

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Л. В. КАРТОНОВА      В. А. КЕЧИН

# ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Учебное пособие

Владимир 2014

УДК 620.22

ББК 30.3

Рецензент:

Кандидат технических наук  
доцент кафедры «Технология машиностроения»

*А.И. Елкин*

**Картонова Л. В., Кечин В.А.** Основы материаловедения: учеб. пособие / Л. В. Картонова, В. А. Кечин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир, 2014. – 179 с.

Содержит изложение основных вопросов курса «Материаловедение», вызывающих наибольшую трудность при изучении данной дисциплины.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150100 «Материаловедение и технологии материалов». Может быть полезно бакалаврам, обучающимся по техническим направлениям подготовки.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Табл. 27. Ил. 32. Библиогр.: 30 назв.

УДК 620.22

ББК 30.3

© ВлГУ, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

**Материаловедение** – это наука, изучающая и устанавливающая взаимосвязь между составом, строением и свойствами современных машиностроительных материалов, а также о методах изменения этих свойств. Как прикладная наука материаловедение постоянно развивается и непрерывно обогащается за счет разработки новых материалов.

Ускорение развития машиностроения во многом зависит от успехов в создании и использовании эффективных и ресурсосберегающих материалов и технологий. Поэтому специалисты в области металлургии, металлообработки и машиностроения должны обладать достаточными знаниями для рационального выбора материалов, методов их упрочнения и снижения материалоемкости изделий при одновременном достижении наиболее высокой технико-экономической эффективности. Это основная задача курса «Материаловедение».

Совершенствование производства, выпуск современных машиностроительных конструкций, машин невозможны без дальнейшего развития производства металлических сплавов, которые в настоящее время являются основными материалами машиностроения. В зависимости от назначения к сплавам предъявляются различные требования. Получение тех или иных свойств определяется внутренним строением сплавов. В свою очередь строение зависит от характера предварительной обработки. Поэтому между всеми характеристиками существуют определенные связи: между составом и строением и между строением и свойствами. Изучение этих взаимосвязей составляет предмет дисциплины «Материаловедение».

Развитие науки и техники требует материалов с уникальными свойствами. Материаловедение является одной из важнейших приоритетных наук, определяющих технический прогресс.

# Раздел I. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

## Глава 1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

В технике под металлом понимают вещества, обладающие «металлическим блеском», в той или иной мере присущим всем металлам пластичностью. Металлы условно делятся на две группы: черные и цветные.

*Черные металлы* имеют темно-серый цвет, большую плотность, высокую температуру плавления, относительно высокую твердость и во многих случаях обладают полиморфизмом. Наиболее типичным металлом этой группы является *железо*.

*Цветные металлы* чаще всего имеют характерную окраску: красную, желтую, белую. Обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления, для них характерно отсутствие полиморфизма. Наиболее типичным металлом этой группы является *медь*.

Наибольшее применение нашли черные металлы. Широкое использование железа и его сплавов связано с большим содержанием его в земной коре, низкой стоимостью, высокими технологическими и механическими свойствами.

Цветные металлы чаще всего подразделяют по сходным свойствам: легкие (бериллий, магний, алюминий) и тяжелые (вольфрам, молибден, ванадий, медь); легкоплавкие (цинк, кадмий, олово, ртуть, свинец, таллий, сурьма) и тугоплавкие (титан, молибден, вольфрам, ванадий); благородные (серебро, золото, металлы платиновой группы); радиоактивные (радий, уран, плутоний).

Наиболее широко применяются в чистом виде и в составе сплавов такие цветные металлы, как медь, алюминий, магний, титан, свинец, цинк, олово.

### 1.1. Кристаллические решетки

Все металлы и их сплавы имеют характерную кристаллическую структуру. Кристаллическое состояние прежде всего характеризуется определенным, закономерным расположением атомов в пространстве.

В кристалле элементарные частицы сближены до соприкосновения и располагаются закономерно по разным направлениям. Для упрощения пространственное расположение частиц заменяют схемами, где центры тяжести частиц представляют точками. Точки пересечения прямых линий, в которых располагаются атомы, называются узлами кристаллической решетки.

Для описания элементарной ячейки кристаллической решетки используются шесть величин: три отрезка ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) и три угла ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) между этими отрезками. Размер элементарной ячейки оценивается тремя отрезками – параметрами (периодами) решетки.

На рис. 1.1 представлены основные типы кристаллических решеток [29, с. 23].

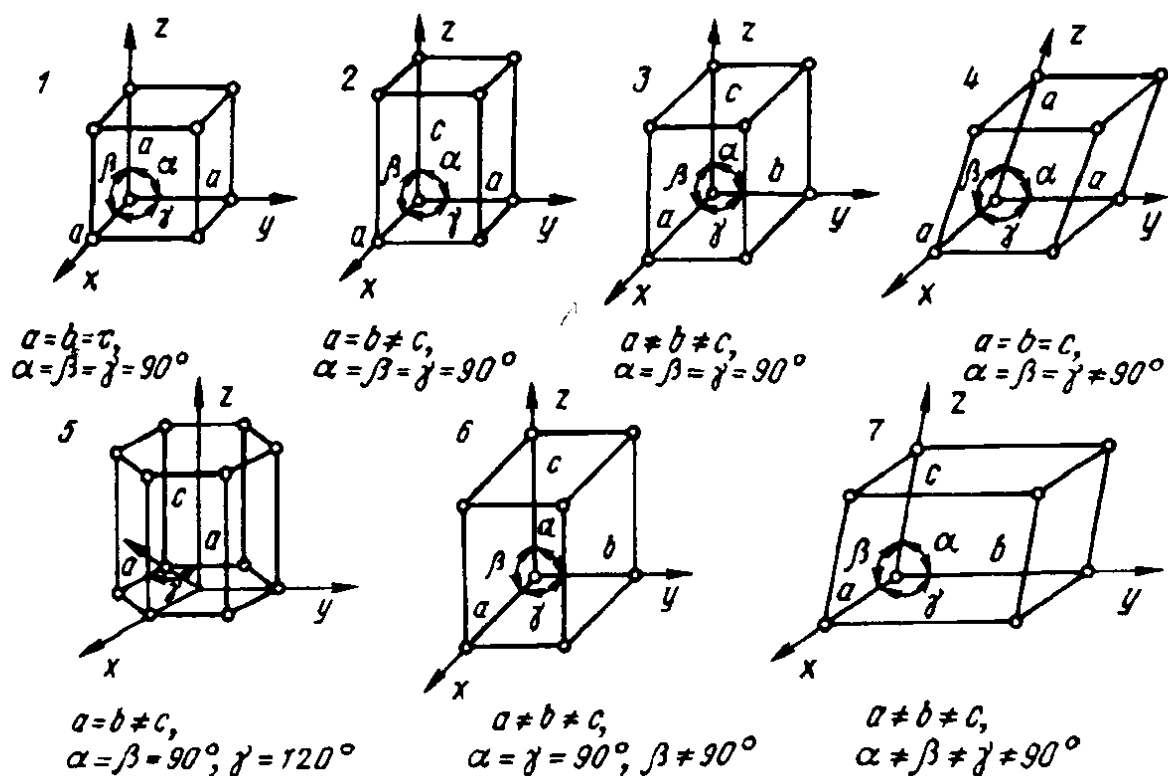


Рис. 1.1. Основные типы кристаллических решеток:

- 1 – кубическая; 2 – тетрагональная; 3 – ромбическая; 4 – ромбоэдрическая;  
5 – гексагональная; 6 – моноклинная; 7 – триклинная

Характеристики основных кристаллических систем приведены в таблице.

### Характеристика кристаллической системы

Система	Ребра	Углы
Кубическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Тетрагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ромбическая	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ромбоэдрическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Гексагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$
Моноклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma \neq 90^\circ$
Триклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$

Металлы образуют в основном три типа решеток (рис. 1.2): объемно центрированную кубическую (R, Na, Li, Ti<sub>β</sub>, Fe<sub>α</sub> и др.), гранецентрированную кубическую (Ca<sub>α</sub>, Ce, Ag, Au, Cu, Fe<sub>γ</sub>, Ni и др.) и гексагональную плотноупакованную (Mg, Ti<sub>α</sub>, Zn, Ca<sub>β</sub> и др.).

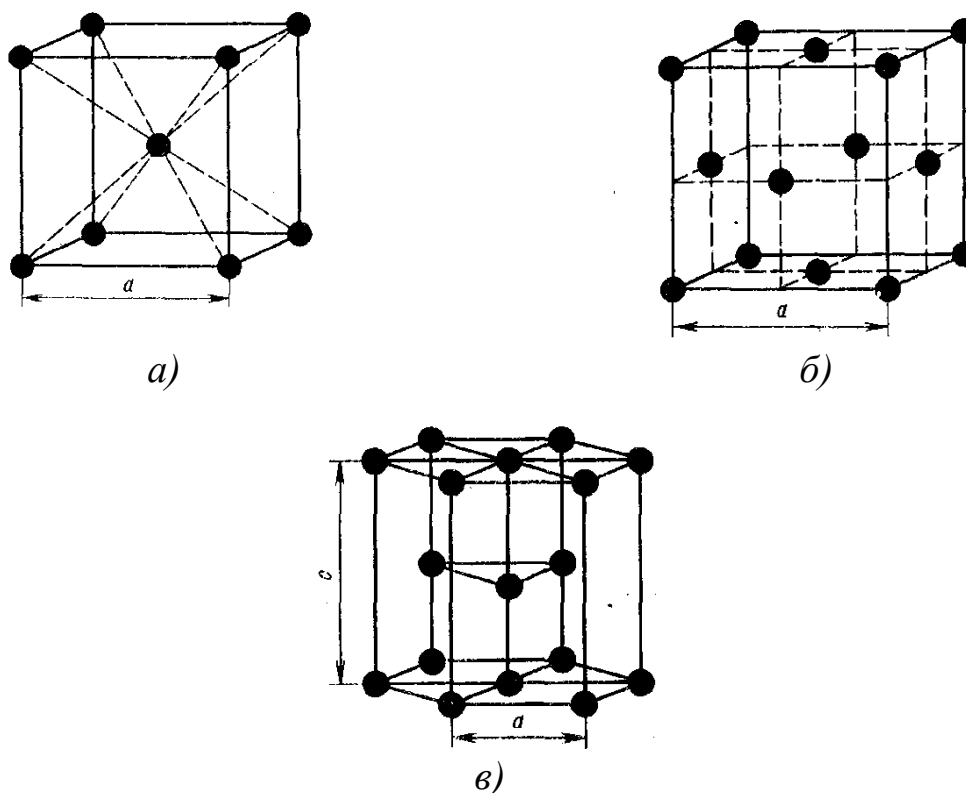


Рис. 1.2. Кристаллические решетки металлов: а – объемно центрированная кубическая; б – гранецентрированная кубическая; в – гексагональная плотноупакованная

*Объемно центрированная кубическая (ОЦК) решетка.* В элементарной ячейке такой решетки девять атомов (восемь – в вершинах куба и один – в центре). Каждый угловой атом входит в восемь соседних ячеек, следовательно, на одну ячейку приходится  $8 \cdot 1/8 + 1 = 2$  атома.

*Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК).* В элементарной ячейке такой решетки 14 атомов (8 – в вершинах и 6 – на гранях куба). Каждый угловой атом входит в восемь ячеек; каждый атом, находящийся в центре грани, входит в две соседние ячейки, в центре ячейки атома нет. Следовательно, на одну ячейку приходится  $8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$  атома.

*Гексагональная плотноупакованная решетка (ГПУ).* В элементарной ячейке такой решетки 16 атомов. Верхние центральные атомы входят в две соседние ячейки; атомы, образующие вершины призмы, входят в шесть соседних ячеек; атомы, лежащие внутри призмы, целиком принадлежат данной ячейке. Следовательно, на одну ячейку приходится  $2 \cdot 1/2 + 12 \cdot 1/6 + 3 = 6$  атомов.

Элементарная кристаллическая ячейка характеризуется координационным числом, под которым понимают число атомов, находящихся на наиболее близком равном расстоянии от избранного атома.

В объемно центрированной кубической решетке (рис. 1.3, а) атом А находится на наиболее близком равном расстоянии от восьми атомов, расположенных в вершинах куба, то есть координационное число этой решетки равно 8 (К8).

В гранецентрированной кубической решетке (рис. 1.3, б) атом А находится на наиболее близком расстоянии от четырех атомов 1, 2, 3, 4, расположенных в вершинах куба, от четырех атомов 5, 6, 7, 8, расположенных на гранях куба, и от четырех атомов 9, 10, 11, 12, принадлежащих расположенной рядом кристаллической ячейке. Атомы 9, 10, 11, 12 симметричны 5, 6, 7, 8. Следовательно, для гранецентрированной кубической решетки координационное число равно 12 (К12).

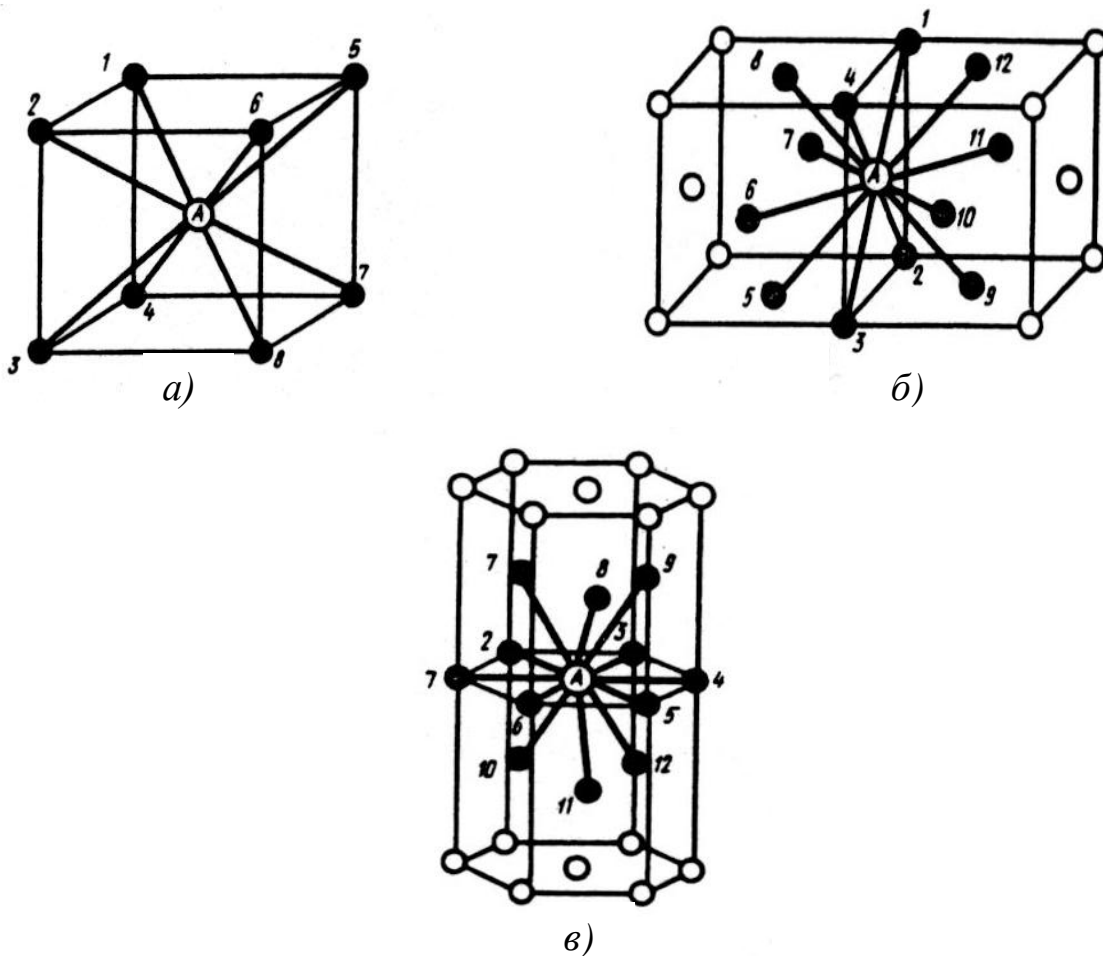


Рис. 1.3. Координационное число в различных кристаллических решетках для атома А: а – объемно центрированная кубическая (К8); б – гранецентрированная кубическая (К12); в – гексагональная плотноупакованная (Г12)

В гексагональной плотноупакованной решетке (рис. 1.3, в) атом А находится на наиболее близком расстоянии от шести атомов 1, 2, 3, 4, 5, 6, расположенных в вершинах шестигранника, и от трех атомов 7, 8, 9, расположенных в средней плоскости призмы. Кроме того, атом А находится на таком же расстоянии еще от трех атомов 10, 11, 12, принадлежащих кристаллической ячейке, лежащей ниже основания. Атомы 10, 11, 12 симметричны атомам 7, 8, 9. Таким образом, для гексагональной плотноупакованной решетки координационное число 12 (Г12).

Чем выше координационное число, тем выше плотность упаковки кристаллической решетки, т.е. объем, занятый атомами.

Плотность кристаллической решетки также характеризуется коэффициентом компактности.



Коэффициент компактности  $Q$  равен отношению суммарного объема атомов, входящего в решетку, к объему решетки [29, с. 24]:

$$Q = \frac{4\pi R^3 n}{3V} 100,$$

где  $R$  – радиус атома (иона);  $n$  – базис или число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку;  $V$  – объем элементарной ячейки.

Принцип определения базиса показан выше: для ОЦК  $n = 2$ , для ГЦК  $n = 4$ , для ГПУ  $n = 6$ .

Таким образом, для ОЦК коэффициент компактности 68 %, для ГЦК – 74 %, для ГПУ – 74 %.

Для определения положения атомных плоскостей в кристаллических пространственных решетках пользуются индексами, которые называются *индексами Миллера*. Для того чтобы установить индексы Миллера, элементарную решетку вписывают в пространственную систему координат, следовательно, положение любого узла кристаллической решетки относительно произвольно выбранного начала координат определяется заданием координат  $x, y, z$ .

За единицу измерения вдоль каждой оси принимается период решетки, т.е. для одной элементарной ячейки эти координаты равны параметрам  $a, b, c$  соответственно. Для удаленной от начала координат ячейки координаты узла определяются  $x = ma, y = nb, z = pc$ , где  $m, n, p$  – целые числа. Если за единицу измерения длин вдоль осей решетки выбрать величины  $a, b, c$ , то координаты узла будут просто числа  $m, n, p$ ; они называются индексами узла. Положение плоскости определяется отрезками, которые она отсекает на осях решетки. За индексы плоскостей принято брать обратные отрезки:  $h = 1/m, k = 1/n, l = 1/p$ . Эти числа заключают в круглые скобки. На рис. 1.4 показано графическое изображение наиболее важных плоскостей в кубической решетке. Если плоскость не пересекает какую-нибудь ось, например  $x$ , то соответствующий индекс Миллера равен нулю, например (011).

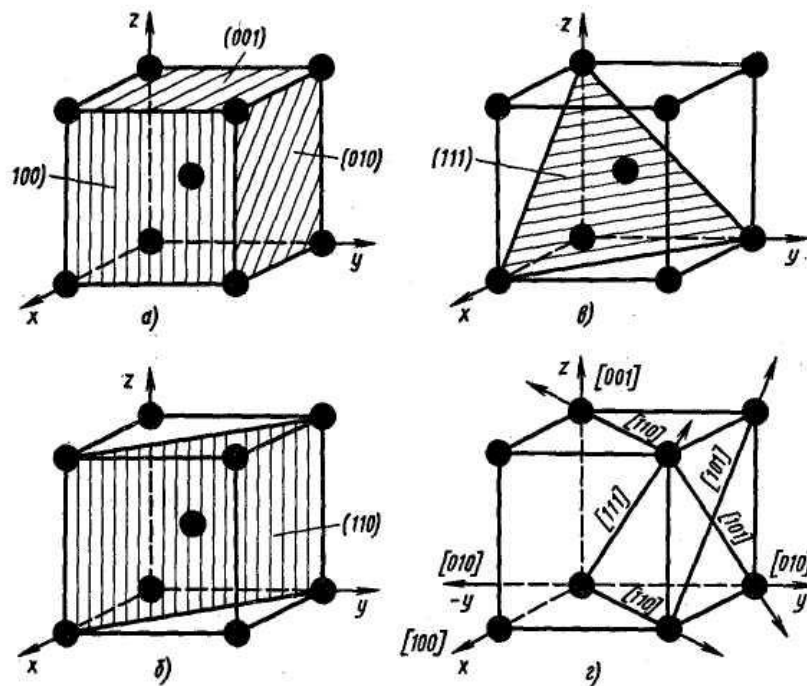


Рис. 1.4. Кристаллографические индексы плоскостей (а – в) и направлений (г) в ОЦК решетке [14, с. 15]

Для рассмотрения явлений, происходящих в решетке, также применяются индексы направлений. Кристаллографические индексы направлений заключают в квадратные скобки (см. рис. 1.4, г).

## 1.2. Дефекты кристаллического строения

Кристаллы металлов обычно имеют небольшие размеры, поэтому металлические изделия состоят из очень большого числа кристаллов. В процессе кристаллизации они приобретают неправильную форму. Кристаллы неправильной формы называются *зернами*, или кристаллитами.

В любом реальном кристалле всегда имеются дефекты строения, которые подразделяются по геометрическим признакам на точечные, линейные и поверхностные.

Размеры *точечных дефектов* не превышают несколько атомных диаметров. К точечным дефектам относятся *вакансии* (узлы кристаллической решетки, в которых отсутствуют атомы) и *межузельные атомы* (образуются в результате перехода атома из узла решетки в между-

узлии) (рис. 1.5). Такие дефекты вызывают местное искажение решетки.

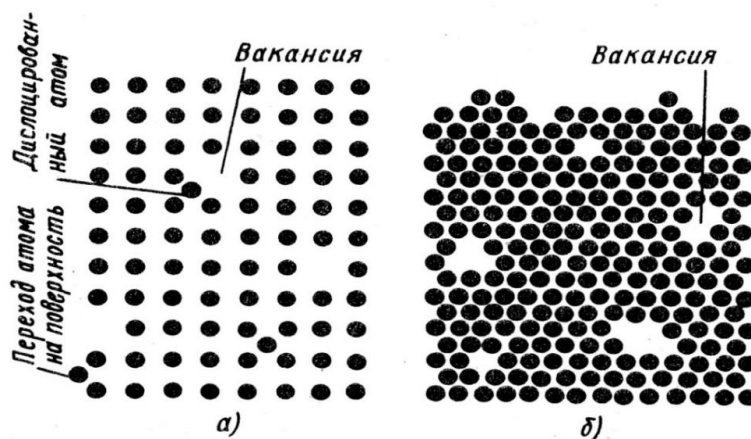


Рис. 1.5. Точечные дефекты кристаллической решетки [14, с. 17]

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении (рис. 1.6). К ним относятся *дислокации* – *краевые* и *винтовые*. Краевая дислокация представляет собой лишнюю незаконченную атомную плоскость (экстраплоскость). Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то краевую дислокацию считают положительной и обозначают  $\perp$ , а если в нижней части кристалла, то дислокация считается отрицательной и обозначается  $\dashv$ . При закручивании дислокации в спираль образуется винтовая дислокация.

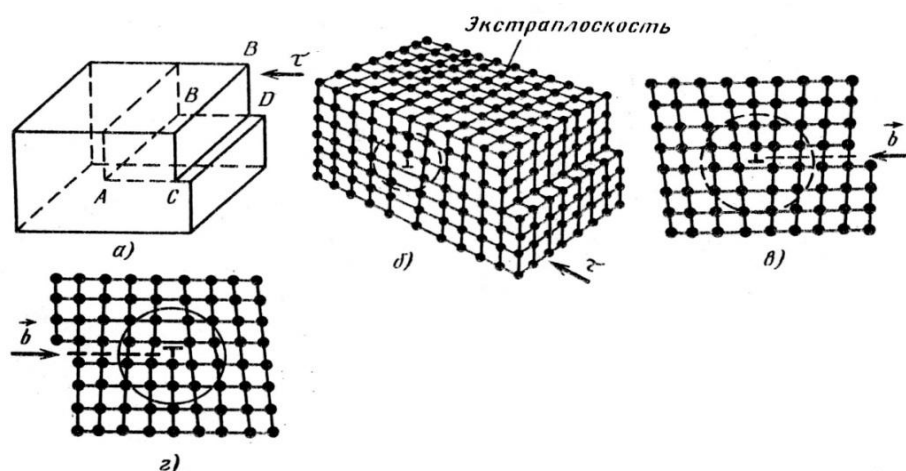


Рис. 1.6. Краевые дислокации ( $\tau$  – вектор сдвига) [14, с. 20]: а – сдвиг, создавший краевую дислокацию; б – пространственная схема краевой дислокации; в, г – схемы расположения атомов у дислокаций

*Поверхностные дефекты* являются двухмерными, т.е. они имеют малые размеры в одном измерении и большую протяженность в двух других измерениях. Такие дефекты представляют собой поверхности раздела между отдельными зёрнами или субзёрнами кристаллической решетки.

### **1.3. Механизмы торможения дислокаций**

В металле существует множество всевозможных препятствий для движения дислокаций. Но наиболее существенные из них можно представить в виде шести основных механизмов [9, с. 48]:

1. При пересечении двух дислокаций, движущихся в различных плоскостях, возникают пороги, требующие для своего образования и продвижения в металле дополнительной энергии, т.е. роста действующего напряжения.

2. Если встречаются три дислокации под углом около  $120^\circ$ , то возникает «замок» Ломера, совершенно лишенный подвижности и тормозящий движение других дислокаций.

3. Заметное торможение вызывают «облака Коттрелла», состоящие из инородных атомов, собирающихся вблизи дислокации в области с меньшей плотностью упаковки. При движении дислокации «облако» устремляется за ней. Так как в холодном металле диффузия протекает очень медленно, скорость облака невелика, что тормозит движение дислокации. Лишь при очень большом напряжении дислокация может вырваться из облака и начать скользить свободно.

4. Дислокации могут сильно тормозиться упругими искажениями кристаллической решетки вследствие действия остаточных напряжений III рода (напряжения, возникающие внутри объема, охватывающего несколько ячеек кристаллической решетки).

5. Очень эффективно торможение дислокаций мелкими включениями какой-либо твердой фазы. Если эти включения крупны и расположены редко, то дислокация, дойдя до них, упруго изгибается и вынуждена с большим трудом продвигаться между ними, на что требуется дополнительная затрата энергии.

6. При переходе из одного зёрна в другое дислокация встречает трудно преодолимый барьер – границу зёрна. То же происходит и внутри зёрна при прохождении через границы блоков. Чем мельче

зерна (или блоки), тем чаще дислокации тормозятся границами, тем выше предел текучести металла. Эта зависимость выражается так называемым уравнением Петча:

$$\sigma_T = \sigma_6 + k d^{0,5},$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести;  $\sigma_6$  – напряжение, необходимое для продвижения дислокации через границу блока (зерна);  $k$  – коэффициент, учитывающий трудность прохождения дислокации сквозь границу блока;  $d$  – средний поперечник блока (зерна).

Учитывая, что  $\sigma_6$  охватывает все первые пять механизмов торможения дислокаций, можно развернуть уравнение Петча, придав ему следующий вид:

$$\sigma_T = \sigma_{II} + \sigma_3 + \sigma_k + \sigma_d + N_{III} + k d^{0,5},$$

где  $\sigma_{II}$  и  $\sigma_3$  – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией порогов и замков соответственно;  $\sigma_k$  – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией облаков Коттрелла;  $\sigma_d$  – напряжения, необходимые для преодоления дислокацией дисперсных частиц;  $N_{III}$  – напряжения III рода.

Таким образом, действием одного или нескольких механизмов торможения дислокаций может быть повышен предел текучести. Однако необходимо учитывать, что чем труднее двигаться дислокациям, тем меньшей оказывается пластичность металла. Поэтому обычно повышение прочности металла сопровождается падением его пластичности. Можно выбрать более или менее выгодное соотношение прочности и пластичности, радикальное же решение вопроса – создание бездислокационного металла, которое пока невозможно.

#### 1.4. Методы изучения строения металлов

Изучение внутреннего строения (структуры) металлов и сплавов начинается с помощью наиболее простого и широко распространенного метода – световой микроскопии.

Изучение строения металлов и сплавов с помощью металлографического микроскопа (при увеличении в 50 – 2000 раз) называется *микроскопическим анализом (микроанализом)*.

Задачи микроанализа:

– оценка формы и размеров кристаллических зерен металлов и сплавов;

- определение формы и размеров неметаллических включений – сульфидов, оксидов и др.;
- определение микропороков – микротрещин, раковин, пор и др.;
- анализ изменения микроструктуры сплавов после термической, химико-термической обработки и обработки металлов давлением;
- определение химического состава некоторых структурных составляющих по их характерной форме и окраске после применения избирательных травителей.

Так как металлы – вещества непрозрачные, то микроанализ проводят на специально изготовленных образцах. Для этого из испытуемого материала вырезают образец (микрошлиф) и путем ряда операций (шлифования, полирования, травления) доводят до такого состояния, когда при рассмотрении его в металлографический микроскоп выявляют неметаллические включения, мелкие поры, графит в чугуне (после шлифования и полирования) или микроструктуры (после шлифования, полирования и травления).

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать при увеличении непрозрачные тела в отраженном свете. В этом заключается основное отличие металлографического микроскопа от биологического, в котором рассматриваются прозрачные тела в проходящем свете.

Однако оптический микроскоп не позволяет обнаружить кристаллы любого размера. Для изучения более тонких деталей структуры (мельче 0,1 мкм) применяют *методы электронной микроскопии*, основанные на взаимодействии электронов с твердым телом. К таким методам относятся: метод просвечивающей электронной микроскопии и метод растровой электронной микроскопии.

Наиболее простым является изучение в просвечивающем электронном микроскопе тонких пленок (реплик), точно воспроизводящих микрорельеф поверхности изучаемого образца. Реплика создается путем напыления (конденсации) в вакууме паров углерода или других веществ на поверхность изучаемого тела с последующим отделением.

Один из наиболее распространенных методов изучения строения металлов – *рентгеноструктурный анализ* – современный метод исследования атомно-кристаллической структуры материалов рентгеновскими лучами. Наибольшую информацию рентгеноструктурный анализ дает при исследовании кристаллов. Он основан на отражении рентгеновских лучей от атомов кристаллической решетки и интерфе-

ренции рентгеновских лучей, т. е. их способности усиливать или ослаблять (гасить) друг друга.

Рентгеновские лучи возникают при соударении быстролетающих электронов с атомами любого элемента и представляют собой электромагнитные волны в диапазоне между ультрафиолетовыми и гамма-лучами. Рентгеновский спектр может быть сплошным (тормозным) либо линейчатым (характеристическим). Длина волны рентгеновского излучения по величине близка к межатомным расстояниям в кристаллической решетке вещества, поэтому кристаллы являются для рентгеновских лучей естественными трехмерными дифракционными решетками. Лучи, отраженные от кристалла, фиксируются на фотопленке с получением рентгенограммы, которая потом расшифровывается, или измеряется интенсивность отраженных лучей специальным прибором.

Основные методы рентгеновской съемки – метод Лауэ, метод порошка (метод Дебая – Шерера), метод вращения и его разновидности.

Рентгеноструктурный анализ проводят на рентгеновском аппарате, где источником рентгеновских лучей является рентгеновская трубка. Рентгеновской камерой называется устройство, позволяющее регистрировать на пленке дифракционные рентгеновские максимумы, которые затем расшифровываются. В методе порошка используется рентгеновская камера РКД, в которой исследуемое вещество в виде порошка наклеивается на стеклянную нить.

Каждое вещество (фаза) обладает своей кристаллической решеткой. Семейства атомных плоскостей, образующих эту решетку, обладают характерным только для данной решетки набором значений межплоскостных расстояний  $d$ . Знание межплоскостных расстояний  $d$  исследуемого металла позволяет установить, с каким веществом (фазой) мы имеем дело. При взаимодействии рентгеновских лучей с кристаллическим веществом возникает дифракционная картина, максимумы интенсивности которой удовлетворяют уравнению Вульфа – Брегга:

$$n\lambda = 2d\sin\theta,$$

где  $n$  – порядок дифракции (целое число 1, 2, 3 и т.д.);  $\lambda$  – длина волны рентгеновских лучей;  $d$  – межплоскостное расстояние;  $\theta$  – угол скольжения лучей (угол рассеяния).

Из уравнения Вульфа – Брегга следует, что

$$\frac{d}{n} = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}.$$

Результат взаимодействия рентгеновских лучей с исследуемым веществом, полученный в виде рентгенограммы (дебаеграммы), подлежит расшифровке.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте характеристику кристаллическим системам.
2. Какие типы кристаллических решеток вы знаете?
3. Чему равно координационное число для решеток ОЦК, ГЦК и ГПУ?
4. Как определяется коэффициент компактности?
5. Как подразделяются дефекты кристаллического строения по геометрическим признакам?
6. Какие дефекты относятся к точечным?
7. Что такое дислокация? Какие вы знаете виды дислокаций?
8. Каковы механизмы торможения дислокаций?
9. Назовите методы изучения строения металлов.

## **Глава 2. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ**

Переход металла из жидкого состояния в твердое называется кристаллизацией. При этом образуются кристаллы.

При сближении атомов (конденсация пара) происходит перераспределение зарядов, и силы притяжения начинают преобладать над силами отталкивания, так как одноименные заряды стремятся удалиться, а разноименные – сблизиться. Поэтому атомы стремятся притянуться друг к другу и занять положение наиболее плотной упаковки, которое нарушается в жидкостях их соударениями в процессе тепловых колебаний. Местами на мгновение возникают упорядоченные группы атомов (ближний порядок), которые тут же разрушаются.

Дальнейшее охлаждение жидкости ослабляет соударение атомов и силам притяжения удается упаковать их наиболее плотным образом. Возникает дальний порядок – кристаллическое состояние. Металл уплотняет-



ся, запасенная в нем свободная энергия  $F$  снижается, т.е. согласно второму началу термодинамики он переходит в более устойчивое состояние.

Математически это выражается так:

$$F = U - TS,$$

где  $F$  – свободная энергия,  $U$  – внутренняя энергия системы,  $S$  – энтропия (энтропия пропорциональна вероятности  $S = k \ln P$ ,  $k$  – постоянная Больцмана,  $P$  – вероятность состояния),  $T$  – абсолютная температура.

При температуре  $T_1$  свободная энергия в твердой фазе меньше, чем в жидкой (рис. 2.1), а следовательно, выгоднее твердая фаза, и металл кристаллизуется. При  $T_2$  – наоборот, идет плавление. При  $T_{кр}$  оба процесса уравновешены. Для кристаллизации необходимо переохлаждение  $\Delta T_1$ , а для плавления – перегрев  $\Delta T_2$ .

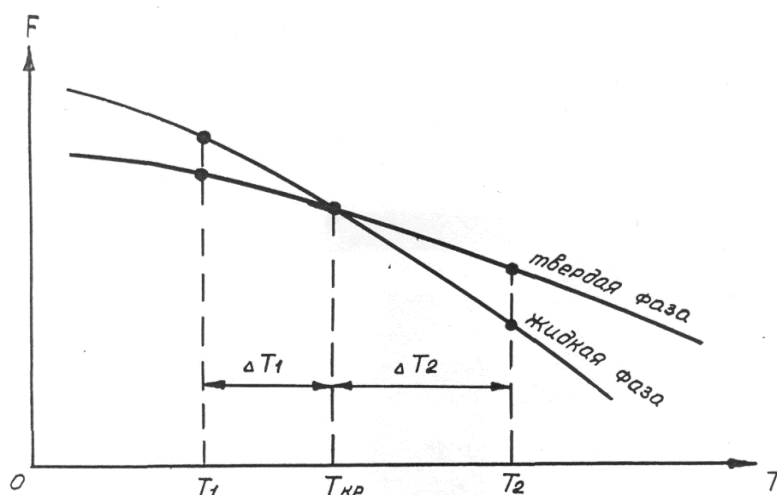


Рис. 2.1. Изменение энергии Гиббса  $F$  (свободной энергии) металла в жидком и твердом состояниях в зависимости от температуры ( $T_{кр}$  – температура, при которой происходит кристаллизация)

Температура  $T_{кр}$  и есть *равновесная* или *теоретическая температура кристаллизации*.

При охлаждении расплава теплота  $Q_1$  рассеивается в воздух. При  $T_1$  возникает некоторое переохлаждение  $\Delta T_1$  и начинается кристаллизация. При этом выделяется некоторое количество теплоты кристаллизации  $Q_2$ . Если  $Q_2 < Q_1$ , то охлаждение продолжается,  $\Delta T$  возрастает, кристаллизация ускоряется до тех пор, пока  $Q_2$  не станет равным  $Q_1$ , т.е. пока отвод тепла компенсируется выделяющейся при кристаллизации *скрытой теплотой кристаллизации*, и на кривой охлаждения появится горизонтальная площадка. Чем быстрее ведут ох-

лаждение (рис. 2.2), тем интенсивнее идет кристаллизация и тем ниже площадка и больше переохлаждение ( $\Delta T_3 > \Delta T_4$ ). Температура, при которой практически начинается кристаллизация, может быть названа *фактической температурой кристаллизации*.

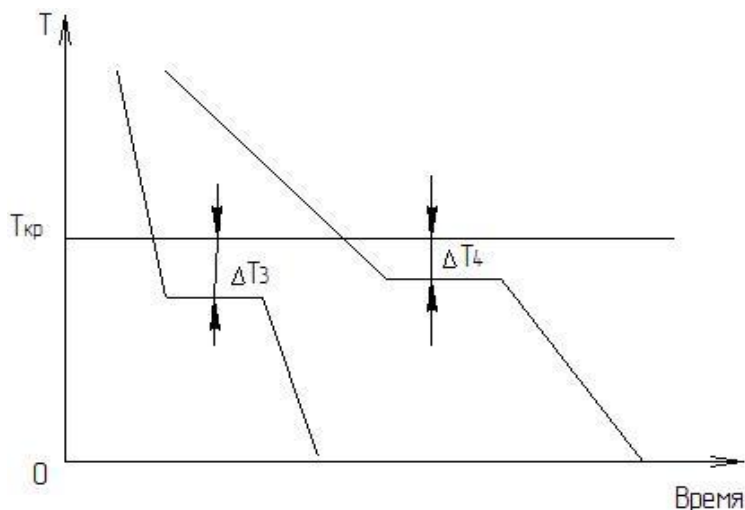


Рис. 2.2. Кривые охлаждения

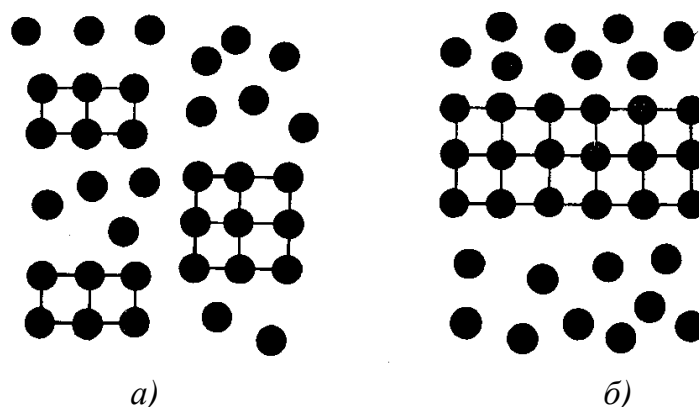
Разность между теоретической и практической температурами кристаллизации называется *величиной* или *степенью переохлаждения*.

## 2.1. Особенности гомогенной и гетерогенной кристаллизации

Процесс гомогенной (самопроизвольной) кристаллизации состоит из двух элементарных процессов. Первый процесс заключается в зарождении центров кристаллизации – зародышей, второй состоит в росте кристаллов из этих центров (рис. 2.3). Возникающие мельчайшие кристаллы неустойчивы и сразу же распадаются, чтобы возникнуть в другом месте. Крупные – устойчивы и могут расти даже при небольшом переохлаждении.

По мере развития процесса кристаллизации в нем участвует все большее и большее число кристаллов. Поэтому процесс вначале ускоряется, пока в какой-то момент взаимное столкновение растущих кристаллов не начинает заметно препятствовать их росту; рост замедляется, тем более что и жидкости, в которой образуются новые кристаллы, становится все меньше. Пока кристалл окружен жидкостью, он часто имеет правильную форму, но при столкновении и срастании

кристаллов их правильная форма нарушается, внешняя форма кристалла оказывается зависимой от условий соприкосновения растущих кристаллов. Скорость всего процесса кристаллизации количественно определяется двумя величинами: скоростью зарождения центров кристаллизации (ч.ц.,  $\text{мм}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ ) и скоростью роста кристаллов (с.р.,  $\text{мм}/\text{мин}$  или  $\text{мм}/\text{с}$ ).



*Рис. 2.3. Процесс кристаллизации:  
а – зарождение центров кристаллизации;  
б – рост кристаллов*

Графически изменения величин ч.ц. и с.р. в зависимости от переохлаждения представлены на рис. 2.4. При теоретической температуре кристаллизации значения ч.ц. и с.р. равны нулю и процесс кристаллизации идти не может. Эти зависимости выражаются кривыми с максимумом. С увеличением переохлаждения значения ч.ц. и с.р. возрастают, достигают максимума и затем понижаются; при больших величинах переохлаждения практически падают до нуля.

Поэтому для быстрого зарождения большого числа мельчайших центров нужно переохлаждение большее, чем для быстрого роста уже имеющихся кристаллов. Максимум на кривой числа центров кристаллизации сдвинут вправо по сравнению с максимумом на кривой скорости роста.

Таким образом, при медленном охлаждении возникает малое переохлаждение, следовательно, – мало число центров, но достаточно быстрый рост кристаллов (сплав I, рис. 2.4), ведущий к крупному зерну, а при быстром охлаждении – большое переохлаждение и большое число центров, поэтому кристаллы растут медленно, и образуется

мелкозернистая структура (сплав II, рис. 2.4). Следовательно, процессом кристаллизации можно управлять.

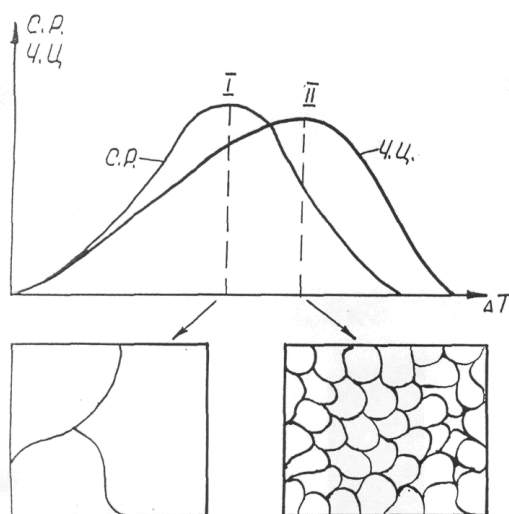


Рис. 2.4. Скорость зарождения центров кристаллизации (ч.ц.) и скорость роста кристаллов (с.р.) в зависимости от степени переохлаждения

В реальных условиях на процесс кристаллизации оказывает влияние степень чистоты жидких расплавов. Чаще источником образования зародышей являются всевозможные твердые частицы, например, неметаллические включения и тому подобное, которые всегда присутствуют в расплаве. Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем мельче будет зерно. Такое образование зародышей называется *гетерогенным*.

Для изменения степени чистоты металла проводят операцию модифицирования.

*Модифицирование* — использование специально вводимых в жидкий металл примесей (модификаторов) для получения мелкого зерна. Эти примеси, практически не изменяя химического состава сплава, вызывают при кристаллизации измельчение зерна и в итоге улучшение механических свойств. При литье слитков в фасонных отливках модифицирование чаще проводят введением в расплав добавок, которые образуют тугоплавкие соединения, такие как нитриды и оксиды, кристаллизующиеся в первую очередь. Выделяясь в виде мельчайших частиц, эти соединения служат зародышами при затвер-

девании кристаллов – *модификаторы I рода*. В качестве модификаторов при модифицировании стали применяют алюминий, ванадий, титан; алюминиевых сплавов – ванадий, титан, цирконий. Иногда используют растворимые в жидком металле *модификаторы II рода*: для стали – редкоземельные элементы; для алюминиевых сплавов – литий, натрий, калий. Данные модификаторы, адсорбирующиеся на кристаллическом зародыше, снимают межфазовое поверхностное натяжение и затрудняют рост зерен.

## 2.2. Кристаллическое строение литого слитка

Реально протекающий процесс кристаллизации усложняется действием различных факторов, в столь сильной степени влияющих на процесс, что роль степени переохлаждения может оказаться второстепенной. При кристаллизации из жидкого состояния для скорости течения процесса и формы образующихся кристаллов первостепенное значение приобретают такие факторы, как скорость и направление отвода тепла, наличие нерастворившихся частиц и др. В направлении отвода тепла кристалл растет быстрее, чем в другом направлении.

Кристалл может расти и в боковом направлении. В результате такого роста образуется древовидный кристалл, который называют *дендритом*. Схема древовидного кристалла показана на рис. 2.5 [5, с. 46].

Структура литого слитка состоит из трех основных зон (рис. 2.6). Наружная *мелкозернистая корка* (зона мелкозернистых кристаллов 1) состоит из дезориентированных мелких кристаллов – дендритов. При соприкосновении жидкого металла со стенками формы в результате резкого перепада температуры и явления переохлаждения происходит образование большого количества центров кристаллизации, в результате зона имеет мелкозернистое строение.



Рис. 2.5. Схема древовидного кристалла Чернова

После образования корки литья теплоотвода меняются. В направлении обратном направлению отвода тепла нормально к поверхности образуется зона *столбчатых кристаллов* 2, которая является более плотной и содержит меньше раковин и пузырей. Однако места стыка таких кристаллов имеют низкую прочность.

Зона *равноосных кристаллов* 3 образуется в центре слитка при отсутствии определенной направленности отвода тепла.

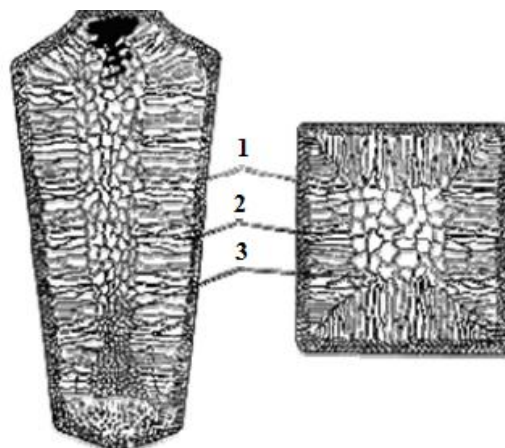


Рис. 2.6. Строение литого слитка [5, с. 47]: 1 – зона мелкозернистых кристаллов, 2 – зона столбчатых кристаллов, 3 – зона равноосных кристаллов

### Контрольные вопросы

1. Что такое кристаллизация? Какое условие необходимо для протекания процесса кристаллизации?
2. Когда процесс кристаллизации протекает быстрее: при небольшой, большой или очень большой степени переохлаждения?
3. Чем отличается гомогенное образование зародышей от гетерогенного?
4. Как можно получить мелкое зерно в литом металле?
5. Каково строение кристаллического слитка?
6. Что такое модифицирование? С какой целью его применяют?

## Глава 3. СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

С целью обеспечения рационального выбора материала для изготовления деталей необходимо учитывать физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства.

К *физическим свойствам* относятся температура плавления, плотность, электрические, магнитные, тепловые и др.

Под *химическими свойствами* понимают способность металлов и сплавов взаимодействовать с различными агрессивными средами (щелочной, кислотной), окисляемость, растворимость и др.

Под *механическими свойствами* понимают характеристики, определяющие поведение металла (или другого материала) под действием приложенных внешних сил.

К *технологическим свойствам* относятся литейные свойства, обрабатываемость давлением, свариваемость, обрабатываемость резанием.

К *эксплуатационным свойствам* относятся хладостойкость, жаростойкость, жаропрочность, антифрикционные свойства, коррозионная стойкость и др.

### 3.1. Физические свойства

**Температура плавления** – одна из важнейших характеристик металлов и сплавов. В зависимости от температуры плавления металлы условно делятся:

- на *легкоплавкие* (температура плавления не превышает 600 °С) – цинк, свинец, олово и др.;
- *среднеплавкие* (от 600 до 1600 °С), к ним относятся почти половина металлов, в том числе магний, алюминий, железо, медь и др.;
- *тугоплавкие* (более 1600 °С) – титан, хром, вольфрам, молибден и др.

**По плотности** металлы принято подразделять на следующие группы:

- *легкие* (плотность не более 5 г/см<sup>3</sup>) – магний, алюминий, титан и др.;

• *тяжелые* (плотность более 5 г/см<sup>3</sup>) – железо, никель, медь, цинк, олово и другие (это наиболее обширная группа).

Для обозначения показателей физических свойств используются буквы греческого алфавита:

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения, К<sup>-1</sup>;

$\gamma$  – удельный вес, Н/см<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.

*Удельная теплоемкость* обозначается латинской буквой *c*, Дж/(кг·К).

*Удельный вес*, как известно, определяется следующим произведением:

$$\gamma = \rho g,$$

где  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

В электротехнической промышленности именно физические свойства определяют возможность применения материалов, от которых может требоваться либо высокая электропроводность, либо высокое электрическое сопротивление.

Именно под воздействием электромагнитного поля ферромагнетики могут намагничиваться и оставаться в намагниченном состоянии, а чтобы размагнитить образец его нужно обработать магнитным полем противоположного знака. Напряженность магнитного поля, необходимого для полного размагничивания намагниченного образца, называют коэрцитивной силой, которую обозначают  $H_c$ .

### 3.2. Химические свойства

Процесс химического взаимодействия металлических материалов с активными средами называют *коррозией*.

Для оценки сопротивления металлических материалов воздействию химически активных сред используют термин *коррозионная стойкость*.

*Коррозионная стойкость* – это способность металла противостоять электрохимической коррозии, которая развивается при наличии среды на поверхности металла и ее электрохимической неоднородности.



*Растворимость* – способность вещества растворяться в том или ином растворителе. Металлы растворяются в сильных кислотах и едких щелочах.

Под *окисляемостью* понимают способность металлов соединяться с кислородом и образовывать оксиды.

В ряде случаев образование прочной оксидной пленки на поверхности изделия желательно, так как пленка предохраняет металл от дальнейшего окисления.

### 3.3. Механические свойства

Механические свойства определяются при статических и динамических испытаниях.

По способу приложения нагрузок различают статические испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг и срез. Наиболее распространены испытания на растяжение.

К механическим свойствам обычно относят прочность, твердость, пластичность и ударную вязкость.

*Прочность* при растяжении определяется критерием, который называется *временным сопротивлением* или *пределом прочности*:

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

где  $\sigma$  – предел прочности,  $P_{\max}$  – наибольшая нагрузка, предшествующая разрушению образца,  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца до разрушения.

*Пластичность* характеризуется *относительным удлинением*  $\delta$ :

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

и *относительным сужением*  $\psi$ :

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

где  $l_0$  и  $F_0$  – начальная длина и площадь поперечного сечения образца;  $l_k$  – конечная длина образца;  $F_k$  – площадь поперечного сечения в месте разрыва.

*Твердость* – это свойство поверхностного слоя материала со-

противляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого тела (индентора) определенной формы и размера. Индентор – тело правильной геометрической формы (шар, конус, трех- и четырехгранная пирамида) – изготавливается из прочных материалов: закаленной стали, твердого сплава или алмаза.

По характеру воздействия индикатора на поверхность испытуемого материала различают:

**I. Способ вдавливания.** Под твердостью понимают сопротивление вещества внедрению в него индентора (методы определения твердости по Бринеллю, Виккерсу, Роквеллу, микротвердость, метод Польди).

- *Метод Бринелля:* в испытуемый металл под определенной постоянной нагрузкой вдавливается стальной закаленный шарик соответствующего диаметра. Шарик оставляет на испытуемой поверхности отпечаток – лунку, размер которой зависит от твердости материала. Отношение нагрузки  $P$ , кгс, к площади сферической поверхности отпечатка – лунки  $F$ , мм<sup>2</sup>, называют числом твердости по Бринеллю и обозначают  $HB$ , кгс/мм<sup>2</sup>:

$$HB = P/F.$$

Если поверхность отпечатка выразить через диаметр шарика  $D$  и диаметр отпечатка  $d$ , то число твердости по Бринеллю определяется по формуле, кгс/мм<sup>2</sup>,

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

Диаметр отпечатка  $d$  измеряют бинокулярной лупой, имеющей шкалу с делениями с точностью до сотых долей миллиметра. Во избежание остаточной деформации стального шарика необходимо, чтобы твердость его была в 1,5 раза выше твердости испытуемых материалов, поэтому для испытания материалов с твердостью более 450 кгс/мм<sup>2</sup> по  $HB$  применять метод Бринелля не рекомендуется. *Область применения:* определение твердости чугунов, пластичных сталей и цветных сплавов.

- *Метод Роквелла* более универсален, так как позволяет испытывать металлы любой твердости, включая и твердые сплавы. Число

твердости при испытании определяется непосредственно отсчетом по шкале индикатора. Их три: *A*, *B*, *C*. Шкала *B* (красная) – применяется для измерения твердости пластичных и отожженных материалов, шкала *C* – для измерения твердости закаленных сталей, шкала *A* – для измерения твердости наиболее твердых материалов – твердых сплавов. В соответствии с вышеизложенным применяют два индентора – стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм и алмазный или твердосплавный конус с углом при вершине 120°. Для уменьшения погрешности измерения используют предварительное нагружение с  $P = 100$  Н и окончательное  $P_1$ , определяемое шкалой (шкала *A* – 500 Н, шкала *B* – 900 Н, шкала *C* – 1400 Н).

Число твердости обозначается формулой  $HRC (HRA) = 100 - e$ , где  $e = (h - h_0) / 0,002$  мм (0,002 мм – цена деления шкалы индикатора прибора для испытания твердости по Роквеллу). Твердость по шкале *B*  $HRB = 130 - e$ .

- *Метод Виккерса* применяют при определении твердости поверхностных слоев (цементируемых, азотированных) и образцов материалов различной твердости в тонких сечениях. При измерении твердости по Виккерсу,  $HV$ , в испытуемый материал вдавливаются четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине 136°. Нагрузка может меняться от 10 до 1000 Н. Твердость по Виккерсу, кгс/мм<sup>2</sup>:

$$HV = \frac{2P \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где  $P$  – нагрузка, кгс;  $\alpha$  – угол при вершине индентора, равный 136°;  $d$  – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

При определении твердости на приборе Виккерса измеряют длину диагоналей с помощью измерительного микроскопа и по таблице определяют число твердости в зависимости от выбранной испытательной нагрузки.

- *Микротвердость*. Метод предназначен для определения твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов. В качестве индентора при измерении микротвердости чаще всего используют, как и в случае определения твердости по Виккерсу, правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136°. Нагрузка может меняться от 0,5 до 5 Н.

Главное преимущество метода микротвердости – это возможность определения твердости отдельных фаз и структурных составляющих.

• *Метод Польди* используют для контроля крупногабаритных изделий и деталей, установка которых на специальном приборе затруднена.

Принцип действия прибора сводится к тому, что под действием наносимого удара одновременно вдавливаются в испытываемую поверхность и эталонный образец с известной твердостью. Зная твердость эталонного образца и измерив диаметры отпечатков на эталонном образце и на испытываемой поверхности, определяют твердость по специальной формуле.

**II. Способ по отскоку наконечника** – шарика, характеризующий упругие свойства материала (метод Шора).

*Твердость по Шору* определяется при помощи бойка, который падает на поверхность образца. Чем больше высота подъема бойка после удара, тем больше его твердость.

Кратковременность соприкосновения бойка с образцом и простота метода позволяют измерить твердость материалов не только при комнатных температурах, но и при высоких температурах (более 1400 К).

**III. Способ царапания** поверхности характеризует сопротивление разрушению путем среза (метод Мооса).

*Метод Мооса* состоит в нанесении царапины на поверхности образца алмазным или другим недеформирующимся индентором. Метод не стандартизован и на практике используют различные критерии твердости царапанием.

Часто за критерий твердости принимают одну из следующих характеристик:

- а) величину нагрузки, при которой получается царапина шириной 10 мкм;
- б) ширину царапины при заданной нагрузке;
- в) комплексный показатель, определяя величину нагрузки и ширину царапины.

Различают статические, статико-динамические и динамические методы измерения твердости.

Прочность и пластичность при динамических испытаниях оцениваются по *ударной вязкости*.

Под *ударной вязкостью* КС, МДж/м<sup>2</sup>, понимают работу удара

К (МДж), отнесенную к начальной площади поперечного сечения  $S_0$  (м<sup>2</sup>) образца в месте концентратора:  $КС = K / S_0$ . Предусматриваются образцы с концентраторами трех видов (ГОСТ 9454-78):  $U$  с радиусом концентратора  $R = 1$  мм,  $V$  с  $R = 0,25$  мм и углом  $45^\circ$  и  $T$  – усталостная трещина. Соответственно ударная вязкость обозначается КСУ, КСV и КСТ.

Основной критерий ударной вязкости – КСV. Она состоит из двух составляющих:

$$КСV = КС_3 + КС_p,$$

где  $КС_3$  – работа зарождения трещины;  $КС_p \approx КСТ$  – работа распространения трещины. Чем острее надрез, тем меньше  $КС_3$ . Критерий КСТ является критерием трещиностойкости, оценивающим сопротивление материала распространению трещины.

### 3.4. Технологические свойства

Наиболее важные *литейные свойства* сплавов: жидкотекучесть, усадка (линейная и объемная), ликвация, склонность к образованию трещин.

*Жидкотекучесть* – это способность металлов и сплавов заполнять литейную форму и четко воспроизводить контуры отливки. Она зависит от температурного интервала кристаллизации, вязкости и поверхностного натяжения расплава, температуры заливки и формы, свойств литейной формы и др. Жидкотекучесть определяется по технологическим пробам: прутковой и спиральной.

*Усадка* – свойство литейных сплавов уменьшать объем при затвердевании и охлаждении. Различают линейную и объемную усадку, выражаемую в относительных единицах.

Линейная усадка – уменьшение линейных размеров отливки, %:

$$\varepsilon_{\text{лин}} = \frac{l_{\text{ф}} - l_{\text{от}}}{l_{\text{от}}} 100,$$

где  $l_{\text{ф}}$  и  $l_{\text{от}}$  – размеры полости формы и отливки при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Она зависит от химического состава сплава, температуры заливки, скорости охлаждения, конструкции отливки и литейной формы.

Объемная усадка – уменьшение объема сплава при его охлаждении в литейной форме при формировании отливки. Объемную усадку определяют соотношением, %,

$$\varepsilon_{об} = \frac{V_{\phi} - V_{от}}{V_{от}} 100,$$

где  $V_{\phi}$  и  $V_{от}$  – объем полости формы и объем отливки при температуре 20 °С. Объемная усадка приблизительно равна утроенной линейной усадке:

$$\varepsilon_{об} \approx 3 \varepsilon_{лин}.$$

Усадка в отливках проявляется в виде усадочных раковин, пористости, трещин и короблений.

*Ликвация* – это неоднородность химического состава по сечению отливки. Различают ликвацию по удельному весу и зональную ликвацию.

**Обрабатываемость давлением** – способность металлов и сплавов изменять свою форму и размеры под действием внешних нагрузок как в нагретом, так и в холодном состоянии без разрушения сплошности. Обрабатываемость давлением определяется пластичностью материала.

**Свариваемость** – свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее установленным требованиям, то есть давать прочное сварное соединение. Она оценивается соответствием свойств шва свойствам основного металла и несклонностью к образованию трещин, пор и шлаковых включений.

**Обрабатываемость резанием** – способность металлов и сплавов подвергаться обработке резанием по ряду технологических показателей: скорости резания, силе резания и т.п.

### 3.5. Эксплуатационные свойства

Эксплуатационными (служебными) называют свойства материала, которые определяют работоспособность деталей машин, приборов или инструментов, их силовые, скоростные, стойкостные и другие технико-эксплуатационные показатели. Как указывалось выше, к эксплуатационным свойствам относятся хладостойкость, жаростойкость, жаропрочность, антифрикционные свойства, коррозионная стойкость и др.

Под *хладостойкостью* понимают способность материала сохранять достаточную вязкость при низких температурах (от 0 до – 269 °С).

*Жаростойкость* характеризует способность материала противостоять химической коррозии, развивающейся в атмосфере сухих газов при повышенной и высокой температуре.

*Жаропрочность* – способность материала длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при повышенных температурах (свыше  $0,3 t_{пл}$ ).

*Антифрикционные свойства* характеризуют способность металлов и сплавов прирабатываться друг к другу. Антифрикционные свойства могут оцениваться таким критерием, как антифрикционность. Антифрикционность – это способность материала обеспечивать низкий коэффициент скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряженных деталей.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие свойства относятся к физическим?
2. Что такое удельный вес?
3. Что понимают под химическими свойствами?
4. Что такое коррозионная стойкость?
5. Что понимают под механическими свойствами?
6. Что такое твердость? Какими методами ее измеряют?
7. Что такое ударная вязкость?
8. Какие свойства относятся к литейным свойствам?
9. Что означает линейная и объемная усадка?
10. Что такое жидкотекучесть? Как ее определяют?
11. Виды ликвации.
12. Какие свойства относятся к эксплуатационным?

## Глава 4. НАКЛЕП И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

*Деформация* – это изменение размеров и формы тела под действием приложенных сил. Деформация вызывается действием внешних сил, приложенных к телу, или различными физико-механическими процессами, происходящими в самом теле.

Различают два вида деформации: *упругую* и *пластическую*. Деформация, которая исчезает после снятия нагрузки, называется *упругой*. Деформация, которая остается после снятия нагрузки, называется *пластической*. В процессе пластической деформации атомы кристаллической решетки смещаются на бóльшие расстояния, чем при упругой, причем это смещение становится необратимым, т.е. после снятия нагрузки в результате пластической деформации размеры и форма тела изменяются.

После снятия внешней нагрузки в теле могут остаться внутренние напряжения. Существует следующая классификация внутренних напряжений:

- внутренние напряжения первого рода (макроскопические напряжения, т.е. напряжения, возникающие между крупными частями тела);
- внутренние напряжения второго рода (микроскопические напряжения, т.е. напряжения, возникающие между смежными зернами или внутри зерен);
- внутренние напряжения третьего рода (субмикроскопические напряжения, т.е. напряжения, возникающие внутри объема, охватывающего несколько ячеек кристаллической решетки).

При достаточно высоких напряжениях деформация может завершиться разрушением тела. Под *разрушением* понимается процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящих к разделению его на части.

### 4.1. Наклеп

*Наклеп* – это упрочнение металла под действием пластической деформации. Упрочнение металла в процессе пластической деформации объясняется увеличением числа дефектов кристаллического строения (вакансий, междоузельных атомов, дислокаций). Пара дви-



жущихся дислокаций порождает сотни и сотни новых, в результате этого плотность дислокаций повышается. Следовательно, повышается сопротивление деформации и уменьшается пластичность. Наибольшее значение имеет увеличение плотности дислокаций, так как возникающее при этом между ними взаимодействие тормозит дальнейшее их перемещение.

Беспорядочно ориентированные кристаллы под действием деформации поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль направления деформации. Все зерна оказываются одинаково ориентированными. Закономерная ориентация кристаллов относительно внешних деформационных сил называется текстурой.

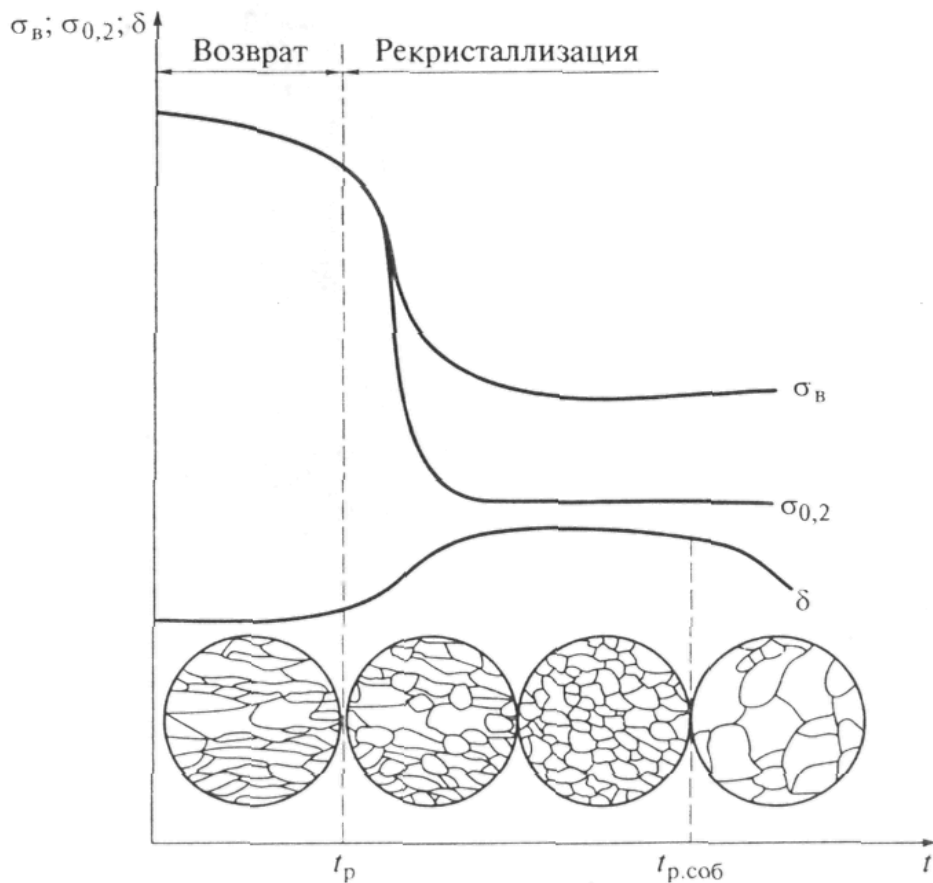
#### 4.2. Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла

Состояние наклепанного (деформированного) металла термодинамически неустойчиво. При нагреве в нем возникают процессы, связанные с переходом к более устойчивой структуре с изменением всех свойств. Протекающие процессы зависят от температуры (см. рисунок, [14, с. 83]).

При небольшом нагреве (для железа 300 – 400 °С) начинается процесс **возврата** (отдых), который повышает структурное совершенство наклепанного металла, но без заметных изменений структуры по сравнению с деформированным состоянием.

В процессе можно выделить две стадии. При более низких температурах (ниже  $0,2T_{пл}$ , где  $T_{пл}$  – абсолютная температура плавления) уменьшается плотность точечных дефектов (вакансий), наблюдается снятие искажений кристаллической решетки, также уменьшается плотность дислокаций в результате их взаимного уничтожения (аннигиляция). В итоге твердость и прочность несколько понижаются (на 20 – 30 % по сравнению с исходным состоянием).

Вторая стадия возврата – **полигонизация** (после небольших деформаций при нагреве до  $(0,25 – 0,3)T_{пл}$ ). Процесс характеризуется тем, что избыточные дислокации одного знака выстраиваются в дислокационные стенки, образуя сетку и создавая ячеистую структуру, т.е. наблюдается фрагментация кристаллитов на субзерна (полигоны) с малоугловыми границами.



*Влияние нагрева на механические свойства (предел прочности  $\sigma_{\text{в}}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta$ ) и изменение структуры деформированного металла:  $t_p$  – температура рекристаллизации;  $t_{\text{р.соб}}$  – температура собирательной рекристаллизации*

При дальнейшем повышении температуры подвижность атомов возрастает, и при достижении определенной температуры образуются новые равноосные зерна – **первичная рекристаллизация**. В результате рекристаллизации наклеп практически полностью снимается, при этом резко снижается прочность, пластичность возрастает. Свойства приближаются к их исходным значениям. Разупрочнение объясняется снятием искажения решетки и резким уменьшением плотности дислокаций.

Наименьшая температура начала рекристаллизации, при которой протекает рекристаллизация и наблюдается разупрочнение, называется температурным порогом рекристаллизации или температурой

рекристаллизации  $T_{рек}$  и может быть определена по формуле А. А. Бочвара:

$$T_{рек} = \alpha T_{пл},$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от состава и структурного состояния металла (для чистых металлов  $\alpha = 0,1 - 0,2$ ; для металлов технической чистоты  $\alpha = 0,3 - 0,4$ ; для сплавов  $\alpha = 0,6 - 0,8$ );  $T_{пл}$  – абсолютная температура плавления, К.

После завершения первичной рекристаллизации в процессе последующего нагрева происходит рост одних рекристаллизованных зерен за счет других – **собирательная рекристаллизация**. При более высоких температурах может уменьшиться пластичность, что объясняется сильным ростом зерна, т.е. явлением перегрева при рекристаллизации.

### 4.3. Холодная и горячая обработка давлением

Температура рекристаллизации имеет важное практическое значение. Для восстановления структуры и свойств наклепанного металла (например, при необходимости продолжить обработку давлением путём прокатки, протяжки, волочения и т.п.) его надо нагреть выше температуры рекристаллизации. Такая обработка называется *рекристаллизационным отжигом*.

В зависимости от соотношения температуры деформации и температуры рекристаллизации различают холодную и горячую деформации. Пластическое деформирование выше температуры рекристаллизации, хотя и приводит к упрочнению, но это упрочнение устраняется протекающим при этих температурах процессом рекристаллизации. Следует отметить, что рекристаллизация протекает не во время деформации, а сразу после ее окончания тем быстрее, чем выше температура. При очень высокой температуре, значительно превышающей температуру рекристаллизации, она завершается за секунды и даже доли секунд.

Следовательно, при пластическом деформировании выше температуры рекристаллизации упрочнение и наклеп металла, если и произойдут, то будут немедленно сниматься. Такая обработка, при которой нет упрочнения (наклепа), называется *горячей обработкой давлением*. Обработка давлением (пластическая деформация) ниже

температуры рекристаллизации вызывает наклеп и называется *холодной обработкой*.

### Контрольные вопросы

1. Что такое деформация?
2. Что происходит в металле при упругой деформации?
3. Что происходит в металле при пластической деформации?
4. Что представляют собой напряжения? Приведите классификацию внутренних напряжений.
5. Что такое наклеп? Как наклеп влияет на свойства металлов и сплавов?
6. Чем отличается первая стадия возврата от процесса полигонизации?
7. Что такое рекристаллизация?
8. Каковы стадии рекристаллизации?
9. Что происходит при первичной рекристаллизации?
10. Каким образом определяется температура рекристаллизации?
11. Чем отличается первичная рекристаллизация от процесса собирательной рекристаллизации?
12. В чем отличие холодной и горячей обработки давлением?

## Глава 5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ

Общеизвестно, что сплавы обладают более высокими свойствами и характеристиками в сравнении с их основами. Под сплавом понимают вещество, получаемое сплавлением двух и более элементов. Различают следующие типы сплавов: механические смеси, твердые растворы и химические соединения.

**Механическая смесь** двух компонентов А и В образуется тогда, когда они неспособны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения, то есть силы притяжения между одноименными атомами преобладают над силами притяжения между разноименными атомами. Поэтому образуются зерна как компонента А, так и компонента В, и наблюдается сохранение их кристаллического строения.

**Твердые растворы** – это фазы, в которых один из компонентов сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы другого компонента располагаются в решетке первого компонента (растворителя), изменяя ее размеры, то есть твердый раствор состоит из двух или нескольких компонентов, имеющих один тип кристаллической решетки, и представляет собой одну фазу. Различают:

- *твердые растворы внедрения* (атомы растворенного компонента располагаются в междоузлиях кристаллической решетки растворителя);

- *твердые растворы замещения* (атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетке).

Твердые растворы замещения имеют большую растворимость, для увеличения растворимости необходимо соблюдать следующие условия:

- одинаковый тип решетки компонентов;
- разница атомных диаметров компонентов не должна превышать 8 %, что снизит вероятность искажения кристаллического строения;
- свойства компонентов должны быть близкими.

**Химические соединения** разнообразны, они имеют следующие характерные особенности:

- новая кристаллическая решетка, отличная от решеток компонентов, образующих соединение;
- в соединении всегда сохраняется простое кратное соотношение компонентов (состав можно отразить формулой  $A_nB_m$ , где А и В – соответствующие элементы,  $n$  и  $m$  – простые числа);
- свойства соединения резко отличаются от свойств образующих его компонентов.

## 5.1. Правило фаз

Общие закономерности сосуществования устойчивых фаз, отвечающих термодинамическим условиям равновесия, могут быть выражены в математической форме, называемой *правилом фаз*, или *законом Гиббса*. Правило фаз дает количественную зависимость между степенью свободы системы и количеством фаз и компонентов:

$$c = k + p - f,$$

где  $c$  – число степеней свободы (вариантность), т.е. число внешних и внутренних факторов, которое может изменяться без изменения числа фаз в системе;

$k$  – количество компонентов (веществ, образующих систему);

$p$  – число внешних и внутренних факторов (температура, давление и концентрация), воздействующих на систему;

$f$  – число фаз; фаза – это однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую свойства изменяются скачкообразно.

Для рассмотрения влияния температуры (охлаждение или нагрев системы) правило фаз можно записать следующим образом:

$$c = k + 1 - f,$$

Ниже представлены примеры построения кривых охладений с применением правила фаз для чистого металла А ( $k = 1$ ) и твердого раствора ( $k = 2$ ).

На рис. 5.1 и 5.2 представлено построение кривых охладений для чистого металла и сплава.

*Задача 1.* Построить кривую охладения для чистого металла А ( $k = 1$ ).

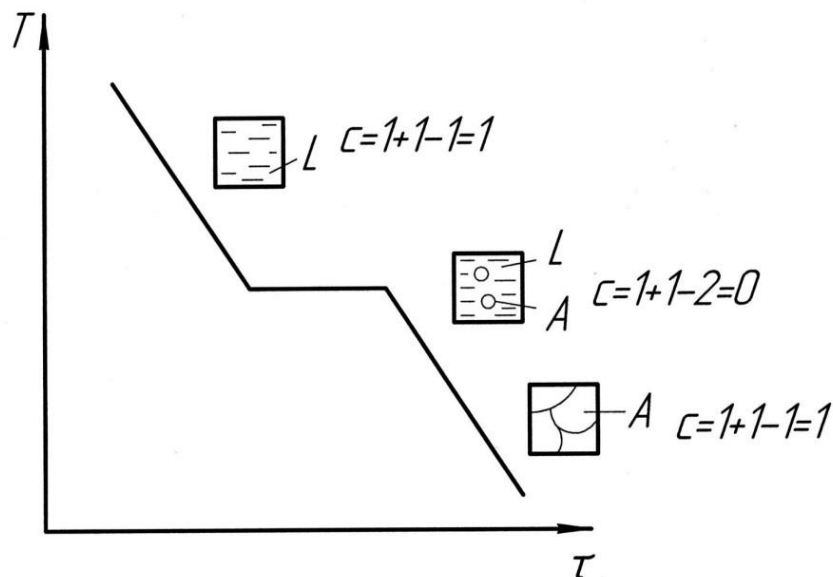


Рис. 5.1. Кривая охладения чистого металла

Задача 2. Построить кривую охлаждения для твердого  $\alpha$ -раствора, то есть сплава ( $k = 2$ ).

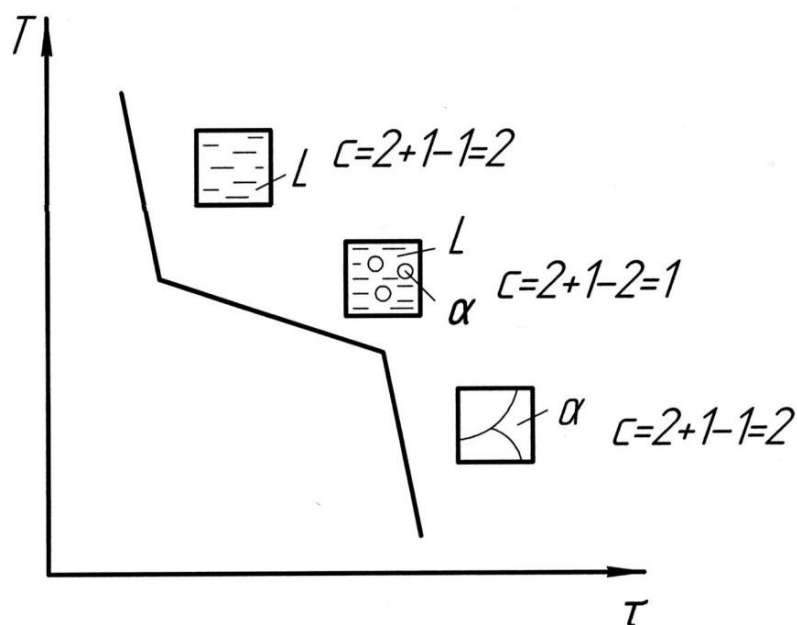


Рис. 5.2. Кривая охлаждения сплава

## 5.2. Диаграммы состояния двойных сплавов

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение характера взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.

Если залить в тигли сплавы, состоящие из двух компонентов А и В, причем концентрация в каждом тигле должна быть различной (от 100 % А до 100 % В), и провести термический анализ, то можно получить серию кривых охладений (рис. 5.3).

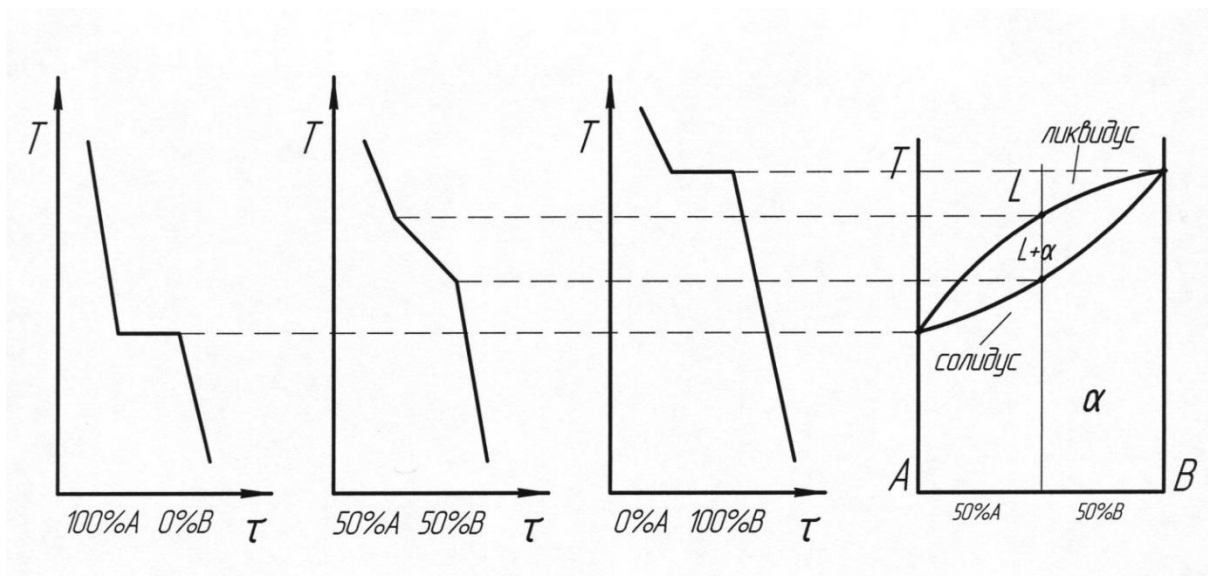


Рис. 5.3. Построение диаграммы состояния двухкомпонентного сплава

Спроецировав точки начала и конца кристаллизации на оси температур и введя ось концентрации, можно получить *диаграмму состояния*, двухкомпонентного сплава.

### 5.2.1. Типы диаграмм состояния двойных сплавов

**Диаграммы состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы.** Компоненты неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях и не образуют химические соединения, поэтому возможно существование только двух фаз – жидкого раствора  $L$  и твердого раствора  $\alpha$ . Следовательно, трех фаз быть не может, кристаллизация при постоянной температуре не наблюдается, и горизонтальной линии на диаграмме нет. Диаграмма, изображенная на рис. 5.4, как бы состоит из двух линий: верхняя линия отделяет жидкую фазу, являясь *линией ликвидус*, и нижняя линия отделяет твердую фазу, являясь *линией солидус*.

Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы, состоит из трех областей: жидкость  $L$ , жидкость  $L +$  твердый раствор  $\alpha$  и твердый раствор  $\alpha$ .



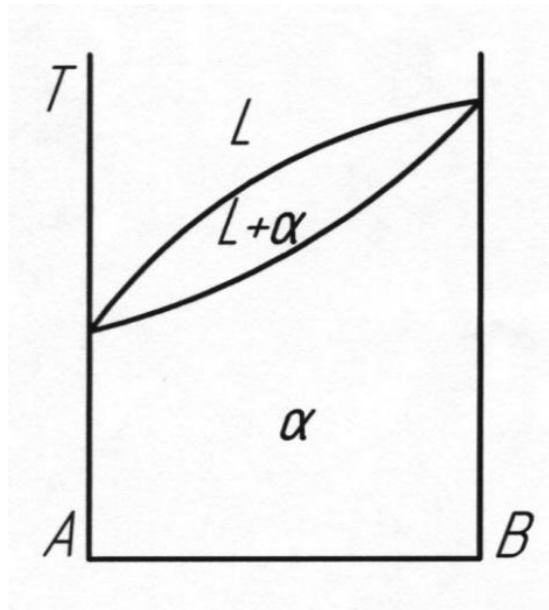


Рис. 5.4. Диаграмма состояния сплавов, образующих неограниченные твердые растворы

**Диаграммы состояния сплавов, образующих механические смеси.** Компоненты в жидком состоянии неограниченно растворимы, а в твердом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений. В этом случае диаграмма имеет вид, представленный на рис. 5.5.

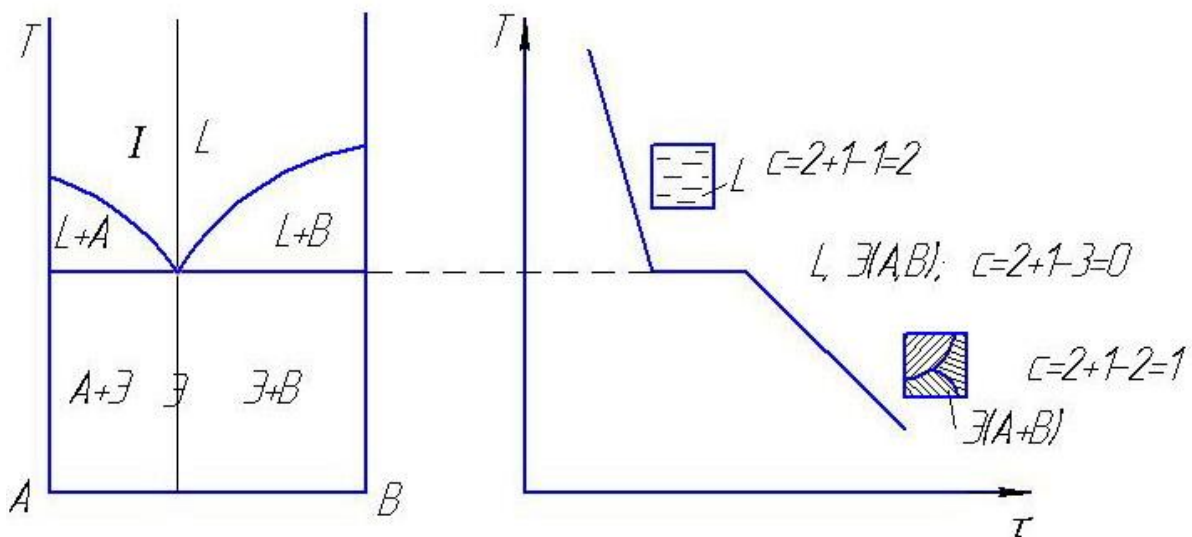


Рис. 5.5. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов

Сплав *I* при охлаждении до температуры кристаллизации за- твердевает при одновременном выделении из жидкости кристаллов обоих компонентов А и В. В момент кристаллизации  $c = 2 + 1 - 3 = 0$ . Такой сплав, имеющий мелкокристаллическое строение и представляющий собой хорошо организованную механическую смесь с мини- мальной температурой плавления, называют *эвтектикой*.

**Диаграммы состояния сплавов, образующих ограниченные твердые растворы.** Оба компонента неограниченно растворимы в жидком состоянии, ограниченно в твердом и не образуют химических соединений (рис. 5.6).

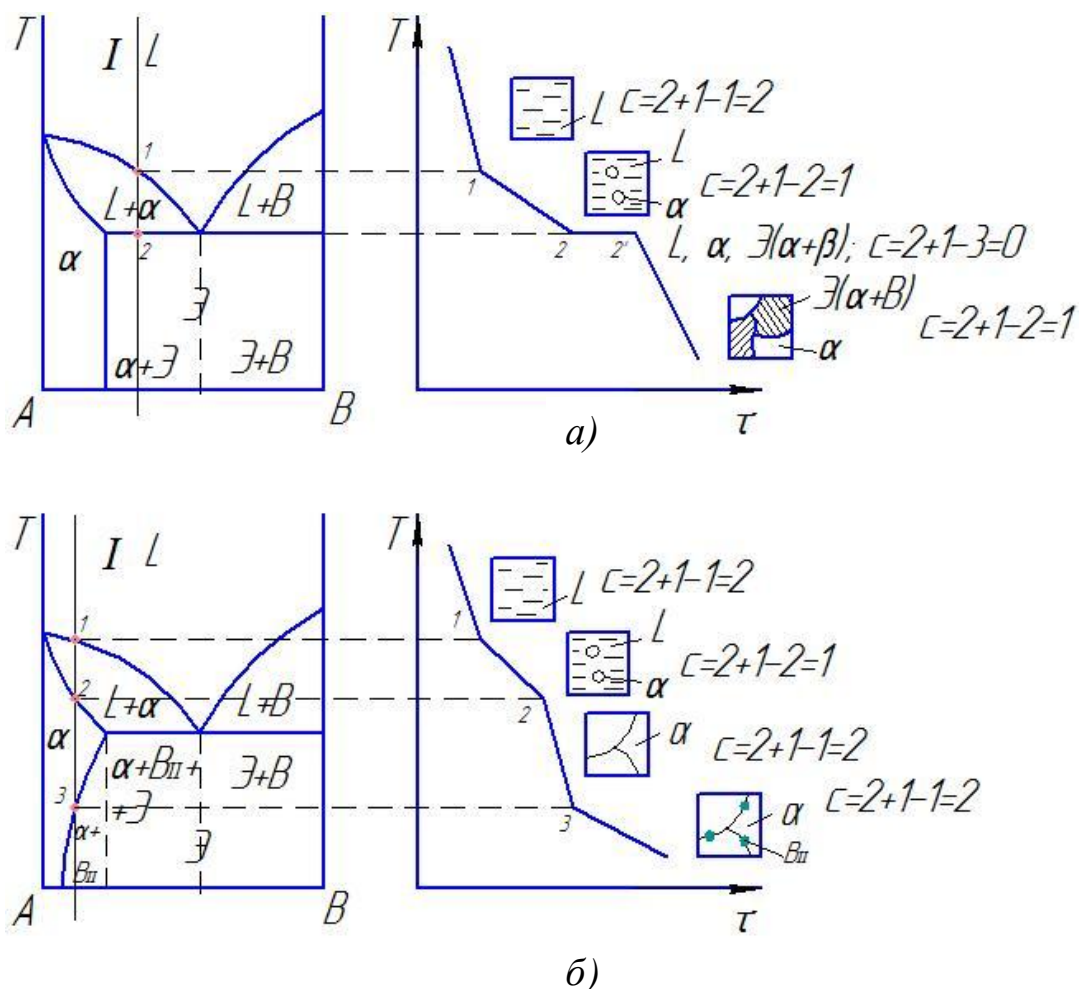


Рис. 5.6. Диаграммы состояния и кривые охлаждения сплавов, образующих ограниченные твердые растворы с постоянной (а) и переменной растворимостью (б)

В сплавах такого рода возможно существование: жидкой фазы  $L$ , твердого раствора компонента  $B$  в  $A$ , который будет называться  $\alpha$ -раствором, и (или) твердого раствора компонента  $A$  в  $B$ , который обозначается  $\beta$ . В этих сплавах возможно неинвариантное равновесие при одновременном сосуществовании трех фаз:  $L$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ ; в данном случае (см. рис. 5.6):  $L$ ,  $\alpha$  и  $B$ . В зависимости от того, какая реакция протекает в условиях существования трех фаз, могут быть два вида диаграмм: диаграмма с эвтектическим превращением (см. рис. 5.6) и диаграмма с перитектическим превращением (рис. 5.7).

В отличие от диаграммы, изображенной на рис. 5.6, *а*, на диаграмме, представленной на рис. 5.6, *б*, видно, что растворимость  $B$  в  $A$  с понижением температуры уменьшается. Это приводит к пересыщению раствора  $I$ , и из него должен выделиться избыточный компонент  $B$ . Кристаллы  $B$ , выделяющиеся из твердого раствора, называют *вторичными кристаллами* и часто обозначают символом, имеющим индекс  $II$ : в данном случае  $B_{II}$ . Процесс выделения вторичных кристаллов из твердой фазы носит название *вторичной кристаллизации*.

При эвтектическом превращении жидкость кристаллизуется с образованием двух твердых фаз. Возможен и другой тип неинвариантного превращения, когда жидкость реагирует с ранее выпавшими кристаллами и образуется новый вид кристаллов. Реакция подобного типа называется *перитектической* (рис. 5.7).

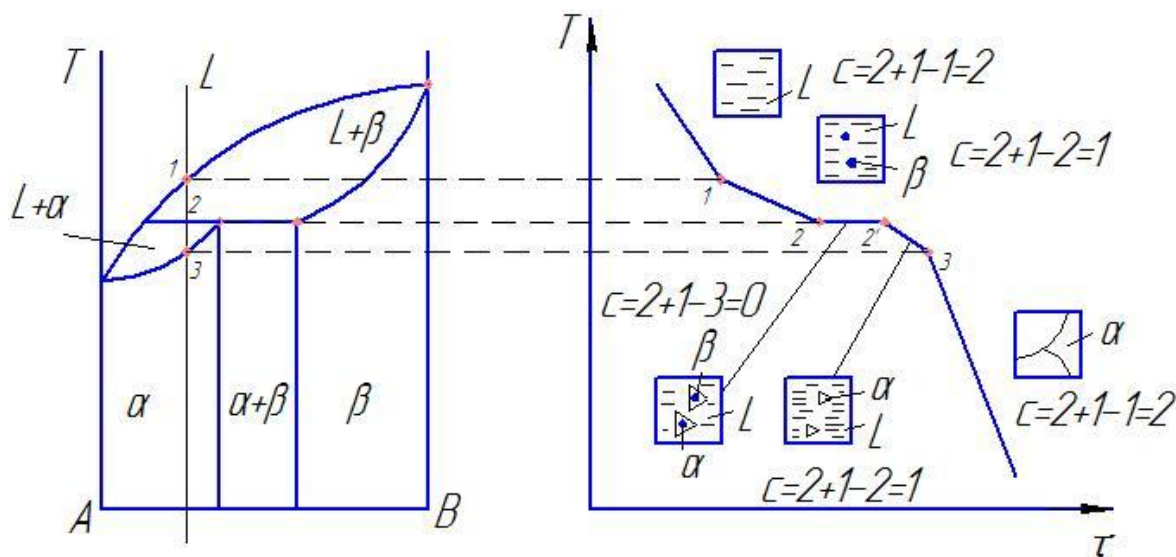


Рис. 5.7. Диаграмма состояния и кривая охлаждения сплавов с перитектическим превращением

### Диаграммы состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения.

Некоторые металлы в зависимости от температуры могут существовать в разных кристаллических формах – разных *полиморфных модификациях*. В результате полиморфного превращения атомы кристаллического тела, имеющие решетку одного типа, перестраиваются в решетку другого типа.

Для обозначения полиморфных модификаций используют буквы греческого алфавита: устойчивую при более низкой температуре полиморфную модификацию принято обозначать буквой  $\alpha$ , более высокой –  $\beta$ , далее  $\gamma$  и т.п.

Известны полиморфные превращения для металлов:  $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_\gamma$ ,  $\text{Ti}_\alpha \leftrightarrow \text{Ti}_\beta$ ,  $\text{Mn}_\alpha \leftrightarrow \text{Mn}_\beta \leftrightarrow \text{Mn}_\gamma \leftrightarrow \text{Mn}_\delta$ ,  $\text{Sn}_\alpha \leftrightarrow \text{Sn}_\beta$ , а также Ca, Li, Te, Na, Cs, Zr, большого числа редкоземельных металлов и др.

Вид диаграммы состояния зависит от соединений, образующихся между аллотропическими формами обоих компонентов. Если полиморфизм присущ обоим компонентам и высокотемпературные модификации неограниченно растворимы друг в друге, а низкотемпературные – нерастворимы, то диаграмма состояния имеет вид, показанный на рис. 5.8.

Видно, что ниже некоторой температуры образовавшийся твердый раствор  $\gamma$  распадается в механическую смесь, которая подобна эвтектике, но образуется не из жидкой фазы, а из твердого раствора и называется *эвтектоидом*. В данном случае  $\mathcal{E}_d = \alpha + B$ .

**Диаграммы состояния сплавов, образующих химические соединения.** Такая диаграмма представлена на рис. 5.9. Данное химическое соединение  $A_nB_m$  устойчиво, поэтому может быть нагрето без разложения до своей температуры плавления. Химическое соединение  $A_nB_m$  плавится при постоянной температуре и его можно рассматривать как однокомпонентную смесь.

Кристаллизация сплавов по этой диаграмме происходит совершенно аналогично

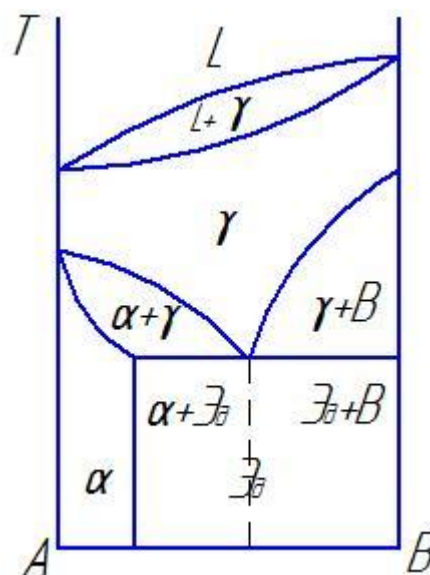


Рис. 5.8. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих полиморфные превращения

кристаллизации сплавов, образующих диаграммы с ограниченной растворимостью. Отличие состоит в том, что кроме выделения кристаллов чистых компонентов А и В и кристаллов твердых растворов, происходит еще образование кристаллов химического соединения. Таким образом, диаграмма с химическим соединением представляет собой как бы приставленные одна к другой две простые диаграммы. Можно визуальнo разделить такую диаграмму на две части по вертикали, соответствующей химическому соединению, и изучать каждую часть диаграммы отдельно.

В данном случае (рис. 5.9):

$$\alpha = A (A_nB_m), \gamma = A_nB_m (A), \mathcal{E}_1 = \alpha + \gamma; \quad \beta = B (A_nB_m), \mathcal{E}_2 = A_nB_m + \beta.$$

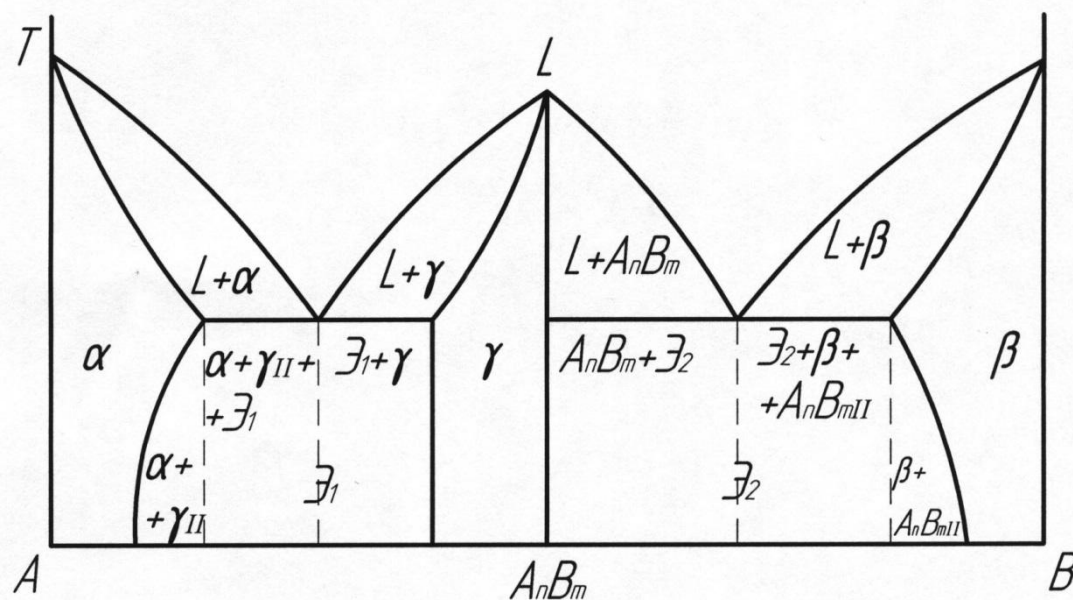


Рис. 5.9. Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения

### 5.2.2. Связь между типами диаграмм состояния и свойствами сплавов

Между химическим и фазовым составом сплава, определяемым диаграммой состояния и свойствами сплава, существует зависимость.

Сплавы эвтектического состава отличаются средней прочностью и пластичностью, но исключительно хорошими линейными свойствами, так как имеют высокую жидкотекучесть и очень малую усадку (поскольку кристаллизуются при постоянной температуре).

Твердые растворы однородны, а потому обладают повышенной прочностью и пластичностью, ковкости, но имеют очень высокое электросопротивление и плохие литейные свойства.

Химические соединения устойчивы, тверды, но чрезвычайно хрупки. Переход сплава в однофазное состояние повышает пластичность, распад твердого раствора понижает ее.

Коррозионная стойкость высока у чистых металлов, ниже – у твердых растворов и наименьшая – у механических смесей.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие вы знаете типы сплавов?
2. Что собой представляют твердые растворы внедрения и твердые растворы замещения?
3. В чем заключается правило фаз?
4. Что собой представляет диаграмма состояния двойного сплава?
5. Какие вы знаете типы диаграмм состояния двойных сплавов?
6. Что такое эвтектика?
7. Что такое эвтектоид?
8. Какова связь между типами диаграмм состояния и свойствами сплавов?

## **Глава 6. ЖЕЛЕЗО И ЕГО СПЛАВЫ**

Железо – металл сероватого цвета. Температура плавления железа  $1539\text{ }^{\circ}\text{C}$ , плотность –  $7,8\text{ г/см}^3$ . Железо имеет две полиморфные модификации  $\alpha$  и  $\gamma$ . Модификация  $\alpha$ -железа существует при температуре ниже  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В интервале температур  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $1539\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\alpha$ -железо нередко обозначают как  $\delta$ -железо.

Кристаллическая решетка  $\alpha$ -железа – объемно центрированный куб с периодом решетки  $0,28606\text{ нм}$ . До температуры  $768\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\alpha$ -железо магнитно (ферромагнетик). Температуру  $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ , соответствующую

магнитному превращению, т.е. переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное, называют точкой Кюри.

$\gamma$ -железо существует при температуре 911 – 1392 °С, оно парамагнитно. Кристаллическая решетка  $\gamma$ -железа гранецентрированная кубическая с периодом решетки  $a = 0,3645$  нм.

### 6.1. Диаграмма состояния железо-углерод

Диаграмма состояния железо-углерод в интервале концентрации от железа до цементита представлена на рис. 6.1.

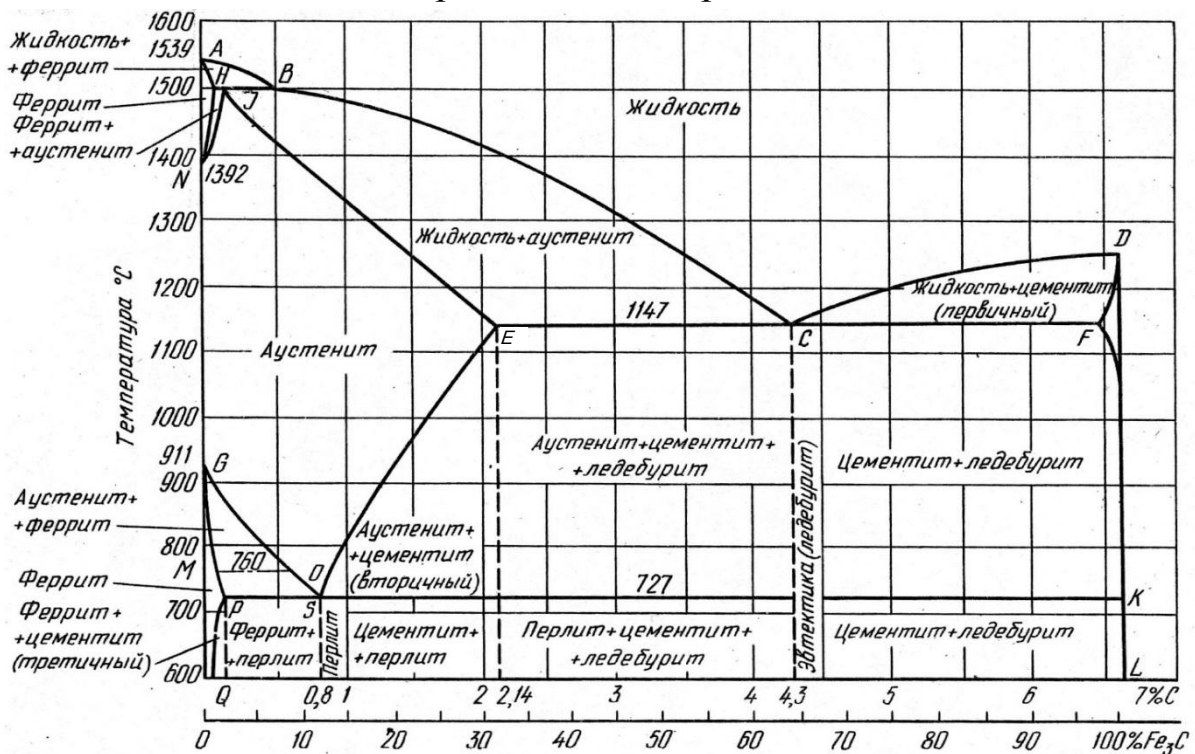


Рис. 6.1. Диаграмма состояния железо-углерод

Ось концентраций двойная: содержание углерода и цементита. Линия  $ABCD$  является ликвидусом системы, линия  $AHJECF$  – солидусом. Железо, кроме того, что образует с углеродом химическое соединение  $Fe_3C$ , имеет две аллотропические формы  $\alpha$  и  $\gamma$  (до 911°С атомы железа образуют объемно центрированную кубическую решетку  $Fe_\alpha$ , выше 911°С гранецентрированную  $Fe_\gamma$ ), поэтому в системе существуют следующие фазы:

*жидкость* (жидкий раствор углерода в железе) существует

выше линии ликвидус и обозначается буквой *L*;

*цементит*  $\text{Fe}_3\text{C}$  (линия *DFKL*) обозначается буквой *Ц*;

*феррит* – твердый раствор углерода в  $\text{Fe-}\alpha$ , обозначается буквой *Ф*;

*аустенит* – твердый раствор углерода в  $\text{Fe-}\gamma$ , обозначается буквой *А*.

Область существования феррита расположена левее линии *GPQ* и *AHN*, а область существования аустенита – левее линии *NJESG*.

Три горизонтальные линии на диаграмме (*HJB*, *ECF* и *PSK*) указывают на протекание трех неинвариантных реакций.

1. При  $1499^\circ\text{C}$  (линия *HJB*) протекает перитектическая реакция:  $L_B + \Phi_H \rightarrow A_J$ . В результате перитектической реакции образуется аустенит. Реакция эта наблюдается только у сплавов, содержащих углерод от 0,1 до 0,5 %.

2. При  $1147^\circ\text{C}$  (горизонталь *ECF*) протекает эвтектическая реакция:

$L_C \rightarrow A_E + \text{Ц}$ . В результате данной реакции образуется эвтектическая смесь аустенита и цементита, называемая *ледебуритом*. Эта реакция протекает у всех сплавов, содержащих более 2,14 % углерода.

3. При  $727^\circ\text{C}$  (горизонталь *PSK*) протекает эвтектоидная реакция:  $A_S \rightarrow \Phi_P + \text{Ц}$ . В результате этой реакции образуется эвтектоидная смесь феррита и цементита, называемая перлитом.

## 6.2. Железоуглеродистые сплавы

### 6.2.1. Стали

Сплавы железа с углеродом, которые содержат до 2,14 % углерода, называются сталями. В сталях, кроме феррита и цементита, имеется также эвтектоидная структурная составляющая пластинчатого строения – перлит; в сталях, содержащих до 0,025 % углерода, перлитной составляющей нет.

По структуре в равновесном состоянии углеродистые стали разделяют на *доэвтектоидные* (содержащие менее 0,8 % углерода), *эвтектоидные* (содержащие 0,8 % углерода) и *заэвтектоидные* (содержащие более 0,8 % углерода).



Доэвтектоидные стали после отжига имеют структуру феррита и перлита. Чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем больше в ее структуре перлита и тем выше прочность стали (одновременно с повышением прочности уменьшается пластичность). Эвтектоидная сталь после отжига состоит из перлита. Она прочная, твердая, но пластичность меньше, чем у доэвтектоидной. Заэвтектоидные стали после отжига имеют структуру перлита и вторичного цементита, который обычно располагается в виде сетки. При увеличении содержания углерода твердость заэвтектоидных сталей увеличивается, а прочность снижается из-за увеличения хрупкости. Именно поэтому на практике применяются стали, содержащие менее 1,3 % углерода.

Для повышения пластичности и улучшения обрабатываемости резанием заэвтектоидные стали подвергают специальному отжигу, при котором весь цементит выделяется в виде зерен. Эти зерна находятся в феррите. Такая зернистая смесь называется *зернистым перлитом*. Микроструктуры сталей приведены на рис. 6.2.

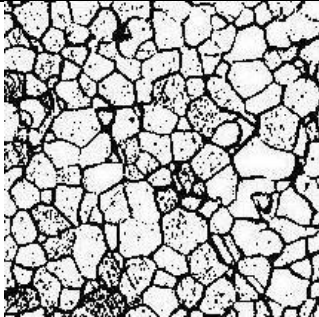
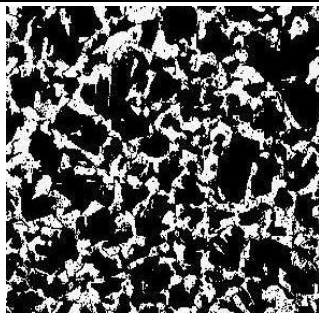
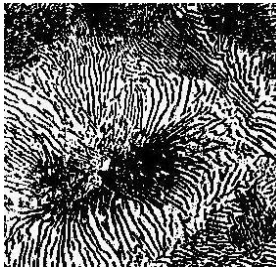
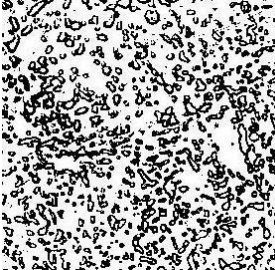
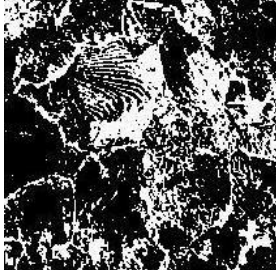
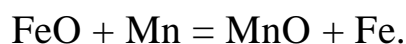
Армко-железо (феррит)	Доэвтектоидная сталь (феррит и перлит)	
		
Эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит)	Эвтектоидная сталь (зернистый перлит)	Заэвтектоидная сталь (перлит и цементит)
		

Рис. 6.2. Микроструктуры углеродистых сталей

В технических сортах стали постоянно присутствуют марганец, кремний, фосфор, сера, а также газы (водород, кислород, азот).

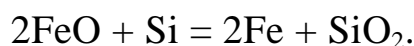
Обычно содержание этих элементов ограничивается следующими верхними пределами, %: 0,8Mn; 0,5Si; 0,05P; 0,05S. При большем их содержании сталь относят к сорту легированных.

**Марганец.** Его вводят в любую сталь для раскисления, т.е. для устранения вредных примесей закиси железа:



Марганец устраняет также вредные сернистые соединения железа и растворяется в феррите и цементите, заметно влияет на свойства стали, повышая прочность в горячекатаных изделиях, изменяя и некоторые другие свойства. Но так как во всех сталях содержание марганца примерно одинаково, то его влияние на сталь разного состава остается примерно постоянным.

**Кремний.** Влияние начальных присадок кремния аналогично влиянию марганца. Кремний раскисляет сталь по реакции



Кремний, остающийся после раскисления в  $\alpha$ -твердом растворе (в феррите), сильно повышает предел текучести. Однако это снижает способность стали к вытяжке и особенно к холодной высадке. В связи с этим в сталях, предназначенных для холодной штамповки и холодной высадки, содержание кремния должно быть снижено.

**Фосфор.** Железо и его руда, а также топливо и флюсы содержат какое-то количество фосфора, которое в процессе производства чугуна остается в нем в той или иной степени и затем переходит в сталь.

Растворяясь в феррите, фосфор резко повышает температуру перехода в хрупкое состояние или иначе – вызывает хладноломкость стали.

Следует отметить, что в отдельных случаях фосфор желателен, так, например, он облегчает обрабатываемость стали режущим инструментом, а в присутствии меди повышает сопротивление коррозии.

**Сера.** Обычно содержание серы для высококачественной стали не должно превышать 0,02 – 0,03 %. Для стали обычного качества допускают более высокое содержание серы: 0,03 – 0,04 %.

Сера нерастворима в железе и любое ее количество образует с железом сернистое соединение – сульфид железа FeS, который входит в состав эвтектики, образующейся при 988 °С.

Наличие легкоплавкой и хрупкой эвтектики, расположенной, как правило, по границам зерен, делает сталь хрупкой при 800 °С и выше, т. е. в районе температур красного каления. Явление это носит название красноломкости. Вследствие красноломкости сталь с повышенным содержанием серы не поддается горячей обработке давлением. С этой точки зрения сера является вредной примесью в стали.

Обычно феррит сернистой эвтектики (Fe + FeS) объединяется с ферритом основной массы металла, а соединение FeS располагается вокруг зерен. Такая форма включений серы является особенно вредной, так как при горячей обработке давлением получают надрывы и трещины. Последнее связано с тем, что в процессе нагрева стали вокруг оторочек сернистого железа, начиная с температуры 988 °С, происходит оплавление. Отдельные обособленные округлые включения сернистого железа уже менее вредны.

Введение марганца в сталь уменьшает вредное влияние серы, так как при введении его в жидкую сталь протекает реакция образования сульфида марганца:  $FeS + Mn = MnS + Fe$ .

Сульфид марганца плавится при 1620 °С, т. е. при температурах, значительно более высоких, чем температура горячей обработки.

**Газы.** Водород, азот и кислород содержатся в стали в небольших количествах, зависящих от способа производства.

Водород, азот и кислород могут присутствовать в следующих формах: находиться в различных несплошностях, находиться в  $\alpha$ -твердом растворе, образовывать различные соединения.

Очень вредным является растворенный в стали водород, который сильно охрупчивает её. Он приводит к образованию в катанных заготовках и крупных поковках флокенов, которые представляют собой очень тонкие трещины овальной или круглой формы (в изломе вид пятен – хлопья серебристого цвета).

Образованные азотом и кислородом хрупкие неметаллические включения ухудшают свойства металла.

### 6.2.2. Чугуны

Сплавы железа с углеродом, которые содержат более 2,14 % углерода, называются чугунами. Кроме углерода, чугуны содержат повышенное количество кремния, марганца, серы и фосфора. Углерод в чугуне может находиться в связанном виде – в виде цементита или в свободном – в виде графита.

Различают следующие виды чугунов:

1) *белый чугун*, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита;

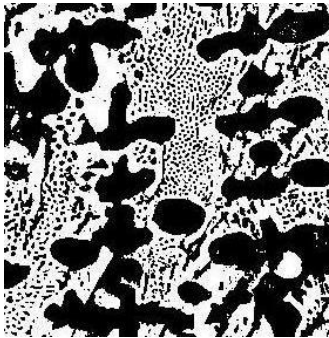
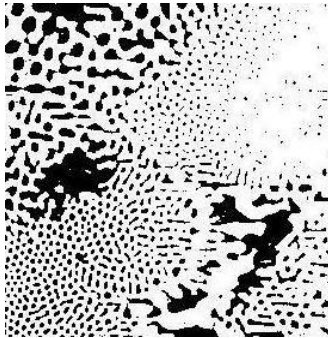

2) *серый чугун*, в котором большая часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде пластинчатого графита;

3) *ковкий чугун*, в котором большая часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде хлопьевидного графита. Название ковкие чугуны условно, пластической деформации они не подвергаются.

4) *высокопрочный чугун*, в котором большая часть или весь углерод находится в виде шаровидного графита.


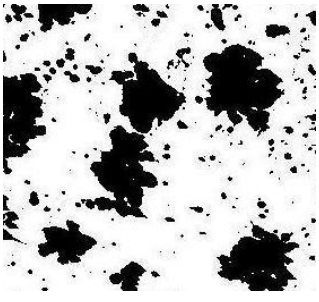
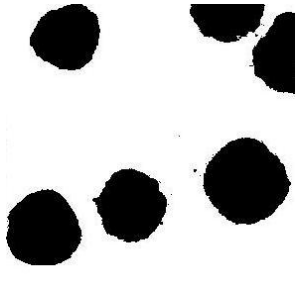
Белые чугуны получают при ускоренном охлаждении и повышенном содержании марганца (свыше 1 %). В белом чугуне весь углерод находится в виде цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), поэтому этот чугун очень твердый и хрупкий. Структурные превращения происходят в соответствии с диаграммой Fe –  $\text{Fe}_3\text{C}$ . При кристаллизации белых чугунов образуется эвтектика – ледебурит. Как указывалось выше, ледебурит – это механическая смесь аустенита и цементита. Он образуется при температурах 1147 °С; при 727 °С аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит; ниже 727 °С ледебурит представляет собой смесь перлита и цементита.

По содержанию углерода *белые чугуны* (рис. 6.3) делятся на *доэвтектические* (2 – 4,3 %), *эвтектические* (4,3 %) и *заэвтектические* (больше 4,3 %). Доэвтектические белые чугуны имеют структуру, состоящую из перлита, вторичного цементита и ледебурита. Чем больше углерода в доэвтектическом чугуне, тем больше содержание ледебурита. Эвтектический белый чугун состоит только из ледебурита, заэвтектический чугун – из крупных пластин первичного цементита и ледебурита. Чем больше углерода в заэвтектическом чугуне, тем больше он содержит первичного цементита.

Белый чугун		
доэвтектический	эвтектический	заэвтектический
		

*Рис. 6.3. Микроструктура белых чугунов*

Микроструктура серого, ковкого и высокопрочного чугунов (рис. 6.4) состоит из металлической основы и графитовых включений. Металлическая основа чугунов бывает ферритной (наименее прочные чугуны), феррито-перлитной, перлитной (наиболее прочные чугуны).

Серый чугун (металлическая основа и пластинчатый графит)	Ковкий чугун (металлическая основа и хлопьевидный графит)	Высокопрочный чугун (металлическая основа и шаровидный графит)
		

*Рис. 6.4. Микроструктура чугунов*

Механические свойства серого, ковкого и высокопрочного чугунов определяются, главным образом, формой графита. Графитную составляющую можно считать пустотой, порой, трещиной, т.е. концентратором внутренних напряжений. Таким образом, свойства чугунов

зависят от количеств, величины и характера распределения включений графита.

Серый чугун с пластинчатым графитом имеет самые низкие механические свойства, так как пластинки графита резко снижают прочность при растяжении и пластичность, также уменьшают сопротивление отрыву.

На рис. 6.5 представлена микроструктура серых чугунов.

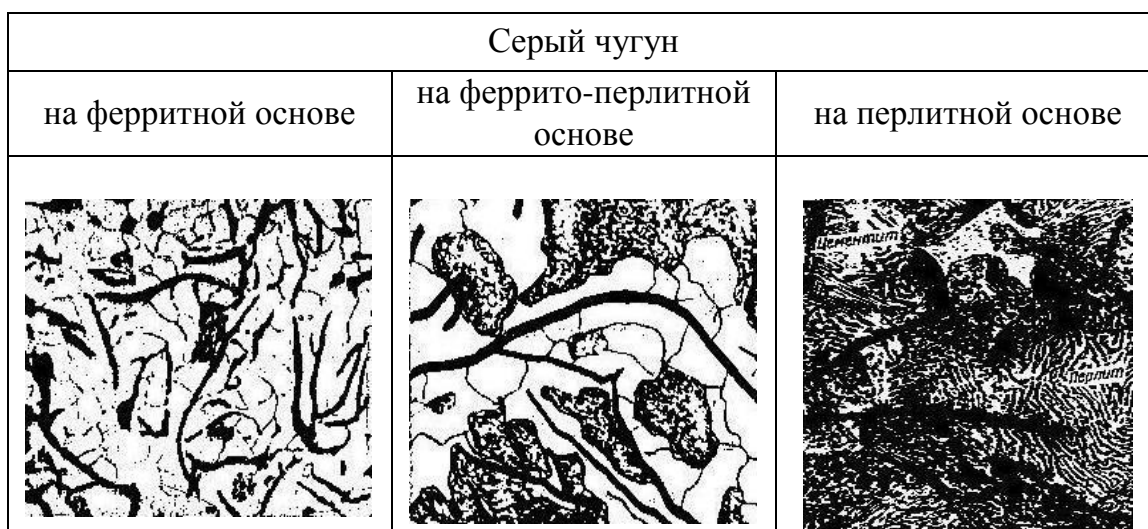


Рис. 6.5. Микроструктура серых чугунов

Серый чугун получается при медленном охлаждении и повышенном содержании кремния. Прочность серых чугунов на растяжение находится в пределах 100 – 350 МПа (табл. 6.1 [29, с. 232]).

Таблица 6.1

Механические свойства и химический состав (%) серых чугунов

Марка чугуна	$\sigma_b$ , МПа, не менее	Твердость НВ, не более	С	Si	Mn	Р	S
						Не более	
СЧ10	100	190	3,5 – 3,7	2,2 – 2,6	0,5 – 0,8	0,3	0,15
СЧ15	150	210	3,5 – 3,7	2,0 – 2,4	0,5 – 0,8	0,2	0,15
СЧ20	200	230	3,3 – 3,5	1,4 – 2,4	0,7 – 1,0	0,2	0,15
СЧ25	250	245	3,2 – 3,4	1,4 – 2,4	0,7 – 1,0	0,2	0,15
СЧ30	300	260	3,0 – 3,2	1,3 – 1,9	0,7 – 1,0	0,2	0,12
СЧ35	350	275	2,9 – 3,0	1,2 – 1,5	0,7 – 1,1	0,2	0,12

Несмотря на низкие механические свойства, серый чугун имеет ряд преимуществ. При низкой себестоимости серые чугуны обладают хорошей жидкотекучестью и малой усадкой, хорошо обрабатываются резанием, имеют высокие антифрикционные свойства, хорошо гасят вибрации и шум.

На рис. 6.6 представлена микроструктура ковкого чугуна. Ковкий чугун получают при длительном нагреве при высоких температурах (отжиг 900 – 1000 °С) отливок из белого чугуна. При этом цементит распадается и образуется графит хлопьевидной формы. Такой графит по сравнению с пластинчатым значительно меньше снижает прочность и пластичность металлической основы.

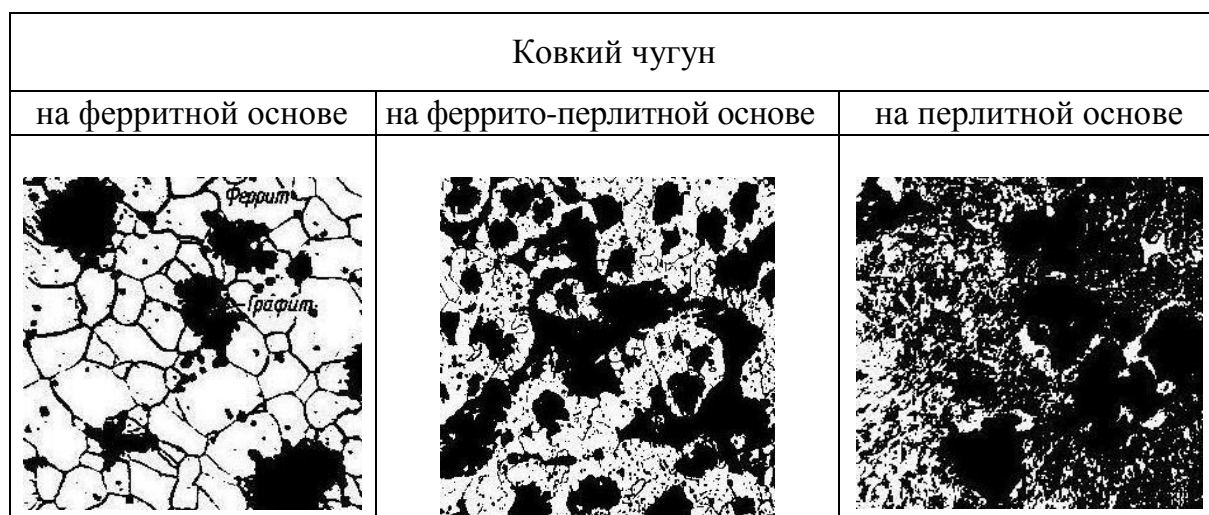


Рис. 6.6. Микроструктура ковких чугунов

Прочность ковкого чугуна может меняться от 300 до 800 МПа. Кроме того, ковкий чугун более пластичен, чем серый. Относительное удлинение равно 2 – 15 %. В табл. 6.2 приведены механические свойства и химический состав ковких чугунов [29, с. 235].

Высокопрочный чугун получают при модифицировании серых чугунов. Перед разливкой в чугун добавляют небольшое количество магния или церия (в количестве 0,03 – 0,08 % от массы обрабатываемого чугуна). Под воздействием этих элементов графит при кристаллизации принимает шаровидную форму. Шаровидный графит меньше ослабляет металлическую основу (рис. 6.7) и обеспечивает высокие механические свойства. Прочность этого чугуна  $\sigma_B = 350 - 1000$  МПа.

Таблица 6.2

## Механические свойства и химический состав (%) ковких чугунов

Марка чугуна	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость НВ	С	Si	Mn	Р	S
	Не более						Не более	
Ферритные чугуны								
КЧ33-8	323	8	100 – 163	2,6 – 2,9	1,0 – 1,6	0,4 – 0,6	0,18	0,20
КЧ37-12	362	12	110 – 163	2,4 – 2,7	1,2 – 1,4	0,2 – 0,4	0,12	0,06
Перлитные чугуны								
КЧ55-4	539	4	192 – 241	2,5 – 2,8	1,1 – 1,3	0,3 – 1,0	1,10	0,20
КЧ65-3	637	3	212 – 269	2,4 – 2,7	1,2 – 1,4	0,3 – 1,0	0,10	0,06

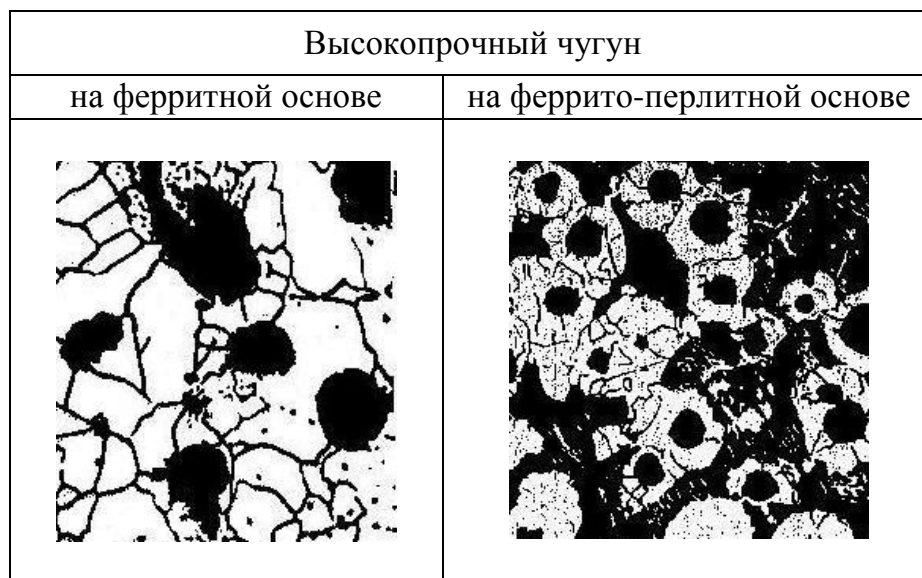


Рис. 6.7. Микроструктура высокопрочных чугунов

Механические свойства высокопрочных чугунов приведены в табл. 6.3 [29, с. 235].

В зависимости от назначения чугуны подразделяются на жаростойкие, жаропрочные, коррозионностойкие, немагнитные, износостойкие и антифрикционные.

Обычные промышленные чугуны содержат те же примеси, что и углеродистые стали (марганец, кремний, сера и фосфор), но в большем количестве, чем сталь. Эти примеси влияют на условия графитизации и, следовательно, на структуру и свойства чугунов.



Таблица 6.3

## Механические свойства высокопрочных чугунов

Марка чугуна	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость НВ
	Не менее			
ВЧ35	350	220	22	140 – 170
ВЧ40	400	250	15	140 – 202
ВЧ45	450	310	10	140 – 225
ВЧ50	500	320	7	153 – 345
ВЧ60	600	370	3	192 – 277
ВЧ70	700	420	2	228 – 302
ВЧ80	800	480	2	248 – 351
ВЧ100	1000	700	2	270 – 360

**Кремний** особенно сильно влияет на структуру чугуна, усиливая графитизацию. Содержание кремния в чугунах колеблется в широких пределах: от 0,3 – 0,5 до 3 – 5 %. Изменяя содержание кремния, можно получить чугуны, совершенно различные по свойствам и структуре – от малокремнистого белого до высококремнистого ферритного (например высокопрочного чугуна с шаровидным графитом).

**Марганец** в отличие от кремния препятствует графитизации или, как говорят, способствует отбеливанию чугуна.

**Сера** также способствует отбеливанию чугуна, но одновременно ухудшает литейные свойства (например снижает жидкотекучесть), поэтому содержание серы в чугунах лимитируется: для мелкого литья до 0,08 %, а для более крупного до 0,1 – 0,12 %.

**Фосфор** практически не влияет на процесс графитизации. Однако фосфор в чугунах полезен, так как он улучшает жидкотекучесть. Это объясняется образованием относительно легкоплавкой тройной эвтектики (температура плавления – 950 °С). В момент затвердевания эвтектика состоит из аустенита, обогащенного фосфором, цементита и фосфида железа ( $Fe_3P$ ).

Кроме постоянных примесей, в чугун в качестве легирующих вводят и другие элементы. Наиболее часто чугун легируют хромом,

никелем, титаном, алюминием и медью. Такие чугуны называются легированными. Примеси могут содержаться в рудах, из которых в доменных печах выплавляется чугун, эти чугуны называются природнолегированными.

### Контрольные вопросы

1. Какие полиморфные модификации имеет железо?
2. Что такое феррит, аустенит, перлит, цементит, ледебурит?
3. Поясните сущность превращений, протекаемых при температурах 727, 1147 и 1499 °С в железоуглеродистых сплавах.
4. Что представляют собой стали?
5. Какие различают стали по структуре в равновесном состоянии?
6. Что общего между пластинчатым и зернистым перлитом? В чем их отличие?
7. Каково влияние постоянных примесей на свойства стали?
8. Что собой представляют чугуны? Какие виды чугунов вы знаете?
9. Что такое белые чугуны? Какова их классификация?
10. Что объединяет серые, ковкие и высокопрочные чугуны?
11. Каково влияние примесей на свойства чугунов?

## Глава 7. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Цель любого процесса термической обработки состоит в том, чтобы нагревом до определенной температуры и последующим охлаждением вызвать желаемое изменение свойств из-за изменения строения металла (сплава). Проведение термической обработки (ТО) можно свести к трем этапам: нагрев, выдержка и охлаждение. При этом определяющими являются температура нагрева и скорость охлаждения.

Основные виды ТО: отжиг, закалка, отпуск и старение. Каждый из указанных видов имеет несколько разновидностей.

*Отжиг* – термическая обработка, в результате которой металлы и сплавы приобретают структуру, близкую к равновесной. При этом происходит разупрочнение, сопровождающееся повышением пластич-

ности и снятием остаточных напряжений.

*Закалка* – термическая обработка, в результате которой в сплавах образуется неравновесная структура. При закалке осуществляют нагрев выше критических температур, выдержку при этих температурах с последующим быстрым охлаждением.

*Отпуск и старение* – термические обработки, в результате которых в предварительно закаленных металлах (сплавах) происходят превращения, приближающие их структуру к равновесной структуре.

## 7.1. Фазовые превращения в сплавах железа

Основные фазовые превращения, влияющие на структуру и свойства сталей:

- 1) превращения при нагреве до аустенитного состояния – фазовая перекристаллизация;
- 2) превращения аустенита при различных условиях охлаждения;
- 3) мартенситное превращение;
- 4) превращения при отпуске.

### 7.1.1. Аустенитное превращение

*Аустенитное превращение* (превращение перлита в аустенит) состоит из двух параллельно идущих процессов: полиморфного  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения и растворения в  $Fe_\gamma$  углерода цементита.

Первые зерна аустенита образуются на границе зерен между ферритом и цементитом – структурными составляющими перлита. Переход через критическую точку  $A_1$  сопровождается резким уменьшением зерна, но дальнейший нагрев (или выдержка) вызывает рост аустенитных зерен.

Размер аустенитного зерна является важной структурной характеристикой нагретой стали. От размера зерна аустенита зависят поведение стали в различных процессах и механические свойства деталей, наиболее существенное влияние он оказывает на ударную вязкость, так как увеличение размеров аустенитных зерен приводит к образованию крупнозернистой структуры. Различают *начальное*, *наследственное* и *действительное* зерно.

*Начальное* зерно определяется размером зерна аустенита в момент окончания перлитно-аустенитного превращения.

*Наследственное* зерно свидетельствует о склонности аустенитных зерен к росту.

*Действительное* зерно представляет размер зерна аустенита после определенной обработки стали, т.е. в конкретных условиях.

По склонности к росту зерна различают *наследственно мелкозернистую* и *наследственно крупнозернистую* стали. В наследственно крупнозернистых сталях размер аустенитных зерен быстро увеличивается даже при небольшом перегреве выше  $A_{c1}$  ( $A_{c3}$ ,  $A_{cm}$ ), тогда как в наследственно мелкозернистых сталях даже при значительном перегреве сохраняется относительно мелкое зерно.

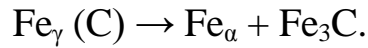
Склонность к росту зерна стали зависит от содержания легирующих элементов. Практически все легирующие элементы препятствуют росту аустенитных зерен. Исключением является марганец, который способствует образованию крупнозернистой структуры. Наиболее сильно тормозят рост зерна аустенита Al, Ti и V; хорошо сдерживают рост аустенитных зерен Mo, W и Cr; слабо сдерживают – Si и Ni. Объяснение природы образования мелкозернистой структуры дает *теория барьеров*, т.е. происходит образование труднорастворимых в аустените соединений (карбидов и оксидов), которые являются барьерами для растущего зерна.

Кроме того, склонность к росту зерна стали сильно зависит от способа её получения, т.е. от технологии производства и режима раскисления. Влияние металлургического качества стали на размер зерна объясняется наличием в стали разного количества мельчайших примесей оксидов, карбидов, нитридов и сульфидов, которые также затрудняют рост зерен.

Наследственно мелкозернистую сталь можно обрабатывать давлением, например, прокатывать при более высоких температурах. Как правило, все спокойные стали после обработки имеют наследственно мелкозернистую структуру, а кипящие стали – наследственно крупнозернистую.

### **7.1.2. Распад аустенита**

При превращении аустенита в перлит происходит полиморфное  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение и диффузионное перераспределение углерода в аустените, что ведет к образованию ферритно-цементитной структуры:



Аустенит распадается с образованием феррита и цементита. В технологических процессах ТО распад аустенита (перлитное превращение) происходит в условиях непрерывного охлаждения и иногда изотермически (при постоянной температуре). Процессы распада переохлажденного аустенита подразделяются на два типа: перлитное и промежуточное, или бейнитное (диффузионные); мартенситное (бездиффузионное). На *C*-образной диаграмме нанесены две кривые, указывающие время начала и конца превращения переохлажденного аустенита. В области диаграммы, расположенной левее линии начала превращения, существует переохлажденный аустенит; между линиями начала и конца превращения находится область, в которой непосредственно и происходит превращение; правее линии конца превращения – область, в которой существуют продукты превращения аустенита. Устойчивость аустенита зависит от степени переохлаждения.

Превращение аустенита при температурах в интервале  $A_{r1} - 550$  °С называется перлитным, а превращение при температурах в интервале  $550$  °С –  $M_n$  – промежуточным. В интервале температур перлитного превращения в результате распада аустенита образуются пластинчатые структуры перлитного типа. Чем больше переохлаждение, тем тоньше получается ферритно-цементитная структура. В зависимости от дисперсности продукты распада имеют следующие названия:

- 1) грубопластинчатые структуры с размером пластинок  $\Delta_0 \approx \approx (0,5...0,7)10^{-3}$  мм называются *перлитом* (превращение при  $670 - 650$  °С),
- 2) при  $\Delta_0 \approx 0,25 \cdot 10^{-3}$  мм – *сорбитом* (превращение при  $640 - 590$  °С),
- 3) при  $\Delta_0 \approx 0,1 \cdot 10^{-3}$  мм – *трооститом* (превращение при  $580 - 550$  °С).

Указанное деление условно: перлит, сорбит и троостит имеют одну и ту же природу – ферритно-цементитная смесь.

Таким образом, перлит, сорбит и троостит – структуры, образующиеся при диффузионном распаде переохлажденного аустенита, являются ферритно-цементитными структурами, имеющими пластинчатое строение, и различаются лишь степенью дисперсности.

В интервале температур промежуточного превращения ( $550$  °С –  $M_n$ ) аустенит распадается с образованием структур, называемых *бей-*

*нитом*. Сущность превращения заключается в следующем. При температурах ниже 550 °С скорость превращения аустенита замедляется: при этом самодиффузия атомов железа практически не происходит, но атомы углерода еще достаточно подвижны. Происходит диффузионное распределение атомов углерода и участки аустенита, обогащенные углеродом, превращаются в цементит, но превращение обедненного углеродом аустенита происходит по сдвиговому механизму путем возникновения и роста зародышей феррита. Образующиеся при этом структуры имеют игольчатую форму. Дисперсность кристаллов феррита и цементита зависит от температуры превращения: толщина пластинок  $\Delta_0 \approx 0,12 \cdot 10^{-3}$  мм образуется при 550 – 350 °С (*верхний бейнит*, он имеет перистое строение – вид резаной соломы);  $\Delta_0 \approx 0,08 \cdot 10^{-3}$  мм – при более низких температурах (*нижний бейнит*, он имеет игольчатое – пластинчатое строение).

### 7.1.3. Мартенситное превращение

*Мартенситное превращение* начинается при переохлаждении аустенита ниже линии  $M_H$ ; малейшая изотермическая задержка в интервале температур от  $M_H$  до  $M_K$  приведет к стабилизации аустенита, а это значит, что превращение до конца не доходит, и в структуре кроме мартенсита образуется большое количество остаточного аустенита.

*Мартенсит* – неравновесная фаза – многократно пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе, образующийся при резком переохлаждении аустенита (охлаждение со скоростями выше критических). Возникают сильнейшие искажения кристаллической решетки, дислокации блокируются почти полностью, атомы углерода «заклинены» внутри пересыщенного раствора, что превращает кристаллическую решетку из кубической в вытянутую тетрагональную, образуется игольчатая структура – мартенсит. Относительно друг друга кристаллы мартенсита расположены под углом 60 и 120 °С.

На температуры  $M_H$  и  $M_K$  помимо содержания углерода существенно влияют растворенные в углероде легирующие элементы (большинство из них понижают температуры  $M_H$  и  $M_K$ ). Свойства мартенсита зависят от количества растворенного в нем углерода: с повышением содержания углерода до 0,6 % твердость мартенсита растет, а затем остается постоянной, т.е. мартенсит имеет высокую твердость, равную или превышающую 60HRC.

Мартенситное превращение отличается от других фазовых превращений двумя особенностями:

1) это бездиффузионный процесс, при превращении происходит лишь перестройка решетки;

2) ориентированностью; сдвиговый характер превращения приводит к образованию на поверхности рельефа.

Мартенситное превращение в стали, обладая вышеуказанными характерными особенностями, также имеет специфичные черты. Данное превращение необратимо; кристаллы мартенсита образуются практически мгновенно. По мере снижения температуры количество мартенсита возрастает.

#### 7.1.4. Превращения при отпуске

*Превращения при отпуске* состоят в том, что мартенсит закаленной стали будучи неустойчивым уже при невысоких нагревах, усиливающих колебания кристаллической решетки, начинает распадаться, в результате чего образуется механическая смесь феррита и цементита. Степень дисперсности данных структурных составляющих будет зависеть от температуры и длительности нагрева. По степени нагрева превращения принято делить на три стадии.

1. Превращения при 150 – 200 °С сопровождаются лишь перераспределением углерода в мартенсите, мартенсит обедняется углеродом и понижается степень тетрагональности, но также образуются зародыши  $\epsilon$ -карбидной фазы ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ); такая смесь неоднородного мартенсита с пластинками  $\epsilon$ -карбида называется *мартенситом отпуска*.

2. Нагрев выше 200 – 300 °С приводит к растворению  $\epsilon$ -карбида и появлению быстро растущих частичек  $\text{Fe}_3\text{C}$ , что сопровождается снятием внутренних напряжений, возникающих в результате предыдущих превращений, сопровождающихся объемными изменениями. Образовавшаяся при этом структура называется *трооститом отпуска*.

3. Дальнейшее повышение температуры (выше 400 °С) сопровождается коагуляцией частиц феррита и цементита и их быстрым ростом. При этом коагуляция одних карбидных частиц происходит за счет растворения других более мелких частиц. Приводимые стадии отра-

жают преимущественно протекающие процессы.

При температурах отпуска 350 – 400 °С диаметр частиц карбида имеет размеры около  $0,3 \cdot 10^{-3}$  мм.

При температурах отпуска 500 – 600 °С диаметр частиц составляет около  $0,1 \cdot 10^{-3}$  мм. Такая структура называется *сорбитом отпуска*.

Основным отличием структур типа троостита и сорбита является сфероидальная форма частиц цементита в структурах отпущенной стали, в то время как у структур после распада аустенита форма частиц пластинчатая.

## 7.2. Отжиг и нормализация стали

Традиционно сложившееся понятие «отжига» охватывает несколько отличающихся друг от друга по режиму операций термической обработки, объединенных единой целью – привести сталь в термодинамически равновесное состояние. При этом происходят перекристаллизация стали и устранение внутренних напряжений или исправление структуры.

### Основные виды отжига

**1. Диффузионный отжиг (гомогенизация)** применяется для устранения в легированных сталях дендритной ликвации. Дендритная ликвация повышает склонность стали, обрабатываемой давлением, к анизотропии и хрупкому излому, то есть понижает пластичность и вязкость легированной стали. Диффузионный отжиг заключается в длительном нагреве (18 – 24 ч) до очень высоких температур (1100 – 1200 °С), так как в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, позволяющие выравнить состав стали в отдельных объемах.

В результате диффузионного отжига образуется крупнозернистая структура, которую можно устранить в процессе последующей термической обработки.

**2. Полный отжиг** – это нагрев стали выше линии  $A_3$  на 30 – 50 °С с выдержкой и медленным охлаждением (вместе с печью). При нагреве выше верхней критической точки феррито-перлитная структура переходит в аустенит, а при охлаждении – его распад в ферритоцементитную смесь, то есть происходит полная перестройка структуры. При фа-



зовой перекристаллизации измельчается зерно и устраняются неблагоприятные структуры стали, например, видманштеттова структура (ферритные выделения имеют вид игл). После полного отжига сталь обладает низкой прочностью и твердостью при достаточно высокой пластичности, внутренние напряжения при этом снимаются полностью.

В большинстве случаев полный отжиг является предварительной термической обработкой и облегчает последующую обработку стальных заготовок, поэтому данному отжигу подвергаются стали до механической обработки.

**3. Неполный отжиг** – это нагрев стали выше линии  $A_1$  на 30 – 50°C с выдержкой и медленным охлаждением. Отжиг проводится, когда нет необходимости в доэвтектоидных сталях в изменении расположения ферритной составляющей. При нагреве в аустенит переходит только перлит, а феррит остается. При охлаждении получается мелкозернистый перлит, а зерно феррита не меняется. Неполный отжиг более экономичен, чем полный, но возможен лишь при не слишком крупнозернистой исходной структуре, внутренние напряжения при этом снимаются полностью.

Неполный отжиг широко применяют для заэвтектоидных сталей. Такой отжиг называют *сфероидизацией*, так как он ведет к образованию *зернистого* (сфероидного) перлита. Сталь со структурой зернистого перлита обладает большей пластичностью, меньшей твердостью по сравнению со сталями, прошедшими полный отжиг. Цель отжига на зернистый перлит (сфероидизирующий отжиг) – улучшение обрабатываемости резанием заэвтектоидных сталей.

**4. Рекристаллизационный (низкий) отжиг** – нагрев ниже  $A_1$  с выдержкой и медленным охлаждением. При этом фазовой перекристаллизации не происходит, назначение данного вида отжига – рекристаллизация наклепанного металла и снятие внутренних напряжений. В результате рекристаллизационного отжига достигается небольшая твердость со значительной вязкостью, так как образуется неоднородная мелкозернистая структура.

Рекристаллизационный отжиг применяют для снятия наклепа в стальных заготовках в процессе холодной обработки давлением, например, в процессе прокатки, штамповки, волочения или как промежу-

точный вид термической обработки для повышения пластичности с целью предупреждения появления трещин в стали при холодной обработке давлением.

**5. Изотермический отжиг** состоит в нагреве стали на  $30 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше линии  $A_3$ , охлаждении до температуры на  $30 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже  $A_1$  (обычно  $660 - 680\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). При этой температуре назначают изотермическую выдержку ( $3 - 6\text{ ч}$ ) до полного распада аустенита, после чего металл охлаждают с любой скоростью.

Основное преимущество изотермического отжига заключается в сокращении длительности процесса по сравнению с полным отжигом и получении более однородной структуры. Данному виду отжига, как правило, подвергаются легированные стали. Для некоторого укрупнения зерна с целью улучшения последующей механической обработки температуру отжига поднимают до  $930 - 950\text{ }^{\circ}\text{C}$  [14, с. 197].

При отжиге могут возникнуть такие дефекты, как перегрев и пережог.

*Перегрев* – это интенсивный рост зерна, снижающий уровень ударной вязкости. Его устраняют повторным отжигом.

*Пережог* – это проникновение кислорода вглубь металла по границам зерен, приводящее к хрупкости. Пережог неустраним, и детали направляют на переплавку.

**6. Нормализация** – это нагрев стали выше  $A_3$  или  $A_{ст}$ , выдержка и охлаждение на спокойном воздухе. Так как охлаждение идет быстрее, чем при отжиге, то частицы цементита оказываются дисперснее. Нормализация широко применяется для исправления структуры перегретой стали и после горячей обработки металла давлением, а также устранения цементитной сетки в заэвтектоидных сталях.

Для низкоуглеродистых сталей разницы в свойствах после нормализации и отжига практически нет. Тогда как для среднеуглеродистых сталей нормализация дает бóльшую твердость и заменить отжиг не может, но позволяет изготовить неотчетственные детали без дополнительной термической обработки.

По сравнению с отжигом нормализация значительно экономнее, так как печи используются только при нагреве и выдержке, а охлаждение осуществляется вне печи – на воздухе, т.е. печь свободна.

### 7.3. Закалка стали

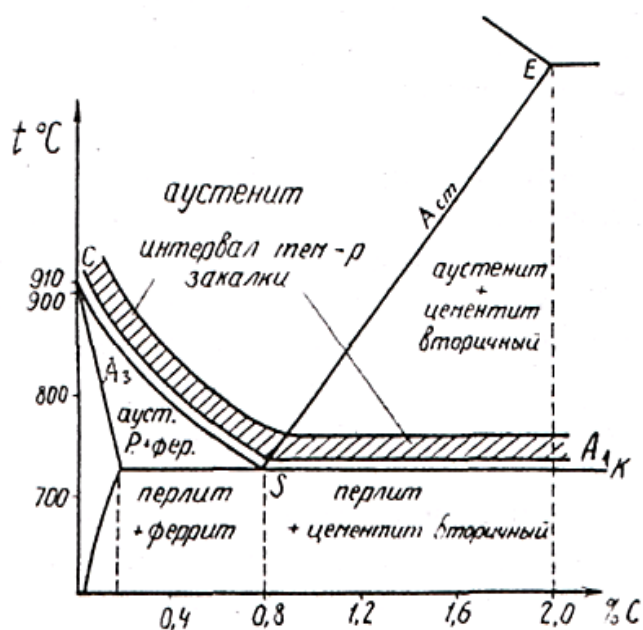
Закалка – это вид термической обработки, который заключается в нагреве стали до аустенитного или аустенитно-карбидного состояния, выдержке в течение времени, необходимого для завершения фазовых превращений, и охлаждении со скоростью выше критической для получения мартенситной структуры.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку (см. рисунок):

1) **полная закалка** – это нагрев выше линий  $A_3$  и  $A_{сг}$  на 30 – 50 °С, выдержка и последующее быстрое охлаждение;

2) **неполная закалка** – это нагрев выше линии  $A_1$  на 30 – 50 °С, выдержка и последующее быстрое охлаждение.

Полная закалка применяется только для доэвтектоидных сталей. Микроструктура после полной закалки этих сталей будет состоять из мелкоигольчатого мартенсита и небольшого количества остаточного аустенита. Тогда как неполная закалка доэвтектоидных сталей приведет не только к образованию мелкоигольчатого мартенсита, но и сохранению ферритной составляющей, что недопустимо (в виду снижения твердости) и является браком, так как сталь, имеющая такую структуру, будет мягкой и недостаточно прочной.



Участки диаграммы Fe – Fe<sub>3</sub>C  
(нанесены температуры закалки)

В результате полной закалки заэвтектоидных сталей образуются крупноигольчатый мартенсит и повышенное количество остаточного аустенита. Это объясняется тем, что нагрев этих сталей до температур, на 30 – 50 °С превышающих линию  $A_{сг}$ , приводит к сильному росту зерна аустенита и увеличению содержания углерода в аустените (за счет растворенного цементита). Большое зерно аустенита приводит к получению крупноигольчатого мартенсита, а повышенное содержание

углерода в аустените – к получению большого процента остаточного аустенита вследствие снижения температуры точек  $M_H$  и  $M_K$ . Наличие большого количества остаточного аустенита ведет к снижению твердости, крупное зерно – к снижению ударной вязкости, а отсутствие включений цементита – к снижению износостойкости.

При неполной закалке заэвтектоидную сталь нагревают до температур между линиями  $A_1$  и  $A_{ст}$ , т.е. до двухфазного состояния аустенит плюс цементит. При последующем охлаждении аустенит превратится в мартенсит. Цементит должен быть в виде мелких равномерно распределенных по объему зернышек. Это можно обеспечить предварительной термической обработкой – отжигом на зернистый перлит. Если же перед закалкой микроструктура стали состояла из пластинчатого перлита и замкнутой сетки цементита, то после неполной закалки сетка цементита сохраняется. Сталь, имеющая в своей структуре мартенсит, остаточный аустенит и замкнутую сетку цементита, будет хрупкой. Таким образом, *для заэвтектоидных сталей следует рекомендовать неполную закалку* как обеспечивающую более высокие эксплуатационные свойства и экономически более выгодную.

На качество закалки особое влияние оказывает охлаждение, которое должно быть быстрым и полным. Скорость охлаждения определяется видом охлаждающей среды.

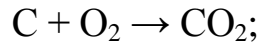
Для получения структуры мартенсита в большинстве случаев требуется умеренное охлаждение при высоких температурах, быстрое в интервале температур  $A_1 - M_H$ . В зоне температур мартенситного превращения, т.е. ниже  $240\text{ }^\circ\text{C}$ , выгоднее замедлить охлаждение, так как образующиеся структурные напряжения успевают выравняться, а твердость образовавшегося мартенсита практически не снижается.

#### **7.4. Химическое действие среды.**

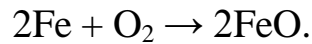
##### **Охлаждение при термической обработке**

При высокой температуре происходит химическое взаимодействие поверхности металла с окружающей средой, причем особое значение имеют два процесса:

1) *обезуглероживание* стали, связанное с выгоранием углерода в поверхностных слоях



2) окисление стали, ведущее к образованию на поверхности окалины, окислов железа



Интенсивность обезуглероживания и окисления стали зависит от температуры, состава стали и состава окружающей среды. Так как эти процессы диффузионные, то с повышением температуры они ускоряются.

Охлаждение при термической обработке может осуществляться в печах, на воздухе, в маслах, расплавах и растворах.

Правильный выбор закалочной среды имеет определяющее значение для успешного проведения закалки. Наиболее распространенные следующие закалочные среды: вода, 5 – 10%-ный водный раствор едкого натра или поваренной соли и минеральное масло. Для закалки углеродистых сталей, как правило, применяют воду с температурой 18 °С; а для закалки большинства легированных сталей – масло.

В таблице приведены скорости охлаждения в различных средах [29, с. 272].

Скорость охлаждения сталей в различных закалочных средах, °С/с

Закалочная среда	Интервал температур, °С	
	650 – 550	300 – 200
Вода, 18 °С	600	270
Вода, 50 °С	100	270
10%-ный раствор NaOH в воде	1200	300
10%-ный раствор NaCl	1100	300
Минеральное масло	100 – 150	20 – 50
Спокойный воздух	3	1
Полимерная закалочная среда ПК-2	300 – 550	50 – 100
Полимерная закалочная среда ВП-3	300 – 550	50 – 100

При охлаждении закаливаемой стали в жидкой среде различают три периода, характеризующиеся разной скоростью охлаждения [27, с. 271]:

1) период пленочного кипения, когда теплопередаче препятст-

вует образование паровой рубашки, из-за чего скорость охлаждения сравнительно невелика;

2) период пузырьчатого кипения, при котором паровая рубашка разрушается, интенсивность охлаждения резко возрастает;

3) период конвективного теплообмена, когда температура детали ниже температуры кипения жидкости, а скорость охлаждения резко падает.

Охлаждающая среда тем эффективней, чем шире интервал стадии пузырьчатого кипения. Для уменьшения периода пленочного кипения закалка проводится в растворах солей и щелочей, что позволяет заметно повысить скорость охлаждения в перлитном интервале.

## 7.5. Внутренние напряжения

Из-за разницы температур по сечению деталей при их охлаждении и неодинакового времени протекания фазовых превращений в разных участках детали в процессе закалки возникают внутренние напряжения.

Различают внутренние напряжения трех родов [5, с. 268].

*Внутренние напряжения первого рода* – это зональные внутренние напряжения, возникающие между отдельными зонами сечения и между различными частями детали. Чем больше градиент температур по сечению и между различными частями детали, возникающий при термической обработке, тем большего значения достигают напряжения первого рода. Внутренние напряжения первого рода зависят от скорости охлаждения, их иногда называют *зональными термическими напряжениями*.

*Внутренние напряжения второго рода* возникают внутри зерна или между соседними зернами. Данного вида напряжения возникают между отдельными фазами вследствие того, что у них разные коэффициенты линейного расширения, или из-за образования новых фаз, имеющих неодинаковые объемы. Так как внутренние напряжения второго рода возникают между отдельными элементами структур, их также могут называть *структурными* или *фазовыми напряжениями*.

*Внутренние напряжения третьего рода* возникают внутри объема порядка нескольких элементарных ячеек кристаллической решетки. Примером служит инородный атом в твердом растворе, который

создает вокруг себя упругие искажения кристаллической решетки.

Наиболее существенно влияние внутренних напряжений первого рода, так как только они способны вызывать коробление детали и трещины.

Напряжения, которые сохраняются в детали в результате охлаждения, называются остаточными. Любая закаленная сталь находится в структурно напряженном состоянии, поэтому последующий отпуск является необходимым средством для снятия остаточных напряжений.

Нагрев при отпуске увеличивает пластичность стали, что позволяет в отдельных объемах упругим деформациям превратиться в пластические, что уменьшает напряжения. Чем выше температура отпуска и чем больше его продолжительность, тем в большей степени снимаются напряжения. Отпуск при 550 °С практически полностью устраняет закалочные напряжения (исходные напряжения с 600 МПа уменьшаются до 50 – 100 МПа) [5, с. 270].

### **7.6. Закаливаемость и прокаливаемость стали**

Под *закаливаемостью* понимают способность стали повышать твердость в результате закалки. Закаливаемость определяется в первую очередь содержанием углерода в стали. Чем больше в мартенсите углерода, тем выше его твердость. Стали, содержащие менее 0,35 % углерода, мало упрочняются при закалке и считаются не обладающими закаливаемостью.

Под *прокаливаемостью* понимают способность стали закаливаться на большую глубину. В момент закалки массивная деталь не может быстро охладиться на всю толщину, критическая скорость охлаждения, необходимая при закалке, достигается лишь в поверхностном слое. Структура поверхностного слоя является мартенситной или троосто-мартенситной. Тогда как слои металла, лежащие в глубине детали, охлаждаются медленно, и аустенит в них успеваает распадаться в троостит, сорбит и даже в перлит.

Чем медленнее происходит превращение аустенита в перлит, чем правее расположены линии на диаграмме изотермического распада аустенита, тем глубже прокаливаемость. На скорость распада аустенита влияют следующие факторы:

– *состав аустенита*. Все элементы, растворимые в аустените (за исключением кобальта), замедляют превращение;

- *нерастворенные частицы* (карбиды, оксиды, интерметаллические соединения). Эти частицы ускоряют превращение, так как являются дополнительными центрами кристаллизации;
- *неоднородный аустенит*. Он быстрее превращается в перлит;
- *размер зерна аустенита*. Увеличение зерна замедляет превращение.

Для практической оценки прокаливаемости используют величину, которая называется *критическим диаметром*, т.е. максимальным диаметром образца, способным прокалиться насквозь. Прокаливаемость зависит не от содержания углерода, а от наличия легирующих элементов. Именно прокаливаемостью и оправдывается в основном необходимость использования более дорогостоящих легированных сталей. Однако легирующие элементы повышают прокаливаемость, только если они растворены в аустените. Если же они находятся в виде химических соединений, например карбидов, то могут облегчить распад аустенита.

## 7.7. Способы закалки стали

Выбор оптимального способа закалки определяется составом стали, формой и размерами детали. Чем сложнее форма термически обрабатываемой детали, тем тщательнее следует выбирать условия охлаждения, потому что чем сложнее деталь и чем больше различие в сечениях детали, тем большие внутренние напряжения возникают в ней при охлаждении.

В зависимости от технологии выполнения закалку можно проводить следующими способами:

**1. Закалка в одном охладителе** – самый простой способ закалки, который применяется для несложных деталей из углеродистых и легированных сталей. При этом деталь погружают в закалочную среду (вода, масло и т.п.), где она остывает до полного охлаждения. Иногда крупные детали охлаждают струей воды (*струйчатая закалка*). При этом способе не образуется паровая рубашка, что обеспечивает более глубокую прокаливаемость, чем простая закалка в воде.

**2. Закалка с подстуживанием** позволяет уменьшить внутренние напряжения, возникающие в детали при проведении закалки. При данном способе деталь не сразу погружают в закалочную среду, а некоторое время охлаждают на воздухе, «подстуживают», поэтому проведе-



ние такого способа закалки требует большого искусства термиста.

**3. Закалка в двух охладителях** (например, сначала в воде, потом в масле) позволяет быстро проходить интервал малой устойчивости аустенита, но при охлаждении его в зоне повышенной устойчивости, т.е. в мартенситном интервале температур, охлаждают медленно. Такой способ закалки позволяет снизить внутренние напряжения, но при этом трудно установить и определить время пребывания детали в первой охлаждающей среде, тем более что это время мало и исчисляется секундами. В двух охладителях охлаждают инструмент, изготовленный из высокоуглеродистых сталей. Этот способ также требует хорошей отладки процесса и высокой квалификации термиста.

**4. Ступенчатая закалка** проводится путем быстрого охлаждения в горячей среде (например в расплавленном металле). При данном способе деталь выдерживают в закалочной среде, имеющей температуру выше мартенситной точки для данной стали. При охлаждении и выдержке в этой среде закаливаемая деталь во всех точках сечения должна приобрести температуру закалочной среды. Затем следует окончательное, как правило, медленное охлаждение, во время которого и происходит закалка, т.е. превращение аустенита в мартенсит. При этом способе закалки снижаются внутренние напряжения первого рода, поэтому уменьшается и закалочная деформация.

**5. Изотермическая закалка** также производится в горячей закалочной среде, но в отличие от ступенчатой закалки выдержка продолжается до полного распада аустенита. При этом способе закалки образуется структура не мартенсита, а бейнита, отличающегося высокой твердостью при несколько меньшей хрупкости, чем у мартенсита. Изотермической закалке (как и ступенчатой) подвергают детали малых сечений.

Закалочная среда определяет скорость охлаждения при закалке. Сильнее всего охлаждают водные растворы солей и щелочей, затем холодная вода, еще медленнее – минеральные масла, горячая вода и эмульсии. Замедление охлаждения вызывает образование паровой рубашки и ее удержание в вязкой среде. Подбирая и комбинируя охлаждающие среды, можно добиваться различных скоростей охлаждения.

## 7.8. Дефекты, возникающие при закалке

Неправильно проведенная закалка может вызвать различные дефекты.

*Деформация, коробления и трещины* являются следствием напряжений. Медленное охлаждение при закалке в области мартенситного превращения – самый эффективный способ уменьшения напряжений и устранения дефектов этого вида. Мелкие детали, так же как и простые по форме, без острых углов и резких переходов, менее склонны к короблению. Поэтому при конструировании детали необходимо придать наиболее технологическую форму. Более сложные по форме детали целесообразно изготавливать из легированных сталей, закаливаемых в масле.

*Недостаточная твердость* закаленной детали объясняется недогревом (низкая температура в печи, недостаточная выдержка при правильной температуре в печи) или недостаточно интенсивным охлаждением. Повышение температуры в печи или увеличение времени выдержки в первом случае устраняет пониженную твердость закаленных деталей. Во втором случае следует применить более интенсивное охлаждение, т.е. во время закалки энергично перемещать деталь в закалочной жидкости или применять вместо простой воды соленую или подкисленную.

*Образование мягких пятен* может объясняться также следствием недостаточного прогрева или недостаточно интенсивного охлаждения. Но иногда мягкие пятна появляются из-за неправильно проведенной закалки, например, образование феррита в доэвтектоидных сталях при полной закалке показывает, что произошло подстуживание стали. Кроме того, образование мягких пятен может быть вызвано неоднородностью исходной структуры. В таких случаях рекомендуется проведение предварительной термической обработки (нормализации), создающей более однородную структуру.

*Повышенная хрупкость* – дефект, обычно появляющийся в результате закалки от слишком высоких температур (более высоких, чем это требуется), при которых произошел значительный рост зерен аустенита. Дефект обнаруживается механическими испытаниями по излому или по микроструктуре. Устраняют дефект повторной закалкой от нормальных температур для данной стали.

*Окисление и обезуглероживание* поверхности часто происходит

при нагреве в плазменных или электрических печах без контролируемой атмосферы. Поэтому дают припуск на шлифование, что влечет удорожание и усложнение технологии изготовления термически обрабатываемых деталей. Контролируемая искусственная атмосфера в термических печах является способом устранения или уменьшения этого дефекта. Нагрев в солях также способствует уменьшению окисления и обезуглероживания.

### **7.9. Отпуск стали**

Закалка стали сопровождается увеличением объема, что вызывает появление значительных внутренних напряжений, которые могут вызывать коробление изделий и появление трещин. Поэтому закаленные изделия всегда подвергают отпуску. При отпуске сталь нагревают ниже линии  $A_1$ , выдерживают при этой температуре и охлаждают (обычно на воздухе или в масле). В зависимости от температуры различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск (120 – 250 °С) применяют для инструментов, цементованных, цианированных изделий, которым необходима высокая твердость (60 – 65 HRC) и износостойкость.

Средний отпуск (350 – 500 °С) на отпущенный троостит применяют для стальных пружин, рессор и упругих элементов приборов, которые в работе должны сочетать свойства высокой упругости, прочности и достаточной вязкости. Твердость троостита отпуска составляет 40 – 45 HRC.

Высокий отпуск (500 – 650 °С) на сорбит отпуска широко применяется к изделиям из машиностроительных сталей, содержащих от 0,35 до 0,5 % углерода. Твердость данной структуры – 30 – 40 HRC.

Двойная операция (закалка с высоким отпуском) называется улучшением, так как после такой термической обработки сталь приобретает наиболее благоприятное сочетание механических свойств: высокую вязкость и пластичность.

### **7.10. Обработка холодом**

В закаленной стали, особенно в стали, содержащей более 0,5 % углерода, всегда присутствует некоторое количество аустенита, который понижает твердость и износостойкость. По мере увеличения в ста-

ли содержания углерода и легирующих элементов содержание остаточного аустенита увеличивается. Кроме того, наличие аустенита нередко приводит к изменению размеров деталей, работающих при низких температурах, в результате самопроизвольного превращения его в мартенсит.

Для уменьшения в структуре остаточного аустенита в закаленной стали применяют обработку холодом, которая заключается в охлаждении стали до температур ниже нуля.

Понижение температуры до точки  $M_K$  ( $-30...-70$  °С) для большинства сталей вызывает превращение остаточного аустенита в мартенсит, что повышает твердость HRC сталей с 0,8 – 1,1 % С на 1–3 единицы [14, с. 215]. Увеличение мартенсита повышает магнитные характеристики, увеличивает объем, стабилизирует размеры деталей, работающих при низких температурах, повышает твердость и износостойкость.

Специфическими при обработке стали холодом являются [5, с. 273]:

1. Температурный режим обработки холодом определяется положением нижней мартенситной точки  $M_K$ . Более глубокое охлаждение не вызовет дополнительного превращения. Для облегчения обработки холодом часто погружают изделие в жидкий азот (температура кипения  $-196$  °С). Из-за низкой теплоты испарения азота металл охлаждается медленно.

2. При назначении режима термической обработки, включающей обработку холодом, необходимо учитывать явление стабилизации остаточного аустенита при выдержке при комнатной температуре после закалки. Поэтому обработку холодом рекомендуется проводить немедленно после закалки.

### **7.11. Химико-термическая обработка**

Химико-термическая обработка (ХТО) – это обработка, заключающаяся в сочетании термического и химического воздействий на металлы и сплавы для изменения в поверхностном слое химического состава, структуры и свойств. ХТО сводится к диффузионному насыщению поверхностного слоя стали неметаллами (углеродом, азотом, бором, кремнием и др.) или металлами (алюминием, хромом и др.) в

процессе выдержки в активной жидкой или газовой среде при определенной температуре.

При химико-термической обработке одновременно протекают несколько процессов:

– диссоциация исходных веществ с образованием диффундирующего элемента в атомарном состоянии; насыщающая среда должна обеспечивать высокую концентрацию данного элемента на поверхности обрабатываемого металла;

– адсорбция атомов на поверхность металла с образованием химических связей между ионами насыщающего элемента и основного металла;

– диффузия адсорбированных атомов от поверхности вглубь обрабатываемого металла.

В результате такой обработки образуется *диффузионный слой*, отличающийся от исходного слоя по химическому составу, структуре и свойствам. Концентрация диффундирующего элемента уменьшается от поверхности вглубь металла.

Толщину диффузионного слоя до пограничной диффузионной линии, характеризующую предельно допустимые значения свойств (например определенной твердости), называют эффективной толщиной. Продолжительность ХТО определяется требуемой глубиной диффузионного слоя.

Процесс диффузии определяется коэффициентом диффузии

$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}},$$

где  $D_0$  – коэффициент, зависящий от вида кристаллической решетки;  $Q$  – энергия активации;  $R$  – газовая постоянная,  $R = 8,3$  Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура.

Химико-термическую обработку широко применяют для упрочнения деталей машин. ХТО повышает твердость, износостойкость, коррозионную стойкость и создает на поверхности благоприятные остаточные напряжения сжатия, увеличивает надежность и долговечность деталей машин.

### 7.11.1. Цементация

*Цементация* – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали уг-

леродом при нагреве в соответствующей среде – карбюризаторе. Как правило, цементацию проводят при температурах выше точки  $A_{с3}$  (930 – 950 °С). Окончательные свойства цементованные изделия приобретают в результате последующей термической обработки.

Назначение цементации и последующей ТО – придать поверхностному слою изделия высокую твердость и износостойкость, повысить предел контактной выносливости.

Для цементации в основном используют низкоуглеродистые (0,1 – 0,18 % С), чаще легированные стали. При цементации крупногабаритных изделий применяют стали с более высоким содержанием углерода (0,2 – 0,3 % С). Выбор стали определяется тем, что при цементации сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом, должна сохранять высокую вязкость после закалки.

Концентрация углерода в поверхностном слое должна составлять 0,8 – 1,0 %. Для повышения сопротивления высокой контактной усталости содержание углерода может быть повышено до 1,1 – 1,2 %. В случае цементации сталей, легированных карбидообразующими элементами, при температуре диффузии возможно образование двухфазного слоя из аустенита и карбидов глобулярной формы.

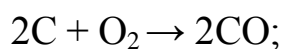
Цементованный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, убывающую от поверхности к сердцевине детали.

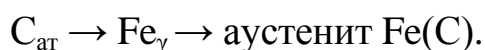
Наибольшее распространение на производстве имеют цементация в твердом карбюризаторе и газовая цементация.

**Цементация в твердом карбюризаторе.** Основная составляющая всех твердых карбюризаторов – уголь различного происхождения: древесный, каменный, костный. Древесный уголь менее активный, но содержит минимальное количество вредных примесей. Каменные угли (кокс) менее пригодны для цементации, так как содержат серу и при нагреве выделяют большое количество летучих продуктов. Поэтому их практически не используют.

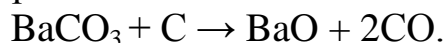
Детали, подлежащие цементации, упаковывают в цементационные ящики. В производстве применяют смесь из свежего и отработанного карбюризатора.

Цементация стали осуществляется атомарным углеродом. При этом протекают следующие реакции:

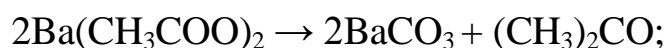




Помимо угля в состав карбюризатора входят углекислый барий ( $BaCO_3$ ) и углекислый натрий ( $Na_2CO_3$ ) в количестве 10 – 40 % массы угля. Это ускорители процесса:

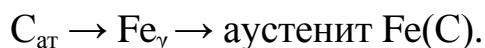


В качестве активизатора еще применяются ацетат натрия ( $CH_3COONa$ ) или ацетат бария ( $Ba(CH_3COO)_2$ ):



**Газовая цементация** осуществляется при нагреве изделия в среде газов в печах с герметичной камерой. Наиболее качественный цементованный слой получается при использовании в качестве карбюризатора природного газа, состоящего почти полностью из метана ( $CH_4$ ) и пропанбутановых смесей, подвергнутых специальной обработке.

Основной реакцией, обеспечивающей науглероживание при газовой цементации, является



При высоком содержании в атмосфере метана возможна реакция



По сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе газовая цементация имеет следующие преимущества:

- сокращение процесса нагрева до температуры цементации и времени самой цементации (отсутствие малотеплопроводного твердого карбюризатора);
- возможность регулирования количества и состава подаваемого в печь карбюризатора;
- высвобождение производственных площадей (отсутствие смесеприготовительного оборудования);
- возможность автоматизации процесса цементации;
- значительно упрощается последующая термическая обработка деталей (закалку можно проводить непосредственно из цементационной печи);
- чистота процесса и улучшение условий труда из-за отсутствия

угольной пыли.

**Термическая обработка цементованных стальных деталей.** Задача цементации – получить высокую поверхностную твердость и износостойкость при вязкой сердцевине – не решается одной цементацией. Цементацией достигается лишь выгодное распределение углерода по сечению. Окончательно формирует свойства цементованной детали последующая закалка, при которой на поверхности получается высокоуглеродистый мартенсит, а в сердцевине сохраняются низкая твердость и высокая вязкость.

*Для деталей, от которых требуется только поверхностная твердость, применяют закалку с цементационного нагрева, т.е. с 900 – 950 °С. Недостатком такой обработки является получение крупноигольчатого мартенсита на поверхности и крупнозернистой структуры сердцевины. Это связано с тем, что за время проведения цементации вырастает зерно аустенита. Также вследствие закалки с высокой температуры в цементационном слое наблюдается повышенное содержание остаточного аустенита.*

Недостатки эти в значительной степени можно устранить, если использовать:

- наследственно мелкозернистую сталь;
- газовую цементацию (благодаря меньшей продолжительности процесса, наблюдается меньший рост зерна);
- подстуживание при закалке до 750 – 800 °С; хотя это не ведет к измельчению зерна, но снижает внутренние напряжения;
- обработку холодом, что приводит к превращению остаточного аустенита и повышению поверхностной твердости.

*При повышенных требованиях к структуре и свойствам детали после цементации охлаждают на воздухе, затем их закалывают с температуры 850 – 900 °С в зависимости от марки стали. При этом в сердцевине произойдут полная перекристаллизация и измельчение зерна, на поверхности – перекристаллизация. Вследствие нагрева выше линии  $A_{c3}$  цементитная сетка растворится, хотя для высокоуглеродистой поверхности такой нагрев сопровождается некоторым перегревом.*

*При особо высоких требованиях к механическим свойствам применяют двойную закалку с последующим низким отпуском. Первая закалка (850 – 900 °С) измельчит структуру сердцевины и устраним це-*



ментитную сетку на поверхности. Для формирования окончательной твердости проводят вторую закалку (750 – 800 °С). Мелкоигольчатый мартенсит с вкрапленным избыточным цементитом обеспечивает высокую износоустойчивость.

Цементованные детали обязательно после закалки для снятия внутренних напряжений подвергают отпуску при низкой температуре (150 – 200 °С). В результате такой обработки (закалка с последующим низким отпуском) поверхность должна иметь твердость 58 – 62 HRC, сердцевина для легированных сталей – 25 – 35 HRC.

### 7.11.2. Азотирование

*Азотирование* – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали азотом.

Азотирование сильно повышает твердость поверхностного слоя и его износостойкость, предел выносливости и сопротивление коррозии в таких средах, как атмосфера, вода, пар и др. В сравнении с цементованным слоем твердость азотированного слоя значительно выше, его теплостойкость (сохранение твердости при высоких температурах) составляет 450 – 500 °С (цементованного – 200 – 225 °С).

Для получения стальных изделий с высокими твердостью и износостойкостью поверхности широко применяют сталь 38Х2МЮА. Одновременное присутствие хрома, молибдена и алюминия позволяет получить твердость азотированного слоя на поверхности 1200 HV. Молибден устраняет отпускную хрупкость, которая может возникнуть при медленном охлаждении от температуры азотирования.

Азотирование ведут в диссоциированном аммиаке NH<sub>3</sub>. На обрабатываемой поверхности происходит диссоциация аммиака с образованием ионов азота, которые адсорбируются поверхностью и диффундируют в глубь металла:



Микроструктура азотированного слоя различна при насыщении азотом железа и азотировании 38Х2МЮА. Так как в структуре слоя присутствует большое количество высокотвердых дисперсных нитридов, после насыщения упрочняющая термическая обработка не требуется.

**Технология процесса азотирования.** Технологический процесс предусматривает проведение следующих операций:

1. Предварительная термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска (600 – 675 °С) стали, для получения повышенной прочности и вязкости в сердцевине изделия. Структура стали после этого – сорбит.

2. Механическая обработка деталей, включая шлифование, которое придает окончательные размеры детали.

3. Защита участков, не подлежащих азотированию, нанесением тонкого слоя (0,01 – 0,015 мм) олова электролитическим методом или жидкого стекла.

4. Азотирование (500 – 520 °С). Для ускорения процесса азотирования применяют двухступенчатый процесс: сначала при температуре 500 – 520 °С, затем при 540 – 560 °С. Рекомендованный слой 0,3 – 0,6 мм.

5. Окончательное шлифование (доводка) изделия.

**Ионное азотирование** широко применяется в тлеющем разряде, которое проводят в разреженной азотсодержащей атмосфере ( $\text{NH}_3$  или  $\text{N}_2$ ) при подключении обрабатываемых деталей к катоду. Анодом является контейнер установки. Между катодом (деталью) и анодом возбуждается тлеющий разряд. Ионы газа, бомбардируя поверхность катода, нагревают деталь до температуры насыщения. Азотирование ведут при температуре 470 – 580 °С в течение 1 – 24 ч.

**Азотирование в жидких средах (тенифер-процесс)** проводят при температуре 570 °С в течение 0,5 – 3,0 ч в расплавленных цианистых солях (85 % соли, содержащие 40 %  $\text{KCNO}$ , 60 %  $\text{NaCN}$  и 15 %  $\text{NO}_2\text{CO}_3$  или 55 % карбамида  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  и 45 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), через которые пропускают сухой воздух. Вследствие низкой температуры в сталь диффундирует в основном азот, образующийся при разложении солей.

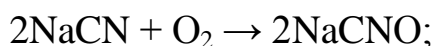
### 7.11.3. Цианирование

*Цианирование* – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температурах 820 – 950 °С в расплавленных солях, содержащих группу  $\text{NaCN}$ .

Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода.

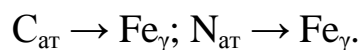
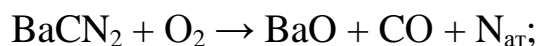
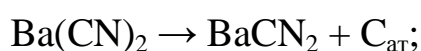
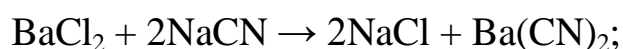
**Среднетемпературное цианирование** проводят для получения слоя небольшой толщины (0,15 – 0,35 мм). В этом процессе изделие нагревают до 820 – 860 °С в расплавленных солях, содержащих группу NaCN.

Процесс ведут в ваннах, содержащих 20 – 25 % NaCN, 25 – 50 % NaCl и 25 – 50 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, с продувкой кислородом воздуха в течение 30 – 90 мин. При этом протекают следующие реакции:



Выделяющийся атомарный азот и углерод диффундируют в сталь. Цианированный слой содержит 0,8 – 1,2 % N и 0,7 % C. Твердость после термической обработки (заковки с последующим низким отпуском 180 – 200 °С) составляет 58...62 HRC. Цианированный слой по сравнению с цементованным обладает более высокой износостойкостью и эффективно повышает предел выносливости.

**Высокотемпературное цианирование** проводят для получения слоя большой толщины (0,5 – 2,0 мм). В этом процессе изделие нагревают до 930 – 950 °С в ванне, содержащей 8 % NaCN, 82 % BaCl<sub>2</sub> и 10 % NaCl в течение 1,5 – 6 ч. При этом протекают следующие реакции:



Выделяющийся атомарный углерод и азот диффундируют в сталь. Цианированный слой содержит 0,8 – 1,2 % C и 0,2 – 0,3 % N. После высокотемпературного цианирования стальные изделия охлаждают на воздухе, а затем для измельчения зерна их закаливают на воздухе с нагревом в соляной ванне или печи и подвергают низкому отпуску. Твердость после термообработки составляет 58...60 HRC.

Цианирование по сравнению с цементацией требует меньшего

времени для получения слоя заданной толщины, характеризуется значительно меньшими деформациями и короблением деталей сложной формы и более высоким сопротивлением износу и коррозии.

#### **7.11.4. Нитроцементация**

*Нитроцементация* – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температурах 840 – 860 °С в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака, в течение 4 – 10 ч.

Скорость роста нитроцементованного и цементованного слоев на глубину 0,5 мм практически одинакова, но температура нитроцементации ниже температуры цементации почти на 100 °С. Для устранения вредных последствий внутреннего окисления азота в слое должно быть около 0,1 – 0,15 %. Рекомендуемая толщина нитроцементованного слоя составляет 0,2 – 0,8 мм, но она не должна превышать 1,0 мм. При большей толщине в нем образуется темная составляющая, которая обнаруживается на поверхности в виде темной точечной сетки, и другие дефекты, снижающие механические свойства стали (особенно предел выносливости). Темная составляющая, вероятно, представляет собой поры, образующиеся в результате выделения из твердого раствора молекулярного азота под давлением.

Оптимальное содержание углерода в нитроцементованном слое в сумме С + N зависит от марки стали и колеблется в широких пределах (1,0 – 1,65 %). При низкой концентрации углерода в структуре нитроцементованного слоя по границам зерен мартенсита появляется троостит. При высоком содержании в стали, содержащей Cr, Mn, Ti, V, образуются карбонитриды, располагающиеся преимущественно по границам зерен в виде сплошной или разорванной сетки. Переход углерода и легирующих элементов в карбонитриды понижает устойчивость аустенита, что ведет к образованию в слое троостита. Образование сетки карбонитридов и троостита снижает предел выносливости, пластичность и вязкость стали.

Рекомендуется использовать контролируемую эндотермическую атмосферу, к которой добавляют 1,5 – 5,5 % необработанного природного газа и 1 – 3,5 % NH<sub>3</sub>.

После нитроцементации проводят закалку непосредственно из печи, реже после повторного нагрева применяют ступенчатую закалку, затем следует провести низкий отпуск (160 – 180 °С). Твердость слоя после термообработки 58...60 HRC.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя должна состоять из мелкокристаллического мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 30 – 50 % остаточного аустенита. Высокое содержание остаточного аустенита дает хорошую прирабатываемость, что обеспечит бесшумную работу зубчатых передач.

Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению. Данный вид ХТО имеет следующие преимущества по сравнению с газовой цементацией: процесс происходит при более низкой температуре, меньше толщина слоя, меньшие деформации и коробления, повышается сопротивление износу и коррозии.

#### **7.11.5. Борирование**

*Борирование* – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагреве в соответствующей среде.

Борирование чаще выполняют при электролизе буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) при температуре 930 – 950 °С в течение 2 – 6 ч. Изделие является катодом.

Процесс можно вести и без электролиза в ваннах с расплавленными хлористыми солями ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{BaCl}_2$ ), в которые добавляют 20 % ферробора и 10 % карбида бора ( $\text{B}_4\text{C}$ ).

Хорошие результаты получаются при газовом борировании при температуре 850 – 900 °С в среде диборана ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) или треххлористом боре ( $\text{BCl}_3$ ) в смеси с водородом.

Диффузионный слой состоит из боридов FeB (на поверхности) и  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Рекомендуемая толщина слоя 0,1 – 0,2 мм. Борированный слой обладает высокой твердостью (1800 – 2000 HV), износостойкостью (главным образом, абразивной), коррозионной стойкостью, окислостойкостью (до 800 °С) и теплостойкостью.

Средне- и тяжело нагруженные детали после борирования подвергают термической обработке: закалке и отпуску. Закалку желательно проводить с температуры борирования или с более низких температур с предварительным подстуживанием. При выполнении закалки, как самостоятельной операции, борированные детали нагревают под закалку в хорошо раскисленных соляных ваннах, так как нагрев под закалку в печах с воздушной средой недопустим.

#### **7.11.6. Силицирование**

*Силицирование* – это вид химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали кремнием.

Силицированный слой является твердым раствором кремния в  $\alpha$ -железе. Под диффузионным слоем часто наблюдается слой перлита, так как происходит отеснение углерода из диффузионного слоя вследствие пониженной растворимости его в кремнистом феррите.

Силицированный слой отличается повышенной пористостью. Рекомендуемая толщина слоя 0,3 – 1,0 мм. Силицированный слой имеет низкую твердость (200 – 300 HV), но после предварительной его пропитки маслом при температуре 170 – 200 °С износостойкость слоя становится высокой.

#### **7.11.7. Диффузионное насыщение металлами**

*Диффузионное насыщение металлами* – это процесс поверхностного насыщения стали алюминием, хромом, цинком и другими элементами.

Наиболее детально изучены процессы диффузионного насыщения хромом и алюминием. Процессы насыщения молибденом, бериллием и другими элементами менее исследованы.

Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газообразных средах.

*При диффузионной металлизации в твердой среде* металлизатором является ферросплав (ферроалюминий, феррохром) с добавлением хлористого аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). В результате реакции металлизатора с

$\text{HCl}$  или  $\text{Cl}_2$  образуется летучее соединение хлора с металлом ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CrCl}_2$  и т.п.), которое в результате контакта с металлической поверхностью диссоциирует с образованием свободных атомов.

*Газовую диффузионную металлизацию* проводят в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов, *жидкую металлизацию* – погружением в расплавленный металл, если диффундирующий элемент имеет низкую температуру плавления (например, алюминий, цинк).

Диффузия алюминия, хрома и других металлов протекает значительно медленнее, чем углерода и азота, потому что углерод и азот образуют с железом растворы внедрения, а металлы – раствор замещения. Именно малая скорость диффузии препятствует широкому распространению диффузионной металлизации в промышленности. Процесс приходится проводить при высоких температурах ( $1000 - 1200^\circ\text{C}$ ) длительное время, а это существенно увеличивает себестоимость изделия.

**Алитирование** – насыщение поверхностного слоя стального изделия алюминием, обеспечивающее высокую окислительную стойкость ( $850 - 900^\circ\text{C}$ ), хорошее сопротивление коррозии в атмосфере и морской воде.

Алитированный слой является твердым раствором алюминия в  $\alpha$ -железе, концентрация алюминия в поверхностном слое около 30 %. Толщина слоя 0,2 – 1,0 мм, твердость (на поверхности) до 500 HV, износостойкость низкая.

**Хромирование** – насыщение поверхностного слоя стального изделия хромом, обеспечивающее высокую коррозионную стойкость в морской воде и азотной кислоте и окислительную стойкость до  $800^\circ\text{C}$ .

Диффузионный слой, получаемый при хромировании стали с содержанием 0,3 % C, приобретает высокую твердость (1200 – 1300 HV) и износостойкость. Он состоит из твердого раствора хрома в  $\alpha$ -железе и карбидов хрома.

Диффузионный слой, получаемый при хромировании технического железа, состоит из твердого раствора хрома в  $\alpha$ -железе, его твердость составляет 250 – 300 HV.

### Контрольные вопросы

1. Какие основные виды термической обработки вы знаете?
2. Каковы фазовые превращения в сплавах железа?

3. Каковы механизмы и температурные области образования структур перлитного типа (перлита, сорбита, троостита)?
4. Чем отличаются перлит, сорбит, троостит?
5. Какое превращение называют промежуточным?
6. Поясните механизм промежуточного (бейнитного) превращения. Сравните верхний и нижний бейнит.
7. Какие виды отжига вы знаете?
8. Как выбрать температуру для полного отжига? С какой целью его применяют?
9. Что такое нормализация? В чем заключается отличие нормализации от полного отжига?
10. Какие стали подвергаются неполной закалке, а какие – полной?
11. Какое химическое действие при высокой температуре оказывает окружающая среда на металл?
12. Какие охлаждающие среды вы знаете?
13. Что такое закаливаемость?
14. Что такое прокаливаемость? Как можно увеличить прокаливаемость?
15. Какими способами можно проводить закалку? Чем отличается изотермическая закалка от ступенчатой?
16. Какие дефекты возникают при закалке? Что вызывает недостаточную твердость стали?
17. Как предотвратить окисление и обезуглероживание поверхности стали?
18. Приведите примеры технологических приемов уменьшения деформации при термической обработке.
19. Сущность превращений при отпуске. Как изменяются структура и свойства стали в связи с коагуляцией карбидной фазы при отпуске?
20. Чем отличаются отпускные структуры от одноименных структур, образующихся при распаде переохлажденного аустенита?
21. Что такое улучшение? Какие стали подвергаются улучшению?
22. Что такое обработка холодом? С какой целью ее проводят?
23. Что такое химико-термическая обработка? Какие процессы при этом протекают?
24. Что такое цементация? Какие виды цементации вы знаете?
25. Что такое азотирование?



26. Что общего и чем отличаются между собой нитроцементация и цианирование?
27. Что такое борирование, силицирование? Назовите их назначение и недостатки.
28. Для каких целей проводят диффузионное насыщение металлами?
29. Сущность и назначение процесса алитирования.
30. Сущность и назначение процесса хромирования.

## Глава 8. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Углеродистые стали в ряде случаев не отвечают требованиям, предъявляемым к металлам и сплавам в современном производстве, так как не обладают достаточно высокими физико-химическими и механическими свойствами. Легирование значительно повышает твердость и прочность стали при сохранении достаточной вязкости, также придает сталям ряд особых свойств: жаропрочность, окалиностойкость, коррозионную стойкость и др. Для получения необходимых свойств в сталь вводят такие элементы, как Cr, Ni, Mo, Ti, W, V, Si, Mn, Al, Co, B и другие, которые называют *легирующими* элементами. Данный процесс называется легированием, а получаемые стали – *легированными сталями*.

Легирующие элементы вводятся в сталь в определенных концентрациях с целью изменения её строения и свойств:

- Легирующие элементы, растворяясь в феррите, изменяют параметры решетки и повышают твердость, снижая пластичность. Однако никель, интенсивно упрочняя феррит, не снижает его вязкость и понижает порог хладноломкости.
- Все легирующие элементы при нагреве сдерживают рост зерна аустенита, т.е. способствуют образованию мелкозернистой структуры; кроме марганца и бора.
- Все легирующие элементы расширяют область существования  $\alpha$ -железа, т.е. являются  $\alpha$ -стабилизаторами. Исключение: марганец и никель –  $\gamma$ -стабилизаторы.
- Все легирующие элементы, растворяясь в аустените, замедля-

ют диффузию углерода, что в свою очередь замедлит распад аустенита и повысит прокаливаемость стали. Исключение – кобальт.

- Легирующие элементы не влияют на кинематику мартенситного превращения, их влияние сказывается на температурном интервале мартенситного превращения. Некоторые элементы повышают мартенситную точку и уменьшают количество остаточного аустенита (алюминий, кобальт), другие не влияют на нее (кремний), но большинство снижает мартенситную точку и увеличивает количество остаточного аустенита.

- Легирующие элементы замедляют процесс распада мартенсита. Никель и марганец влияют незначительно, тогда как большинство (хром, молибден, кремний и др.) – весьма заметно, что позволит поднять температуру отпуска и увеличит его продолжительность.

В зависимости от суммарного содержания легирующих элементов различают *низколегированные*, содержащие не более 2,5 % легирующих элементов, *среднелегированные* – 2,5 – 10 % и *высоколегированные* стали – более 10 %.

Необходимый комплекс свойств в легированных сталях выявляется только после термической обработки, в результате которой можно получить наиболее оптимальную структуру, а следовательно, и изменение свойств.

Применение легирующих элементов существенно влияет на стоимость стали. Чем выше степень легирования стали, тем больше её стоимость. Высокой стоимостью отличаются стали, содержащие большое количество Ni, Mo, W, Co.

## 8.1. Классификация легированных сталей

Легированные стали, как правило, классифицируют по структуре в равновесном состоянии, по структуре после охлаждения на воздухе, по количеству легирующих элементов и назначению.

Приведенная ниже классификация отражает назначение сталей.

1. Строительные стали – 15ХСНД, 17ГС, 18Г2АФ.

2. Конструкционные стали:

2.1. Стали общего назначения:

- *цементуемые* – 15ХН, 12Х2Н4А, 18ХГТ;
- *улучшаемые* – 35ХГСА, 38ХМЮА, 40ХН, 45Х;

- *высокопрочные* – Н18К9М5Т, Н9Х12Д2ТБ, 30Х9Н8М4Г2С2.

## 2.2. Специализированного назначения:

- *шарикоподшипниковые* – ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ;
- *рессорно-пружинные* – 50С2, 50ХГСФА, 60С2Н2А;
- *износостойкие* – 110Г13, Х12Ф1.

## 3. Инструментальные стали:

- режущие – Х, ХВГ;
- быстрорежущие – Р18, Р6М5;
- штамповые:
  - для штампов холодного деформирования – Х12Ф1, Х6ВФ;
  - штампов горячего деформирования – 5ХНМ, 3Х2В8Ф.

## 4. Стали и сплавы с особыми свойствами:

- нержавеющие – 12Х13, 12Х18Н10Т, 15Х25Т;
- жаропрочные – 12Х2МФБ, Х10С2М, Х25Н20С2;
- с особыми магнитными свойствами:
  - ферромагнитные – ЮНДК15, 80ХНС;
  - парамагнитные – 110Г13, 55Г9Н9;
- с особыми электротехническими свойствами – 79ХН, 1211, 3411;
- особыми тепловыми и упругими свойствами – Н36, Н48, Н35ХМВ.

## 8.2. Быстрорежущие стали

Под быстрорежущими понимаются стали, предназначенные для изготовления режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания. В отличие от других сталей быстрорежущие обладают высокой теплостойкостью (красностойкостью), т.е. способностью сохранять мартенситную структуру и соответствующую высокую твердость, прочность и износостойкость при повышенных температурах, возникающих в режущей кромке при резании с большой скоростью. Эти стали сохраняют мартенситную структуру при нагреве 600 – 650 °С, поэтому их применение позволяет значительно повысить скорость резания (в 2 – 4 раза) и стойкость инструментов (в 10 – 30 раз) по сравнению со сталями, не обладающими теплостойкостью.

Красностойкость создается легированием стали карбидообразующими элементами (например, вольфрамом, молибденом, хромом, ванадием) в таком количестве, при котором они связывают почти весь

углерод в специальные карбиды. Сталь P18 (P – условное обозначение быстрорежущей стали (рапид – скорость), – содержание вольфрама 18 %) – наиболее распространенная, универсальная марка быстрорежущей стали. В связи с высокой стоимостью вольфрама широкое распространение получили вольфрамомолибденовые стали. Из них преимущественно применяют сталь P6M5 (6 % вольфрама, 5 % молибдена).

Термическая обработка быстрорежущих сталей имеет свои особенности.

Для предотвращения вероятности возникновения нафталинистого излома необходимо перед закалкой провести изотермический отжиг (нагрев до 860 – 900 °С и после выдержки охлаждение до 700 – 750 °С, в этом интервале температур сталь выдерживают до окончательного превращения аустенита, которое заканчивается за 1,5 – 2 ч).

Необходим медленный нагрев под закалку до 800 °С, чтобы сталь не растрескалась из-за малой теплопроводности и пластичности. Температуру закалки стали P18 принимают равной 1270 °С и стали P6M5 – 1220 °С. Высоколегированный аустенит, полученный при нагреве под закалку, обладает большой устойчивостью, поэтому охлаждающей средой при закалке чаще всего является масло. Структура быстрорежущей стали после закалки представляет собой высоколегированный мартенсит, нерастворенные избыточные карбиды и остаточный аустенит. Обычно содержание остаточного аустенита в стали P18 составляет 25 – 30 % и в стали P6M5 – 28 – 34 %.

После закалки следует отпуск при 550 – 570 °С, вызывающий превращение остаточного аустенита в мартенсит и дисперсионное твердение в результате частичного распада мартенсита и выделения дисперсных карбидов. Это сопровождается увеличением твердости. При однократном отпуске только часть остаточного аустенита превращается в мартенсит. Поэтому применяют многократный (чаще трехкратный) отпуск. Продолжительность каждого отпуска 45 – 60 мин.

Инструмент простой формы из быстрорежущей стали иногда для уменьшения содержания остаточного аустенита непосредственно сразу после закалки (во избежание стабилизации аустенита) охлаждают до – 80 °С (обработка холодом). При охлаждении от комнатной температуры до – 80 °С образуется дополнительно около 15 – 20 % мартенсита (от общего объема стали) и после обработки холодом сохраняется

10 – 15 % остаточного аустенита. Этот аустенит превращается в мартенсит после однократного отпуска при 560 °С.

Твердость после закалки составляет 62 – 63 HRC, а после отпуска – 63 – 65 HRC.

Температурные режимы термической обработки инструментов из быстрорежущей стали приведены в табл. 8.1 [5, с. 368].

*Таблица 8.1*

Температурные режимы термической обработки инструментов из быстрорежущей стали

Марка стали	Закалка			Отпуск		
	Температура, °С	Твердость HRC	Количество аустенита, %	Температура, °С	Число отпусков	Твердость HRC
P18	1270 – 1290	62 – 64	25	560	3	63 – 65
P12	1240 – 1260	62 – 64	25	560	3	63 – 65
P9	1220 – 1240	62 – 64	30	560	3	63 – 65
P6M5	1210 – 1230	62 – 64	25	550	2 – 3	63 – 65

### 8.3. Твердые сплавы

Твердые сплавы получают методами порошковой металлургии. При изготовлении порошки карбидов вольфрама, карбидов титана смешиваются со связующим веществом – кобальтом, затем придают изделию соответствующую внешнюю форму (прессуют в формах) и спекают при температуре 1500 – 2000 °С. Твердые сплавы изготавливают в виде пластин, которые медным припоем припаивают к державке из обычной конструкционной или инструментальной углеродистой стали.

Характерными особенностями твердых сплавов являются их высокая твердость (87...92 HRC) и износостойкость в сочетании с высокой теплостойкостью (800 – 1000 °С). При этом твердые сплавы имеют достаточно высокую прочность, близкую к прочности инструментальных сталей. Твердость и прочность зависят от состава твердых сплавов и в первую очередь от количества связующего, т.е. кобальта, и величины зерна карбидов.

В зависимости от состава карбидной основы изготавливают твердые сплавы трех групп:

- вольфрамовые (ВК2, ВК3, ВК6, ВК8, ВК10);
- титановольфрамовые (Т5К10, Т5К12, Т14К8, Т15К6, Т30К4);
- титанотанталовольфрамовые (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9).

**Вольфрамовые твердые сплавы** (группа ВК) представляют собой частицы карбида вольфрама, связанные кобальтом. Содержание кобальта может меняться. Чем больше в сплаве кобальта, тем он менее тверд и менее теплостоек (до 800 °С). Сплавы этой группы имеют наибольшую прочность, но наименьшую твердость по сравнению со сплавами других групп.

Структура вольфрамовых твердых сплавов – кристаллы вольфрама в виде светлых угловатых зерен окружены кобальтовой прослойкой, кроме того, в структуре имеются поры. Существенное влияние на твердость твердых сплавов оказывает размер карбидных частиц. Уменьшение размера частиц приводит к увеличению твердости, при этом прочность снижается.

Сплавы группы ВК обычно применяют для обработки чугуна, цветных сплавов, различных неметаллических материалов, дающих стружку надлома, т.е. прерывистую стружку.

**Титановольфрамовые твердые сплавы** (группа ТК) являются двухкарбидными. Структура данных сплавов – карбиды титана, в которых растворяется небольшое количество вольфрама, карбиды вольфрама и кобальтовая связка. При увеличении количества карбидов титана твердость сплава возрастает, а прочность уменьшается. Твердость карбидов титана (3220 НV) выше твердости карбидов вольфрама (2080 НV), поэтому твердость сплавов этой группы выше, также твердые сплавы группы ТК отличаются более высокой теплостойкостью (до 900 – 1000 °С).

Сплавы данной группы обычно применяют для обработки сталей, дающих непрерывную стружку. При этом вследствие постоянного контакта с обрабатываемым материалом происходит большой нагрев инструмента, поэтому применение титановольфрамовых сплавов позволяет повысить режимы резания.

Гарантируемые свойства наиболее распространенных твердых сплавов вольфрамовой и титановольфрамовой групп приведены в табл. 8.2 [5, с. 380].

Таблица 8.2

## Состав и свойства сплавов групп ВК и ТК

Группа сплавов	Марка сплава	Состав, %			Сопротивление изгибу $\sigma_{изг}$ , МПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Твердость HRA
		WC	TiC	Co			
ВК	ВК2	98	–	2	1000	15,0 – 15,4	90
	ВК3	97	–	3	1000	14,9 – 15,3	89
	ВК6	94	–	6	1200	14,6 – 15,0	88
	ВК8	92	–	8	1300	14,4 – 14,8	87,5
ТК	Т5К10	85	5	10	1150	12,3 – 13,2	88,5
	Т14К8	78	14	8	1150	11,2 – 12,0	89,5
	Т15К6	79	15	6	1100	11,0 – 11,7	90
	Т30К6	66	30	4	900	9,5 – 9,8	92
	Т60К6	36	60	6	750	6,5 – 7,0	90

*Титанотанталовольфрамовые твердые сплавы* (группа ТТК) получают из карбидов вольфрама, титана, тантала и порошка кобальта в качестве связки. В структуре присутствуют три фазы – сложный карбид на основе карбида титана, в котором часть атомов титана замещена атомами вольфрама и вольфрама и кобальтовой связки. Сплавы группы ТТК отличаются более высокой прочностью и лучшим сопротивлением ударным воздействиям.

Титанотанталовольфрамовые сплавы используют для тяжелых условий резания с большими силовыми и температурными нагрузками.

Состав и свойства сплавов группы ТТК приведены в табл. 8.3 [1, с. 283].

Таблица 8.3

## Состав и свойства сплавов группы ТТК

Сплав	Состав, %				Сопротивление изгибу $\sigma_{изг}$ , МПа	Модуль упругости $E$ , ГПа	Твердость HRA
	WC	TiC	TaC	Co			
ТТ7К12	81	4	3	12	1666	–	87
ТТ8К6	84	8	2	6	1323	–	90,5
ТТ10К8	82	3	7	8	1617	490	89
ТТ20К9	67	9,4	14,1	9,5	1470	550	91

Применение инструмента из твердых сплавов позволяет в 5 – 10 раз повысить скорость резания в сравнении с быстрорежущими сталями. Однако общим недостатком вышерассмотренных сплавов является высокая стоимость основного компонента – вольфрама.

**Безвольфрамовые твердые сплавы** (группа) принципиально отличаются от вольфрамосодержащих твердых сплавов отсутствием в своем составе карбида вольфрама и использованием в качестве связки вместо кобальта, никеля и молибдена. Высокая твердость обеспечивается карбидами и карбонитридами титана.

Состав и свойства сплавов группы БВТС приведены в табл. 8.4 [1, с. 284].

Таблица 8.4

Состав и свойства сплавов группы БВТС

Сплав	Состав, %				Сопротивление изгибу $\sigma_{изг}$ , МПа	Модуль упругости $E$ , ГПа	Твердость НРА
	TiC	TiCN	Ni	Mo			
КНТ16	–	74	19,5	6,5	1200	425	89
ТН20	79	–	15	6	1050	420	90
ТН50	53	–	34	13	1400	–	86,5

По теплостойкости и прочности сплавы группы БВТС уступают традиционным сплавам (до 800 °С). Наряду с более низкой теплостойкостью безвольфрамовые твердые сплавы имеют меньшую прочность, трещиностойкость. Однако они отличаются высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью. Сплавы данной группы обычно применяют для чистовой, реже получистовой обработки, также для изготовления измерительного инструмента (калибров).

#### 8.4. Дефекты легированных сталей

Наряду с преимуществами легированным сталям свойственны дефекты, не встречающиеся у нелегированных сталей.

**1. Дендритная ликвация** – результат увеличенного интервала между линиями ликвидус и солидус. При прокатке она приводит к образованию волокна и резкой анизотропии. Как указывалось ранее, для



устранения дендритной ликвации необходимо применять диффузионный отжиг.

**2. Карбидная ликвация** возникает вследствие разной плотности железа и карбидов легирующих элементов. Карбиды могут образовывать в стали местные скопления, что приводит к резкому колебанию свойств по сечению детали. Данный вид дефекта наблюдается только в сталях, легированных карбидообразующими элементами, например, титаном, ванадием, вольфрамом, молибденом, хромом, марганцем. Термической обработкой карбидную ликвацию устранить невозможно. Однако методами обработки давлением карбидные скопления относительно равномерно распределяются по сечению заготовки.

**3. Флокены** – это трещины, имеющие в изломе вид пятен. Их образование вызывается содержащимся в металле водородом, в процессе быстрого охлаждения в основном хромированных сталей в интервале температур 200 – 20 °С. Флокены редко образуются в литой стали, так как выделившийся из раствора водород скапливается в многочисленных литейных порах и неплотностях литого материала. Флокены можно устранить последующей ковкой (прокаткой) на меньший размер.

**4. Нафталинистый излом** – особый вид брака, встречающийся в быстрорежущих сталях: при нормальной твердости и нормальном количестве остаточного аустенита сталь оказывается очень хрупкой, а ее излом – грубозернистый, чешуйчатый, напоминает нафталин.

**5. Шиферный излом** наблюдается только после горячей деформации и вызывается неравномерным распределением соединений серы, фосфора, кислорода и других примесей. Усадочные раковины и газовые пузыри при прокатке вытягиваются, образуя слои загрязненного металла. При разрушении по такому слою излом получается слоистым, с острыми зазубринами и выступами. Стали с такими дефектами обычно направляют на переплав, так как устранить их удается только перековкой стали и то не всегда.

**6. Отпускная хрупкость** (II рода) проявляется в легированных сталях при медленном охлаждении в области температур около 550

°С. Отпускная хрупкость I рода – результат неравномерного отпуска границ и сердцевины зерен. Границы отпускаются быстрее, теряется прочность и они становятся концентраторами напряжений. Отпускная хрупкость II рода – результат диффузии фосфора, азота, углерода и легирующих элементов в границах зерен, где они сильно тормозят движение дислокаций, понижая пластичность. Хром и марганец, вытесняя эти элементы из раствора, усиливают отпускную хрупкость, но молибден не вытесняет и в то же время затрудняет диффузию элементов, уменьшая отпускную хрупкость. Быстрое охлаждение способно полностью устранить отпускную хрупкость II рода.

### **Контрольные вопросы**

1. Как влияют легирующие элементы на свойства стали?
2. Какова классификация легированных сталей?
3. В чем сущность красностойкости?
4. Что такое быстрорежущая сталь? Какие требования предъявляются к быстрорежущим сталям?
5. Каким образом предотвратить нафталинистый излом быстрорежущих сталей?
6. Какой термической обработке подвергаются быстрорежущие стали?
7. Что такое твердые сплавы?
8. Приведите примеры вольфрамовых, титановольфрамовых и титанотанталовольфрамовых твердых сплавов.
9. Какие дефекты возникают в легированных сталях?

## Глава 9. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

Как указывалось ранее, цветные металлы и сплавы условно подразделяют на легкие и тяжелые. К легким относятся металлы, у которых плотность не превышает  $5 \text{ г/см}^3$ . Среди промышленных металлов наименьшей плотностью обладает магний ( $1,7 \text{ г/см}^3$ ). К легким металлам также относятся бериллий, алюминий, титан и др. Металлы, у которых плотность превышает  $5 \text{ г/см}^3$ , называются тяжелыми.

### 9.1. Алюминий и его сплавы

**Алюминий** – металл серебристо-белого цвета. Температура плавления  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Алюминий имеет кристаллическую решетку ГЦК с периодом  $a = 0,4041 \text{ нм}$ . Наиболее важная особенность алюминия – низкая плотность –  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Алюминий обладает хорошими теплопроводностью и электрической проводимостью, высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Чем чище алюминий, тем выше его коррозионная стойкость.

**Алюминиевые сплавы** классифицируют по технологии изготовления (деформируемые, литейные и спеченные (порошковые)), способности к термической обработке (упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой), свойствам (сплавы повышенной пластичности, низкой прочности, нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные и др.).

Типичные представители деформируемых сплавов на алюминиевой основе – дуралюминий (Д1, Д16) и литейных – силумин АЛ2. Химический состав и свойства наиболее применяемых алюминиевых сплавов приведены в табл. 9.1 [29, с. 496].

**Силумины** – литейные сплавы на основе алюминия с кремнием (4...13 %, иногда до 23 % Si) и некоторыми другими элементами (медь, марганец, магний, цинк, титан, бериллий). Сплавы, содержащие до 11,3 % Si, являются доэвтектическими и имеют структуру из первичных кристаллов  $\alpha$ -раствора (кремния в алюминии) и эвтектики ( $\alpha + \text{Si}$ ). При более высокой концентрации кремния (заэвтектические сплавы) в структуре сплавов кроме эвтектики присутствуют первичные кристаллы кремния в виде пластинок.

Таблица 9.1

## Химический состав и свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, %				Режим термообработки	Механические свойства		
	Cu	Mg	Mn	Прочие		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
<i>Литейные сплавы</i>								
АК12 (АЛ2)	–	–	–	10 – 13 Si	Литье в землю	180	80	6
					Литье в кокиль	220	90	5
АК9 (АЛ4)	–	0,17 – 0,3	0,2 – 0,5	8 – 10 Si	Литье в землю (закалка – старение)	260	200	4
АМ5 (АЛ19)	4,5 – 5,3	–	0,6 – 1,0	0,15 – 0,35 Ti	Литье в землю (закалка – старение)	360	250	3
<i>Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой</i>								
АМц	0,1	0,2	1,0 – 1,6	–	Отжиг	130	50	20
АМг2	0,1	1,8 – 2,6	0,2 – 0,6	–	Отжиг	190	100	23
АМг5	0,1	5,8 – 6,8	0,5 – 0,8	–	Отжиг	340	170	20
<i>Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой</i>								
Д1	3,8 – 4,8	0,4 – 0,8	0,4 – 0,8	–	Закалка + старение	400	240	20
Д16	3,8 – 4,9	1,2 – 1,8	0,3 – 0,9	–	Закалка + старение	440	330	18
В95	1,4 – 2,0	1,8 – 2,8	0,2 – 0,6	0,01 – 0,25 Cr 5 – 7 Zn	Закалка + старение	540	470	10
В96	2,0 – 2,6	2,3 – 3,0	0,3 – 0,8	8 – 9 Zn	Закалка + старение	750	720	7
АК6	1,8 – 2,6	0,4 – 0,8	0,4 – 0,8	0,7 – 1,2 Si	Закалка + старение	400	300	12

Силумины обычно модифицируют натрием, который в виде хлористых и фтористых солей вводят в жидкий сплав в виде 2 – 3 % от массы сплава. Натрий сдвигает эвтектическую точку в системе Al – Si в сторону больших содержаний кремния.

Обычный силумин содержит 12 – 13 % Si и по структуре является заэвтектическим, но если перед самой отливкой внести в сплав незначительное количество хлористых и фтористых солей натрия, то

структура резко изменится. Сплав становится доэвтектическим. При модифицировании температура выделения кремния и кристаллизации эвтектики понижается. Так как кристаллизация происходит при более низких температурах, следовательно, продукты кристаллизации становятся более мелкозернистыми. Измельчение структуры и отсутствие первичных выделений хрупкого кремния улучшают механические свойства.

**Дуралюминий** (дуралюмин) – сплав шести компонентов: алюминия, меди, магния, марганца, кремния и железа. Указанный сплав можно причислить к сплавам системы Al – Cu – Mg, кремний и железо являются постоянными примесями. Перечисленные компоненты образуют ряд растворимых соединений ( $\text{CuAl}_2$ , фаза S,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) и нерастворимых (железистые и марганцовистые соединения). Структура дуралюмина в отожженном состоянии состоит из твердого раствора и вторичных включений различных интерметаллидных соединений.

На рис. 9.1 приведена диаграмма состояния сплавов Al – Cu.

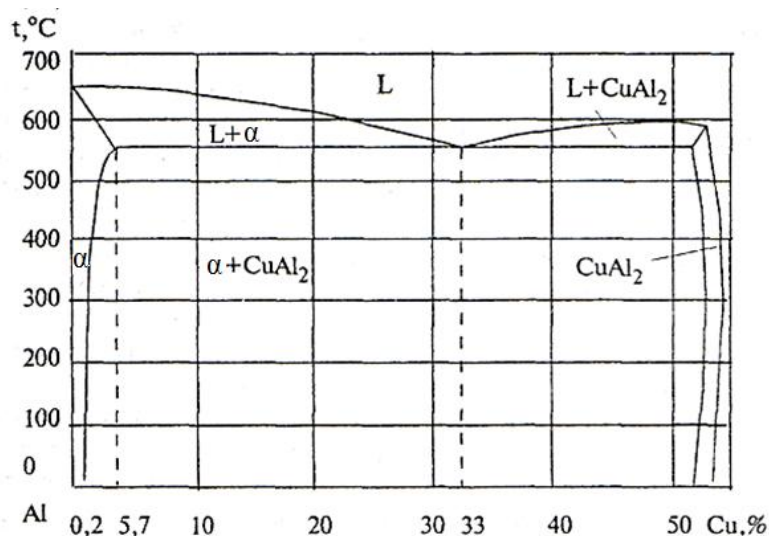


Рис. 9.1. Диаграмма состояния сплавов Al – Cu

Дуралюмин относится к сплавам, в которых не происходят полиморфные превращения при нагреве. Поэтому они могут подвергаться упрочняющей термической обработке, состоящей из закалки с последующим естественным и искусственным старением.

После закалки с оптимальных температур (500 °С) основное количество соединений  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{Mg}_2\text{Si}$  растворяется в алюминии, соединения железа не растворяются. Поэтому в закаленном состоянии

структура состоит из алюминиевого твердого раствора (пересыщенного  $\alpha$ -раствора) и нерастворимых включений соединений железа. Такая структура будет отличаться большей пластичностью, но меньшей твердостью и прочностью, т.е. в результате закалки дуралюмин становится мягким и пластичным. Старению предшествует 2 – 3-часовой инкубационный период, в течение которого сплав сохраняет высокую пластичность. Но полученный в результате закалки  $\alpha$ -раствор является неустойчивым. Выдержка при комнатной температуре (естественное старение) или при искусственном повышении температуры (искусственное старение) приводит к изменениям в твердом растворе, ведущем в конечном итоге к выделению соединений (в сплавах, дополнительно легированных магнием, также выделяется S-фаза –  $\text{CuMgAl}_2$ ).

Дуралюмины после закалки подвергают естественному старению, так как оно обеспечивает получение более высокой коррозионной стойкости, но естественное старение продолжается в течение 5 – 7 сут. Длительность старения значительно сокращается при увеличении температуры до 40 особенно 100 °С, температура искусственного старения различных алюминиевых сплавов колеблется от 20 до 200 °С.

## 9.2. Магний и его сплавы

**Магний** – щелочноземельный металл серебристо-белого цвета. Температура плавления 651 °С. Магний кристаллизуется в гексагональной решетке с периодами  $a = 0,3103$  и  $c = 0,5200$  нм. Как отмечалось ранее, он имеет наименьшую плотность.

Главные недостатки магния – его низкие механические свойства и малая коррозионная стойкость, низкие литейные свойства. Окисная пленка  $\text{MgO}$  не обладает защитными свойствами, так как её плотность значительно выше плотности магния, поэтому она растрескивается. Магний относительно устойчив лишь в сухой атмосфере, при повышении температуры он интенсивно окисляется и может воспламеняться.

В качестве конструкционного материала магний не применяется. Примерные свойства прокатанного отожженного магния следующие:  $\sigma_{\text{в}} = 180$  МПа,  $\sigma_{\text{т}} = 100$  МПа, твердость 30 НВ,  $\delta \approx 15$  %.

Применение сплавов магния оказывается целесообразным в виду их низкой плотности, однако они мало пригодны для нагруженных деталей. Легирование алюминием и цинком повышает механические

свойства. Марганец увеличивает коррозионную стойкость и улучшает свариваемость. Цирконий измельчает зерно, повышает механические свойства и коррозионную стойкость.

По технологии изготовления различают деформируемые и литейные магниевые сплавы.

**Деформируемые магниевые сплавы** изготавливают в виде горячекатаных прутков, полос, профилей, а также в виде поковок и штампованных заготовок. Различают сплавы упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой.

Состав и свойства наиболее распространенных деформируемых магниевых сплавов приведены в табл. 9.2 [29, с. 481].

Таблица 9.2

Химический состав и механические свойства некоторых деформируемых магниевых сплавов

Марка сплава	Содержание элемента, %				Режим термообработки	$\sigma_{в}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
	Al	Mn	Zn	Другие элементы				
МА1	–	1,3 – 2,5	–	–	Отжиг	200	130	8
МА2	3,0 – 4,0	0,15 – 0,5	0,2 – 0,8	–	Отжиг	270	170	10
МА5	7,8 – 9,2	0,15 – 0,5	0,2 – 0,8	–	Закалка, старение	320	220	14
МА14	–	–	5 – 6	0,3 – 0,9 Zr	Закалка, старение	350	300	9
МА18	0,5 – 1,0	0,1 – 0,4	2,0 – 2,5	10 – 11,5 Li; 0,15 – 0,35 Ce	Отжиг	170	130	30
МА19	–	–	5,5 – 7,0	0,5 – 1,0 Zr; 0,2 – 1,0 Cd; 1,4 – 2,0 Nd	Закалка, старение	380	330	5
МА20	–	–	1,0 – 2,0	0,05 – 0,12 Zr; 0,12 – 0,25 Ce	Отжиг	250	160	20

**Литейные магниевые сплавы** по химическому и фазовому составу близки к деформируемым. Недостаток литейных сплавов – низкие механические свойства из-за усадочной пористости и крупнозернистой структуры.

Состав и свойства некоторых литейных магниевых сплавов при-

ведены в табл. 9.3 [27, с. 481].

Таблица 9.3

Химический состав и механические свойства некоторых  
литейных магниевых сплавов

Марка сплава	Содержание элемента, %				Режим термообработки	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
	Al	Mn	Zn	Другие элементы				
МЛ5	7,5 – 9,0	0,15 – 0,5	0,2 – 0,8	–	Отжиг	160	85	3
					Закалка, старение	255	120	6
МЛ8	–	–	5,5 – 6,6	0,7 – 1,1 Zr; 0,1 – 0,8 Cd	Закалка, старение	255	155	5
МЛ10	–	–	0,1 – 0,7	0,4 – 1,0 Zr; 2,2 – 2,8 Nd	Закалка, старение	230	140	3
МЛ19	–	–	0,1 – 0,6	0,4 – 1,0 Zr; 1,6 – 2,3 Nd; 1,4 – 2,2 Y	Закалка, старение	220	120	3

Наиболее распространенным магниевым литейным сплавом является МЛ5. Данный сплав характеризуется хорошей жидкотекучестью, малой склонностью к пористости и хорошей обрабатываемостью резанием.

Благодаря малой плотности и высокой удельной прочности магниевые сплавы широко применяют в авиастроении, транспортном машиностроении и других отраслях. Также их используют для протекторной защиты от коррозии в морской воде, коррозии в грунте в виду высокого электроотрицательного потенциала магниевых сплавов.

### 9.3. Титан и его сплавы

**Титан** – металл серого цвета. Температура плавления 1668 °С. Титан имеет две полиморфные модификации: до 882 °С существует  $\alpha$ -титан, который кристаллизуется в гексагональной решетке с периодами  $a = 0,2951$  нм и  $c = 0,4684$  нм, а при более высоких температурах –  $\beta$ -титан, имеющий ОЦК-решетку с периодами  $a = 0,3282$  нм. Плотность титана 4,5 г/см<sup>3</sup>.

Титан благодаря защитной пленке из TiO<sub>2</sub> обладает очень высокими коррозионной и химической стойкостью, сохраняющимися в ин-



тервале температур от – 250 до 550 °С.

Сплавы на основе титана получили значительно большее применение, чем технический титан.

Титановые сплавы классифицируются по способу производства, структуре, механическим свойствам и способности упрочняться термической обработкой.

*По способу производства* титановые сплавы делятся на деформируемые и литейные. *По механическим свойствам* – нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные и повышенной пластичности. *По способности упрочняться термической обработкой* различают упрочняемые и неупрочняемые титановые сплавы.

подавляющее большинство металлов образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектоидным превращением. *По структуре* титановые сплавы делят на  $\alpha$ -, ( $\alpha + \beta$ )- и  $\beta$ -сплавы. Все легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана можно разделить на три группы:

- 1)  $\alpha$ -стабилизаторы (алюминий, галлий, индий, углерод, азот, кислород);
- 2)  $\beta$ -стабилизаторы (молибден, ванадий, хром, марганец, железо, медь, никель, кобальт);
- 3) нейтральные элементы (олово, цирконий, германий).

Наилучшее сочетание свойств достигается в ( $\alpha + \beta$ )-сплавах. Эти сплавы более прочны, чем однофазные, хорошо куются и штампуются, поддаются термической обработке.

Титановые сплавы подвергают термической обработке – отжигу, закалке и старению, химико-термической обработке (азотированию, силицированию). Упрочняющая обработка, состоящая из закалки с последующим старением, применима только для ( $\alpha + \beta$ )-сплавов. Сплавы, имеющие структуру  $\alpha$ -раствора, нельзя упрочнить термической обработкой.

С целью повышения твердости, износостойкости и жаропрочности титановые сплавы могут подвергать азотированию. Азотирование проводят в газовой среде при температуре 900 °С, процесс длителен (до 50 ч). Для уменьшения хрупкости азотированного слоя заготовки подвергают вакуумному отжигу при 800 – 900 °С.

Превращения при закалке и старении в титановых сплавах похожи на соответствующие превращения в стали. Однако такого существенного упрочнения, как в сталях, в титановых сплавах не происходит.

Состав и свойства некоторых титановых сплавов приведены в табл. 9.4 [1, с. 258].

Таблица 9.4

Химический состав и механические свойства некоторых  
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Сплав	Химический состав, %				Механические свойства			
	Al	V	Mo	Прочие	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
α-сплавы								
BT5	4,5 – 6,2	1,2	0,9	0,3 Zr	700 – 950	650 – 850	12	0,4
BT5-1	4,3 – 6,0	1,0	–	2 – 3 Sn	700 – 950	650 – 850	12	0,45
псевдо-α-сплавы								
OT4-1	1,5 – 2,5	–	–	0,7 – 2 Mn	600 – 750	470 – 650	30	0,5
OT4	3,5 – 5,0	–	–	0,8 – 2 Mo	700 – 900	550 – 650	18	0,5
BT20	5,5 – 7,0	0,8 – 2,5	0,5 – 2,0	1,5 – 2,5 Zr	950 – 1150	950 – 1150	8	0,45
(α + β)-сплавы								
BT6	5,3 – 6,8	3,5 – 5,3	–	–	1100 – 1150	1000 – 1050	15	0,3
BT14	3,5 – 6,3	0,9 – 1,9	2,5 – 3,8	0,3Zr	1150 – 1400	1080 – 1300	8	0,5
BT16	1,6 – 3,8	4,0 – 5,0	4,5 – 5,5	0,8 – 1,2 Cr	1250 – 1450	1100 – 1200	5	0,5
BT22	4,4 – 5,7	4,0 – 5,5	4,0 – 5,5	0,8 – 1,2 Cr	1100 – 1200	–	9	0,4

**Примечания.** 1. Псевдо-α-сплавы имеют структуру α-раствора с небольшим количеством β-фазы (1 – 4 %) вследствие легирования β-стабилизаторами (Mn, Mo, V и др.).  
2. Свойства сплавов BT6, BT14, BT22 приведены после закалки и старения; остальных – после отжига.

Титановые сплавы обладают хорошими литейными свойствами, они отличаются высокой жидкотекучестью и плотностью отливок, а также малой склонностью к образованию горячих трещин. Однако литейные титановые сплавы имеют более низкие механические свойства по сравнению с деформируемыми сплавами.

Титан и его сплавы благодаря высокой удельной прочности и хорошей коррозионной стойкости применяют в разных отраслях промышленности, особенно в авиа- и ракетостроении, судостроении и химической промышленности. Широкое использование титановых спла-

вов сдерживается их сравнительно высокой себестоимостью.

#### 9.4. Медь и ее сплавы

**Медь** – металл красного цвета. Температура плавления 1083 °С. Медь имеет кристаллическую решетку ГЦК с периодом  $a = 0,3608$  нм. Плотность меди 8,94 г/см<sup>3</sup>. Удельное электрическое сопротивление меди 0,0175 мкОм·м. Медь характеризуется высокими теплопроводностью и электропроводностью, коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, пресной и морской воде, едких щелочах, органических кислотах и других агрессивных средах.

Механические свойства меди относительно низки. Так, в литом состоянии  $\sigma_b = 150...200$  МПа,  $\delta \approx 15... 25$  %. Поэтому в качестве конструкционного материала медь находит ограниченное применение. Повышение механических свойств достигается созданием различных сплавов на медной основе.

Медные сплавы подразделяются на латуни, бронзы и медно-никелевые сплавы.

**Латуни** – сплавы меди с цинком содержат не более 45 % цинка с небольшим количеством других компонентов. Латуням присущи все положительные свойства меди (высокая электро- и теплопроводность, коррозионная стойкость, пластичность) при более высокой прочности и лучших технологических свойствах.

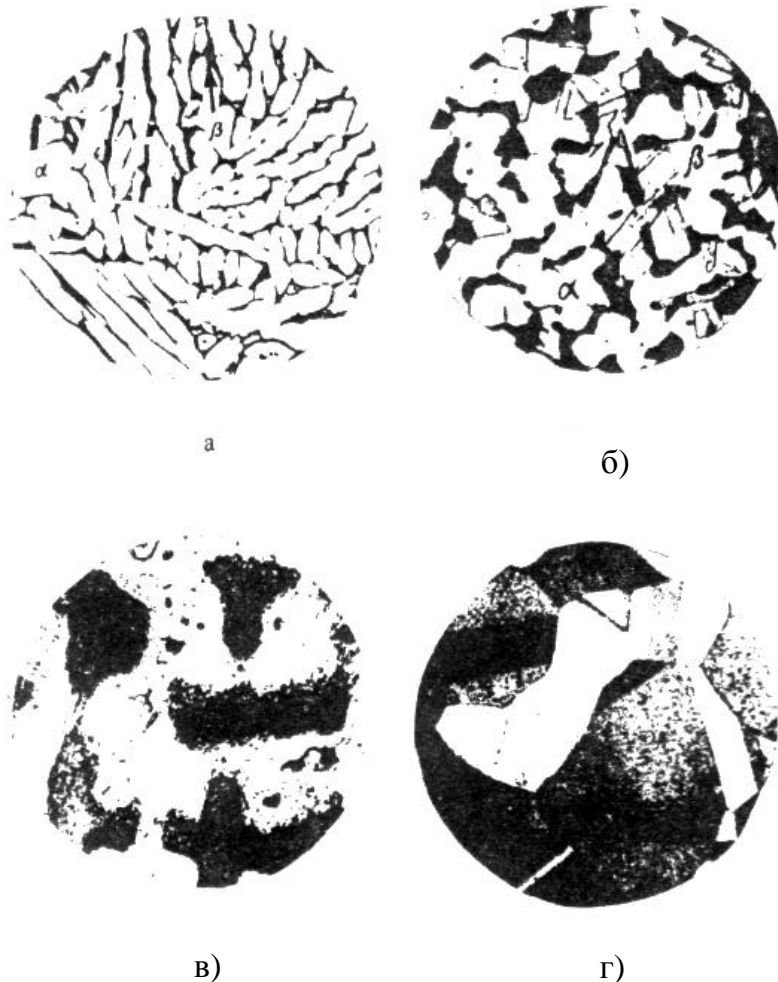
В зависимости от числа компонентов различают простые (двойные) и специальные (многокомпонентные) латуни. Строение и свойства простых латуней зависят от содержания в них цинка.

Латуни, содержащие до 39 % цинка (Л90, Л80, Л68), имеют однофазную структуру ( $\alpha$ -раствор), представляют собой твердый раствор цинка в меди. Они не упрочняются при термической обработке, так как при нагревании до температуры плавления их структура не изменяется, такие латуни пластичны, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях.

Латуни, содержащие 40 – 45 % цинка (Л60, Л59, ЛЦ40Мц1,5), имеют двухфазную структуру ( $\alpha + \beta$ -раствор),  $\beta$ -фаза представляет собой твердый раствор на основе химического соединения CuZn (рис. 9.2). Латуни, имеющие двухфазную структуру, обладают повышенной

твердостью, хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии, но в холодном состоянии пластичность их невелика.

На рис. 9.2, а и б приведена микроструктура литейной латуни и латуни после деформирования.



*Рис. 9.2. Микроструктуры (x 100): а – литейная латунь ( $\alpha + \beta$ ); б – латунь ( $\alpha + \beta$ ) после деформирования; в – литейная бронза Бр05; г – бронза после деформирования и рекристаллизации*

Применяются сложные латуни, в которые для изменения механических и химических свойств дополнительно вводят свинец, олово, кремний, алюминий (свинец улучшает обрабатываемость резанием ЛС59-1), олово повышает коррозионную стойкость (ЛО 60-1), кремний и алюминий повышают механические свойства (ЛК 80-3, ЛА77-2).

По технологическим признакам различают литейные и деформи-

руемые латуни (табл. 9.5) [29, с. 524].

Таблица 9.5

Химический состав и механические свойства  
некоторых марок латуней

Марка латуни	Структура	Содержание, %		$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
		Cu	Легирующие элементы		
<i>Деформируемые латуни</i>					
Л90	$\alpha$	88 – 91	–	260	45
Л80	$\alpha$	79 – 81	–	320	52
Л62	$\alpha + \beta$	62 – 65	–	330	50
ЛС59-1	$\alpha + \beta$	57 – 60	0,8 – 1,9 Pb	400	45
ЛЖМц59-1-1	$\alpha + \beta$	57 – 60	0,6 – 1,2 Fe; 0,1 – 0,4 Al; 0,3 – 0,7 Sn; 0,5 – 0,8 Mn	450	50
ЛАЖ60-1-1	$\alpha + \beta$	58 – 61	0,75 – 1,5 Al; 0,75 – 1,5 Fe; 0,1 – 0,6 Mn	450	45
<i>Литейные латуни</i>					
ЛЦ16К4	$\alpha + \beta$	78 – 81	3,0 – 4,5 Si	300	15
ЛЦ40МцЗЖ	$\alpha + \beta$	53 – 58	3,0 – 4,0 Mn; 0,5 – 1,5 Fe	500	10
ЛЦ23А6Ж3Мц2	$\alpha + \beta$	64 – 68	4,0 – 7,0 Al; 2,0 – 4,0 Fe; 1,5 – 3,0 Mn	700	7

**Бронзы** – это сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием, свинцом, бериллием (в настоящее время бронзами называют все сплавы меди, кроме латуней и медно-никелевых сплавов). По химическому составу бронзы делятся на оловянные и безоловянные (специальные), а по технологическим свойствам – на обрабатываемые давлением (деформируемые) и литейные.

Сплавы меди с оловом – *оловянные бронзы* (Бр010, БрО10Ф1) очень давно и широко применяются в промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости и антифрикционным свойствам. Микроструктура литейной оловянной бронзы (рис. 9.2, в) состоит из неоднородного твердого  $\alpha$ -раствора (твердого раствора олова в меди) и эвтектоида  $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ . Темные участки неоднородного твердого  $\alpha$ -раствора богаты медью, светлые – оловом, в эвтектоиде на светлом фоне соединения  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  видны темные точечные включения  $\alpha$ -фазы.

На рис. 9.2, г приведена микроструктура бронзы после деформирования и рекристаллизации.

Химический состав и механические свойства некоторых марок

оловянных бронз представлены в табл. 9.6 [29, с. 527].

Таблица 9.6

Химический состав и механические свойства  
некоторых марок оловянных бронз

Марка сплава	Содержание, %				$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
	Sn	Zn	Pb	P		
<i>Бронзы, обрабатываемые давлением</i>						
БрОФ4-0,25	3,5 – 4,0	–	–	0,2 – 0,3	340	52
БрОФ6,5-0,15	6 – 7	–	–	0,1 – 0,25	400	65
БрОЦ4-3	3,5 – 4,0	2,7 – 3,3	–	–	350	40
<i>Литейные бронзы</i>						
БрО10Ф1	9 – 11	–	–	0,4 – 1,1	250	7
БрО5Ц5С5	4 – 6	4 – 6	4 – 6	–	180	4
БрО6Ц6С2	5 – 7	5 – 7	1 – 3	–	–	–

В последнее время широко применяются безоловянные бронзы (табл. 9.7 [29, с. 530]).

Таблица 9.7

Механические свойства и назначение безоловянных бронз

Марка бронзы	Содержание, %	Механические свойства		Назначение
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	
<i>Алюминиевые бронзы</i>				
БрАЖ9-4	9 Al, 4 Fe	600	40	Для изготовления проката, штампованных шестерен, втулок, труб
БрАЖН10-4-4	10 Al, 4 Fe, 4 Ni	650	35	Арматура, обоймы подшипников
БрА10Ж3Мц2	10 Al, 3 Fe, 2 Mn	390	10	
<i>Кремнистая бронза</i>				
БрКМц3-1	3Si, 2 Mn	380	35	Прутки, лента, проволока для пружин
<i>Свинцовая бронза</i>				
БрС30	30Pb	600	4	Антифрикционные детали
<i>Бериллиевая бронза</i>				
БрБ2	2Be	1200	4	Полосы, лента, прутки, проволока, пружины, мембраны, контакты

*Алюминиевые бронзы* содержат до 11 % алюминия (БрАЖ9-4,

БрА10ЖЗМц2), для повышения механических свойств в них добавляют железо и никель.

В отожженном состоянии бронзы очень пластичны. Для повышения твердости проводят термическую обработку, которая состоит из закалки с 900 °С в воду и отпуска 650 °С. После закалки они имеют игольчатую структуру, состоящую из зерен  $\alpha$ - и  $\beta$ -твердых растворов. Алюминиевые бронзы имеют хорошие механические и высокие антифрикционные свойства.

*Кремнистые бронзы* содержат до 3,0 % Si (БрКМц3-1). Они превосходят алюминиевые бронзы и латуни в прочности и стойкости в щелочных средах. Кремнистые бронзы легко обрабатываются давлением, резанием и свариваются.

*Бериллиевые бронзы* содержат 1,8 ... 2,5 % Be (БрБ2), применяются в промышленности после упрочнения (закалка и отпуск).

*Свинцовистые бронзы* содержат 27... 33 % Pb (БрС30). Свинец практически не растворяется в жидкой меди. Структура обеспечивает ее высокие антифрикционные свойства.

**Медно-никелевые сплавы** выделяют в отдельную группу. Данные сплавы могут использоваться в качестве конструкционных (МН19, МНЦ15-20) и электротехнических (МНМц40-1,5) материалов.

## 9.5. Цинк и его сплавы

**Цинк** – переходный металл голубовато-белого цвета, на воздухе быстро окисляется, покрываясь тонкой защитной пленкой, уменьшающей его блеск. Температура плавления 419 °С. Цинк имеет плотноупакованную гексагональную структуру с периодами  $a = 0,26595$  нм,  $c = 0,49368$  нм, его плотность 7,14 г/см<sup>3</sup>. Цинк отличается достаточно хорошей коррозионной стойкостью, поэтому его широко используют для защитных покрытий стальных изделий, имеющих контакт с водой.

Цинк обладает низкой прочностью  $\sigma_b = 150$  МПа при высокой пластичности  $\delta = 50$  %. Как конструкционный материал цинк не применяется, так как обладает недостаточно благоприятным комплексом свойств. В основном цинк применяется как добавка в разные сплавы и

как основа для цинковых сплавов. Цинковые сплавы условно подразделяют на литейные и антифрикционные. Практически во все сплавы вводится добавка магния (до 0,1 %), при этом повышается размерная стабильность литых деталей и увеличивается коррозионная стойкость.

В промышленности используют сплавы на базе систем Zn-Al и Zn-Al-Cu.

Литейные цинковые сплавы широко применяют в автомобильной промышленности. Все литейные цинковые сплавы имеют очень узкий температурный интервал кристаллизации, поэтому обладают хорошей жидкотекучестью и дают плотные отливки.

Сплавы типа ЦАМ10-1 (9 – 11 % Al, 0,6 – 1 % Cu) обладают хорошими антифрикционными свойствами.

В качестве конструкционного материала цинковые сплавы применяются в судостроении, для изготовления предметов домашнего обихода, в авиационной промышленности, автомобильной промышленности, приборостроении, полиграфической промышленности.

## 9.6. Свинец, олово и сплавы на их основе

**Свинец** – мягкий металл синевато-серого цвета. Температура плавления 327 °С. Свинец имеет гранецентрированную кубическую решетку с периодом  $a = 0,49389$  нм, его плотность 1,34 г/см<sup>3</sup>. В качестве конструкционного материала свинец использоваться не может, он применяется в химическом машиностроении, для защиты от гамма-излучения, в припоях и подшипниковых материалах.

Легирование свинцом повышает обрабатываемость резанием.

**Олово** – металл серебристо-белого цвета. Температура плавления 232 °С. Олово имеет две аллотропных модификации: ниже 13,2 °С устойчиво  $\alpha$ -олово с кубической решеткой, выше 13,2 °С устойчиво  $\beta$ -олово с тетрагональной кристаллической решеткой, его плотность 7,29 г/см<sup>3</sup>. Олово является важной составляющей подшипниковых сплавов.

В качестве **припоев** в основном используются сплавы системы Sn – Pb с небольшим количеством сурьмы (до 2 %). Данные сплавы



применяются для низкотемпературной пайки и относятся к легкоплавким припоям.

Сплавы олова и свинца образуют диаграмму состояния эвтектического типа с ограниченной растворимостью. Эвтектический сплав, содержащий около 61 % Sn и 39 % Pb (ПОС-61), имеет низкую температуру плавления – 183 °С и высокую жидкотекучесть, что обеспечивает качественное формирование шва и высокие механические свойства.

Состав и свойства некоторых припоев системы Sn – Pb приведены в табл. 9.8 [5, с. 530].

Таблица 9.8

Составы и свойства некоторых легкоплавких припоев

Марка припоя	Содержание элементов, %*		Свойства				
	Sn	Sb	Температурный интервал затвердевания, °С	Жидкотекучесть, см	Электропроводность, м/(Ом·мм <sup>2</sup> )	σ <sub>в</sub> , МПа	
						металла	шва
ПОС-90	89 – 90	< 0,15	185 – 220	135	–	40	–
ПОС-81	56 – 61	< 0,8	183 – 185	135	6,9	50	40 – 80
ПОС-50	45 – 50	< 0,8	183 – 210	115	6,4	40	50 – 90
ПОС-40	39 – 40	1,5 – 2,0	183 – 235	91	5,7	40	40 – 110
ПОС-30	29 – 30	1,5 – 2,0	183 – 256	63	4,5	30	30 – 90

\* Остальное – свинец.

Очень важная область применения олова и свинца – это подшипниковые сплавы (**бabbиты**), их используют для заливки вкладышей подшипников.

*Бabbиты на основе олова* являются сплавами тройной системы Sn – Sb – Cu. В этих сплавах α-раствор на основе олова является мягкой основой, а роль твердых включений выполняет β'-твердый раствор на основе интерметаллидного SnSb и химического соединения Cu<sub>3</sub>Sn.

*Свинцовые баббиты*, сплавы системы Pb – Sb, являются более экономичными. Мягкой основой служит эвтектика, а твердыми включениями – кристаллы Sb. Введение олова повышает твердость, улучшает прирабатываемость и вязкость баббитов.

Твердые включения обеспечивают хорошую износостойкость. Мягкая основа в баббитах не только обеспечивает хорошую прирабатываемость, но и микрорельеф поверхности улучшает снабжение смазочным материалом.

Состав и условия работы баббитов приведены в табл. 9.9 [29, с. 534].

Таблица 9.9

Химический состав и условия работы  
оловянных и свинцовых баббитов

Марка баббита	Химический состав, %					Удельное давление, МПа	Окружная скорость, м/с	Рабочая температура, °С
	Sn	Sb	Cu	Pb	Прочие			
Б88	Остальное	7,3 – 7,8	2,5 – 3,5	–	–	20	50	75
Б83	Остальное	10 – 12	5,5 – 6,5	–	–	15	50	70
Б83С	Остальное	9 – 11	5 – 6	1,0 – 1,5	–	15	50	70
БН	9 – 11	13 – 15	1,5 – 2,0	Остальное	0,1 – 0,7 Cd; 0,1 – 0,5 Ni; 0,5 – 0,9 As	10	30	70
Б16	15 – 17	15 – 17	1,5 – 2,0	Остальное	–	10	30	70

По антифрикционным свойствам баббиты превосходят другие сплавы, но уступают им по сопротивлению усталости.

**Контрольные вопросы**

1. Какими свойствами обладает медь?
2. Какие медные сплавы и их свойства вы знаете? Область применения медных сплавов.

3. Какими свойствами обладают алюминий и его сплавы?
4. Что представляет собой модифицирование силуминов? С какой целью его проводят?
5. Какова термическая обработка дуралюминов?
6. Какими свойствами обладают титан и его сплавы?

## **Раздел II. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **Глава 10. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

К неметаллическим материалам относятся органические и неорганические полимерные материалы: различные виды пластических масс, каучуки и резины, пленкообразующие материалы (клеи, герметики, лакокрасочные покрытия), а также стекло и ситаллы, керамические материалы, графит.

По происхождению различают природные органические (натуральный каучук, древесина и др.) и неорганические (графит, слюда и др.), искусственные и синтетические неметаллические материалы.

Искусственные органические материалы получают из природных полимерных продуктов (вискозное волокно, целлофан, целлюлоза, эфиры). Синтетические материалы получают из простых низкомолекулярных соединений. Именно в искусственных и синтетических материалах возможно проектирование исходных веществ с целью получения заданных свойств готового изделия.

Синтетическими полимерами называют неметаллические материалы (пластические массы, резины, химические волокна, пленки и др.), в основе производства которых лежит синтез высокомолекулярных органических продуктов на базе полимерных соединений. Основными преимуществами синтетических полимеров перед природными полимерами являются неограниченность запасов сырья и широкие возможности синтеза полимеров.

В настоящее время возрастает интерес к неметаллическим материалам, они широко применяются в разных отраслях техники в качест-

ве конструкционных материалов. Неметаллические материалы служат своего рода дополнением к металлам и сплавам, а в ряде случаев с успехом заменяют металлические материалы.

Преимущество неметаллических материалов заключается в сочетании требуемого уровня физических, химических и механических свойств при низкой себестоимости и высокой технологичности изготовления деталей, имеющих сложную конфигурацию. В основе неметаллических материалов лежат полимеры.

В связи с этим все более широкое применение в качестве конструкционных материалов находят синтетические полимерные материалы. Полимеры используются в машиностроении как функциональные материалы – материалы со специальными свойствами.

### 10.1. Полимерные материалы

К *полимерным пластическим материалам* относятся вещества, получаемые на основе природных или синтетических высокомолекулярных полимеров. Полимеры – это высокомолекулярные материалы с очень большой молекулярной массой. В инженерной практике такие материалы называют **пластмассами**.

Полимерные высокомолекулярные соединения состоят из сотен и тысяч атомов, основа структуры полимеров – макромолекулы, которые построены из многократно повторяющихся звеньев. Структура макромолекулы определяет свойства полимеров. По форме макромолекул полимеры делят на линейные (цеповидные), плоские, разветвленные, ленточные (лестничные), пространственные или сетчатые [14, с. 436].

*Линейные макромолекулы* представляют собой длинные зигзагообразные или закругленные в спираль цепочки. Наличие гибких макромолекул с высокой прочностью вдоль цепи и слабыми межмолекулярными связями обеспечивает эластичность материала, способность размягчаться при нагреве, а при охлаждении снова затвердевать (полиамиды, полиэтилен и др.).

*Разветвленные макромолекулы* отличаются от линейных наличием боковых ответвлений, что препятствует их плотной упаковке (полиизобулен).

Макромолекула *ленточного (лестничного) полимера* состоит из двух цепей, соединенных химическими связями. Такие полимеры

имеют более жесткую основную цепь, они обладают большей жесткостью, повышенной теплостойкостью. Кроме того, лестничные полимеры нерастворимы в стандартных органических соединениях (кремнийорганические полимеры).

При соединении макромолекул («сшивке») между собой прочными химическими связями образуются *пространственные или сетчатые полимеры* с различной густотой сети. Именно пространственные полимеры лежат в основе конструкционных неметаллических материалов. *Редкосетчатые полимеры* обладают упругостью (мягкие резины) и теряют способность растворяться и плавиться. *Густосетчатые полимеры* отличаются твердостью, повышенной теплостойкостью и нерастворимостью. К сетчатым полимерам также относятся пластинчатые (паркетные) полимеры, например графит.

Пластмасса – это материал, который представляет собой композицию полимера с различными ингредиентами. Состав композиций, изготовленных на основе полимеров, разнообразен. Простые пластмассы – это полимеры без добавок, тогда как сложные пластмассы – это смеси полимеров с различными добавками (наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, специальные добавки и др.).

*Наполнители* – это органические и неорганические вещества, как правило, инертные по отношению к полимеру, в виде порошков (древесная мука, сажа, графит, слюда, тальк и др.), волокон (полимерные, стеклянные, хлопчатобумажные и др.), листов (бумага, ткани из различных волокон, древесный шпон). Их добавляют в количестве 40 – 70 % для повышения механических свойств, снижения стоимости готовой продукции, изменения других параметров.

*Стабилизаторы* – различные органические вещества, которые вводят в количестве нескольких процентов для сохранения структуры молекул и стабилизации свойств, чтобы замедлить процесс старения. Стабилизаторы вводятся в состав композиции для повышения долговечности: антиокислители предотвращают термоокислительные реакции, светостабилизаторы предотвращают фотоокисление.

*Пластификаторы* – вещества (например, сложные эфиры, стеарин), уменьшающие межмолекулярное взаимодействие и хорошо совмещающиеся с полимерами. Их добавляют в количестве 10 – 20 % для уменьшения хрупкости, облегчения обработки, улучшения морозостойкости и огнестойкости.

*Специальные добавки* – смазочные вещества (стеарин, олеиновая кислота), красители (минеральные пигменты, спиртовые растворы органических красок), добавки для уменьшения статических зарядов и горючести, для защиты от плесени, ускорители и замедлители отверждения и другие – служат для изменения или усиления какого-либо свойства.

*Отвердители* – вещества, которые изменяют структуру полимера, влияя на свойства пластмасс. Их добавляют в количестве нескольких процентов для создания межмолекулярных связей и встраивания молекул отвердителя в общую молекулярную сетку. Чаще всего используют отвердители, ускоряющие процесс полимеризации.

Для пластмасс характерны следующие свойства [29, с. 594]:

- низкая плотность (обычно  $1,0 - 1,8 \text{ г/см}^3$ , в некоторых случаях до  $0,02 - 0,04 \text{ г/см}^3$ );

- высокая коррозионная стойкость. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии, на них не действуют слабые кислоты и щелочи. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей. Большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении;

- высокие диэлектрические свойства;

- хорошая окрашиваемость в любые цвета. Некоторые пластмассы могут быть изготовлены прозрачными, не уступающими по своим оптическим свойствам стеклам;

- механические свойства широкого диапазона. В зависимости от природы выбранных полимеров и наполнителей пластмассы могут быть твердыми и прочными или же гибкими и упругими. Ряд пластиков по своей механической прочности превосходят чугун и бронзу. При одной и той же массе пластмассовая конструкция может по прочности соответствовать стальной;

- антифрикционные свойства. Пластмассы могут служить полноценными заменителями антифрикционных сплавов (оловянистых бронз, баббитов и др.). Например, полиамидные подшипники скольжения длительное время могут работать без смазки;

- высокие теплоизоляционные свойства. Все пластмассы, как правило, плохо проводят теплоту, а теплопроводность таких теплоизоляторов, как пено- и поропласты, почти в десять раз меньше, чем у обычных пластмасс;

- высокие адгезионные свойства;
- хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки) – литьем, прессованием, формообразованием с применением невысоких давлений или в вакууме;
- низкое или высокое водопоглощение;
- хорошая декоративность.

Недостатками пластмасс являются следующие их свойства: низкая ударная вязкость, склонность к старению, повышенная ползучесть, высокий коэффициент линейного расширения, низкая теплостойкость (до 100 – 120 °С), токсичность, пожароопасность, способность воспламеняться или подвергаться деструкции под действием огня и др.

Свойства основных полимеров приведены в табл. 10.1 [26, с. 101].

Таблица 10.1

Свойства основных полимеров

Название полимера	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , ГПа	Предел прочности при растяжении $\sigma_B$ , МПа	Трещиностойкость, МПа·м <sup>1/2</sup>	Полное удлинение $\epsilon$ , %	Температура стеклования $T_c$ , °С
Термопластичные полимеры						
Полиэтилен малой плотности	0,92	0,15...0,24	7...17	1...2	90...800	0
Полиэтилен высокой плотности	0,96	0,55...1,0	20...37	2...5	15...100	30
Поливинилхлорид	1,39	2,4...3,0	40...60	2,4	2...30	80
Полипропилен	0,9	1,2...1,7	50...70	3,5	10...700	–20
Полистирол	1,06	3,0...3,3	35...68	2	1...2	100
Полиамид	1,14	2,0...3,5	60...110	3...5	60	70
Термореактивные полимеры						
Фенолформальдегидная смола	1,4	8	35...55	–	0	–
Полиэстер	–	1,3...4,5	45...85	0,5	0	70
Эпоксидная смола	1,6	2,1...5,5	40...85	0,6...1,0	0	80

### 10.1.1. Классификация полимерных материалов

Классифицируют полимерные материалы по нескольким призна-

кам: по способу синтеза, виду наполнителя, отношению к нагреву, структуре, применению.

**По способу синтеза** полимеры подразделяют на получаемые полимеризацией, поликонденсацией и химическим модифицированием.

При *полимеризации* молекулы мономера соединяются без образования побочных продуктов.

При *поликонденсации* получают полимеры, состав которых отличается от состава исходных веществ (при реакции образуются дополнительные низкомолекулярные продукты).

При *химическом модифицировании* происходит замена атомов водорода или других элементов на атомы и группы в самой молекулярной цепи.

**По виду наполнителя** различают пластмассы с твердым наполнителем в виде порошков, волокон, слоистых материалов и с газовым.

**По отношению к нагреванию** полимеры делят на термопластичные и термореактивные.

*Термопластичные полимеры* (термопласты) при нагревании размягчаются, а при охлаждении затвердевают. Как правило, их не сочетают с наполнителями. К основным термопластичным полимерам относятся полиэтилен, полиметилакрилат, поливинилхлорид (винипласт) и др. Они характеризуются малой хрупкостью, большой упругостью и способностью к ориентации.

*Терморреактивные пластмассы* (реактопласты) на основе терморреактивных полимеров (смола) после тепловой обработки (отверждения) переходят в термостабильное состояние. Среди терморреактивных полимеров наибольшее распространение получили фенолоформальдегид, а также полиэфирные и полисиликоновые (кремнеорганические) полимеры. Они обладают повышенной теплостойкостью, однако для них характерна хрупкость.

**По структуре** полимеры могут быть аморфными и кристаллическими.

**По применению** пластмассы можно подразделить на конструкционные общего и специального (фрикционные и антифрикционные, уплотнительные, тепло- и электроизоляционные, химически стойкие, декоративные и др.) назначения и с особыми физико-химическими свойствами (оптически прозрачные и др.). Однако это деление условно, так как одна и та же пластмасса может обладать разными свойствами.



### 10.1.2. Термопластичные полимерные материалы

Основу термопластичных полимеров (термопластов) составляют полимеры с линейной или разветвленной структурой, иногда в состав полимера вводят пластификаторы. Широкое применение находят термопластические полимеры на основе полиэтилена, полипропилена, полистирола, поливинилхлорида, фторопластов, полиамидов и других полимеров. Механические свойства и максимальная температура эксплуатации без нагрузки наиболее распространенных термопластов показаны в табл. 10.2 [17, с. 388].

Таблица 10.2

Свойства термопластичных полимеров

Название полимерного материала	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$KС$ , кДж/м <sup>2</sup>	Максимальная температура эксплуатации (без нагрузки), °С
Полиэтилен низкой плотности (< 0,94 т/м <sup>3</sup> )	10 – 18	300 – 1000	Не ломается	60 – 75
Полиэтилен высокой плотности (> 0,94 т/м <sup>3</sup> )	18 – 32	100 – 600	5 – 12	70 – 80
Полипропилен	26 – 38	700 – 800	3 – 15	100
Полистирол	40 – 60	3 – 4	2	50 – 70
Ацетобутиратстирол	30 – 55	15 – 30	8 – 40	75 – 85
Поливинилхлорид жесткий	50 – 65	20 – 50	2 – 4	65 – 85
Поливинилхлорид пластикат	10 – 40	50 – 350	Не ломается	50 – 55
Фторопласт-4	20 – 40	250 – 500	16	250
Фторопласт-3	37	160 – 190	8 – 10	150
Органическое стекло	80	5 – 6	2	65 – 90
Поликарбонат без наполнителя	60 – 65	80 – 120	20 – 30	135
Поликарбонат с 30 % волокна	90	3,5	8	145
Капрон сухой	75 – 85	50 – 130	3 – 10	80 – 100
Капрон, насыщенный Водой	35 – 50	160 – 250	$\geq 45$	–
Капрон сухой +30 % волокна	180	3	12	100 – 300
Капрон, насыщенный	100 – 125	4	18	–

водой +30 % волокна				
Эпоксидный пластик	60	4	$\geq 1,8$	–
Эпоксидный пластик +65 % стеклоткани	500	~ 2,5	–	130

*Полиэтилен* имеет линейную структуру макромолекул  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ , его получают полимеризацией этилена. Свойства полиэтилена определяются условиями полимеризации. По плотности полиэтилен подразделяют на полиэтилен низкой плотности (0,918 – 0,930 г/см<sup>3</sup>), получаемый полимеризацией при высоком давлении (ПЭВД), и полиэтилен высокой плотности (0,946 – 0,970 г/см<sup>3</sup>), получаемый полимеризацией при низком давлении (ПЭНД). Чем выше плотность и степень кристалличности полиэтилена, тем выше его модуль упругости, прочность и теплостойкость. Полиэтилен низкой плотности имеет степень кристалличности до 55 – 65 %, полиэтилен высокой плотности – до 74 – 95 %.

Полиэтилен сочетает высокую прочность с пластичностью, имеет высокие диэлектрические свойства, химически стоек, нетоксичен, технологичен, стоит недорого. Однако недостатком полиэтилена является его склонность к старению под действием ультрафиолетовых лучей. Для защиты от светового старения в полиэтилен вводят 2 – 3 % сажи, при этом процессы старения замедляются в 30 раз.

*Полипропилен*  $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-)_n$  является производной пропилена. По сравнению с полиэтиленом полипропилен имеет более высокую прочность, жесткость, большую теплостойкость (+150 °С) и меньшую склонность к старению. Полипропилен легко подвергается механической обработке. Недостатком полимера является его невысокая морозостойкость (–20 °С).

*Полистирол*  $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-)_n$  – аморфный полимер, имеющий высокую твердость, жесткость, водостойкость, химическую стойкость к действию кислот, щелочей, солей; его используют для изготовления пористых материалов. Полистирол наиболее стоек к действию ионизирующего излучения. Недостаток полимера – повышенная хрупкость при ударных нагрузках, низкая теплостойкость (до 60 °С), склонность к старению, невысокая тепло- и морозостойкость.

Широкое распространение получили *газонаполненные пластики*, их подразделяют на *пенопласты* и *поропласты*. Плотность пенопластов менее  $0,3 \text{ г/см}^3$ , в них микроскопические ячейки, наполненные газом, не сообщаются между собой. В поропластах плотность выше, их ячейки сообщаются между собой. Газонаполненные пластики выпускаются на основе полистирола, поливинилхлорида и других полимеров. Пенопласт применяют в качестве теплоизоляционного материала.

В настоящее время в промышленности все чаще применяют армированные газонаполненные пластики, которые позволяют сочетать высокую прочность с малой плотностью. Их армируют листами более прочных газоненаполненных пластмасс и листами металлов.

*Полифторэтилен*  $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2-)_n$  – продукт полимеризации фторосодержащего полиэтилена и его производных. Наиболее широкое распространение получили фторопласт-4 и политетрафторэтилен (тефлон). Фторопласты характеризуются высокой плотностью, термо- и морозостойкостью, химической стойкостью, они негорючи. Фторопласт-4 обладает хорошими диэлектрическими свойствами. К недостаткам фторопластов относятся выделение токсичного фтора при высокой температуре, трудность переработки.

*Органическое стекло*  $((-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3))_n)$  – продукт полимеризации, характеризуется невысокой поверхностной твердостью, хорошо обрабатывается резанием, легко шлифуется и отличается стойкостью к действиям разбавленных щелочей и кислот. Недостатком является низкая поверхностная твердость.

*Полиамиды* включают в себя группу известных термопластов, молекула которых имеет структуру  $(-\text{NH}-(\text{CH}_2)_x-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_y-\text{CO}-)_n$ , где  $x, y = 2 - 10$ . В данную группу входят нейлон, капрон и другие термопластичные пластмассы. Полиамиды характеризуются высокой прочностью, способностью к поглощению вибрации, их можно использовать в качестве подшипников ввиду низкого коэффициента трения.

*Полиуретаны*  $(-\text{NH}-\text{C}(\text{O})\text{O}-)$  характеризуются высоким модулем упругости, износостойкостью, стойкостью к поглощению вибрационных нагрузок, стойкостью к воздействию атмосферы, масла, бензина.

*Поликарбонат* отличается высокой ударной вязкостью, которая близка ударной вязкости среднеуглеродистых сталей. Его с успехом используют в криогенной технике для работы в среде жидких газов. Широкое применение получили армированные поликарбонаты.

Область применения наиболее распространенных термопластов приведена в табл. 10.3 [29, с. 596].

*Таблица 10.3*

Области и условия применения некоторых термопластичных  
пластмасс

Название пластмассы	Интервал рабочих температур, °С	Область применения
Полиэтилен высокого давления	– 70... +70	Упаковка, ненагруженные детали машин и оборудования, футляры, покрытия
Полиэтилен низкого давления	– 70... +80	То же
Полистирол	– 40... +65	Оборудование радиотехники и фотографическое, электроизоляция, пенящиеся изоляционные материалы
Полипропилен	– 20... +130	Трубы, детали автомобилей, элементы холодильников, емкости, упаковка
Поливинилхлорид	– 40... +70	Химическое оборудование, трубы, профили, детали машин, элементы насосов и вентиляторов, упаковка, покрытие полов, оконные рамы и т.п.
Полиамид	– 60... +100	Детали машин, канаты, шнуры, одежда
Полиметилметакрилат (органическое стекло)	– 60... +100	Детали освещения и оптики, остекление в самолетостроении, на наземном и водном транспорте
Поликарбонаты	– 100... +135	Точные детали машин и аппаратуры, радио- и электротехника, фотографические пленки и др.
Политетрафторэтилен (тефлон)	– 269... +260	Химическая, электротехническая, машиностроительная промышленность

### 10.1.3. Термореактивные полимерные материалы

Основу терморезактивных полимеров (реактопластов) составляет химически затвердевающая терморезактивная смола, которая является связующим веществом. Реактопласты имеют сетчатую структуру, поэтому при нагреве не плавятся, не взаимодействуют с топливом и со смазочными материалами, устойчивы против старения.

В состав терморезактивных пластмасс входят наполнители, ускорители или замедлители, пластификаторы, отвердители и растворители. В качестве наполнителей используют порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы. Преимуществами наполненных реактопластов являются большая стабильность механических свойств, высокая удельная жесткость и удельная прочность, они более надежны.

В зависимости от формы частиц наполнителя реактопласты подразделяют на порошковые, волокнистые и слоистые терморезактивные пластмассы.

**Пластмассы с порошковыми наполнителями.** К реактопластам с порошковым наполнителем относятся *фенопласты* и *аминопласты*. В качестве наполнителя используют графит, кварц, тальк и др. Пластмассы с порошковыми наполнителями отличаются изотропией свойств, удовлетворительными электроизоляционными показателями, невысокой прочностью. Недостаток порошковых пластмасс заключается в пониженной ударной вязкости.

**Пластмассы с волокнистыми наполнителями.** К данной группе относятся волокниты, асболокниты, стекловолокниты.

*Волокниты* – это композиции, в которые в качестве наполнителя добавляют волокна в виде очесов хлопка, пропитанного формальдегидным связующим. Их применяют для изготовления деталей с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, для деталей, работающих на изгиб и кручение (втулки, стойки, шкивы, маховики, фланцы и др.).

*Асболокниты* – пластмассы, в которых в качестве наполнителя используют асбест, а связующим является фенолформальдегидная смола. Они обладают хорошими антифрикционными свойствами, повышенной теплостойкостью (свыше 200 °С), устойчивостью к кислым средам. Асболокниты уступают по водостойкости и диэлектрической проницаемости реактопластам с порошковым наполнителем.

*Стекловолокниты (ориентированные и неориентированные)* – композиции, которые содержат стекловолокнистый наполнитель (не-

прерывное или короткое стекловолокно), связующим является синтетическая смола. Стекловолокниты стойки к воздействию ультрафиолетовых лучей и ионизирующему излучению, негорючи, химически стойки, отличаются стабильными размерами.

**Слоистые пластики.** Листовые наполнители, уложенные слоями, придают пластику анизотропность механических, физических и диэлектрических свойств. Свойства слоистых пластиков зависят от соотношения компонентов, характера подготовки наполнителя, режимов прессования и других факторов. Физические и диэлектрические свойства слоистых пластиков зависят от типа полимерного связующего.

*Гетинакс* – пластик на основе бумаги и модифицированных фенольных, анилиноформальдегидных и карбамидных смол, устойчив к действию химикатов и растворителей. Гетинакс применяется для электротехнических и декоративных целей.

*Текстолит* – пластик, в котором в качестве наполнителя используются хлопчатобумажные ткани, связующее – термореактивные смолы. Текстолит отличается наибольшей способностью поглощать вибрацию, поглощать шумы, хорошо сопротивляться раскаливанию. Недостатком являются невысокие рабочие температуры (до 90 °С).

*Древесно-слоистые пластики (ДСП)* – материал, состоящий из тонких листов древесного шпона, пропитанных фенолоформальдегидными смолами и спрессованных в виде плит и листов. ДСП отличаются большей плотностью, высокими механическими свойствами, низким коэффициентом трения.

Механические свойства и максимальная температура эксплуатации без нагрузки наиболее распространенных реактопластов приведены в табл. 10.4 [17, с. 393].

*Таблица 10.4*

## Свойства термореактивных полимерных материалов

Материал	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$KС$ , кДж/м <sup>2</sup>	Максимальная температура эксплуатации (без нагрузки), °С
Термореактивные полимеры без наполнителей:				
фенолоформальдегидные	15 – 35	1 – 5	< 1	200
полиэфирные	42 – 70	2	< 1	95 – 120
эпоксидные	28 – 70	3 – 6	< 1	150 – 175
кремнийорганические	22 – 42	5 – 10	< 1	350
Порошковые пластмассы	30 – 60	1 – 3	0,5 – 5	100 – 200
Волокниты	30 – 90	1 – 3	10 – 20	120 – 140
Гетинаксы	60 – 70	–	4 – 5	125
Текстолиты	65 – 100	1 – 3	20 – 35	90 – 105
Стеклотекстолиты	200 – 600	1 – 3	50 – 200	200 – 400
Пористые пластмассы	0,5 – 2,5	–	~ 1	–

### 10.2. Резиновые материалы

*Резинами* называются эластичные многокомпонентные материалы на основе каучука. Резина как технический материал отличается от других материалов высокими эластичными свойствами, которые присущи главному исходному компоненту резины – каучуку.

Резина представляет собой искусственный материал, получаемый специальной обработкой (вулканизацией) смеси каучука (натурального или синтетического) с различными добавками.

Вулканизация – превращение каучука в резину, осуществляемое под действием вулканизирующих веществ (агентов), например серы, или под действием ионизирующей радиации.

В процессе вулканизации линейные молекулы каучука соединяются поперечными химическими связями. Молекулярная структура резины представляет собой объемную сетку, способную к высокоэластичным деформациям благодаря невысокой плотности поперечных связей. По сравнению с каучуком резина прочнее, не склонна к необратимым деформациям под нагрузкой и не растворяется, а лишь набухает в тех растворителях, в которых растворим каучук.

Резина способна к очень большим деформациям (относительное

удлинение достигает 1000 %), которые почти полностью обратимы. Следует отметить, что при нормальной температуре резина находится в высокоэластическом состоянии и ее эластические свойства сохраняются в широком диапазоне температур. Для улучшения физико-механических свойств каучуков вводят различные добавки.

### 10.2.1. Состав резиновых материалов

Основой любой резины является каучук натуральный (НК) или синтетический (СК), который и будет определять основные свойства резинового материала. Добавки (ингредиенты) вводятся с целью улучшения физико-механических свойств каучуков.

В качестве добавок при производстве резиновых материалов используются вулканизирующие вещества, ускорители процесса вулканизации, активаторы ускорителей, наполнители, противостарители, пластификаторы и красители.

*Вулканизирующие вещества (агенты)* являются обязательными компонентами резиновых материалов. Наряду с серой в качестве вулканизаторов применяются селен и тиурам.

Тиурам – это органическое сернистое соединение, которое в отличие от серы не взаимодействует с медью. Тиурам используют для получения резиновых материалов для электротехнической промышленности.

В качестве *ускорителей процесса вулканизации* используются полисульфиды, оксиды свинца, магния и т.п.; они влияют как на режим вулканизации, так и на физико-механические свойства вулканизаторов.

В присутствии оксидов некоторых металлов (*активаторов ускорителей*), например оксида цинка, ускорители проявляют свою наибольшую активность.

*Наполнители* используют в производстве резиновых материалов для снижения стоимости и придания им необходимых физико-механических и потребительских свойств. Наполнители по воздействию на каучук подразделяются на неактивные (инертные) и активные (усиливающие). В качестве неактивных наполнителей применяют мел, тальк и др.; их используют с целью удешевления продукции. Для повышения механических свойств в состав резин вводят активные наполнители: сажу, оксид цинка и др.



В качестве наполнителя в состав резиновой смеси часто вводят *реагент*, который является продуктом переработки старых резиновых изделий и отходов резинового производства. Введение реагента не только позволяет повысить качество резины, но и снижает ее склонность к старению.

*Пластификаторы (мягчители)* облегчают переработку резиновой смеси, увеличивают физико-механические свойства, повышают морозостойкость. В качестве пластификаторов применяют парафин, вазелин, канифоль, растительные масла и др.

*Противостарители (антиоксиданты)* замедляют процесс старения и обеспечивают потребительские свойства резиновых материалов. Различают противостарители химического и физического действия. Противостарители химического действия (альдоль, неозон Д и др.) задерживают окисление каучука в результате окисления их самих или за счет разрушения образующихся перекисей каучука. Противостарители физического действия (парафин, воск и др.) применяются реже, они образуют поверхностные защитные пленки.

*Красители* вводят в состав резиновых смесей для улучшения эксплуатационных свойств.

### **10.2.2. Классификация резиновых материалов**

Резиновые материалы классифицируют по видам сырья и наполнителя (порошковые и ткани), степени упрочнения макромолекул и пористости (мягкие, жесткие, пористые и пастообразные), технологическим способам переработки (выдавливание, прессование и литье), типам теплового старения и изменению объема после пребывания в нефтяной жидкости.

По назначению резиновые материалы подразделяются на резины общего назначения и резины специализированного назначения.

К группе резин общего назначения относят натуральный каучук (НК), синтетический каучук бутадиеновый (СКБ), бутадиенстирольный каучук (СКС), синтетический каучук изопреновый (СКИ).

Резины специализированного назначения (специальные резины) включают в себя бензомаслостойкие, теплостойкие, морозостойкие, теплехимически-стойкие, светоозоностойкие, электротехнические, износостойкие резины.

Основные типы резин и характеристики каучуков приведены в

табл. 10.5 [29, с. 611].

Таблица 10.5

Основные типы резин и характеристики каучуков

Вид резины	Вид каучука	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Удлинение после разрыва, %	Область рабочих температур, °С
Общего назначения	Натуральный (НК)	0,91	29	650	32	-50...+130
	Бутадиеновый синтетический (СКБ)	0,91	17	470	60	-50...+150
	Изопреновый синтетический (СКИ)	0,91	30	700	28	-50...+130
Специализированного назначения: бензомаслостойкая	Бутадиен-нитрильный (СКН)	0,96	26	600	20	-40...+170
теплостойкая	Силоксановый (СКТ)	1,85	6	250	4	-70...+300
теплохимическистойкая	Фторкаучук (СКФ)	1,85	17	200	8	-40...+300
морозостойкая	Бутадиенметилстирольный (СКМС) и бутадиенстирольный (СКС)	0,94	31	800	16	-80...+130

### 10.3. Керамические материалы

Керамика – неорганические поликристаллические материалы, получаемые из сформированных минеральных масс (глины и их смеси с минеральными добавками) в процессе высокотемпературного (1200 – 2500 °С) обжига. Керамика – это большая группа неметаллических материалов разного химического состава, объединяемая по общности технологий.

#### 10.3.1. Получение керамических материалов, их классификация

Технология керамики заключается в тонком измельчении исходного сырья, формировании изделий методами обработки давлением или по литейной технологии и последующих сушке и обжиге. При

этом используются главным образом каолины и глины, а также и другие виды минерального сырья, например чистые оксиды.

При нагреве глины во время спекания в ней начинают последовательно происходить следующие химические и физико-химические процессы, приводящие к полному и необратимому изменению ее структуры:

- удаление химически связанной воды (500 – 600 °С);
- разложение обезвоженной глины на оксиды (800 – 900 °С);
- образование новых водостойких и тугоплавких минералов (1000 – 1200 °С);
- образование некоторого количества расплава из легкоплавких компонентов глины (900 – 1200 °С);
- образование прочного камневидного материала за счет связывания твердых частиц образовавшимся расплавом.

При спекании отдельные частицы порошков превращаются в монолит, при этом формируются окончательные свойства керамических материалов. Процесс спекания сопровождается уменьшением пористости и усадкой.

Керамику классифицируют по вещественному составу, составу кристаллической фазы, структуре и назначению.

По вещественному составу разновидностями керамики являются фаянс, полуфарфор, фарфор, терракота, керметы, корундовая и сверхтвердая керамика и каменная масса.

По составу кристаллической фазы различают керамику из чистых оксидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BeO}$  и др.) и бескислородную ( $\text{SiC}$ ,  $\text{MoSi}_2$ ,  $\text{TiB}_2$  и др.).

По структуре керамика делится на плотную (кирпич, блоки, черепица и др.) и пористую (канализационные трубы, плитка для полов и др.).

По назначению керамику делят на конструкционную, инструментальную, техническую и бытовую.

### **10.3.2. Свойства и области применения керамических**

## материалов

Керамические материалы обладают высокой жаропрочностью, малой теплопроводностью, очень высокой коррозионной стойкостью. Керамика с успехом конкурирует с металлическими материалами в условиях работы при высоких температурах.

Основными недостатками керамических материалов являются их хрупкость и сложность обработки. Керамика чувствительна к надрезам, механическим или термическим ударам, циклическим нагрузкам.

Характеристика основных видов керамики приведена в табл. 10.6 [29, с. 643].

Таблица 10.6

### Характеристика и области применения основных видов керамики

Тип керамики	Характерные свойства	Применение	Основные соединения
Электрокерамика	Электропроводность, электроизоляционные, диэлектрические, пьезоэлектрические свойства	Интегральные схемы, конденсаторы, вибраторы, зажигатели, нагреватели, термисторы, транзисторы, фильтры, солнечные батареи, твердые электролиты	BeO, MgO, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZnO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , SiC, B <sub>4</sub> C, TiC, титанаты, CdS, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Магнетокерамика	Магнитные свойства	Головки магнитной записи, магнитные носители, магниты	Магнитомягкие и магнитотвердые ферриты
Оптокерамика	Прозрачность, поляризация, флуоресценция	Лампы высокого давления, ИК-прозрачные окна, лазерные материалы, световоды, элементы оптической памяти, экраны дисплеев, модуляторы	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , ThO <sub>2</sub> , ZnS, CdS

Окончание табл. 10.6

Тип керамики	Характерные свойства	Применение	Основные соединения
Хемоке-рамика	Абсорбционная и адсорбционная способность, каталитическая активность, коррозионная стойкость	Сорбенты, катализаторы и их носители, электроды (например топливных элементов), датчики влажности газов, элементы химических реакторов	ZnO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SnO, SiO <sub>2</sub> , MgO, BaS, CeS, TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiC, титаниды
Биокера-	Биологическая со-	Протезы зубов, суставов	Системы окси-

мика	вместимость, стойкость к биокоррозии		ДОВ
Термокерамика	Жаропрочность, жаростойкость, огнеупорность, теплопроводность, коэффициент термического расширения (КТР), теплоемкость	Огнеупоры, тепловые трубы, футеровка высокотемпературных реакторов, электроды для металлургии, теплообменники, теплозащита	SiC, TiC, B <sub>4</sub> C, TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , BeS, CeS, BeO, MgO, ZrO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , композиты
Механо-керамика	Твердость, прочность, модуль упругости, вязкость разрушения, износостойкость, триботехнические свойства, КТР, термостойкость	Керамика для тепловых двигателей, уплотнительная, антифрикционная и фрикционная, режущий инструмент, пресс-инструмент, направляющие и другие износостойкие детали	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , ZrO <sub>2</sub> , SiC, TiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> , TiC, TiN, WC, B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , композиты
Ядерная керамика	Радиационная стойкость, жаропрочность, жаростойкость, сечение захвата нейтронов, огнеупорность, радиоактивность	Ядерное горючее, футеровка реакторов, экранирующие материалы, поглотители излучения, поглотители нейтронов	UO, UO-PuO, UC, US, ThS, SiC, B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BeO
Сверхпроводящая керамика	Электропроводность	Линии электропередач, МГД-генераторы, накопители энергии, интегральные схемы, железнодорожный транспорт на магнитной подвеске, электромобили	Оксидные системы: La – Ba – Cu – O La – Sr – Cu – O Y – Ba – Cu – O

Основные области применения керамических материалов – изготовление режущего инструмента, деталей двигателей внутреннего сгорания.

По комплексу свойств (твердости, износостойкости, химической инертности к большинству металлов в процессе резания) керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы и сплавы (табл. 10.7 [29, с. 648]). Применение керамических инструментальных материалов позволяет повысить скорость механической обработки стали и чугуна (табл. 10.8 [29, с. 648]).

Таблица 10.7

## Сравнительные значения свойств инструментальных материалов

Свойство	Быстрорежущая сталь	Твердый сплав	Керамика на основе $Al_2O_3$
Твердость по Виккерсу, HV	850	1700	2100
Температура размягчения, °С	550	1100	1500
Температура начала образования окалины, °С	800	800	–

Таблица 10.8

## Сравнительные значения скоростей резания при точении керамических инструментов и инструментов из твердого сплава

Обрабатываемый материал	Твердость	Скорость резания, м/мин, инструментом, оснащенным	
		керамикой	твердым сплавом
Углеродистая сталь	150 – 250 НВ	250 – 300	100 – 200
Легированная сталь	46 – 56 HRC	100 – 160	25 – 65
Серый чугун	120 – 240 НВ	300 – 400	100 – 200
Высокопрочный чугун	160 – 300 НВ	200	50 – 100

В настоящее время широко применяют керамику для изготовления дизельных адиабатных поршневых двигателей, имеющих керамическую изоляцию, и высокотемпературных газотурбинных двигателей. При этом обеспечиваются более высокий КПД двигателей за счет повышения рабочей температуры, более низкая плотность и теплостойкость, повышенная термо- и износостойкость, снижаются (или полностью отсутствуют) расходы на систему охлаждения.

### 10.4. Древесные материалы

Роль древесины как строительного материала весьма велика. Широко применяется древесина и в машиностроении: детали конструкции вагонов, борта, пол, модельная оснастка, тара и т.п.

Древесина – это природный материал растительного происхождения, в ее состав входят целлюлоза ( $C_6H_{10}O_5$ ) и другие компоненты. Существенный компонент древесины – вода. Различают связанную и

свободную воду. Вода (25 – 30 % влаги), содержащаяся в древесине в связанном виде, трудно поддается удалению, а оставшаяся вода, заполняющая межклеточное пространство, легко удаляется во время сушки. При длительном хранении на складе насыщение древесины водой стабилизируется. При этом влажность древесины, находящейся на воздухе, в зависимости от климата и времени года составляет 15 – 20 %. Такая древесина, высушенная на воздухе, называется воздушно-сухой.

Плотность древесины зависит от степени её влажности и пористости. Различают плотность свежесрубленной, воздушно-сухой и полностью сухой древесины. В зависимости от плотности в воздушно-сухом состоянии различают шесть классов древесины (табл. 10.9 [29, с. 628]).

*Таблица 10.9*

Плотность древесины в воздушно-сухом состоянии

Класс древесины	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Породы
Очень тяжелая	> 0,80	Граб, тис, гваяк, эбен, эвкалипт
Тяжелая	0,71 – 0,80	Белая акация (акация), бук, дуб, ясень, орех, груша, слива
Умеренно тяжелая	0,61 – 0,70	Береза, клен, явор (белый клен), лиственница, вяз
Легкая	0,51 – 0,60	Каштан, красное дерево
Умеренно легкая	0,41 – 0,5	Сосна обыкновенная, ель, пихта, липа, ольха, осина, кедр, тик
Очень легкая	< 0,40	Тополь, белая сосна

Механические свойства древесины зависят от направления действия силы по отношению к волокнам; различают прочность древесины вдоль и поперек волокна. Прочность древесины при сжатии вдоль волокна в три раза меньше, чем при растяжении. Древесина с большей плотностью имеет большую твердость.

Твердость древесины – важная характеристика, определяющая пригодность материала для использования в промышленных целях. Классификация древесины по твердости приведена в табл. 10.10 [29, с. 628].

Достоинствами древесины являются обрабатываемость резанием, хорошая сопротивляемость ударным и вибрационным нагрузкам,

малая теплопроводность, высокая стойкость к ряду масел, кислот, солей, малый коэффициент температурного расширения, возможность скрепления с помощью склеивания, гвоздей, способность удерживать шурупы, гвозди и другие свойства.

Недостатки древесины – гигроскопичность, изменяющая размеры, форму и прочность деревянных изделий, гниение и возгораемость.

Таблица 10.10

#### Классификация древесины по твердости

Характеристика твердости	Порода дерева	Твердость, НВ	Предел прочности на растяжение (вдоль волокна), МПа
Очень мягкая	Верба, бальза, тополь, осина, пихта, ель, белая сосна	До 3,5	80 – 100
Мягкая	Береза, ольха, явор (белый клен), липа, лиственница, обыкновенная сосна, красное дерево, платан	3,6 – 4,9	90 – 140
Средней твердости	Вяз, орех, черная сосна	5,0 – 5,9	90 – 140
Твердая	Дуб, сень, яблоня, груша, вишня, тик	6,0 – 6,5	100 – 140
Очень твердая	Дуб, граб, бук, тис, белая акация (акация), палисандр	6,6 – 14,6	120 – 160
Твердая, как кость	Эбонитовое дерево, гваяковое дерево, кокос	Более 15,0	–

При использовании древесных материалов необходимо учитывать пороки древесины, т.е. отклонения от нормального строения, а также повреждения, которые оказывают влияние на ее свойства. В зависимости от причин появления пороки можно условно разделить на следующие группы:

- пороки, зависящие от неправильного роста древесины (сучки, трещины, пороки формы ствола и строения древесины, химические окраски);
- повреждения древесины грибками;
- биологические повреждения древесины насекомыми (червоточина), паразитными растениями и птицами;



– механические повреждения, инородные включения, пороки обработки и покоробленности.

Искусственные материалы, получаемые из древесины путем распиливания, измельчения волокон, склеивания и других процессов, называются древесными изделиями. Их изготавливают по наиболее распространенным технологиям в следующих видах:

– слоистые материалы (фанеры), получают путем склеивания слоев шпона под действием давления и тепла;

– древесностружечные плиты, получают путем горячего прессования древесной стружки и клея;

– древесноволокнистые плиты, получают путем склеивания или горячего прессования древесных волокон;

– облегченные плиты (фибролит), получают путем прессования длинных стружек и минерального связующего вещества.

### **Контрольные вопросы**

1. Что относится к полимерным материалам? Особенности свойств полимеров.
2. Что такое наполнители пластмасс, их назначение? Какие наполнители вы знаете?
3. С какой целью вводят отвердители пластмассы? Какие добавки вводят в состав композиций?
4. Достоинства и недостатки пластмасс. В чем преимущества пластмасс по сравнению с металлическими материалами?
5. Дайте классификацию пластмасс? В чем отличие термопластичных пластмасс от терморезистивных?
6. Дайте характеристику свойствам и области применения термопластических пластмасс.
7. Дайте характеристику свойствам и области применения терморезистивных пластмасс.
8. Что представляют собой резины? В чем сущность процесса вулканизации; как изменяются свойства резины после вулканизации?
9. Дайте описание составу, свойствам и области применения резиновых материалов. Как классифицируют резины?
10. Что представляет собой керамика? Какова технология получения керамики?

11. Дайте описание составу, свойствам и области применения керамических материалов. Как классифицируют керамику?
12. Что представляет собой древесина? Опишите достоинства и недостатки древесных материалов.
13. Какова классификация древесины по твердости?
14. Что представляют собой пороки древесины? Приведите примеры.
15. Какие виды древесных изделий вы знаете?

## Глава 11. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композиционные материалы или композиты – это сложные материалы, в состав которых вводят сильно отличающиеся по свойствам нерастворимые или малорастворимые один в другом компоненты, разделенные в материале ярко выраженной границей. Спектр свойств, которые присущи композиционным материалам, невозможно получить при использовании обычных материалов. Их применение дает возможность создать ранее недоступные принципиально новые конструкции.

Важными характеристиками материалов, работающих в этих условиях, являются удельная прочность  $\sigma_b / \gamma g$  и удельная жесткость  $E / \gamma g$ , где  $\sigma_b$  – временное сопротивление,  $E$  – модуль нормальной упругости,  $\gamma$  – плотность материала,  $g$  – ускорение свободного падения. По удельной прочности и жесткости композиционные материалы превосходят все известные конструкционные сплавы.

Различают *искусственные композиты*, уровень свойств которых реализуется подбором компонентов, и *естественные композиты*, получаемые при естественном структурировании. Искусственные композиты могут иметь разную матрицу: металлическую (сплав или монометалл) и неметаллическую (полимерную, углеродную, керамическую). Разработаны также и полиматричные материалы, в которых чередующиеся слои матрицы могут иметь различный состав.

Компоненты, равномерно распределенные в матрице, называются *армирующими наполнителями* или *упрочнителями*. В зависимости от формы наполнителя композиты делят на *дисперсно-упрочненные*, *волокнистые* и *слоистые*.

В дисперсно-упрочненных материалах равноосные частицы на-

полнителя ориентированы беспорядочно, в волокнистых оси волокон могут быть ориентированы вдоль одного из направлений (однонаправленные композиты), в нескольких направлениях (двух или более) или без ориентации в определенном направлении (неориентированные композиты). В слоистых композитах слои не обязательно должны быть сплошными пластинами, они могут быть заполнены расположенными упорядоченно в плоскости частицами либо волокнами, уложенными упорядоченно в параллельных плоскостях. Иногда в одном композиционном материале используют несколько различных наполнителей. Такие композиционные материалы называют *полиармированными*.

### **11.1. Искусственные композиционные материалы с металлической матрицей**

*В дисперсно-упрочненных композиционных материалах* наполнителями служат частицы оксидов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BeO}$ ), карбидов ( $\text{SiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ), нитридов ( $\text{BN}$ ), боридов и других соединений. Обычно такие материалы изготавливают порошковым методом.

В промышленности используются и дисперсно-упрочненные жаропрочные композиты с матрицами на титановой, никелевой и алюминиевой основах.

Упрочнителями *волокнистых композиционных материалов* являются волокна неметаллических материалов ( $\text{C}$ ,  $\text{B}$ ), тугоплавких соединений ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ) или проволока из тугоплавких металлов ( $\text{W}$ ,  $\text{Mo}$ ). Диаметр волокон может быть  $1 \dots 50$  мкм (нитевидные монокристаллы), а диаметр проволоки обычно составляет доли миллиметра. Длина волокон в десятки раз превышает их диаметр.

В промышленности волокнистые композиты используются большей частью для изготовления деталей простой формы (пластин, клиньев, колец и т.п.). Нашли применение волокнистые композиты с алюминиевой матрицей, армированной проволокой из коррозионно-стойких сталей или борными и углеродными волокнами.

### **11.2. Искусственные композиционные материалы**

## **с неметаллической матрицей**

В качестве неметаллических матриц используют полимерные, углеродные и керамические материалы. Из полимерных матриц наибольшее распространение получили эпоксидная, фенолоформальдегидная и полиамидная. Угольные матрицы получают из синтетических полимеров, подвергнутых пиролизу. Свойства матрицы определяют прочность композиции при сдвиге и сжатии и сопротивление усталостному разрушению.

Упрочнителями служат волокна: стеклянные, углеродные, борные, органические, на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и др.), обладающие высокой прочностью и жесткостью. Армирующие материалы могут быть в виде волокон, жгутов, нитей, лент, многослойных тканей.

По виду упрочнителя композиционные материалы подразделяют на стекловолокниты, карбоволокниты, бороволокниты и органоволокниты.

В слоистых материалах волокна, нити и ленты, пропитанные связующими, укладывают параллельно друг другу в плоскости укладки. Плоскостные слои собирают в пластины. Можно создавать материалы как с изотропными, так и с анизотропными свойствами. Можно укладывать волокна под разными углами, варьируя свойства композитов.

### **11.3. Естественные композиционные материалы**

Естественные композиционные материалы получают в результате выделения волокон, пластин или частиц упрочняющей фазы в процессе естественного структурообразования. В естественных композитах упрочняющая фаза кристаллизуется в виде иголок (нитевидных кристаллов), стерженьков, пластинок или зернистых включений. По виду структура этих материалов мало отличается от структуры искусственных волокнистых и слоистых композиций, но имеет ряд важных особенностей.

В естественных композициях упрочнители по механическим свойствам почти не отличаются от нитевидных кристаллов («усов»), имеющих уникальные механические свойства. Другими особенностями являются исключительно хорошее сопряжение матрицы с упроч-

нителем и высокая термодинамическая стабильность структуры. Поэтому эффект композиционного упрочнения в таких материалах сохраняется при нагревании до высоких температур (вплоть до  $0,9T_{пл}$ ). Высокая стабильность структуры этих материалов при рабочих температурах обеспечивает значительное сопротивление ползучести и выгодно отличает их от традиционных жаропрочных сплавов.

Естественные композиционные материалы можно классифицировать по нескольким признакам: характеру матричной и упрочняющей фаз, геометрической форме и расположению включений упрочняющей фазы, способу получения композитов.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое композит? В чем особенности естественных композиционных материалов?
2. Как классифицируются композиционные материалы?
3. Что представляют собой искусственные композиционные материалы с металлической матрицей?
4. Что представляют собой искусственные композиционные материалы с неметаллической матрицей?
5. Что представляют собой естественные композиционные материалы?

## **Глава 12. НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Наноструктурные материалы и нанотехнологии – одни из самых перспективных быстроразвивающихся направлений современной науки.

К наноструктурным материалам (нанокристаллическим, нанофазным, наноразмерным и т.п.) относятся объекты с характерным структурным размером менее 100 нм. Особое строение и свойства малых атомных агрегаций представляют значительный научный интерес, так как являются промежуточными между строением и свойствами изолированных атомов и массивного (объемного) твердого тела.

### **12.1. Свойства и область применения наноматериалов**

Малый размер зерна приводит к появлению уникальных физических, химических, механических и других свойств, что привлекает внимание широкого круга специалистов в области материаловедения, физики и химии твердого тела, биологии и перспективных технологий. Формирование нанокристаллической структуры позволяет существенно изменить физические свойства материала: повысить предел текучести и прочности, теплоемкость, электросопротивление, диффузионную способность материала, понизить его упругость, температуру магнитных переходов и т.п. Изменяются и свойства других структурных уровней: атомного, электронного (снижается работа выхода электронов) и ядерного.

Необычные свойства наноматериалов обусловлены как особенностями отдельных частиц (кристаллитов), так и их коллективным поведением, зависящим от характера взаимодействия между наночастицами. Такие эффекты появляются, когда размер кристаллических зерен не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо наблюдаются, когда размер зерен менее 10 нм. Таким образом, изучение свойств сверхмелкозернистых материалов требует учета не только их состава и структуры, но и дисперсности.

Отличие свойств малых частиц от свойств массивного материала известно уже достаточно давно и используется в разных областях техники. Примерами могут служить широко применяемые аэрозоли, получение цветных стекол благодаря окрашиванию их коллоидными частицами металлов, суспензии металлических наночастиц размером от 30 нм используют как присадки к моторным маслам для восстановления изношенных деталей автомобильных и других двигателей непосредственно в процессе работы.

### **12.2. Наноструктурные элементы**

**Фуллерены** – новая форма существования углерода в природе наряду с давно известными алмазом и графитом была открыта в 1985 году при попытках астрофизиков объяснить спектры межзвездной

пыли. Молекула фуллерена  $C_{60}$  содержит фрагменты с шестикратной и пятикратной симметрией.

Фуллерены могут быть не только чисто углеродными, но и наполненными. Наполнением могут быть молекулы инертных или других газов, небольшие органические и неорганические молекулы, атомы металлов (щелочных, щелочноземельных и др.).

**Фуллериты** – кристаллы, образованные молекулами  $C_{60}$ , имеющие гранцентрированную кубическую решетку со слабыми межмолекулярными связями. В этом кристалле имеются октаэдрические и тетраэдрические полости, в которых могут находиться посторонние атомы.

Если октаэдрические полости заполнены ионами щелочных металлов (калием, рубидием, цезием), то при температурах ниже комнатной структура этих веществ перестраивается, и образуется новый полимерный материал. Если заполнить также и тетраэдрические полости, то образуется сверхпроводящий материал с критической температурой 20...40 К. Существуют фуллериты и с другими присадками, придающими материалу уникальные свойства.

**Углеродные нанотрубки** – цилиндрические молекулы с гигантским числом атомов углерода. Они представляют собой графитовые сетки, свернутые в трубки, и могут быть открытыми и закрытыми, одностенными, двухстенными и многостенными. На поверхности трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников, являющихся ячейками в плоском графитовом листе. На концах закрытых нанотрубок помимо шестиугольных ячеек присутствуют пятиугольные. Правильные пятиугольники (семиугольники) являются локальными дефектами в графитовом листе, позволяющими получить его кривизну. Геометрия этих наноконструкций определяет их уникальные физические и химические свойства и, следовательно, возможность существования принципиально новых материалов и технологий производства. Для производства нанотрубок используют специальные катализаторы.

Однослойные нанотрубки имеют размеры 1 – 10 нм в диаметре и длину 10 – 1000 нм и более, а многослойные имеют диаметры и длину в 10 – 100 раз больше.

В углеродных нанотрубках возможно различное наполнение. Помимо перечисленных в качестве наполнителей используются фуллерены меньшего диаметра.

Углеродные нанотрубки могут быть проводниками или полупроводниками.

**Нанокластеры.** К множеству нанообъектов относят сверхмалые частицы – нанокластеры, состоящие из десятков, сотен или тысяч атомов. Свойства кластеров кардинально отличаются от свойств макроскопических объемов материалов того же состава. Из нанокластеров, как из крупных строительных блоков, можно целенаправленно конструировать новые материалы с заранее заданными свойствами и использовать их в каталитических реакциях для разделения газовых смесей и хранения газов. Большой интерес представляют магнитные кластеры, состоящие из атомов переходных металлов, лантаноидов, актиноидов. Эти кластеры обладают собственным магнитным моментом, что позволяет управлять их свойствами с помощью внешнего магнитного поля.

### **Контрольные вопросы**

1. Что представляют собой наноструктурные материалы? Каковы их особенности?
2. Что такое фуллерены и фуллериты?
3. Что представляют собой нанотрубки и нанокластеры?
4. Назовите свойства и область применения наноструктурных материалов.



## Раздел III. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

### Глава 13. НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЙ

Для общей оценки качества изделия (машины) большое значение имеет его *работоспособность*. Под работоспособностью понимается такое состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. В связи с этим одна из основных характеристик современных машин – их надежность.

*Надежность* – свойство изделия сохранять во времени свою работоспособность. *Отказ* – это событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия. Время работы изделия до отказа, выраженное в часах, называется *наработкой до отказа* и по своему существу является случайной величиной.

*Срок службы* изделия, определяемый его наработкой до достижения предельного регламентированного состояния (предельный износ и т.п.), называется *ресурсом*.

*Ресурс* в отработанных часах или допустимый срок службы изделия (в календарных часах) в отличие от наработки до отказа является неслучайной, детерминированной величиной (регламентированное время работы изделия, определяющее его долговечность).

*Надежность изделия* – обобщенное свойство, которое включает в себя понятия безотказности и долговечности.

*Безотказность* – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого периода времени или некоторой наработки. При этом предполагается самостоятельная непрерывная работа изделия без каких-либо вмешательств для поддержания работоспособности (т.е. без регулировки и ремонта).

*Долговечность* – свойство изделия сохранять работоспособность до наступления предельного состояния, т. е. в течение всего периода эксплуатации при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

### 13.1. О проблеме надежности конструкционного материала

Одна из основных проблем машиностроения – проблема надежности и долговечности. Решение этой проблемы позволяет не только сохранить требуемые качественные показатели в течение всего периода эксплуатации, но и увеличить ресурс изделия.

Надежность деталей машин определяется множеством факторов: характером нагрузки, распределением и частотой перегрузок, влиянием коррозионной среды, наличием абразивных частиц, концентрацией напряжений и другими факторами, с одной стороны, составом, качеством, состоянием, предшествующей технологией обработки материала и т.п., с другой стороны.

Можно считать, что надежность деталей  $R_{дет}$  определяется как сочетание двух групп факторов и может быть выражена произведением надежности конструкции  $R_k$  на надежность материала  $R_M$ :

$$R_{дет} = R_k R_M .$$

В то время как проблема надежности конструкции основательно разработана в цикле дисциплины технической механики, роль надежности материала пока еще не получила достаточного освещения.

Одна из первых удачных попыток оценить надежность материала была сделана Д. И. Береновым, который предложил ввести понятие работоспособности (а по существу – статической вязкости материала).

Надежность материала по Беренову определяется сочетанием прочности и пластичности:

$$\Delta = k\sigma_{вр}\delta,$$

где  $k$  – коэффициент заполнения диаграммы  $\sigma - \varepsilon$ ,

$\sigma_{вр}$  – предел прочности при растяжении,

$\varepsilon$  – относительное удлинение.

Но с повышением прочностных характеристик (предела прочности при растяжении  $\sigma_{вр}$ , твердости НВ и т.д.) наблюдается снижение показателей пластичности и вязкости (относительного удлинения  $\delta$ , относительного сужения  $\psi$ , ударной вязкости КСV и т.д.).

При выборе металлов и сплавов необходимо учитывать механические, технологические, физические, химические и служебные (эксплуатационные) свойства.

Известные способы термической обработки позволяют перераспределить противоположные механические свойства, оставляя материал на определенном «уровне прочности». Термическая обработка повышает работоспособность металлического материала в определенных силовых и температурных условиях, но обычно неспособна повышать одновременно прочность и пластичность. Это объясняется тем, что прочность металла определяется, главным образом, сопротивлением движению дислокаций. А оно, как известно, находится в прямой зависимости от механизмов торможения дислокаций (тормоз порогов, тормоз замков, облака Коттрелла, тормоз дисперсионных частиц, напряжения третьего рода и механизм Петча). Способность же дислокаций свободно перемещаться и составляет в основном сущность пластичности на субмикроскопическом уровне металла (типа зерен феррита в ферритно-перлитной структуре), повышает прочность, как, например в сорбите, но исключает «пластические шарниры». Закалка вызывает рост напряжений третьего рода, а отпуск на троостит или сорбит ввиду дисперсности структуры приводит в действие механизм дисперсионного твердения. Вместе закалка с отпуском повышают гомогенность, но пластичность металла невысока, так как в его структуре отсутствует свободный феррит. Отжиг и нормализация дают гетерогенную перлитно-ферритную структуру, но зерна при этом расположены хаотично (хотя и равномерно), что и дает усреднение, «посредственные» свойства. Видно, что при этом невозможно одновременно достигнуть повышения и прочности, и пластичности. А именно такое комплексное повышение характеристик прочности и пластичности наиболее эффективно для обеспечения надежной работы конструкционного материала, а следовательно, и самого изделия.

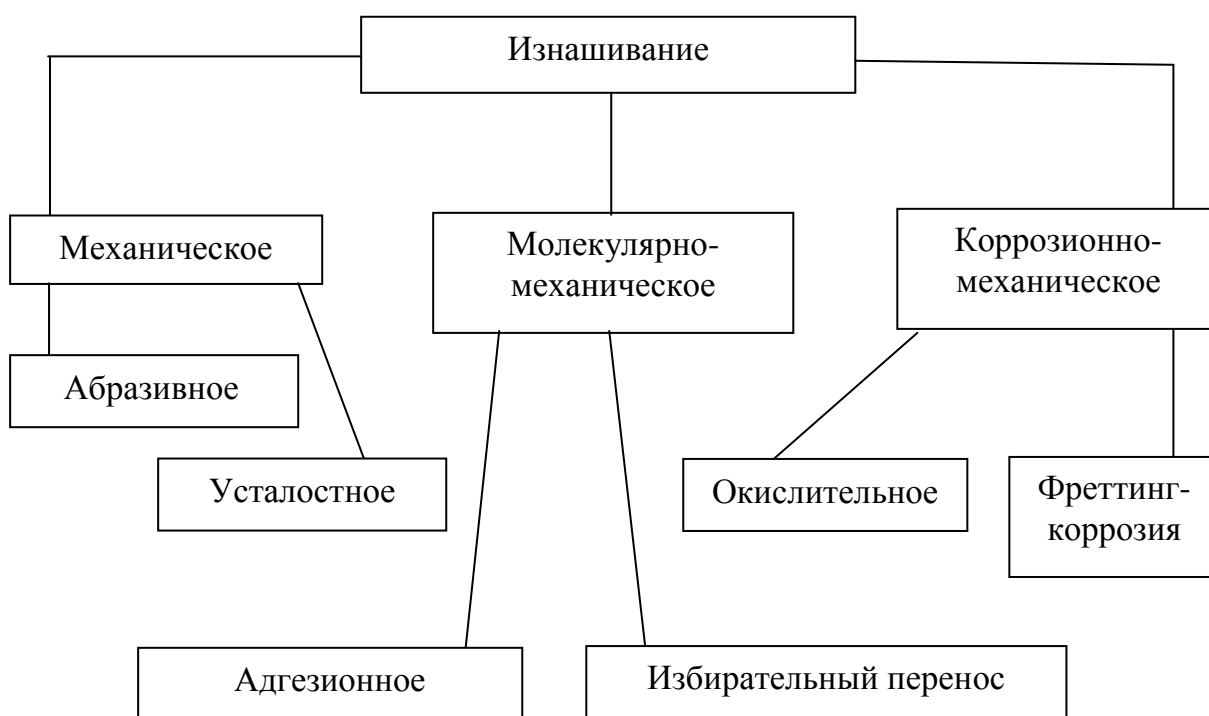
Другой метод улучшения механических свойств деталей – химико-термическая обработка. Но у этого метода, основанного на диффузионном насыщении обрабатываемого материала легирующими элементами, есть свои недостатки и ограничения. Во-первых, химико-термическая обработка дает только поверхностное упрочнение и, во-вторых, достигаемое увеличение значений прочности происходит при снижении пластичности и вязкости упрочненного слоя по тем же причинам, что и при закалке.

Проблема радикального повышения надежности на обычных путях развития упрочняющей обработки представляется неразрешимой. Работая над этой проблемой, можно, конечно, искать резервы увеличения эффективности термической и химико-термической обработок, устранять недостатки известных технологий, но эти исследования не вносят качественных изменений, а лишь совершенствуют существующие технологии, ослабляя отрицательные проявления. Этот путь мало эффективен. В таких условиях важен поиск нетрадиционных решений.

### 13.2. Повышение износостойкости деталей машин

Процессы изнашивания очень сложны и обычно сочетают механические, физические и химические воздействия. Классификация видов изнашивания рассмотрена в трудах ряда известных специалистов в этой области.

Одна из классификаций механизмов изнашивания представлена ниже в виде схемы.



*Классификация механизмов изнашивания*

Так как обычно изнашивание происходит при сочетании нескольких механизмов одновременно с преобладанием одного из них, то в соответствии с этим приходится выбирать те или иные способы повышения износостойкости.

Традиционным методом борьбы с абразивным износом является повышение твердости, что возможно как за счет выбора материала, так и упрочняющей обработкой: термической и химико-термической обработками, поверхностно-пластическим деформированием, а также нанесением твердых покрытий и регулярного рельефа. Но нельзя не отметить, что упрочнение наклепом противоречит положению М. М. Хрущева о том, что эффективное увеличение износостойкости возможно только за счет повышения «естественной» твердости, тогда как «искусственное» повышение твердости, например закалкой, сопровождается переводом металла в энергетически менее устойчивое состояние и достигается к тому же ценой потери пластичности.

Как известно, усталостное изнашивание – следствие циклического воздействия на микровыступы трущихся поверхностей. Здесь следует различать контактную усталость поверхностных слоев, которая возникает при чистом качении и проявляется в развитии очагов разрушения (питтинг), и усталостный износ, когда при трении скольжения отделение микрообъемов поверхностей связано с усталостной природой разрушения. При разрушении поверхностей кулачковых механизмов, зубчатых передач, подшипников качения и других могут иметь место оба процесса.

Так как усталостный износ – результат циклического воздействия поверхности одного тела на гребешки другого, то очевидно, что величина износа должна расти при увеличении удельных давлений. Однако рассчитывать это давление как отношение действующих усилий к геометрическим размерам деталей нельзя, поскольку площадь фактического контакта всегда значительно меньше, чем номинальная площадь поверхности. При скольжении друг по другу циклические нажатия (и сдвиги, сопровождающиеся периодическими растяжениями и сжатиями) приводят к накоплению усталостного повреждения вследствие скопления дислокаций у препятствий. Возникающие субмикротрещины перерастают в микротрещины и ведут к локальному

разрушению поверхности (питтингу). Радикальное средство повышения усталостной износостойкости заключается в создании на поверхности сжимающих остаточных напряжений, а также в повышении поверхностной твердости. При этом ускоренное разрушение происходит не на поверхности, а на некоторой глубине. Обычно это объясняют тем, что максимальные сдвигающие напряжения возникают именно там, но при этом решается статическая задача и не рассматривается характер асимметрии цикла напряжений.

Следует отметить и другое противоречие: при росте твердости обычно растет сопротивление износу, но по этой причине уменьшается площадь фактического контакта, а значит, растет удельное давление, ухудшается прирабатываемость и, казалось бы, должен ускоряться процесс изнашивания.

К методам борьбы с усталостным изнашиванием относятся создание высокой твердости, повышение предела выносливости, исключение концентраторов напряжения, остановка трещины вязкими прослойками, а также создание оптимальных структур.

Адгезионное изнашивание связано с возникновением в локальных зонах контакта интенсивного молекулярного взаимодействия, силы которого превосходят прочность связей материала поверхностных слоев с основным материалом. Образование адгезионных связей происходит в процессе механического взаимодействия микровыступов контактирующих тел и сопровождается, как правило, значительным изменением потенциальной энергии поверхностных слоев, что усиливает межмолекулярное взаимодействие. А величина атомно-молекулярных сил зависит от природы контактирующих материалов. Уменьшение такого износа достигается использованием разнородных материалов, у которых нет близкого химического сродства. Совершенно недопустимо трение однородных материалов типа сталь по стали, так как коэффициент трения при этом становится большим, и энергия трения идет на разрушение этих мгновенных связей. Повышение температуры усиливает адгезию вплоть до схватывания, поэтому необходимо обеспечивать соответствующее охлаждение.

Так как адгезия возникает при высоких контактных напряжениях, то один из путей борьбы с адгезионным видом изнашивания – уменьшение контактных напряжений. Это представляется возможным за счет применения материалов с малым модулем упругости.

Как известно, изнашивание в условиях избирательного переноса характеризуется атомарными явлениями в зоне контакта, когда атомы более мягкого металла переносятся на поверхность более твердого, а при достижении некоторой толщины слой начинает разрушаться с обратным переносом. А так как атомы почти не выносятся за зоны контакта, износ оказывается минимальным. Повышение стойкости в данном случае достигается правильным выбором трущихся материалов и состава смазки.

Необходимо отметить, что высокой износостойкостью обладают поверхности, отвечающие правилу Шарпи, согласно которому структура материалов с повышенными характеристиками должна быть неоднородной и состоять из твердых включений и мягкой основы. Если это требование выполняется, то после непродолжительной работы (периода «приработки») на поверхности образуется макрорельеф, в котором удерживается смазка.

Подобной структурой обладают сплавы олова и сплавы свинца. Однако они из-за малой прочности не могут выдержать больших давлений, а вследствие низкой температуры плавления – даже сравнительно небольшого нагрева, и применяются лишь в деталях, испытывающих небольшие, сжимающие нагрузки, например во вкладышах подшипников.

В современном машиностроении применяются такие антифрикционные материалы, как бронза, баббиты и чугуны. Для них характерна гетерогенная макроструктура.

*Баббиты* на основе олова являются сплавами тройной системы Sn – Sb – Cu. Например, оловянистый баббит Б83, содержащий 83 % Sn, остальное – 10 – 12 % Sb и 5 – 7 % Cu. Его структура состоит из матричной фазы  $\alpha$  (твердого раствора сурьмы и меди в олове), первичных кристаллов промежуточной фазы  $Cu_3Sn$  и многогранных кри-

сталлов SnSb. Баббит Б83 применяют для заливки подшипников тяжело нагруженных машин.

*Бронзовые* вкладыши изготавливают из оловянистой и свинцовой бронзы. Благодаря своей неоднородной структуре бронзы (у оловянистой бронзы  $\alpha$ -раствор является мягкой основой, а эвтектид  $\alpha + \beta$  – твердыми включениями) также хорошо удерживают смазку.

По сравнению с антифрикционными сплавами цветных материалов (бронзой и баббитом) чугун имеет значительно меньшую стоимость, но несколько худшую прирабатываемость, что приводит к ограничению допустимых скоростей скольжения и удельных давлений. Кроме того, чугун плохо работает на растяжение. Разрушающая нагрузка при растяжении в зависимости от марки чугуна в 3 – 5 раз меньше, чем при сжатии, что также ограничивает его применение.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое работоспособность?
2. Что такое надежность и долговечность?
3. От чего зависит надежность детали?
4. Как определяется надежность материала?
5. Чем вызвано возникновение питтинга?
6. Какова классификация механизмов изнашивания?
7. Каким образом можно повысить износостойкость?



## Глава 14. НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА

Рациональный выбор материала – важнейшая задача конструктора, так как надежность, эффективность и экономичность машины зависят, с одной стороны, от правильности конструкции, а с другой – от правильности выбора материалов для ее деталей.

В настоящее время нет единой методики выбора оптимального материала, а существуют лишь разрозненные рекомендации для подбора пригодного материала в частных случаях разных деталей в различных областях машиностроения, базирующихся на использовании традиционного материала. Во всех случаях создания новых деталей или изменения условий работы (коррозионная среда, радиация, высокие температуры, космический вакуум и т. п.) приходится начинать поиск с самого начала методом проб и ошибок. Проблема усугубляется тем, что количество новых материалов растет в геометрической прогрессии, тогда как опыт их использования – в арифметической, и все больше отстает от разработки новых материалов. Справочник не может дать рекомендаций по использованию нового материала, пока не будет накоплен опыт. Но опыт не накапливается, так как конструкторы не применяют новый материал, поскольку нет рекомендаций. Круг замыкается.

Тем не менее можно сформулировать некоторые общие положения, которые будут полезны для конструктора и помогут ему грамотно ориентироваться в большом объеме конструкционных и инструментальных материалов. Эти положения основываются на излагаемом курсе материаловедения и могут быть сформулированы таким образом – материал можно считать выбранным правильно, если он наилучшим образом отвечает трем основным требованиям:

- эксплуатационная надежность,
- технологичность,
- экономичность.

### **14.1. Эксплуатационная надежность материала**

Наиболее общим требованием, обеспечивающим работоспособность материала, может служить эксплуатационная надежность, под которой следует понимать вероятность того, что данный материал обеспечивает безотказность работы изделия в течение заданного срока.

В каждом конкретном случае ведущая характеристика надежности будет своя: у пружины – выносливость, у подшипника – износостойкость, у лопатки газовой турбины – жаропрочность и т. д. Для правильного выбора материала следует ясно представлять, какие характеристики материала для данного изделия являются лимитирующими, и подобрать материал, пригодный в первую очередь по этим характеристикам.

Главная трудность здесь – это определение ведущей характеристики с количественной стороны, так как, например, повышение твердости стали может привести к такому снижению ее пластичности, что материал окажется столь же непригодным, как и при недостаточной твердости. Зная природу механических и иных свойств материалов, можно предвидеть, какие из них и в каком состоянии целесообразно использовать для данного изделия, а при необходимости – внести изменения в нужную сторону.

При решении проблемы надежности большое значение имеет разброс характеристик материала относительно средних значений.

### **14.2. Технологичность материала**

Второе важное требование к материалу – его технологичность, т. е. пригодность к обработке теми или иными способами.

Наиболее дешевый способ получения деталей сложной формы – литье. Поэтому, если деталь сложна, нужно постараться подобрать металл с хорошими литейными свойствами, учитывая его усадку, жидкотекучесть, температуру плавления, горючесть и т. д.

Но, как правило, литые металлы хрупки и не имеют высокой конструкционной прочности. Если эксплуатационные требования не позволяют использовать литье, нужно выбрать материал, обрабатываемый давлением, т. е. обладающий достаточной ковкостью, пластичностью в холодном или горячем состоянии, учитывая при этом наслед-

ственное зерно и красноточность.

Нередко сложные детали могут быть получены сочетанием штамповки со сваркой. В этом случае ведущим технологическим свойством будет наряду со штампуемостью еще и свариваемость, т. е. способность образовывать прочный шов без образования трещин, больших остаточных напряжений и других дефектов.

Точные формы и размеры изделий требуют применения обработки резанием. В этом случае, собирая материал, необходимо учитывать обрабатываемость резанием, т.е. чтобы он не был ни очень твердым, ни очень вязким, не вызывал бы усиленного износа инструмента и обеспечивал хорошую чистоту поверхности, причем шлифуемость не совпадает с обрабатываемостью резцом.

Следует также учитывать возможность термической обработки, поскольку она может в несколько раз изменять свойства металла. При этом надо принимать во внимание закалываемость, прокаливаемость, наследственное зерно, склонность к короблению и растрескиванию при закалке, к отпускной хрупкости, образованию шиферного излома, обезуглероживанию и т. д.

Таким образом, технологичность металла играет чрезвычайно важную роль, которую конструкторы не должны забывать, ибо кому же нужен прекрасный по своим эксплуатационным характеристикам материал, если изделие из него невозможно изготовить.

### **14.3. Экономичность материала**

Вопросы экономики производства во многих случаях играют решающую роль. Выбирая материал, необходимо стремиться к минимальной его стоимости. Однако такой прямолинейный подход не отражает экономичности производства, поскольку у детали из дешевого материала может оказаться дорогая технология производства изделия, а из дорогого – дешевая. При этом себестоимость продукции может быть меньше именно во втором случае, поскольку отходы металла будут меньшими, т. е. выше будет коэффициент использования материала и меньше затраты труда.

Таким образом, выбор оптимального материала должен быть ос-

нован на расчете экономических характеристик в тесной связи с его эксплуатационной надежностью и технологичностью.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие требования необходимо учитывать при выборе материала?
2. Что такое эксплуатационная надежность?
3. Какую роль играет технологичность материала?
4. Какую роль играют экономические характеристики при выборе материалов?

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

*На наш взгляд, поставленная цель – дать представление о металлических и неметаллических материалах, а также рассмотреть вопросы, связанные с проблемой повышения надежности и долговечности изделий – достигнута.*

*В прил. 1 представлена таблица, удобная в использовании, где систематизирована информация по условному обозначению основных металлических сплавов в соответствии с действующими государственными стандартами.*

*Наличие контрольных вопросов после каждой главы способствует проверке знаний по пройденной тематике; тестовые задания (прил. 2) позволяют студентам провести самостоятельную оценку изученного материала.*

*Наиболее полные сведения по дисциплине студенты могут получить, используя литературу и справочные издания, указанные в библиографическом списке.*

*Надеемся, что учебное пособие поможет успешной подготовке к экзамену студентам всех форм обучения технических направлений бакалавриата, а также будет полезно магистрам.*

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Условные обозначения некоторых марок металлических материалов

Обозначение	Что обозначают	Примеры расшифровок
<i>1. Сталь углеродистая общего назначения (ГОСТ 380-2005)</i>		
Ст0, Ст1, Ст3кп, Ст5пс, Ст6сп	Буквы «Ст» означают сталь; цифры от 0 до 6 – условный номер марки в зависимости от химического состава; буква «Г» – марганец при его массовой доле в стали 0,80 % и более; буквы «кп», «пс», «сп» – степень раскисления стали: «кп» – кипящая, «пс» – полуспокойная, «сп» – спокойная	Ст3Гпс – углеродистая сталь общего назначения, 3 – условный номер марки, с повышенным содержанием марганца; полуспокойная
<i>2. Сталь углеродистая качественная конструкционная (ГОСТ 4543-88)</i>		
08, 08кп, 08 пс, 10, 40, 50, 80	Цифры означают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Буквы «кп», «пс», «сп» – степень раскисления стали: «кп» – кипящая, «пс» – полуспокойная, «сп» – спокойная	08кп – углеродистая качественная конструкционная сталь со средней массовой долей углерода 0,08 %, кипящая
<i>3. Сталь легированная конструкционная (ГОСТ 4543-71*)</i>		
40Г, 20Н2М, 30ХГСА, 30ХГС-Ш	Первые две цифры указывают среднюю массовую долю углерода в сотых долях процента, буквы за цифрами означают: Р – бор, Ю – алюминий, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Г – марганец, Н – никель, М – молибден, В – вольфрам. Цифры, стоящие после букв, указывают примерную массовую долю легирующего элемента в целых единицах. Отсутствие цифры означает, что в марке содержится до 1,5 % этого легирующего элемента. Буква «А» в конце наименования марки обозначает «высококачественная сталь», буква «Ш» через тире в конце наименования марки – «особовысококачественная сталь»	20Н2М – легированная конструкционная качественная сталь со средней массовой долей углерода 0,2 %, никеля 2 %, молибдена до 1,5 %  30ХГС-Ш – легированная конструкционная особовысококачественная сталь со средней массовой долей углерода 0,3 %, хрома до 1,5 % марганца до 1,5 %, кремния до 1,5 %

<i>4. Сталь конструкционная высокой обрабатываемости резанием (ГОСТ 1414-75*)</i>		
A12, A20, A30, A40Г, AC35Г2	В обозначении марок стали буквы означают: А – автоматная сернистая, АС – автоматная свинецсодержащая, Е – указывает на наличие селена. Остальные обозначения – в соответствии с обозначениями, принятыми ГОСТ 4543-88	АС35Г2 – автоматная свинецсодержащая сталь со средней массовой долей углерода 0,35 %, марганца 2 %
<i>5. Сталь подшипниковая (ГОСТ 80 1-78*)</i>		
ШХ4, ШХ15, ШХ20СГ	Буква «Ш» в начале марки означает подшипниковая; Х – легированная хромом. Цифры указывают среднюю массовую долю хрома в десятых долях процента. СГ – легированная кремнием и марганцем	ШХ20СГ – подшипниковая сталь со средней массовой долей хрома 1,5 %, кремния до 1,5 %, марганца до 1,5 %
<i>6. Сталь нелегированная инструментальная (ГОСТ 1435-99)</i>		
У7, У8, У8ГА, У10А, У13А	Буквы и цифры означают: У – углеродистая сталь, последующая за ней цифра – средняя массовая доля углерода в десятых долях процента, А в конце наименования марки – высококачественная сталь, Г – повышенная массовая доля марганца	У9А – углеродистая инструментальная высококачественная сталь со средней массовой долей углерода 0,9 %
<i>7. Сталь инструментальная легированная (ГОСТ 5950-2000)</i>		
Х, Х12, 5ХНМ, Х12ВМФ	Первые цифры означают массовую долю углерода в десятых долях процента. Если массовая доля углерода близка к единице или больше единицы, то цифры не указываются. Буквы означают: Г – марганец, С – кремний, Х – хром, В – вольфрам, Ф – ванадий, Н – никель, М – молибден, Д – медь, Т – титан. Цифры, стоящие после букв, означают среднюю массовую долю соответствующего легирующего элемента в целых единицах процентов. Отсутствие цифры означает, что массовая доля этого легирующего элемента примерно равна 1 %. В отдельных случаях массовая доля этих легирующих элементов не указывается, если она не превышает 1,8 %	5ХНМ – легированная инструментальная сталь со средней массовой долей углерода 0,5 %, хрома 1 %, никеля 1 %, молибдена 1 %

Обозначение	Что обозначают	Примеры расшифровок
<i>8. Сталь быстрорежущая (ГОСТ 19265-73*)</i>		
P18, P6M5, P6M5K5, P2AM9K5	Буквы и цифры означают: P – быстрорежущая; цифра, следующая за буквой, – среднюю массовую долю вольфрама; M – молибден, Ф – ванадий, K – кобальт, A – азот; цифры, следующие за буквами, означают соответственно массовую долю молибдена, ванадия, кобальта; Ш – электрошлаковый переплав. В обозначении марок стали не указывают массовую долю: хрома – при любой массовой доле, молибдена – до 1 % включительно, ванадия – в стали марок P18, P6M5, P9K5, P6M5K5, P9M4K8 и P2AM9K5, азота – в стали марок 11P3AM3Ф2 и P2AM9K5	P6M5K5 – быстрорежущая сталь с массовой долей вольфрама 6 %, молибдена 5 %, кобальта 5 %
<i>9. Сплавы твердые спеченные (ГОСТ 3882-84)</i>		
BK6, BK6-M, T15K6, T30K4, TT7K12, TT20K9	а) <i>сплавы вольфрамовой группы</i> : буква «В» обозначает группу сплава – вольфрамовая, K – кобальт. Цифры после буквы K – массовая доля кобальта, %. Остальное – карбид вольфрама. Буквы в конце марок обозначают: M – сплавы, изготовленные из мелких порошков карбида вольфрама; OM – сплавы, изготовленные из особо мелких порошков карбида вольфрама; B – сплавы, изготовленные из крупнозернистого карбида вольфрама; BK – сплавы, изготовленные из особо крупного карбида вольфрама; KC – сплавы, изготовленные из карбида вольфрама, полученного при высоких температурах, отличающегося крупной зернистостью, но подвергнутого размолу до средней зернистости	BK6 – спеченный твердый сплав вольфрамовой группы с массовой долей кобальта 6 %. Остальное (94 %) – массовая доля карбида вольфрама. M – мелкозернистая структура сплава в изделиях
	б) <i>сплавы титано-вольфрамовой группы</i> : буква «Т» обозначает группу сплава – титано-вольфрамовая, K – кобальт. Цифры после буквы T указывают массовую долю карбида титана, %; цифры после K – массовую долю кобальта, %; остальное – карбид вольфрама	T30K4 – спеченный твердый сплав титано-вольфрамовой группы с массовой долей карбида титана 30 %, кобальта 4 %. Остальное (66 %) – карбид вольфрама

*Продолжение*

	в) <i>сплавы титано-тантало-вольфрамовой группы</i> : буквы «ТТ» обозначают группу сплава – титано-тантало-вольфрамовая группа, К – кобальт. Цифры, стоящие после букв ТТ, указывают суммарную массовую долю карбидов титана и тантала, %, а цифры после буквы К – массовую долю кобальта, %; остальное до 100 % – массовая доля карбида вольфрама	ТТ20К9 – спеченный твердый сплав титано-тантало-вольфрамовой группы с суммарной массовой долей карбидов титана и тантала 20 %, массовой долей кобальта – 9 %. Остальное (71 %) – карбид вольфрама
<i>10. Чугун с пластинчатым графитом для отливок (ГОСТ 1412-85)</i>		
СЧ10, СЧ18, СЧ30	Буквы «СЧ» обозначают серый чугун. Цифры после букв означают минимальную величину временного сопротивления при растяжении, МПа·10 <sup>-1</sup>	СЧ18 – отливка из серого чугуна с минимальной величиной временного сопротивления при растяжении 180 МПа
<i>11. Отливки из ковкого чугуна (ГОСТ 1215-79*)</i>		
КЧ30-6, КЧ45-7, КЧ70-2, КЧ80-1,5	Буквы «КЧ» обозначают ковкий чугун. Первое двузначное число обозначает минимальное значение временного сопротивления при растяжении. МПа·10 <sup>-1</sup> , второе число – относительное удлинение	КЧ45-7 – отливка из ковкого чугуна с минимальным значением временного сопротивления при растяжении 450 МПа и относительным удлинением 7 %
<i>12. Чугун с шаровидным графитом для отливок (ГОСТ 7293- 85)</i>		
ВЧ35, ВЧ40, ВЧ100	Буквы «ВЧ» обозначают высокопрочный чугун. Цифры после букв означают минимальную величину временного сопротивления при растяжении, МПа·10 <sup>-1</sup>	ВЧ80 – отливка из высокопрочного чугуна с минимальным значением временного сопротивления при растяжении 800 МПа
<i>13. Чугун антифрикционный для отливок (ГОСТ 1585-85*)</i>		
АЧС-1, АЧС-6, АЧК-1, АЧВ-2	Буквы «АЧ» обозначают антифрикционный чугун; С – серый с пластинчатым графитом; В – высокопрочный с шаровидным графитом; К – ковкий с компактным графитом; цифра – порядковый номер марки	АЧС-2 – антифрикционный чугун серый (с пластинчатым графитом); 2 – порядковый номер марки



Обозначение	Что обозначают	Примеры расшифровок
<i>14. Алюминий первичный (ГОСТ 11069-2001)</i>		
A995, A99, A7, A5, A0	Буква «А» обозначает алюминий, последующие цифры указывают массовую долю алюминия (не менее)	A99 – алюминий первичный с массовой долей алюминия 99,99 % (не менее)
<i>15. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые (ГОСТ 4784-97)</i>		
Д1, Д16, АК8, АВ, АМц, АМг3,5	Буква «Д» в начале марки обозначает сплавы типа дуралюминов; АК – алюминиевый ковочный сплав, АВ – авиационный алюминий (авиаль), АМц – сплав алюминий–марганец, АМг – сплав алюминий–магний. Буква П в конце марки обозначает, что сплав предназначен для изготовления проволоки для холодной высадки. Состояние полуфабрикатов обозначается буквенно-цифровой маркировкой, следующей за условным номером марки: М – мягкий (отожженный), Т – закаленный и естественно состаренный, Т1 – закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность, Н – нагартованный и др.	Д16 – дуралюмин с условным номером 16 АМц – алюминировомарганцевый сплав со средней массовой долей магния 1 % АМг3,5 – алюминировомагниевый сплав со средней массовой долей магния 3,5 %
<i>16. Сплавы алюминиевые литейные (ГОСТ 1583-93)</i>		
АК5М2	Буквы: АЛ – алюминиевый литейный, К – кремний, М – медь, Н – никель, Ц – цинк. Цифры после АЛ – номер сплава, цифры после букв К, М, Н, Ц обозначают среднюю массовую долю соответственно кремния, меди, никеля, цинка, %	АК5М2 – алюминиевый литейный сплав со средней массовой долей кремния 5 %, меди 2 %
<i>17. Сплавы магниевые деформируемые (ГОСТ 14957-76*)</i>		
МА1, МА2, МА15	Буквы «МА» обозначают магниевый деформируемый сплав. Последующие цифры указывают условный (порядковый) номер сплава	Сплав марки МА15 – магниевый деформируемый сплав с порядковым номером 15
<i>18. Сплавы магниевые литейные (ГОСТ 2856-79*)</i>		
МЛ3, МЛ4пч, МЛ5он,	Буквы «МЛ» обозначают магниевый литейный сплав. Последующие цифры указывают условный (порядковый) номер сплава. Индексы: пч – повышенной чистоты, он – общего назначения	Сплав марки МЛ19 – магниевый литейный сплав с порядковым номером 19

19. Медь (ГОСТ 859-2001)		
М0б, М1б, М1р	Буквы: М – медь, к – катодная, р – раскисленная, б – бескислородная. Цифры (от 00 до 3) – условный порядковый номер. Чем больше цифра, тем больше в меди примесей	М00б – медь бескислородная с порядковым номером 00
20. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением (ГОСТ 15527-2004)		
Л96, Л90, ЛО62-1, ЛС64-2, ЛК80-3, ЛМц58-2	Буквы: «Л» – латунь, А – алюминий, Ж – железо, Мц – марганец, Н – никель, К – кремний, О – олово, С – свинец, Мш – мышьяк. Первые две цифры – средняя массовая доля меди (%), последующие – средняя массовая доля других элементов (%), в том же порядке, как и буквы. Остальное (до 100 %) – массовая доля цинка	ЛО62-1 – латунь оловянная со средней массовой долей меди 62 %, олова 1 %; остальное (37 %) – средняя массовая доля цинка
21. Сплавы медно-цинковые (латуни) литейные (ГОСТ 17711-93)		
ЛЦ40С, ЛЦ40Мц1,5, ЛЦ16К4	Буквы: «Л» – латунь, Ц – цинк, С – свинец, К – кремний, А – алюминий, Мц – марганец, Ж – железо. Цифры после буквы «Ц» – средняя массовая доля цинка (%), последующие – средняя массовая доля других элементов (%), остальное (до 100 %) – средняя массовая доля меди	ЛЦ16К4 – латунь кремнистая со средней массовой долей цинка 16 %, кремния 4 %; остальное (80 %) – средняя массовая доля меди
22. Бронзы оловянные, обрабатываемые давлением (ГОСТ 5017-2006). Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением (ГОСТ 18175-78*)		
БрОФ8-0,3, БрА7, БрБ2, БрКд1	Буквы: Бр – бронза, О – олово, Ц – цинк, С – свинец, Ф – фосфор, Н – никель, А – алюминий, Б – бериллий, Т – титан, Ж – железо, Мц – марганец, Мг – магний, К – кремний, Кд – кадмий, Х – хром, Ср – серебро, Су – сурьма. Цифры – средняя массовая доля элементов сплава (%), в том же порядке, как и буквы; остальное – средняя массовая доля меди	БрБ2 – бронза бериллиевая со средней массовой долей бериллия 2 %, остальное (98 %) – средняя массовая доля меди
23. Бронзы оловянные, литейные (ГОСТ 613–79). Бронзы безоловянные литейные (ГОСТ 493-79)		
БрО8Ц4, БрО3Ц12С5	Буквы: Бр – бронза, О – олово, Ц – цинк, С – свинец, Ф – фосфор, Н – никель, А – алюминий, Ж – железо, Мц – марганец, Мг – магний, К – кремний, Ср – серебро, Су – сурьма. Цифры – средняя массовая доля элементов сплава (%), остальное – средняя массовая доля меди	БрО8Ц4 – бронза оловянная со средней массовой долей олова 8 %, цинка 4 %; остальное (88 %) – средняя массовая доля меди
	Буква Л в конце марки означает, что бронза литейная	

Окончание

Обозначение	Что обозначают	Примеры расшифровок
<i>24. Никель, никелевые и медно-никелевые сплавы, обрабатываемые давлением (ГОСТ 492-2006)</i>		
МН19, МНЦ18-20, МНМц40- 1,5	Буквы «МН» обозначают медно-никелевый сплав, Ц – цинк, Мц – марганец, Ж – железо. Первые две цифры – средняя массовая доля никеля (%), последующие – средняя массовая доля других элементов (%), в том же порядке, как и буквы. Остальное (до 100 %) – массовая доля меди	МН19 – медно-никелевый сплав со средней массовой долей никеля 19 %
<i>25. Титан и титановые сплавы, обрабатываемые давлением (ГОСТ 19807-91)</i>		
ОТ4, ВТ22	Буквы: В – высокопрочный; Т – титановый; О – условное обозначение сплавов на основе системы Ti – Al – Mn (серия ОТ). Последующая цифра указывает условный (порядковый) номер сплава	Сплав марки ОТ4 – титановый сплав, обрабатываемый давлением, на основе системы Ti – Al – Mn с условным номером 4
<i>26. Баббиты оловянные и свинцовые (ГОСТ 1320-74*)</i>		
Б88, Б83, Б16, БН	Буква «Б» обозначает баббит; Н – никель, С – свинец. Цифра показывает среднюю массовую долю олова, %	Б88 – оловянный баббит, средняя массовая доля олова составляет 88 %
<i>27. Припой оловянно-свинцовые (ГОСТ 21930-76*)</i>		
ПОС90, ПОС61М, ПОСК50-18	Буквы «ПОС» обозначают припой оловянно-свинцовый; Су – сурьма, М – медь, К – кадмий. Первая цифра указывает содержание олова, вторая цифра – содержание легирующего элемента	ПОССу 25-0,5 – оловянно-свинцовый припой, олова 25 %, сурьмы 0,5 %

**Тестовое задание 1**

(Выбрать один вариант ответа)

1. Характеристика кристаллической решетки, определяющая число частиц (атомов, молекул или ионов), находящихся на наименьшем равном расстоянии от данной частицы, называется ...

- а) периодом решетки;      б) координационным числом;  
в) плотностью упаковки;      г) коэффициентом компактности.

2. Для гранецентрированной кубической решетки координационное число:

- а) К12;      б) К8;      в) Г12;      г) К6.

3. Для гранецентрированной решетки число атомов (базис), принадлежащих одной кристаллической решетке, равно...

- а) 1;      б) 2;      в) 4;      г) 6.

4. К точечным дефектам относят...

- а) вакансии;      б) краевые дислокации;  
в) границы раздела;      г) винтовые дислокации.

5. Дефект, представляющий собой локализованное искажение кристаллической решетки вдоль края лишней атомной полуплоскости, называется...

- а) вакансией;      б) дислокационным атомом;  
в) краевой дислокацией;      г) дефектом упаковки.

6. В центре кристаллического слитка при нормальных условиях охлаждения образуются:

- а) столбчатые кристаллы;      б) мелкозернистые кристаллы;  
в) кристаллы различной формы;      г) равноосные кристаллы.

7. На травленых стальных образцах видны ...

- а) поры;      б) риски;  
в) зерна;      г) неметаллические включения.

8. Твердость материалов в нагретом состоянии измеряют методом...

- а) Роквелла (шкала С);
- б) Мооса;
- в) Роквелла (шкала В);
- г) Шора.

9. Метод \_\_\_\_\_ относится к группе методов измерения твердости по отскоку наконечника.

- а) Бринелля;
- б) Польди;
- в) Мооса;
- г) Шора.

10. Упрочнение металла в процессе пластической деформации называется...

- а) деструкцией;
- б) наклепом;
- в) плакированием;
- г) диффузией.

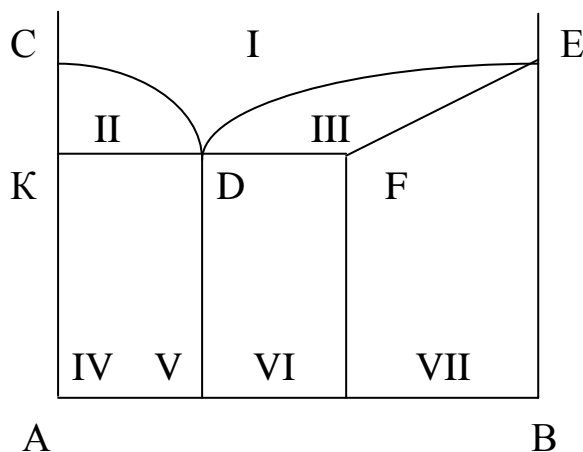
11. При первичной рекристаллизации происходит...

- а) образование дислокационных диполей (стенок);
- б) уменьшение количества точечных дефектов;
- в) процесс зарождения новых зерен с меньшим количеством дефектов;
- г) изменение тонкой структуры.

12. Температура рекристаллизации для титановых сплавов составляет:

- а) 115 °С;
- б) 20 °С;
- в) 503 °С;
- г) 892 °С.

13. На рисунке показана диаграмма состояния двойного сплава ...

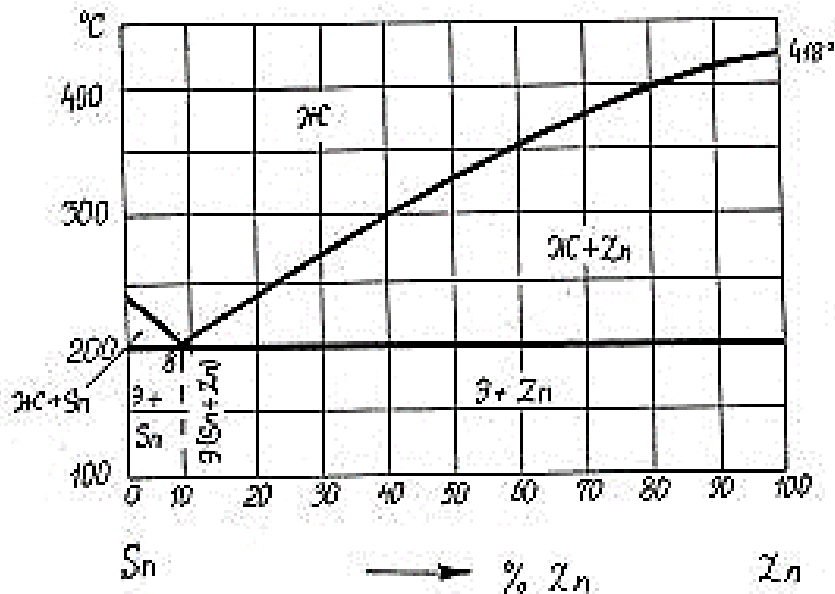


- а) с полной нерастворимостью;
- б) с полной растворимостью;
- в) с ограниченной переменной растворимостью;
- г) с ограниченной постоянной растворимостью.

14. Линией ликвидус на диаграмме состояния, показанной выше, является...

- а) линия EF;
- б) линия CDE;
- в) линия KDFE;
- г) линия CKDFE.

15. Фазовый состав сплава, содержащего 40 % Sn и 60 % Zn, при температуре 300 °С:



- а) жидкая фаза и кристаллы Zn;
- б) жидкая фаза и кристаллы Sn;
- в) жидкая фаза;
- г) механическая смесь кристаллов Zn и Sn.

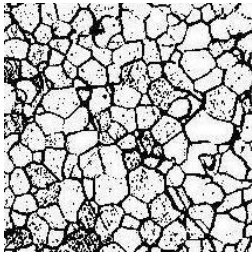
### Тестовое задание 2

(Выбрать один вариант ответа)

1. Структура, представляющая собой смесь феррита и цементита, называется...

- а) аустенитом;
- б) перлитом;
- в) мартенситом;
- г) ледебуритом.

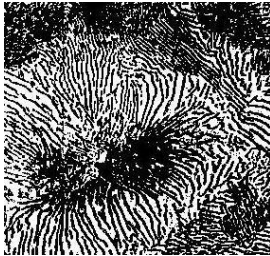
2. Представленная микроструктура стали является ....



- б) ферритом;
- в) зернистым перлитом;
- г) цементитом.

а) пластинчатым перлитом;

3. Какая сталь имеет микроструктуру, показанную на рисунке?



- б) У8;
- в) 45;
- г) 60.

а) У12;

4. Какую структуру имеет сталь 45 в равновесном состоянии?

- а) феррит;
- б) феррит + перлит;
- в) перлит;
- г) перлит + цементит.

5. Заэвтектоидная сталь содержит углерод в количестве ....

- а) 0,8 %;
- б) более 0,8 %;
- в) более 2,14 %;
- г) 4,3 %.

6. Приемлемая сталь для изготовления молотка – это...

- а) У12;
- б) У7;
- в) Р9;
- г) Х12М.

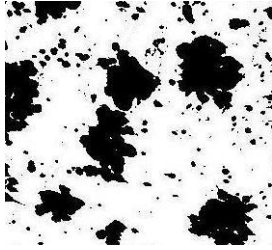
7. Из нижеприведенных качественной конструкционной сталью является сталь...

- а) У12;
- б) Ст3кп;
- в) А40;
- г) 60.

8. Структура стали 60 после полного отжига...

- а) феррит + перлит;                      б) цементит + перлит;  
в) бейнит;                                      г) мартенсит.
9. Неполную закалку стали У10 проводят при температуре...
- а) 760 – 780 °С;                              б) 1100 – 1200 °С;  
в) 660 – 680 °С;                              г) 160 – 180 °С;
10. Для \_\_\_\_\_ обычно после закалки назначают средний отпуск.
- а) цементованных изделий;  
б) рессор и пружин;  
в) мерительных инструментов и подшипников;  
г) валов и осей, испытывающих высокие статические и динамические нагрузки.
11. Сплав ШХ15 представляет собой...
- а) конструкционную сталь, содержащую около 0,15 % углерода, после электрошлакового переплава;  
б) инструментальную сталь, содержащую около 1,5 % углерода и около 15 % хрома;  
в) шарикоподшипниковую сталь, содержащую около 1 % углерода и около 15 % хрома;  
г) шарикоподшипниковую сталь, содержащую около 1 % углерода и около 1,5 % хрома.
12. Марка инструментальной легированной стали состава 0,5 % С, 0,8 % Cr, 1,4 % Ni, 0,3 % Mo – это...
- а) 5ХНМ;              б) 05ХНМ;              в) 5ХН;              г) 05ХМ.
13. Легированная сталь Х12Ф1 относится к...
- а) сталям обыкновенного качества;              б) высокопрочным;  
в) инструментальным;                                      г) строительным.
14. Таковую микроструктуру имеет
- а) серый чугун;                                      г) ковкий чугун.  
б) белый чугун;  
в) высокопрочный чугун;





15. Представленная микроструктура является ....



- а) доэвтекктическим белым чугуном;
- б) серым чугуном на феррито-перлитной основе;
- в) ковким чугуном на ферритной основе;
- г) углеродистой сталью.

16. Сплав марки СЧ25 представляет собой...

- а) серый чугун с минимальным значением предела прочности при растяжении 250 МПа;
- б) серый чугун с минимальным относительным удлинением 25 %;
- в) серый чугун с содержанием углерода 2,5 %;
- г) сталь углеродистую, содержащую 0,25 % углерода.

17. Сплав Д16 является...

- а) деформируемым алюминиевым сплавом, упрочняемым термической обработкой;
- б) деформируемым алюминиевым сплавом, не упрочняемым термической обработкой;
- в) латунию, содержащей 16 % цинка;
- г) сталью, содержащей 16 % меди.

18. Сплав марки ЛК80-3 имеет состав:

- а) 80 % Co, 3 % Sn, 17 % Cu;      б) 80 % Cu, 3 % Si, 17 % Zn;
- в) 80 % Cu, 3 % Co, 17 % Zn;      г) 80 % Si, 3 % Sn, 17 % Cu.

19. Сплав Б83 – это...

- а) деформируемый сплав на основе меди;
- б) баббит на основе олова, содержащий около 83 % меди и сурьмы;

- в) бронза, содержащая 83 % олова;
- г) баббит на основе олова, содержащий около 83 % Sn.

20. Сплавом на основе титана является...

- а) 18ХГТ;    б) Т30К4;    в) ВТ14;    г) 12Х18Н10Т.

### Тестовое задание 3

(Выбрать один вариант ответа)

1. К полупроводниковым относятся все материалы ряда...

- а) Se, Ge, Ca, полистирол;                      б) P, Ge, Ni, поливинилхлорид;
- в) GaAs, Si, B, полиацетилен;                г) B, Cr, As, полипропилен.

2. Удельное электрическое сопротивление металлов уменьшается в ряду...

- а) Fe – Al – Cu;                                      б) Cu – Al – Fe;
- в) Al – Fe – Cu;                                      г) Cu – Fe – Al.

3. Углеродные проводниковые материалы применяют для изготовления...

- а) постоянных магнитов;
- б) твердых припоев;
- в) щеток электрических машин;
- г) магнитопроводов трансформаторов.

4. Полимеры, обратимо затвердевающие при охлаждении без протекания химических реакций, называют...

- а) термопластичными;                          б) аморфными;
- в) терморезистивными;                        г) кристаллическими.

5. Материалами для изоляции токопроводящих частей являются...

- а) проводники;                                      б) магнитные;
- в) диэлектрики;                                    г) полупроводники.

6. Продуктом поликонденсации является ...

- а) полиэтилен;                                      б) полиметилметакрилат (оргстекло);

в) полистирол; г) фенолформальдегидная смола.

7. В качестве теплоизоляционного материала можно использовать...

а) пенопласт; б) гетинакс;  
в) текстолит; г) полистирол.

8. Изменение свойств пластмасс в процессе хранения или эксплуатации называется ...

а) деструкцией; б) старением;  
в) усталостью; г) коррозией.

9. Реакцией полимеризации получают...

а) полиэферы; б) полиамиды;  
в) полипропилен; г) фенолоформальдегидные смолы.

10. Текстолит – это...

а) пластмасса на основе эпоксидной смолы с волокнистым наполнителем;  
б) термопласт на основе поливинилхлорида;  
в) порошковая пластмасса на основе полиэтилена с наполнителем из древесной муки;  
г) слоистый пластик на основе фенолоформальдегидной смолы с наполнителем из хлопчатобумажной ткани.

11. Для повышения прочности, термостойкости, электропроводности пластмасс в их состав вводят ...

а) стабилизаторы; б) наполнители;  
в) полимеры; г) пластификаторы.

12. Композиционные материалы на основе полимерного связующего, армированные синтетическими волокнами, называются...

а) органоволокнитами; б) стекловолокнитами;  
в) карбоволокнитами; г) бороволокнитами.

13. При вулканизации каучуков используется...

- а) сера;
- б) мел;
- в) сажа;
- г) каолин.

14. Для резин характерны...

- а) высокие электро- и теплопроводность;
- б) стабильность свойств во времени, низкая химическая стойкость;
- в) высокая эластичность, хорошие электроизоляционные свойства;
- г) высокие теплостойкость и прочность.

15. Основным потребителем каучуков является производство ...

- а) резинового клея;
- б) автомобильных, авиационных и велосипедных шин;
- в) резинотехнических изделий;
- г) резиновых изделий народного потребления.

**Ответы на тестовое задание 1:**

1. б; 2. а; 3. в; 4. а; 5. в; 6. г; 7. в; 8. г; 9. г; 10. б; 11. в; 12. г; 13. г; 14. б; 15. а.

**Ответы на тестовое задание 2:**

1. б; 2. б; 3. б; 4. б; 5. б; 6. б; 7. г; 8. а; 9. а; 10. б; 11. г; 12. а; 13. в; 14. г; 15. б; 16. а; 17. а; 18. б; 19. г; 20. в.

**Ответы на тестовое задание 3:**

1. в; 2. а; 3. в; 4. а; 5. в; 6. г; 7. а; 8. б; 9. в; 10. г; 11. б; 12. а; 13. а; 14. в; 15. б.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Адаскин, А. М.** Материаловедение в машиностроении : учеб. для бакалавров / А. М. Адаскин [и др.]. – М. : Юрайт, 2013. – 535 с. – ISBN 978-5-9916-2867-9. – (Сер. Бакалавр. Углубленный курс).

2. **Волков, Г. М.** Материаловедение : учеб. для техн. вузов по немашиностроительным направлениям и специальностям / Г. М. Волков, В. М. Зуев. – М. : Академия, 2008. – 398 с. (Сер. Высшее профессиональное образование, Технические специальности). – ISBN 978-5-7695-4248-0.

3. **Гелин, Ф. Д.** Металлические материалы : справочник / Ф. Д. Гелин. – Минск : Высш. шк., 1987. – 368 с.

4. **Геллер, Ю. А.** Материаловедение : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт ; под ред. А. Г. Рахштадта. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1989. – 456 с. – ISBN 5-229-00228-X.

5. **Гуляев, А. П.** Металловедение : учеб. для втузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1986. – 542 с.

6. **Дриц, М. Е.** Технология конструкционных материалов и материаловедение : учеб. для немашиностроительных специальностей вузов / М. Е. Дриц, М. А. Москалев. – М. : Высш. шк., 1990. – 447 с. – ISBN 5-06-000144-X.

7. **Журавлев, В. Н.** Машиностроительные стали : справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 480 с. – ISBN 5-217-01306-0.

8. **Золоторевский, В. С.** Механические свойства металлов : учеб. для вузов по специальности "Металловедение, оборудование и технология термической обработки металлов" / В. С. Золоторевский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1983. – 350 с.

9. **Иванов, Г. П.** Надежность материала в технических расчетах / Г. П. Иванов [и др.] ; под ред. Д. В. Бушенина. – Владимир : Посад, 2002. – 128 с.

10. **Кечин, В. А.** Цинковые сплавы / В. А. Кечин, Е. Я. Люблинский. – М. : Металлургия, 1986. – 246 с.

11. **Колачев, Б. А.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов : учеб. пособие для вузов по специальности "Металловедение и технология термической обработки металлов" / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М. : МИСИС, 2001. – 414 с. – ISBN 5-8763-027-8.

12. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Васильева; Ю. М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 510 с. – ISBN 5-217-01113-0.

13. Конструкционные материалы : справочник / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под ред. Б. Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1990. – 687 с. – ISBN 5-217-01112-2. – (Сер. Основы проектирования машин).

14. **Лахтин, Ю. М.** Материаловедение : учеб. для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с. – ISBN 5-217-00858-X. – (Сер. Для вузов).

15. **Лейкин, А. Е.** Материаловедение : учеб. для для машиностроит. специальностей вузов / А. Е. Лейкин, Б. И. Родин. – М. : Высш. шк., 1971. – 416 с.

16. Материаловедение. Технология конструкционных материалов : учеб. пособие для вузов по направлению "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" / А. В. Шишкин [и др.] ; под ред. В. С. Чередниченко. – 2-е изд., стер. – М. : Омега-Л, 2006. – 752 с. – ISBN 5-365-00041-2. – (Сер. Высшее техническое образование).

17. Материаловедение : учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под ред. Б. Н. Арзамасова. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 646 с. – ISBN 5-7038-1860-5. – (Сер. Учебник для технических вузов).

18. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учеб. для вузов по направлению "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств" и "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / В. Б. Арзамасов [и др.] ; под ред. В. Б. Арзамасова, А. А. Черепихина. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2009. – 447 с. – ISBN 978-5-7695-6499-4. – (Сер. Высшее профессиональное образование, Машиностроение).

19. Материаловедение и технология металлов : учеб. для вузов / Г. П. Фетисов [и др.] ; под ред. Г. П. Фетисова. – Изд. 4-е, испр. и доп. – М. : Высш. шк., 2006. – 862 с. – ISBN 5-06-004418-1.

20. Материалы в машиностроении: выбор и применение : справочник : в 5 т. / под ред. И. В. Кудрявцева. – М. : Машиностроение, 1967. – Т. 1: Цветные металлы и сплавы / И. А. Алексахин [и др.] ; под ред. Л. П. Лужникова. – 1967. – 304 с.

21. **Мозберг, Р. К.** Материаловедение : учеб. пособие для вузов / Р. К. Мозберг. – Изд. 2-е, перераб. – М. : Высш. шк., 1991. – 448 с. – ISBN 5-06-001909-8.

22. **Пикунов, М. В.** Металловедение / М. В. Пикунов, А. И. Деси-при. – М. : Metallurgia, 1980. – 256 с.

23. **Плошкин, В. В.** Материаловедение : учеб. пособие / В. В. Плошкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2011. – 463 с. – ISBN 978-5-9916-1222-7. – (Серия: Основы наук).

24. Производство отливок из сплавов цветных металлов : учебник / А. В. Курдюмов [и др.] ; под ред. В. Д. Белова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд. дом МИСиС, 2011. – 615 с. – ISBN 978-5-87623-573-2.

25. **Ржевская, С. В.** Материаловедение : учеб. для вузов в области техники и технологии / С. В. Ржевская. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М. : Логос, 2006. – 421 с. – ISBN 5-98704-179-X.

26. **Рогов, В. А.** Современные машиностроительные материалы и заготовки : учеб. пособие для вузов по направлениям "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств", "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – М. : Академия, 2008. – 330 с. – ISBN 978-5-7695-4254-1. – (Сер. Высшее профессиональное образование, Машиностроение).

27. **Роцин, В. Е.** Электрометаллургия и металлургия стали : учебник / В. Е. Роцин, А. В. Роцин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Челябинск : ЮУРГУ, 2013. – 572 с. – ISBN 978-5-696-04354-8.

28. **Сильман, Г. И.** Материаловедение : учеб. пособие для вузов / Г. И. Сильман. – М. : Академия, 2008. – 336 с. – ISBN 978-5-7695-4255-8.

29. **Солнцев, Ю. П.** Материаловедение : учеб. для вузов по металлург., машиностроит. и общетехн. специальностям / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин ; под ред. Ю. П. Солнцева. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб. : Химиздат, 2004. – 735 с. – ISBN 5-93808-075-4. – (Сер. Учебник для вузов).

30. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенко [и др.] ; под ред. Л. С. Ляховича. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	3
<b>Раздел I. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ</b> .....	4
<b>Глава 1. Кристаллическое строение металлов</b> .....	4
1.1. Кристаллические решетки .....	4
1.2. Дефекты кристаллического строения .....	10
1.3. Механизмы торможения дислокаций .....	12
1.4. Методы изучения строения металлов .....	13
Контрольные вопросы .....	16
<b>Глава 2. Кристаллизация металлов</b> .....	16
2.1. Особенности гомогенной и гетерогенной кристаллизации ....	18
2.2. Кристаллическое строение литого слитка .....	21
Контрольные вопросы .....	22
<b>Глава 3. Свойства металлов и сплавов</b> .....	23
3.1. Физические свойства .....	23
3.2. Химические свойства .....	24
3.3. Механические свойства .....	25
3.4. Технологические свойства .....	29
3.5. Эксплуатационные свойства .....	30
Контрольные вопросы .....	31
<b>Глава 4. Наклеп и рекристаллизация</b> .....	32
4.1. Наклеп .....	32
4.2. Влияние нагрева на структуру и свойства деформированного металла .....	33
4.3. Холодная и горячая обработка давлением .....	35
Контрольные вопросы .....	36
<b>Глава 5. Основы теории сплавов</b> .....	36
5.1. Правило фаз .....	37
5.2. Диаграммы состояния двойных сплавов .....	39
5.2.1. Типы диаграмм состояния двойных сплавов .....	40
5.2.2. Связь между типами диаграмм состояния и свойствами сплавов .....	45
Контрольные вопросы .....	46
<b>Глава 6. Железо и его сплавы</b> .....	46
6.1. Диаграмма состояния железо-углерод .....	47
6.2. Железоуглеродистые сплавы .....	48



6.2.1. Стали .....	48
6.2.2. Чугуны .....	51
Контрольные вопросы .....	58
<b>Глава 7. Основы термической обработки стали .....</b>	<b>58</b>
7.1. Фазовые превращения в сплавах железа .....	59
7.1.1. Аустенитное превращение .....	59
7.1.2. Распад аустенита .....	60
7.1.3. Мартенситное превращение .....	62
7.1.4. Превращения при отпуске .....	63
7.2. Отжиг и нормализация стали .....	64
7.3. Закалка стали .....	67
7.4. Химическое действие среды. Охлаждение при термической обработке .....	68
7.5. Внутренние напряжения .....	70
7.6. Закаливаемость и прокаливаемость стали .....	71
7.7. Способы закалки стали .....	72
7.8. Дефекты, возникающие при закалке .....	74
7.9. Отпуск стали .....	75
7.10. Обработка холодом .....	75
7.11. Химико-термическая обработка .....	76
7.11.1. Цементация .....	77
7.11.2. Азотирование .....	81
7.11.3. Цианирование .....	82
7.11.4. Нитроцементация .....	84
7.11.5. Борирование .....	85
7.11.6. Силицирование .....	86
7.11.7. Диффузионное насыщение металлами .....	86
Контрольные вопросы .....	87
<b>Глава 8. Легированные стали и твердые сплавы .....</b>	<b>89</b>
8.1. Классификация легированных сталей .....	90
8.2. Быстрорежущие стали .....	91
8.3. Твердые сплавы .....	93
8.4. Дефекты легированных сталей .....	96
Контрольные вопросы .....	98
<b>Глава 9. Цветные металлы и сплавы .....</b>	<b>99</b>
9.1. Алюминий и его сплавы .....	99
9.2. Магний и его сплавы .....	102
9.3. Титан и его сплавы .....	104
9.4. Медь и ее сплавы .....	107
9.5. Цинк и его сплавы .....	111
9.6. Свинец, олово и сплавы на их основе .....	112

Контрольные вопросы .....	114
<b>Раздел II. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....</b>	<b>115</b>
<b>Глава 10. Неметаллические материалы .....</b>	<b>115</b>
10.1. Полимерные материалы .....	116
10.1.1. Классификация полимерных материалов .....	120
10.1.2. Термопластичные полимерные материалы .....	121
10.1.3. Терморезистивные полимерные материалы .....	125
10.2. Резиновые материалы .....	127
10.2.1. Состав резиновых материалов .....	128
10.2.2. Классификация резиновых материалов .....	129
10.3. Керамические материалы .....	130
10.3.1. Получение керамических материалов, их классификация .....	130
10.3.2. Свойства и области применения керамических материалов .....	132
10.4. Древесные материалы .....	134
Контрольные вопросы .....	137
<b>Глава 11. Композиционные материалы .....</b>	<b>138</b>
11.1. Искусственные композиционные материалы с металлической матрицей .....	139
11.2. Искусственные композиционные материалы с неметаллической матрицей .....	140
11.3. Естественные композиционные материалы .....	140
Контрольные вопросы .....	141
<b>Глава 12. Наноструктурные материалы .....</b>	<b>141</b>
12.1. Свойства и область применения наноматериалов .....	142
12.2. Наноструктурные элементы .....	142
Контрольные вопросы .....	144
<b>Раздел III. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ .....</b>	<b>145</b>
<b>Глава 13. Надежность и долговечность изделий из материалов функционального и конструкционного назначений .....</b>	<b>145</b>
13.1. О проблеме надежности конструкционного материала .....	146

13.2. Повышение износостойкости деталей машин .....	148
Контрольные вопросы .....	152
<b>Глава 14. Научные основы выбора материала .....</b>	<b>153</b>
14.1. Эксплуатационная надежность материала .....	154
14.2. Технологичность материала .....	154
14.3. Экономичность материала .....	155
Контрольные вопросы .....	156
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>156</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>157</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>173</b>