °С,  $KC = 6 \div 9 \text{ кДж/м}^2$ ,  $\nu = 1,18 \div 1,19 \text{ г/см}^3$  при 20 °С, светопрозрачность (при толщине до 30 мм) 85-88 %, усадка прогрева при 40 °С в течение 1 ч 3,5-4 %, разрушающее напряжение при растяжении 60-80 МПа,  $\delta$  при разрыве 2-2,5 %.

#### 14.2.4 Термореактивные пластмассы

Термореактивные пластмассы производят на основе термореактивных смол: фенолформальдегидных, аминокальцидных, эпоксидных, полиамидных, кремнийорганических, ненасыщенных полиэфиров. Пластмассы на основе этих смол отличаются повышенной прочностью, не склонны к ползучести и способны работать при повышенных температурах. Смолы в пластмассах являются связкой и должны обладать высокой клеящей способностью, теплостойкостью, химической стойкостью в агрессивных средах, электроизоляционными свойствами, доступной технологией переработки, малой усадкой при затвердевании.

Смолы – высокомолекулярные органические соединения, получаемые по реакциям полимеризации и поликонденсации.

В реакции полимеризации могут участвовать два мономера и более, а получаемые вещества называют сополимерами. Введение в реакцию дополнительных веществ, помимо основного мономера, необходимо для изменения свойств полимеров в

требуемом направлении. Таким образом, например, происходит образование сополимера из полистирола и каучука.

Процесс поликонденсации сопровождается отщеплением низкомолекулярных соединений (аммиак, вода, спирт и др.) в результате взаимодействия функциональных групп исходных мономеров. Здесь имеет место несовпадение элементарного состава мономеров, получаемых на основе полимеров. Поликонденсация протекает как при наличии, так и при отсутствии катализатора.

Фенолформальдегиднал (бакелитовая) смола – продукт поликонденсации фенола  $\text{H}_5\text{C}_6\text{–OH}$  с формальдегидом  $\text{H}_2\text{CO}$ .

В зависимости от условий поликонденсации образуются резольные (терморективные) или новолачные (термопластичные) смолы, способные отверждаться при последующей переработке.

Новолачные смолы получают при избытке фенола, в присутствии кислотного катализатора при последующем нагреве для удаления воды. Новолак – твердая, хрупкая, прозрачная смола – плавится при 100-120 °С, растворяется в этиловом спирте, ацетоне. Новолачные смолы отверждают нагревом совместно с уротропином, но значительно быстрее резольных. Новолаки часто применяют для изготовления пресс-порошков. Резольные смолы получают поликонденсацией фенола с избытком формальдегида в щелочной среде.

Резольные смолы длительное время при переработке сохраняют вязкотекучее состояние, что позволяет применять их в производстве толстостенных слоистых пластиков. Эти смолы способны отверждаться без подвода теплоты в присутствии кислот. Отверждение идет с большей скоростью, но эксплуатационные свойства полимера в этом случае невысоки. Отвержденная фенолформальдегидная смола с частой сетчато-пространственной структурой обладает повышенной хрупкостью. Смола обладает высокой адгезионной способностью ко многим наполнителям. В чистом виде эпоксидные смолы – вязкие жидкости, способные длительное время сохранять свойства без изменений. Они растворяются во многих органических растворителях (ацетон, толуол и др.) и не растворимы в воде, бензине. В присутствии отвердителей (амины, их производные, ангидриды карбоновых кислот и др.) эпоксидные смолы быстро затвердевают, приобретая сетчато-пространственное строение. Отверждение смолы – полимеризационный процесс, протекающий без выделения воды или низкомолекулярных веществ и развивающийся равномерно в весьма толстом слое.

Получению монолитной массы затвердевшей эпоксидной смолы способствует сравнительно малая, всего 0,5-2 %, усадка. Из-за наличия в затвердевшей смоле гидроксильной группы – OH ее адгезия ко многим материалам (стекло, металлы, некоторые пластмассы и др.) высока.

Кремнийорганические смолы (силиконы) содержат в составе элементарного звена макромолекулы атомов углерода и кремния. По строению макромолекулы могут быть линейными, разветвленными и пространственными.

Без наполнителя смола способна работать при 250-300 °С, а с наполнителями (слюда, асбест, стеклянное волокно и др.) – до 400-450 °С.

Недостатками силиконовых полимеров следует считать невысокую механическую прочность и пластичность при температурах выше 150 °С и низкую адгезионную способность к большинству других материалов.

Кремнийорганические полимеры широко используют в качестве связующих в производстве стеклотекстолитов, а также в производстве термостойких резин (каучук СКТ), лакокрасочных покрытий, клеев, герметиков.

Полиэфирные смолы получают поликонденсацией различных спиртов и кислот (или их ангидридов). Полиэфирные смолы, полученные из двухатомных спиртов (гликолей), содержащих в молекуле две гидроксильные группы  $-\text{OH}$ , и из двухосновных органических кислот, имеющих две карбоксильные группы  $-\text{COOH}$  в молекуле, термопластичны. Терморезактивные смолы получают из трехатомных спиртов и кислот.

Глифталевые смолы (алкидные) получают поликонденсацией трехатомного спирта – глицерина  $\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CHOH}-\text{CH}_2-\text{OH}$  и фталиевого ангидрида.

Отверждаются смолы в три стадии, как и фенолформальдегидные, с выделением воды. Для этого требуются более высокая температура и значительное время. Глифталевые смолы имеют повышенную теплостойкость (до  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ). Они отличаются от бакелитовых смол повышенной эластичностью, стойкостью к старению при повышенных температурах и адгезией. Глифталевые смолы растворяются в ацетоне и спирте, стойки к воздействию воды, кислых сред и имеют хорошие диэлектрические свойства. На основе глифталевых смол получают клеи и лаки.

### 14.3 Резины

Резины – пластмассы с редкосетчатой структурой, в которых связующим выступает полимер, находящийся в высокопластическом состоянии. В резинах связующим являются натуральные (НК) или синтетические (СК) каучуки. Каучукам присуща высокая пластичность, обусловленная особенностями строения их молекул. Линейные и слаборазветвленные молекулы каучуков имеют зигзагообразную или спиралевидную конфигурацию и отличаются большой гибкостью. Чистый каучук ползет при комнатной температуре и особенно при повышенной, хорошо растворяется в органических растворителях. Такой каучук не может использоваться в готовых изделиях. Для повышения упругих и других физико-механических свойств в каучуке формируют редкосетчатую молекулярную структуру. Это осуществляют вулканизацией – путем введения в каучук химических веществ – вулканизаторов, образующих поперечные химические связи между звеньями макромолекул каучука. В зависимости от числа возникших при вулканизации поперечных связей получают резины различной твердости – мягкие, средней твердости, твердые.

Механические свойства резины определяют по результатам испытаний на растяжение и на твердость. При вдавливании тупой иглы или стального шарика диаметром 5 мм по значению измеренной деформации оценивают твердость. При испытании на растяжение определяют прочность  $\sigma_z$  (МПа), относительное удлинение в момент разрыва  $\varepsilon_z$  (%) и остаточное относительное удлинение  $\theta_z$  (%).

В процессе эксплуатации под воздействием внешних факторов (свет, температура, озон, кислород, радиация и др.) резины изменяют свои свойства – стареют. Старение резин оценивают коэффициентом старения  $K_{\text{стар}}$ , который определяют, выдерживая стандартизованные образцы в термостате при температуре  $-70\text{ }^\circ\text{C}$  в течение 144 ч, что соответствует естественному старению резины в течение 3 лет. Морозостойкость резины определяется температурой хрупкости  $t_{\text{хр}}$ , при которой резина теряет эластичность и при ударной нагрузке хрупко разрушается.

Для оценки морозостойкости резин используют коэффициент  $K_M$ , равный отношению удлинения  $\sigma_M$  образца при температуре замораживания к удлинению  $\sigma_0$  при комнатной температуре.

Резины являются сложной смесью различных ингредиентов, каждый из которых выполняет определенную роль в формировании ее свойств. Помимо основы – каучуков – в состав резин вводят: вулканизирующие вещества, ускорители вулканизации, наполнители, пластификаторы, противостарители и красители.

Вулканизирующие вещества (сера, оксиды цинка или магния, пероксиды и нитросоединения) непосредственно участвуют в образовании поперечных связей между макромолекулами. Их содержание в резинах составляет 5-7 %, а в твердых резинах, например эбоните, – до 30 %. В присутствии ускорителей (тиурам, каптакс, оксиды свинца) процесс вулканизации наиболее активен.

Наполнители по воздействию на каучуки подразделяют на активные и инертные. Активные наполнители (сажа, оксид кремния) повышают твердость и прочность резины и увеличивают ее сопротивление истиранию. Инертные наполнители (тальк, мел и др.) вводят в состав резин в целях их удешевления.

Пластификаторы (вазелин технический, парафин, стеариновая кислота, минеральные и растительные масла и т. д.), присутствуя в составе резин (8-30 %), облегчают их переработку, увеличивают эластичность и морозостойкость.

Противостарители замедляют процесс старения резин, препятствуют присоединению кислорода. Присоединение кислорода происходит по месту двойных связей в каучуке. В результате макромолекулы каучука разрываются на части, укорачиваются. Это приводит к потере эластичности, хрупкости и появлению сетки трещин на поверхности. Противостарители химического действия (альдолы, неозон), взаимодействуя с кислородом, протидиффундировавшим в резину, и перекисями каучука, задерживают его окисление. Противостарители физического действия (парафин, воск), образуя поверхностные пленки, затрудняют диффузию кислорода.

Красители (охра, ультрамарин) выполняют не только декоративные функции, но и задерживают световое старение, поглощая коротковолновую часть света.

Решающая роль в формировании основных свойств резин принадлежит каучукам. Натуральный каучук получают из сока (латекса), извлекаемого из стволов каучуковых деревьев. В латексе содержится 30-37 % каучука, частицы которого имеют округлую форму диаметром 0,14-0,6 мкм. Каучук из латекса выделяют коагуляцией с помощью органических кислот (муравьиной или уксусной). Затем рыхлый сгусток промывают водой, раскатывают в листы и сушат. Наибольшее распространение получили сорта натурального каучука смокедшит янтарного цвета и светлого тона.

Натуральный каучук – мягкий эластичный материал плотностью 0,91-0,94 г/см. Он хорошо растворяется в органических растворителях (бензине, бензоле, хлороформе и др.). Натуральный каучук обычно находится в аморфном состоянии. При длительном хранении возможна его кристаллизация. Деформация растяжением натурального каучука вызывает его кристаллизацию. Возникновение кристаллической фазы увеличивает прочность каучука. При температуре  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  натуральный каучук утрачивает эластичность и становится хрупким. Нагрев натурального каучука выше  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  делает его пластичным, а при температуре выше  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  он разлагается. Резины на основе натурального каучука имеют высокую прочность и эластичность, высокие электроизоляционные свойства.

Более широкое применение в производстве резин получили синтетические каучуки, отличающиеся разнообразием свойств. Синтетические каучуки получают из спирта, нефти, попутных газов нефтедобычи, природного газа и т. д.

Бутадиеновый каучук (СКБ) получают полимеризацией газообразного углеводорода бутадиена  $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$  (дивинила) в присутствии металлического натрия.

Цепочка макромолекул СКБ имеет вид  $\dots-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\dots$ . Это некристаллизующийся каучук, отличающийся пониженной прочностью при растяжении, растворимый в неорганических растворителях.

Морозостойкость бутадиенового каучука невысокая и находится в пределах от -40 до -50 °С. СКБ каучук чаще идет на изготовление специальных резин.

Бутадиенстирольный каучук (СКС) получают совместной полимеризацией бутадиена ( $\text{C}_4\text{H}_6$ ) со стиролом ( $\text{CH}_2=\text{CH}_6\text{CH}_5$ ). Свойства каучука зависят от содержания стирольных звеньев. Увеличение стирола повышает прочность, но понижает морозостойкость каучука. Промышленностью освоен выпуск нескольких марок бутадиенстирольных каучуков: СКС-10, СКС-30, СКС-50.

Каучук СКС-30 (содержит 30 % стирола), наиболее универсальный и распространенный, идет на изготовление автомобильных шин, резиновых рукавов и других резиновых изделий. СКС-10 (содержит 10 % стирола) отличается повышенной морозостойкостью (до -77 °С). Каучуки СКС отличаются малой стойкостью к действию органических растворителей (масел и топлива). По диэлектрическим свойствам резины на основе СКС каучуков близки к резинам на основе НК.

Изопреновый каучук (СКИ) получают полимеризацией изопрена ( $\text{C}_5\text{H}_8$ ) в присутствии щелочных металлов (литий) или комплексных катализаторов. Этот каучук по строению, химическим и физико-механическим свойствам близок к натуральному каучуку: СКИ способен кристаллизоваться только при значительном растяжении. Промышленностью выпускаются каучуки СКИ-3 – для изготовления шин, амортизаторов; СКИ-ЗД – для производства электроизоляционных резин; СКИ-ЗВ – для вакуумной техники.

Хлоропреновый каучук (наирит) представляет собой продукт эмульсионной полимеризации хлоропрена. Хлоропреновые каучуки имеют линейное строение макромолекул. Присутствие в макромолекуле каучука хлора (37 %) придает ему полярность. Вследствие полярности наирит обнаруживает невысокие диэлектрические свойства, стойкость к действию масел и бензина, а также озона и других окислителей, огнестойкость. Хлоропреновые каучуки обладают высокими прочностными свойствами. Их применяют при изготовлении резин для шлангов, прокладок, защитных оболочек кабельных изделий.

Бутадиеннитрильный каучук (СКН) получают совместной полимеризацией бутадиена и нитрила акрильной кислоты. В зависимости от содержания нитрила акриловой кислоты бутадиеннитрильные каучуки разделяют на марки СКН-18, СКН-26, СКН-40. Из-за наличия сильнополярной группы ( $-\text{CN}$ ) бутадиеннитрильные каучуки имеют дипольную природу и низкие электроизоляционные свойства. Они стойки в бензине и нефтяных маслах и по этим показателям превосходят наирит. По теплостойкости СКН превосходят натуральный каучук. На основе СКН производят резины для топливных и масляных шлангов, прокладок и уплотнителей мягких топливных баков.

Синтетический каучук теплостойкий (СКТ) представляет собой продукт поликонденсации циклических сил океанов.

Значительная прочность (374,2 кДж) силоксановой связи ( $\text{Si}-\text{O}$ ) придает этим каучукам повышенную термостойкость. Радикалами могут быть соединения  $\text{CH}_3$  и  $\text{C}_6\text{H}_5$ . Силоксановый каучук, содержащий только метильную группу  $\text{CH}_3$ , имеет рабочую температуру от -60 до +250 °С. Замена радикала  $\text{CH}_3$  на  $\text{C}_6\text{H}_5$  повышает его эластичность и морозостойкость до -80 °С.

Каучуки стойки к действию озона и кислорода, растворяются в ароматических углеводородах и набухают в бензине и маслах, отличаются низкой прочностью и плохой адгезией.

На основе силоксановых каучуков производят резины, предназначенные для изоляции электрических кабелей и для герметизирующих и уплотняющих прокладок.

#### 14.4 Стекло, ситаллы, графит

Стекло неорганическое - прозрачный (бесцветный или окрашенный) хрупкий материал, получаемый при остывании расплава, содержащего стеклообразующие компоненты (оксиды кремния, бора, алюминия, фосфора, титана, циркония и др.) и оксиды металлов (лития, калия, свинца, кальция, магния и др.). По типу стеклообразующего компонента различают стекло неорганическое силикатное (на основе  $\text{SiO}_2$ ), боратное ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), боросиликатное, алюмосиликатное и др. (рисунок 14.5).

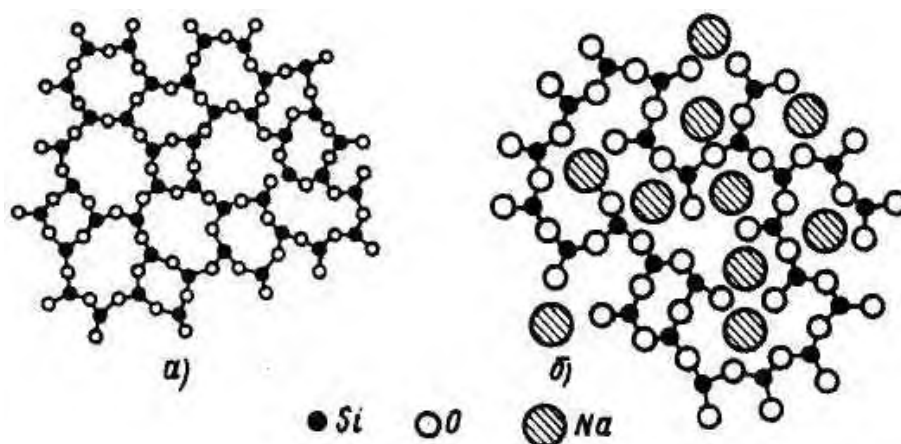


Рисунок 14.5 - Схема непрерывной структурной сетки кварцевого (а) и натриево-силикатного (б) стекла

Благодаря возможности придавать неорганическому стеклу разнообразные свойства, оно широко распространено в различных отраслях техники, строительстве, декоративном искусстве и быту.

Стекло органическое - техническое название прозрачных пластмасс на основе полистирола, поливинилхлоридов, поликарбонатов и др. По сравнению с неорганическим стеклом органическое отличается относительно небольшой плотностью и повышенной прочностью. Органическое стекло малочувствительно к ударам, толчкам и не дает опасных осколков. Применяется для изготовления трехслойного стекла для остекления самолетов, автомобилей и др. Из него изготавливают детали приборов, линзы, светофильтры и бытовые изделия.

Термин «ситаллы» образован от слов: стекло и кристаллы. За рубежом их называют стеклокерамикой, пирокерамами. Ситаллы получают на основе неорганических стекол путем их полной или частичной управляемой кристаллизации. По структуре и технологии получения ситаллы занимают промежуточное положение между обычным стеклом и керамикой. От неорганических стекол они отличаются кристаллическим строением, а от керамических материалов – более мелкозернистой и однородной микроструктурой (рисунок 14.6).



Рисунок 14.6 - Схема кристаллизации стекла при образовании ситаллов с помощью катализаторов

Их получают путем плавления стекольной шихты специального состава с добавкой катализаторов, охлаждения расплава до пластичного состояния и формования из него изделий методами стекольной технологии и последующей кристаллизации. Ситалловые изделия получают также порошковым методом спекания.

В отличие от обычного стекла, свойства которого определяются в основном его химическим составом, для ситаллов решающее значение имеют структура и фазовый состав. Причина ценных свойств ситаллов заключается в их исключительной мелкозернистости, почти идеальной поликристаллической структуре. В них совершенно отсутствует всякая пористость и усадка материала при его переработке незначительна. Свойства ситаллов изотропны. Большая абразивная стойкость делает их малочувствительными к поверхностным дефектам. Материалы обладают высокой химической устойчивостью к кислотам и щелочам, высокой жаростойкостью, газонепроницаемостью и нулевым водопоглощением, являются хорошими диэлектриками.

Жаропрочность ситаллов под нагрузкой составляет 800-1200 °С. Ударная вязкость ситаллов выше, чем ударная вязкость стекла (4,5-10,5 кДж/м<sup>2</sup>), однако они являются хрупкими материалами. Обладают высокой твердостью (микротвердость 7000-10500 МПа) и износостойкостью.

Применение ситаллов определяется их свойствами. Из ситаллов изготавливают подшипники, детали для двигателей внутреннего сгорания, трубы для химической промышленности, оболочки вакуумных электронных приборов, детали радиоэлектроники. Ситаллы используют в качестве жаростойких покрытий. Графит - минерал, наиболее устойчивая кристаллическая модификация чистого углерода. Это полимерный материал кристаллического пластинчатого строения, образованный параллельными слоями гексагональных сеток (плоскостей) (рисунок 14.7)

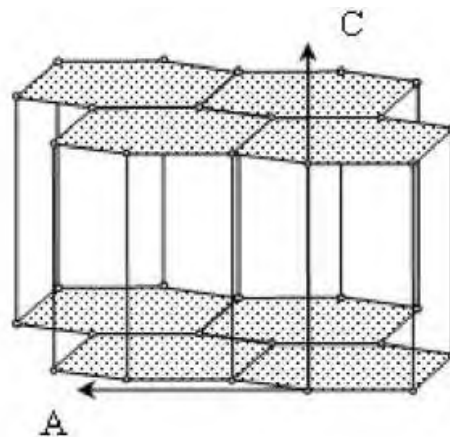


Рисунок 14.7 - Кристаллическая решетка графита.

Графит встречается в природе, а также его получают искусственным путем. Фи-

зико-механические свойства искусственного графита зависят от природы исходного сырья, технологии получения, плотности, степени ориентации кристаллов и др.

В качестве исходных материалов для производства технического графита применяют твердое сырье - нефтяной кокс и каменноугольный пек в качестве связующего вещества. Заготовки формуются в процессе прессования или выдавливания. Процесс графитизации осуществляется путем нагрева заготовок (обоженных при 1200 °С) до 3000 °С.

Графит используется в производстве плавильных тиглей, электродов, карандашей, в атомных ректорах, а также для получения синтетических алмазов.

### **Контрольные вопросы**

- 1) Назовите конструктивные особенности пластмасс.
- 2) Назовите основные методы переработки пластмасс.
- 3) Назовите области применения пластмасс.
- 4) Что является основой резины?
- 5) Зачем нужна вулканизация резины?

## **15 Композиционные материалы**

### **15.1 Основные свойства и классификация композиционных материалов**

Композиционные материалы обладают комплексом свойств, отличающихся от традиционных конструкционных материалов тем, что и предопределило их успешное применение для совершенствования современных и разработки принципиально новых конструкций. Композиционными называют материалы, состоящие из двух компонентов и более, объединенных различными способами в монолит и сохраняющими при этом индивидуальные особенности.

В большинстве случаев композиционные материалы состоят из сравнительно пластичного матричного материала и более твердых и прочных веществ, являющихся упрочняющими наполнителями. Матрица связывает композицию и придает ей нужную форму. В зависимости от материала матрицы различают композиционные материалы с металлической матрицей или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной - полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической - керамические композиционные материалы (ККМ). По типу упрочняющих наполнителей композиционные материалы подразделяют на дисперсно-упрочненные, армированные (волокнистые) и слоистые. Общие схемы строения композиционных материалов по типу упрочняющих наполнителей представлены на рисунке 15.1.

Для композиционных материалов характерны следующие признаки:

- состав, форма и распределение компонентов материала определены заранее;
- материалы состоят из двух компонентов и более различного химического состава и разделены границей;
- свойства материала определяются каждым из составляющих его компонентов;
- материал обладает свойствами, отличными от свойств составляющих его компонентов, взятых в отдельности;
- материал однороден в макромасштабе и неоднороден в микромасштабе;
- материал не встречается в природе, а является искусственно созданным.





Рисунок 15.1 - Схема строения композиционных материалов по типу упрочняющих наполнителей

Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. Компонент, который обладает непрерывностью по всему объему, является матрицей. Компонент же прерывный, разделенный в объеме композиционного материала, считается армирующим или упрочняющим.

В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, а также органические и неорганические полимеры, керамические, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и ее эксплуатационные характеристики: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Армирующие или упрочняющие компоненты равномерно распределены в матрице. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твердостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Более широким понятием, чем армирующий или упрочняющий компонент, является термин «наполнитель», поскольку наполнитель в матрице помимо изменения прочности оказывает влияние и на другие характеристики композиции.

Композиционные материалы классифицируют по геометрии наполнителя, расположению его в матрице и природе компонентов.

По геометрии наполнителя композиционные материалы подразделяют на три группы:

- с нуль-мерными наполнителями, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок;
- одномерными наполнителями, один из размеров которых значительно превосходит два других;
- двухмерными наполнителями, размеры которых значительно превосходят третий.

По схеме расположения наполнителей выделяют три группы композиционных материалов:

- с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;
- с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя в виде волокон, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;

- с трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его распределении.

По природе компонентов композиционные материалы разделяются на четыре группы:

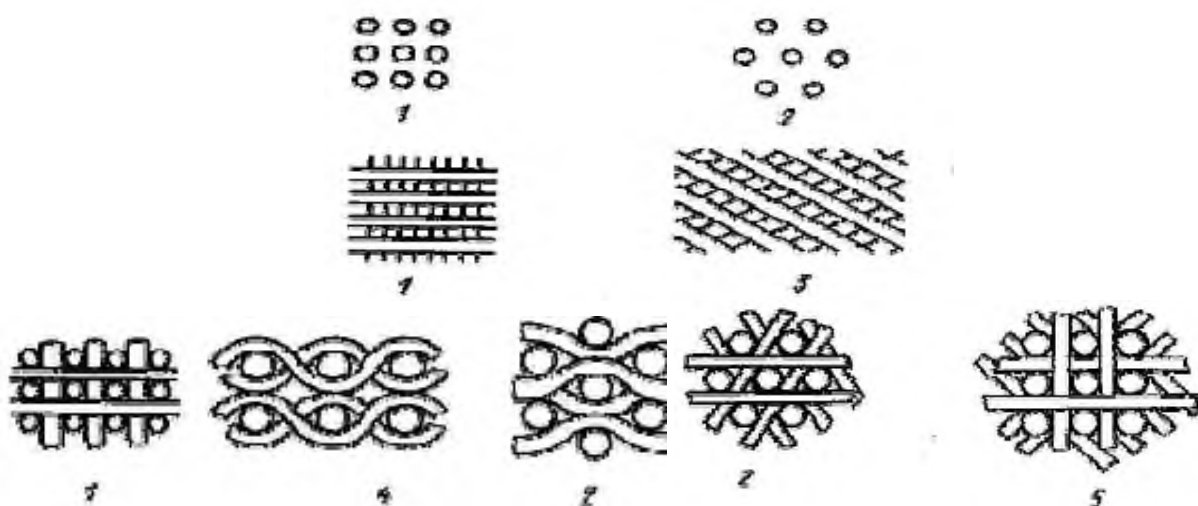
- композиционные материалы, содержащие компонент из металлов или сплавов;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неорганических соединений оксидов, карбидов, нитридов и др.;
- композиционные материалы, содержащие компонент из неметаллических элементов, углерода, бора и др.;
- композиционные материалы, содержащие компонент из органических соединений (эпоксидные, полиэфирные, фенольные и другие смолы).

В названную классификацию не входят полиармированные композиционные материалы, содержащие чередующиеся слои двух композиций или более, с матрицами, отличающимися химическим составом.

Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и от прочности связи между ними. Обычно компоненты для композиционного материала выбирают со свойствами, существенно отличающимися друг от друга.

Композиционные материалы по сравнению с современными конструкционными материалами обнаруживают более высокие удельную жесткость  $E/p$  и удельную прочность  $\sigma_b/p$ .

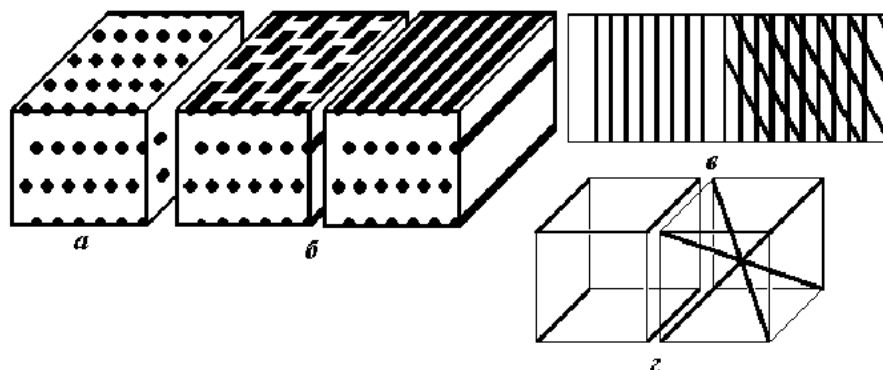
Модуль упругости композиционных материалов может изменяться в требуемом направлении в зависимости от схемы армирования. Высокая надежность в работе конструкций из композиционных материалов связана с особенностями распространения в них трещин. В обычных сплавах трещина развивается быстро и скорость роста ее в период работы конструкции детали возрастает. В композиционных материалах трещина обычно возникает и развивается в матрице и встречает препятствия на границе матрица – упрочнитель. Армирующий элемент тормозит ее распространение, задерживая на некоторое время ее рост. Основные схемы армирования представлены на рисунке 15.2.



1 – прямоугольная; 2 – гексагональная; 3 – косоугольная; 4 – с искривленными волокнами; 5 – система из n нитей

Рисунок 15.2 - Схема армирования композиционных материалов

В композиционных материалах этого типа наибольшее распространение получила металлическая матрица из металла или сплава (рисунок 15.3).



а – зернистые, б – волокнистые; в – с непрерывной укладкой волокон;  
г – с объемной укладкой волокон

Рисунок 15.3 - Структура композитных материалов с металлической матрицей

Композиции на металлической основе упрочняются равномерно распределенными дисперсными частицами различной зернистости: микроскопические с диаметром частицы  $d = 0,01 \div 0,1$  мкм; мелкие с диаметром частицы  $d = 1 \div 50$  мкм.

Композиционные материалы с равномерным распределением частиц упрочнителя различаются изотропностью свойств.

Получают композиции, армированные дисперсными частицами, чаще методами порошковой металлургии, включающей следующие этапы:

- получение порошковой смеси матричного металла и упрочнителя (рассев порошков на фракции, смешивание порошков в смесителях различных систем);
- прессование порошка в компактную заготовку в стальных матрицах (изостатическое прессование) с последующим спеканием.

На стадиях прессования с последующей деформационной и термической обработки в полуфабрикate формируется оптимальная, устойчивая дислокационная структура. Дисперсные частицы наполнителя способствуют образованию зерен с большой степенью неравноосности (волокнистой структуры) и задерживают протекание рекристаллизационных процессов.

В таких материалах матрица воспринимает всю нагрузку, а дисперсные частицы армирующего наполнителя препятствуют развитию пластической деформации, оказывая сопротивление движению единичных (субграниц, границ) зерен. Эффективное упрочнение достигается при содержании 5-10% частиц упрочняющего вещества.

На уровень прочности композиций оказывают влияние объемное содержание частиц упрочнителя, степень дисперсности и расстояние между частицами.

Армирующими наполнителями, чаще служат дисперсные частицы тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов ( $AlO_3$ ,  $ThO_2$ ,  $HfO_2$ ,  $BN$ ,  $SiC$ ,  $Be_2C$  и др.). Эти тугоплавкие соединения имеют высокие значения модуля упругости, низкую плотность, значительную инертность в отношении материала матриц. Так, модуль упругости оксидов  $ThO_2$  и  $AlO_3$  равен  $380,5 \cdot 10^3$  и  $146,12 \cdot 10^3$  МПа, а плотность – 1,0 и 3,97 г/см соответственно. Кроме метода порошковой металлургии существуют и другие технологии получения дисперсионно-упрочненных композиционных материалов. Например, вводят частицы армирующего порошка в жидкий расплав металла или сплава. Улучшения смачивания частиц жидким металлом и равномерного распределения их в

матрице достигают в этом случае ультразвуковой обработкой расплава или другими способами. Равномерное распределение упрочняющей фазы по объему композиции чаще достигается применением твердофазных методов.

## 15.2 Композиционные материалы с алюминиевой матрицей

Промышленное применение нашли композиционные материалы на основе алюминия, упрочненные частицами  $Al_2O_3$ . Их получают прессованием алюминиевой пудры с последующим спеканием (САП). Частицы пудры имеют форму чешуек толщиной около 1 мкм.

Размеры частиц по длине и ширине мало отличаются друг от друга. Оксидная пленка на поверхности частиц имеет толщину 0,01-0,1 мкм. Уменьшение размеров частиц пудры увеличивает их общую поверхность и содержание оксидов алюминия (таблица 15.1).

Таблица 15.1 – Механические свойства САП

Марка	Содержание $Al_2O_3$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{a2}$ , МПа	$\delta$ , %	$E$ , ГПа
САП-1	6-8	300	200	7-9	67
САП-2	9-12	320	230	4	71
САП-3	13-17	400	340	3	76
Д20*	-	420	300	11	69

\* В состоянии после закалки с температурой  $(535 \pm 5)^\circ C$  и последующего старения при  $180^\circ C$ , 124 ч.

При комнатной температуре механические свойства САП ниже свойств высокопрочных алюминиевых сплавов (Д20).

Преимущества САП отчетливо проявляются при температурах выше  $300^\circ C$ , при которых алюминиевые сплавы разупрочняются. Дисперсно-упрочненные сплавы сохраняют эффект упрочнения вплоть до температуры  $0,8T_{пл}$  в результате термодинамической стабильности упрочняющих частиц. Кислород не растворяется в алюминии, и диффузионного взаимодействия между частицами  $Al_2O_3$  через алюминиевую матрицу не происходит. Упрочняющие частицы имеют стабильные размеры и устойчивое взаимное расположение. При  $500^\circ C$  деформируемые сплавы Д19, Д20 имеют прочность в пределах 1-5 МПа, в то время как прочность  $\sigma_B$  САП-1 составляет 80 МПа, САП-2 – 90 МПа, САП-3 – 120 МПа.

Физические свойства САП – электропроводность, теплопроводность и коэффициент термического расширения – связаны линейной зависимостью с содержанием  $Al_2O_3$ , и их значения уменьшаются по мере его повышения. Электропроводность и теплопроводность сплава САП-3 выше, чем у стандартных алюминиевых сплавов (Д19, Д20), и составляет 70-75 % от соответствующих значений технического алюминия.

Сплавы САП удовлетворительно деформируются в горячем состоянии, а сплавы САП-1 – и в холодном. САП легко обрабатываются резанием, удовлетворительно свариваются аргонодуговой и контактной сваркой.

Из САП выпускают полуфабрикаты в виде листов, профилей, труб, фольги. Детали из САП работают при  $300-500^\circ C$ . Из него изготавливают лопатки компрессоров, лопатки вентиляторов и турбин, поршневые штоки. Листы из САП используют для

изготовления деталей обшивок гондол и жалюзи, работающих в зоне выхлопа силовых установок.

### **15.3 Композиционные материалы с никелевой матрицей**

Упрочняющим компонентом в композиционных материалах с никелевой матрицей являются токсичные частицы диоксида тория ( $\text{ThO}_2$ ) или диоксида гафния ( $\text{HfO}_2$ ). Эти материалы обозначают ВДУ-1 и ВДУ-2 соответственно. В сплаве ВДУ-3 матрицей служит никелево-хромовый твердый раствор (20 % хрома), а упрочнителем – диоксид гафния. Оксиды гафния и тория имеют высокие значения микротвердости и прочности при сжатии, а также максимальную стабильность в матрице. Объемное содержание упрочняющей дисперсной фазы оксидов тория и гафния находится в пределах 2-3 %.

Композиционные материалы ВДУ-1, ВДУ-2 и ВДУ-3 при умеренных температурах по прочности уступают жаропрочным никелевым сплавам. При комнатной температуре временное сопротивление разрыву сплавов ВДУ-1 и ВДУ-2 составляет 540-570 и 450-500 МПа соответственно, а у сплава ВДУ-3 – 800-850 МПа. Большая прочность сплава ВДУ-3 по сравнению с остальными двумя связана с легированием матрицы хромом. При высоких температурах по жаропрочности дисперсно-упрочненные сплавы превосходят стареющие деформируемые никелевые сплавы.

Дисперсно-упрочненные сплавы ВДУ-1, ВДУ-2 и ВДУ-3 целесообразно применять при рабочих температурах 1100-1200 °С.

Композиционные материалы ВДУ-1 и ВДУ-2 пластичны, и полуфабрикаты этих сплавов деформируются в широком интервале температур различными методами (ковка, штамповка, осадка, глубокая вытяжка и др.). Для соединения деталей из сплавов типа ВДУ применяют высокотемпературную пайку либо диффузионную сварку, с тем чтобы избежать расплавления. Сплавы ВДУ-2, ВДУ-3 выпускают в виде труб, прутков, листов, проволоки, фольги. Их применяют главным образом в авиационном двигателестроении. Из композиций ВДУ-2 и ВДУ-3 изготавливают сопловые лопатки, стабилизаторы пламени, камеры сгорания, а также трубопроводы и сосуды, работающие при высоких температурах в агрессивных средах.

### **15.4 Композиционные материалы с одномерными наполнителями**

В композиционных материалах этого типа упрочнителями являются одномерные элементы в форме нитевидных кристаллов, волокон (проволоки). Волокна и другие армирующие элементы скрепляются матрицей в единый монолит. Матрица защищает упрочняющие волокна от повреждений, служит средой, передающей нагрузку на волокна, и перераспределяет напряжения в случае разрыва отдельных волокон.

Для армирования композиционных материалов используют непрерывные дискретные волокна с размерами в поперечном сечении от долей до сотен микрометров.

Для упрочнения композиционных материалов используют высокопрочную проволоку из стали, молибдена, вольфрама и других металлов и их сплавов. Кроме того, используют волокна из бора, углерода, стекла, а также монокристаллы из оксидов, нитридов алюминия и кремния и других соединений.

Проволока из вольфраморениевиевого сплава до 1100 °С имеет более высокую длительную прочность. Однако при 1200 °С длительная прочность проволоки ВТ-15, содержащей добавку диоксида тория, превосходит длительную прочность проволоки

ВР-20. Высокие прочностные свойства проволок из вольфрама, молибдена, тантала сохраняются до 1200-1500 °С.

Вольфрамовую и молибденовую проволоку целесообразно применять для армирования жаропрочных композиционных материалов.

Бериллиевую проволоку чаще применяют для упрочнения матриц с малой плотностью – алюминиевой, магниевой, титановой.

Углеродные волокна получают из полиакрилонитрильного (ПАН) гидроцеллюлозного волокна или из волокон на основе нефтяных смол или пеков.

Прочность углеродных волокон также зависит от наличия дефектов – пустот, трещин – и значительно снижается с увеличением размеров дефектов.

В настоящее время освоено производство нескольких типов углеродных волокон, различающихся уровнем механических свойств:

- высокопрочные волокна ( $\sigma_B = 2500 \div 3200$  МПа,  $E = (180 \div 220) \times 10^3$  МПа);
- высокомодульные волокна ( $\sigma_B = 1400 \div 2200$  МПа,  $E = (350 \div 550) 10^3$  МПа).

Промышленностью выпускаются углеродные волокна в виде крученого или некрученого жгута с диаметром волокон около 7 мкм и числом волокон в жгуте от 1000 до 160 000. Из углеродных волокон делают ленты различной ширины.

К недостаткам углеродных волокон следует отнести их склонность к окислению на воздухе, химическую активность при взаимодействии с металлическими матрицами, слабую адгезию с полимерными матрицами. Улучшения совместимости волокон с металлическими матрицами и защищенности их от окисления добиваются нанесением на углеродные волокна металлических и керамических покрытий.

Борные волокна. Борные волокна получают осаждением бора из газовой фазы ( $BCl_2 + H_2$ ) при 1100-1200 °С на предварительно нагретую и очищенную вольфрамовую проволоку диаметром 12 мкм. В результате осаждения образуется сердцевина из боридов вольфрама ( $WB$ ,  $W_2B_5$ ,  $WB_4$ ) диаметром 15-17 мкм, вокруг которой располагается слой поликристаллического бора. Диаметр полученного таким образом волокна бора 70-200 мкм.

Прочность борных волокон определяется поверхностными и объемными дефектами, а также дефектами на поверхности раздела сердцевина–оболочка. Чаще поверхностные дефекты возникают в борных волокнах с грубой поверхностью, содержащей наросты, неровности и трещины. Поверхностные дефекты устраняют травлением, что ведет к увеличению прочности борного волокна.

Волокна бора обладают ценным сочетанием свойств низкой плотностью ( $2600 \text{ кг/м}^3$ ), достаточно высокой прочностью ( $\sigma_B = 3500$  МПа при модуле Юнга 420 000 МПа и температуре плавления 2300 °С). Борное волокно интенсивно окисляется на воздухе при 400 °С, а при температурах выше 500 °С интенсивно взаимодействует с алюминиевой матрицей. Повышают жаростойкость и предотвращают взаимодействие борного волокна с алюминиевой матрицей, нанося на их поверхность покрытия из карбида кремния толщиной 3-5 мкм. Волокна бора, покрытые карбидом кремния, получили название борсик. При повышенных температурах на воздухе прочность волокон борсика и карбида кремния значительно выше прочности волокон бора (рисунок 15.4).

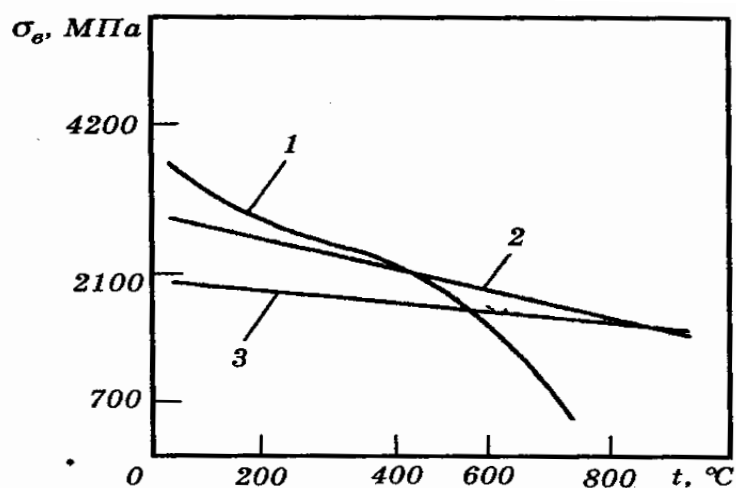


Рисунок 15.4 – Изменение прочности волокон бора (1), борсика (2), карбида кремния (3) на воздухе в зависимости от температуры

Борные волокна выпускаются промышленностью в виде моноволокон на катушках, а также в виде полуфабрикатов – лент полотняного плетения шириной от 5 до 50 см. Основу полотен образуют борные волокна, а уток – полиамидные или другие волокна.

Волокна бора применяют в производстве композитов на основе полимерной и алюминиевой матриц.

Волокна карбида кремния. Волокна этого типа получают по технологии, мало отличающейся от технологии получения волокон бора. Карбидокремниевые волокна, полученные на углеродной подложке, более дешевые и характеризуются повышенной чувствительностью к поверхностным дефектам и пониженными характеристиками прочности.

Волокна карбида кремния применяют для армирования металлических матриц композитов, предназначенных для эксплуатации при высоких температурах.

Стекланные волокна. Получают путем пропускания расплавленного стекла при 1200-1400 °С через фильеры диаметром 0,8-3 мм и дальнейшим быстрым вытягиванием до диаметра несколько микрометров. Непрерывные волокна диаметром 3-100 мкм, соединяясь в пряжи, наматываются на вращающиеся с большой скоростью барабаны и имеют длину до 20 км. Штапельные волокна выпускают диаметром 0,5-20 мкм длиной 0,01-5 м.

Волокна, соединенные в пряжи, оказывают друг на друга сильное абразивное воздействие. Истирание волокон в пряжи предотвращают обработкой волокон технологическими замасливателями (эмульсия крахмала или минерального масла). Их применяют на стадии переработки волокна. Активные замасливатели (пленкообразующие смазочные материалы, кремнийорганические соединения) помимо предотвращения истирания волокон в пряжи усиливают адгезию между матрицей и стекловолокном в армированных пластиках. Замасливатели также препятствуют возникновению дефектов на поверхности волокон и, таким образом, увеличивают их прочность.

Непрерывные волокна выпускают с треугольной, квадратной, прямоугольной, шестиугольной и круглой формой поперечного сечения, что позволяет получить бо-

лее плотную упаковку их в композиции и, таким образом, обеспечить повышение ее прочности и жесткости.

Основой стеклянных волокон является диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . В зависимости от природы стеклообразующего вещества стекла делят на силикатные ( $\text{SiO}_2$ ), алюмосиликатные ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ), алюмоборосиликатные ( $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ) и др.

Щелочные стекла, содержащие добавки  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ , имеют пониженные температуру плавления, прочность и химическую стойкость ввиду разрыва прочной связи  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ .

Широко используемое для армирования пластиков Е-стекло размягчается при  $846^\circ\text{C}$ , его плотность  $2540 \text{ кг/м}^3$ , модуль Юнга  $73,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ .

Высокопрочное S-стекло при комнатной температуре имеет прочность  $4,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ , а модуль упругости –  $87 \cdot 10^3 \text{ Па}$ . Прочность стеклянных волокон уменьшается при увеличении их диаметра (рисунок 15.5). Более тонкие волокна содержат меньше дефектов (пор, микротрещин). Для армирования пластиков очень тонкие непрерывные стеклянные волокна не используют в связи с разрушениями (обрывами) очень многих из них. Оптимальные диаметры волокон для армирования пластиков 5-15 мкм.

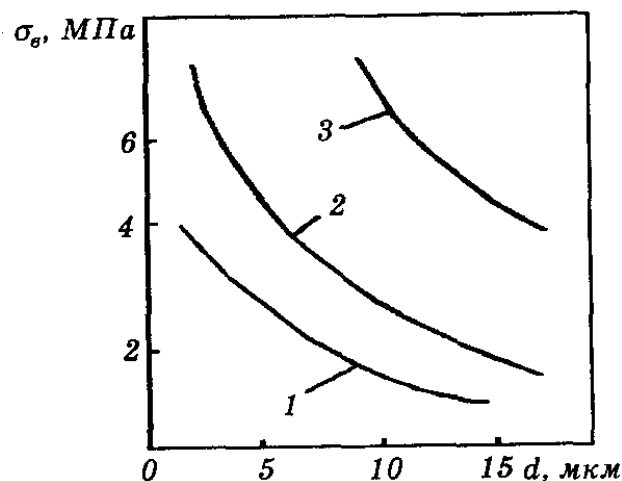


Рисунок 15.5 – Зависимость прочности волокон из щелочного (1), бесщелочного (2) и алюмоборосиликатного (3) стекол от его диаметра

Стекловолокна применяют для армирования композитов в виде жгутов, нитей, лент, тканей различного плетения, матов.

Стеклонаполненные полиамиды (ГОСТ 17648–83). Представляют собой композиционный материал, состоящий из полиамидов, наполненных длинными отрезками стеклянных нитей. Предназначены для изготовления деталей литьем под давлением конструкционного электротехнического и общего назначения, обладающих повышенной теплостойкостью и повышенными механическими свойствами и применяемых для нужд народного хозяйства и экспорта. Стандарт предусматривает следующие марки: ПА 610-ДС, ПА 6-210-ДС, ПА 6-211-ДС, ПА 66-ДС.

Условные обозначения стеклонаполненного полиамида состоит из наименования исходного полиамида (ПА), краткого цифрового обозначения марки исходного полиамида (610, 6-210, 6-211, 66), условного обозначения длины стеклянной нити в грануле стеклонаполненного полиамида (ДС), длины отрезка стеклянной нити, цвета и сорта.



Для марки ПА 6-211-ДС в скобках указывают наименование стабилизатора и букву К для полиамида, окрашенного в массу. Примеры условного обозначения: ПА 6-210-ДС, черный, сорт высший, ГОСТ 17648-83; ПА 6-211-ДС-К (стабилин 10), сорт высший, ГОСТ 17648-83. В таблице 15.2 приведены обозначения марок стеклонеполненного полиамида, аналогичных указанным в ГОСТ 17648-83.

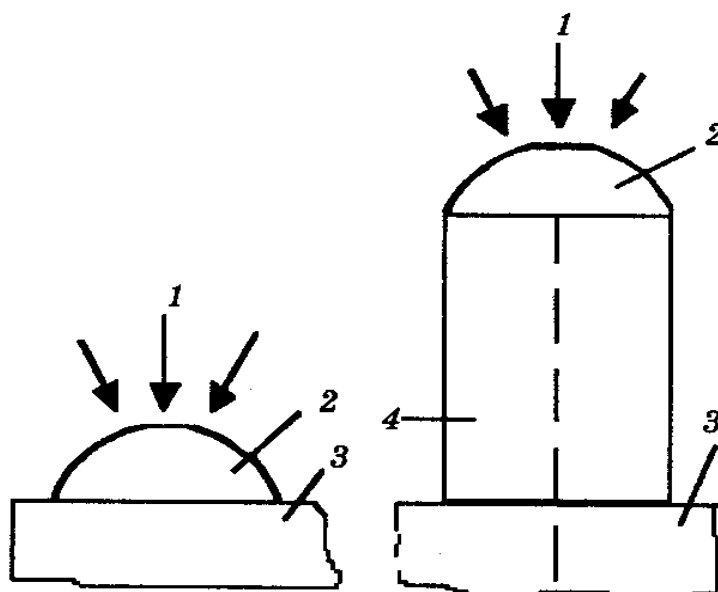
Таблица 15.2 – Обозначения марок стеклонеполненного полиамида в различных стандартах

ГОСТ 17648-83	ГОСТ 17648-72	Нормативно-техническая документация
ПА 610-ДС	П 68С-30	-
ПА 6-210-ДС	КПС-30	КС-30, КОС-30
ПА 66-ДС	-	АС-30, АОС-30
ПА 6-211-ДС	-	ПА 6-211-ДС

Нитевидные кристаллы (усы).

Нитевидные кристаллы карбидов и нитридов кремния, оксида и нитридов алюминия и других тугоплавких соединений получают осаждением из газовой фазы с использованием транспортных реакций, реакций пиролиза, восстановления летучих соединений по методу пар–жидкость–твердая фаза (ПЖТ).

Рост кристаллита карбида кремния (по схеме ПЖТ) происходит аналогично выращиванию кристалла кремния (рисунок 15.6).

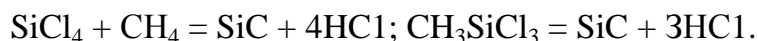


1 – пар; 2 – капелька расплава Au–Si; 3 – кремниевая подложка; 4 – кристалл кремния

Рисунок 15.6 - Схема роста кристалла кремния па механизму пар–жидкость–кристалл

На поверхности кремниевой подложки 3 находится частица золота при температуре, близкой к температуре плавления. В этих условиях золото растворяет кремний и превращается в капельку 2 расплава золото–кремний. Пары кремния, конденсируясь в капельке расплава, пересыщают ее атомами кремния. Это ведет к выделению кремния на границе раздела жидкость–подложка и росту нитевидного кристалла 4. Поперечные размеры кристалла определяются диаметром капли расплава, а скорость роста

уса – скоростью кристаллизации поступающего к поверхности капли кремния. При получении нитевидных кристаллов карбида кремния их выращивание ведут из хлорсиланов и углеводородов по реакциям:



В качестве жидкой фазы используют тройные расплавы железо – углерод – кремний, а подложкой служит графит. Процесс проходит при 1250-1350 °С.

Диаметр кристаллита кремния в зависимости от условий получения изменяется от долей до десятков микрометров. Длина кристаллитов достигает 60-80 мкм. В условиях производства для получения нитевидных кристаллов используют периодические, полунепрерывные и непрерывные процессы. В первых двух процессах рост кристаллов происходит на массивных стационарных подложках. В непрерывном процессе роль подложки выполняют взвешенные в объеме газового потока микроскопические центры кристаллизации.

Непрерывные процессы получения нитевидных кристаллов более производительны, но в этом случае кристаллиты имеют длину, меньшую, чем длина нитевидных кристаллов, полученных периодическими и полунепрерывными методами.

Промышленные методы производства усов других соединений (нитридов кремния, алюминия, бора, оксидов алюминия) имеют много общего и аналогичны технологии получения карбидов кремния.

Усы, нитевидные кристаллы отличаются совершенством структуры и имеют прочностные свойства, близкие к теоретическим. Свойства наиболее изученных и практически используемых нитевидных кристаллов для армирования композиционных материалов приведены в таблице 15.3.

Таблица 15.3 – Свойства некоторых нитевидных кристаллов (усов)

Материал кристаллов	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B \cdot 10^{-3}$ , МПа	Удельная прочность, км	Удельный модуль упругости, км
SiC	2665	3320	49	21	650	15 200
B <sub>4</sub> C	2450	2490	45	14	550	20 000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2040	3880	64	28	525	10 700
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Cr	1675	3320	31	14	425	12 000
	1665	7500	23	9	125	3 200
Fe	1540	6370	20	13,3	200	3 200
Графит	3640	1660	71	19,9	1075	42 500

Усы графита, обладая высокими показателями удельной прочности и жесткости, неустойчивы в металлических матрицах при высоких температурах. Нитевидные кристаллы металлов из-за высокой плотности обнаруживают пониженную удельную жесткость по сравнению с соответствующими характеристиками усов тугоплавких соединений (SiC, B<sub>4</sub>C и др.). Усы металлов склонны к разупрочнению при переработке, несовместимы с металлическими матрицами и непригодны для армирования метал-

лических матриц. Нитевидные кристаллы SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладают лучшей совместимостью с металлами, стойки к воздействию влаги, истиранию при переработке. Обнаруживая лучшие высокотемпературные свойства, усы SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и других тугоплавких соединений являются хорошими упрочнителями композиционных материалов с металлической матрицей.

### **15.5 Композиционные материалы с алюминиевой матрицей, армированные стальной проволокой и другими материалами**

Технический алюминий и его сплавы (АМц, АМг6, АД1, Д16, САП и др.) используют в качестве матриц композиционных материалов. Армирование матриц выполняют высокопрочной стальной проволокой из сталей (08Х18Н9Т, 1Х15Н4АМЗ, ЭП322 и др.), бериллиевой проволокой и волокнами бора, карбида кремния, углерода.

Композиции, упрочненные стальными проволоками, получают прокаткой между валками прокатного стана до компактного состояния. Прокатке подвергают сэндвич из алюминиевой фольги и волокон. Режим прокатки определяется температурой, направлением и степенью деформации. Температура разупрочнения стальных волокон определяет температуру прокатки композиции алюминий–сталь. Так, температура прокатки для композиции алюминий–сталь при использовании в качестве упрочнителя проволоки из стали 08Х18Н9Т и 12Х18Н10Т составляет 380-400 °С и 420-450 °С при использовании волокон из стали 15Х15Н4АМЗ и ЭП322, имеющих более высокую температуру разупрочнения (400 и 450 °С соответственно). Направление деформации при прокатке выбирают под некоторым углом к направлению армирующих волокон, с тем чтобы избежать обрыва волокон при деформации в ходе продольной прокатки и искривления волокон при поперечной прокатке.

Промышленностью освоен выпуск композита КАС-1. В качестве упрочнителя применяют проволоку 1Х15Н4АМЗ диаметром 0,15 мм. Матрицей в этих композициях служит сплав АВ или САП-1В результате армирования алюминиевой матрицы прочность композиции увеличивается в 10-12 раз при объемной доле упрочнителя до 25 %. При увеличении объемной доли армирующего волокна до 40 % временное сопротивление прочности композиции достигает 1700 МПа.

Алюминиевая матрица, армированная стальной проволокой (25-40 %), по прочностным свойствам превосходит высокопрочные алюминиевые сплавы и приближается к уровню аналогичных свойств титановых сплавов.

Прочность алюминий-стальной композиции можно дополнительно повысить холодной пластической деформацией и закалкой с последующим старением, если матрицей служит алюминиевый сплав, упрочняемый термической обработкой.

При повышенных температурах прочность алюминий-стальной композиции превышает прочность теплостойких алюминиевых сплавов. Для работы при высоких температурах рационально в качестве матрицы использовать дисперсионно-упрочненные материалы типа САП.

Введение стальной проволоки в матрицу из САП увеличивает прочностные свойства композиции. Так, предел прочности композиции САП-1 с 15 % проволоки Х18Н9 ( $\sigma_{\text{в}}=1750$  МПа) при температуре 250 °С и 415-435 МПа в 2,3 раза больше, чем предел прочности САП-1 при тех же температурах, а при 350 °С – в 3,9 раза, при 500 °С – 5,6 раза.

Композиция САП-1 – стальная проволока имеет удовлетворительную термическую стабильность микроструктуры при высоких температурах. На границе матрица–

волокно при 450 °С в течение 150 ч под нагрузкой не происходит образования интерметаллических соединений.

Композиция А1–волокно бора отличается высокой прочностью и жесткостью и способна работать при 400-500 °С, поскольку бор мало разупрочняется с повышением температуры.

Основная проблема при армировании алюминия волокнами бора – предотвращение взаимодействия бора с алюминием. Поэтому промышленный композиционный материал (ВКА-1), содержащий 50 % волокон бора, был получен диффузионной сваркой пакета, составленного из чередующихся листов алюминиевой фольги с закрепленными на них слоями борных волокон. Покрытие борного волокна нитридом бора или карбидом кремния (волокно борсик) снижает его взаимодействие с алюминиевой матрицей даже в расплавленном состоянии. В этом случае открывается возможность получения композиционного материала жидкофазными методами.

Увеличение объемного содержания бора увеличивает прочность и жесткость композиции А1–В (таблице 15.4).

Таблица 15.4 – Прочность и жесткость композиции А1–В в зависимости от содержания волокон бора

Содержание волокон бора, %	Прочность, МПа	Модуль упругости $E \cdot 10^{-3}$ , МПа
0	70-140	70
10	300-380	105
20	500-650	135
30	700-900	180
40	900-1140	190-200
50	1100-1400	200-257

Прочность и модуль упругости материала ВКА-1 до температуры 500 °С превосходят соответствующие характеристики высокопрочного сплава В95 и сплава АК4-1 (рисунок 15.7). Наиболее значительно преимущество композиционного материала при 250-400 °С.

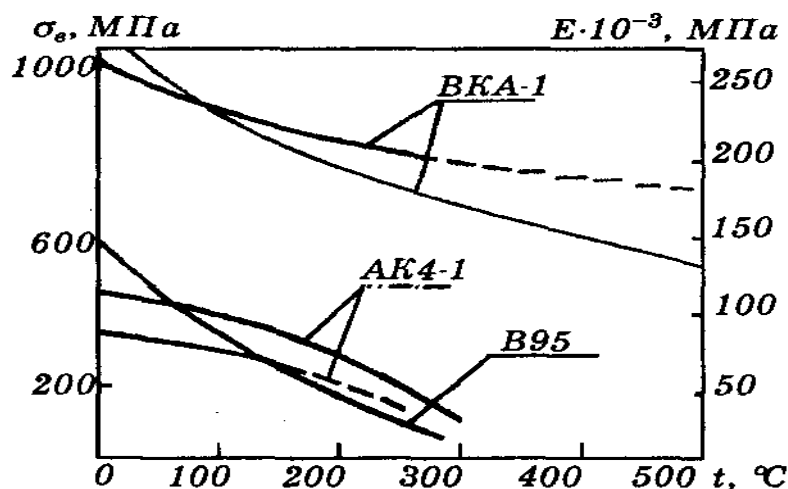


Рисунок 15.7 – Зависимость предела прочности (—) и модуля упругости (---) композиционного материала ВКА-1, сплавов В95 и АК4-1 от температуры

Модуль упругости материала ВКА-1 с повышением температуры меняется незначительно и составляет при содержании волокон бора 30 и 50 % соответственно 136 000 и 228 000 МПа. Плотность материала ВКА-1 2650 кг/м<sup>3</sup>, а удельная прочность 45 км.

Предел прочности алюминия, армированного волокнами борсика, при 500 °С составляет 600 МПа. Прочность такой композиции при объемном содержании борсика 65 % составляет 1600 МПа и сохраняется после длительной выдержки (до 1000 ч) материала при 300 и даже 500 °С.

Композиционные материалы на алюминиевой основе, армированные углеродными волокнами, уступают по удельной прочности (42 км) материалам, армированным борным волокном, хотя они дешевле и легче последних.

Производство композиционного материала с углеродным волокном связано с большими технологическими трудностями вследствие взаимодействия углерода с металлической матрицей (в том числе и алюминиевой) при нагреве. В результате отмечается понижение прочности материала. Композиции А1–углеродное волокно получают быстрым протягиванием пучка углеродных волокон через расплав алюминия.

Попытки получить композицию алюминий–углеродное волокно другими методами (диффузионная сварка, электроосаждение материала матрицы) не дали положительных результатов из-за разрушения волокон при понижении давления.

Характеристики прочности алюминиево-углеродных композиций из-за большого разброса характеристик углеродных волокон, различия в технологических режимах процессов производства полуфабрикатов и изделий из этого материала проявляются в широком диапазоне значений. При объемной доле упрочнителя 18-53 % прочность композиции А1–углеродное волокно вдоль расположения волокон составляет от 150-400 до 500-1000 МПа, а модуль Юнга –  $(116 \div 168) 10^3$  МПа.

Добиться улучшения свойств композиционного материала можно, совершенствуя технологию его изготовления.

Композиционные материалы с титановой матрицей армируют в целях увеличения модуля упругости и повышения рабочих температур. Производство композиционных материалов с титановой матрицей связано с необходимостью нагрева до высоких температур, что резко активизирует способность матрицы к газопоглощению и взаимодействию со многими упрочнителями (бором, карбидом кремния, оксидом алюминия и др.).

### **15.6 Композиционные материалы на никелевой матрице, упрочняемые нитевидными кристаллами, вольфрамовой и молибденовой проволокой и другими материалами**

Армированию чаще подвергают жаропрочные никелевые сплавы, чтобы увеличить время их работы и рабочую температуру до 1100-1200 °С. Для армирования никелевых сплавов применяют упрочнители – нитевидные кристаллы  $Al_2O_3$  (усы), проволоки тугоплавких металлов и сплавов на основе W и Mo, волокна углерода и карбида кремния.

Армирование никеля и нихрома усами  $Al_2O_3$  выполняют методами порошковой металлургии. Для улучшения прочности связи волокно–матрица в шихту вводят титан и хром. Прочность композиции при содержании усов 9 %  $Al_2O_3$  достигает 1800-2100 МПа, а удельная прочность 22-25 км.

Наиболее широкое распространение получило армирование жаропрочных никелевых сплавов вольфрамовой проволокой. Композиционный материал в этом случае получают способами пластического деформирования прокаткой, сваркой, взрывом.

Так, методом динамического горячего прессования в вакууме пакетов из чередующихся слоев жаропрочного никельхромовольфрамового сплава ХН60В и слоев проволоки ВТ15 диаметром 0,15-0,18 мм получают композицию, отличающуюся повышенной кратковременной прочностью при 1100-1200 °С по сравнению с неармированной матрицей (рисунок 15.8). Прочность вольфрамовой арматуры до конца не используется в связи с появлением дефектов в отдельных волокнах при ударном уплотнении. Модуль упругости композиции увеличивается с ростом содержания упрочнителя согласно закону аддитивности, и при 34 % проволоки ВТ15 он составляет  $265 \cdot 10^3$  МПа. Длительная прочность композиции ХН60В–ВТ15 (34 %) на базе 100 ч при 1100 и 1200 °С равна соответственно 104 и 55 МПа.

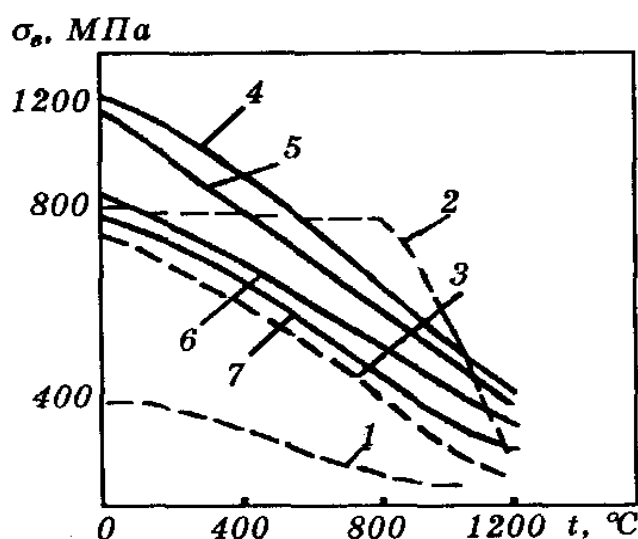


Рисунок 15.8 – Зависимость предела прочности чистого никеля (1), сплава ЖС6К (2), сплава ХН60В (3) и сплава ХН60В, упрочненного проволокой ВТ15 в количестве 34 % (4), 28 % (5), 22 % (6), 15 % (7)

Длительная работа композиции приводит к разупрочнению арматуры в связи с развитием в проволоке ВТ15 рекристаллизационных процессов, ускоряемых действующей нагрузкой и диффузией никеля и хрома из матрицы в волокна.

Композиционный материал ВКН-1 (матрица – литейный жаропрочный сплав ЖС6К, упрочненный вольфрамовой проволокой ВА диаметром 0,5 мм) получают вакуумным всасыванием. Длительная прочность ВКН-1 выше прочности сплава ЖС6К, и при одинаковых значениях нагрузки и долговечности он по сравнению с неармированной матрицей имеет резерв по температуре 100 °С. Перспективными упрочнителями для жаропрочных матриц могут быть волокна карбида кремния и углеродные волокна, отличающиеся высокой температурой разупрочнения. Их использование в качестве армирующих элементов сдерживается совместимостью с жаропрочной матрицей. Проблема решается в настоящее время путем разработки барьерных покрытий для этих видов упрочнителей.

## Контрольные вопросы

- 1) Что называют композиционными материалами?
- 2) От каких факторов зависят свойства композиционных материалов?
- 3) Что такое матрица композиционного материала?
- 4) Как располагается наполнитель в волокнистых композиционных материалах?
- 5) Что такое слоистые композиционные материалы?

## Библиографический список

1. Лякишев Н.П. Энциклопедический словарь по металлургии: Справочное издание. В 2-х т. Т. 1: А-О/ Н.П. Лякишев и др. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. – 412 с.
2. Стерин И.С. Машиностроительные материалы. Основы металловедения и термической обработки / Учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2003.- 344 с.
3. Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
4. Михайлов А.М. Литейное производство: Учебник / А.М. Михайлов, Б.В. Бауман, Б.Н. Благов и др. / Под ред. А.М. Михайлова. – М.: Машиностроение. 1987. – 255 с.
5. Кудрюмов А.В., Пикунов М.В. Литейное производство цветных и редких металлов. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.
6. Материаловедение и технология материалов: Учебник / В.Т. Жадан, П.И. Полухин, А.Ф. Нестеров и др. – М.: Металлургия, 1994. – 623 с.
7. Свойства элементов: справочник / Под ред. М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1985. – 671 с.
8. Лунев В.В., Аверин В.В. Сера и фосфор в стали. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
9. Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. В 3-х т. - 4-е изд. – М.: Металлургия, 1991. – 1131 с.
10. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – 414 с.
11. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов: (Справ. пособие). – Мн.: Беларусь, 1981. – 205 с.
12. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для студентов высших учебных заведений. / В.Б. Арзамасов, А.Н. Волчков, В.А. Головин и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 446 с.
13. Материаловедение: учеб. для студентов вузов / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе и др. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008.– 232 с.

БРАТКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ  
ШЕВЧЕНКО ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И  
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

для бакалавров по направлениям подготовки:

22.03.02 «Металлургия»,

15.03.02 «Технологические машины и оборудование»,

13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

всех форм обучения

Подписано в печать 22.05.2016 г.		
Формат 60x90 <sub>1/16</sub> Рег.№ 85	Печать цифровая Тираж 100 экз.	Уч.-изд.л. 10,44

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: [nfmisis@yandex.ru](mailto:nfmisis@yandex.ru)

Контактный тел. 8 (3537) 679729.