

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ФИЛИАЛ КФУ В Г. ЧИСТОПОЛЕ**

**Л.П.СОЛОШЕНКО**

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**



**Конспект лекций**

**Казань-2013**

*Принято на заседании кафедры механизация агропромышленного комплекса  
Протокол № 1 от 20.09.2013*

**Солошенко Л.П.**

**Материаловедение. Конспект лекций/ Л.П.Солошенко,;** Каз.федер. ун.- т, — Казань, 2013.— 99с.

В предлагаемых лекциях рассмотрены закономерности структурообразования, фазовых превращений в материалах; основные классы современных материалов, их свойства и области применения, принципы выбора материалов, особенности этапов жизненного цикла материалов и изделий из них; методы анализа и способы изучения структуры и свойств материалов и методы их повышения. Подготовленный материал можно изучать самостоятельно, проводя самоконтроль усвоения материала.

© Казанский федеральный университет  
© Солошенко Л.П.

## Содержание

<b>1. Тема 1. Введение. Атомно-кристаллическое строение металлов.....</b>	<b>7</b>
1.1. Введение.....	7
1.2. Строение реальных кристаллов. Виды дефектов и их влияние на свойства металлов .....	7
1.3. Кристаллизация металлов.....	11
1.4. Строение металлического слитка .....	13
1.5. Качество материалов и его оценка.....	14
1.6. Вопросы самопроверки.....	15
1.7. Глоссарий по теме .....	15
1.8. Используемые информационные ресурсы.....	17
<b>2. Тема 2. Механические свойства металлов.</b>	
2.1. Конструкционная прочность материалов.....	18
2.2. Особенности деформации поликристаллических тел.....	18
2.3. Физическая природа деформации металлов.....	20
2.4. Механические свойства и способы определения их количественных характеристик.....	22
2.5. Технологические свойства.....	25
2.6. Эксплуатационные свойства.....	25
2.7. Вопросы самопроверки.....	26
2.8. Глоссарий по теме 2.....	26
2.9. Используемые информационные ресурсы.....	28
<b>3. Тема 3. Строение сплавов. Диаграммы состояния сплавов</b>	
3.1. Основные понятия в теории сплавов.....	29
3.2. Особенности строения, кристаллизации и свойств сплавов: механических смесей, твердых растворов, химических соединений.....	29
3.3. Кристаллизация сплавов.....	32
3.4. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов.....	32
3.5. Вопросы самопроверки.....	37

3.6. Глоссарий по теме 3.....	38
3.7. Используемые информационные ресурсы.....	40
<b>4. Тема 4. Железо-углеродистые сплавы.</b>	
4.1. Диаграмма состояния железо-углерод.....	41
4.2. Классификация, структура и маркировка углеродистых сталей .....	43
4.3. Влияние углерода и постоянных примесей на структуру и свойства стали.....	45
4.4. Свойства и микроструктуры чугуна.....	46
4.5. Влияние графитовых включений на свойства чугунов. Процесс графитизации.....	47
4.6.Классификация и маркировка чугунов.....	49
4.7. Вопросы самопроверки.....	49
4.8. Глоссарий по теме 4.....	50
4.9. Используемые информационные ресурсы.....	51
<b>5. Тема 5. Термическая обработка сталей.</b>	
5.1. Виды термической обработки металлов.....	52
5.2. Превращения, протекающие в структуре стали при нагреве и охлаждении.....	53
5.3. Технологические возможности и особенности отжига, нормализации, закалки и отпуска.....	56
5.4. Понятие отпускной хрупкости.....	60
5.5 Особенности термообработки чугунов.....	61
5.6. Вопросы самопроверки.....	62
5.7. Глоссарий по теме 5.....	62
5.8. Используемые информационные ресурсы.....	66
<b>6. Тема 6. Химико-термическая обработка сталей.</b>	
6.1. Физические основы химико-термической обработки.....	67
6.2. Назначение и виды цементации.....	67
6.3. Азотирование стали и цианирование стали.....	69

6.4. Диффузионная металлизация.....	70
6.5. Поверхностное упрочнение.....	70
6.6. Вопросы самопроверки.....	71
6.7. Глоссарий по теме 6.....	72
6.8. Используемые информационные ресурсы.....	73
6.9. Список сокращений.....	73

## **7. Тема 7. Легированные стали**

7.1. Классификация легированных сталей. ....	74
7.2. Влияние легирующих элементов на свойства стали.....	74
7.3. Конструкционные стали. ....	75
7.4. Стали и сплавы с особыми свойствами.....	77
7.5. Вопросы самопроверки.....	81
7.6. Глоссарий по теме 7.....	81
7.7. Используемые информационные ресурсы.....	83

## **8. Тема 8. Цветные металлы и сплавы**

8.1. Алюминий и его сплавы.....	84
8.2. Деформируемые и литейные алюминиевые сплавы.....	84
8.3. Медь и ее свойства.....	85
8.4. Латунни, их свойства, маркировка и применение.....	85
8.5. Бронзы. Состав и свойства бронз.....	86
8.6. Магний и его сплавы.....	87
8.7. Вопросы самопроверки.....	88
8.8. Глоссарий по теме 8.....	88
8.9. Используемые информационные ресурсы.....	89

## **9. Тема 9. Неметаллические материалы.**

9.1. Пластические массы.....	90
------------------------------	----

9.2. Резиновые материалы.....	92
9.3. Неорганические материалы.....	93
9. 4. Композиционные материалы.....	94
9.5. Экономические проблемы использования материалов.....	95
9.6. Вопросы самопроверки.....	98
9.7. Глоссарий по теме 9.....	98
9.8. Используемые информационные ресурсы.....	99

## Тема 1. Введение. Атомно-кристаллическое строение металлов

**Аннотация.** Данная тема раскрывает основные понятия процесса кристаллического строения металлов. Предусматривается изучение основных кристаллических решеток и строение слитка.

**Ключевые слова.** *Металлы, кристаллическое строение, аллотропия, анизотропия, ячейка, модификация, вакансия, дислокация.*

### 1.1. Введение.

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

Основными направлениями в развитии материаловедения является разработка способов производства чистых и сверхчистых металлов, свойства которых сильно отличаются от свойств металлов технической чистоты, с которыми преимущественно работают.



Генеральной задачей материаловедения является создание материалов с заранее рассчитанными свойствами применительно к заданным параметрам и условиям работы. Большое внимание уделяется изучению металлов в экстремальных условиях (низкие и высокие температуры и давление).

До настоящего времени основной материальной базой машиностроения служит черная металлургия, производящая стали и чугуны. Эти материалы имеют много положительных качеств и в первую очередь обеспечивают высокую конструкционную прочность деталей машин. Однако эти классические материалы имеют такие недостатки как большая плотность, низкая коррозионная стойкость. Потери от коррозии составляют 20% годового производства стали и чугуна. Поэтому, по данным научных исследований, через 20...40 лет все развитые страны перестроятся на массовое использование металлических сплавов на базе титана, магния, алюминия. Эти легкие и прочные сплавы позволяют в 2-3 раза облегчить станки и машины, в 10 раз уменьшить расходы на ремонт. Важное значение имеет устранение отставания нашей страны в области использования новых материалов взамен традиционных (металлических) – пластмасс, керамики, материалов порошковой металлургии, особенно композиционных материалов, что экономит дефицитные металлы, снижает затраты энергии на производство материалов, уменьшает массу изделий. Расчетами установлено, что замена ряда металлических деталей легкового автомобиля на углепластики из эпоксидной смолы, армированной углеродными волокнами, позволит уменьшить массу машины на 40%; она станет более прочной; уменьшится расход топлива, резко возрастет стойкость против коррозии.

### 1.2. Строение реальных кристаллов. Виды дефектов и их влияние на свойства металлов.

*Металлы* – один из классов конструкционных материалов, характеризующийся определенным набором свойств: «металлический блеск» (хорошая отражательная способность); пластичность; высокая теплопроводность; высокая электропроводность. Данные свойства обусловлены особенностями строения металлов. Все металлы,

затвердевающие в нормальных условиях, представляют собой кристаллические вещества, то есть укладка атомов в них характеризуется определенным порядком – периодичностью, как по различным направлениям, так и по различным плоскостям. Этот порядок определяется понятием *кристаллическая решетка*. Другими словами, кристаллическая решетка это воображаемая пространственная решетка, в узлах которой располагаются частицы, образующие твердое тело. *Элементарная ячейка* – элемент объема из минимального числа атомов, многократным переносом которого в пространстве можно построить весь кристалл. Элементарная ячейка характеризует особенности строения кристалла.

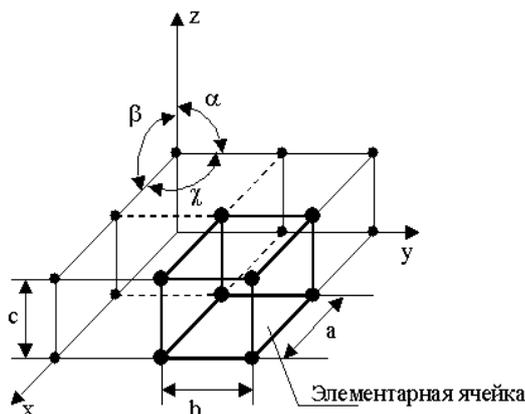


Рис.1.1. Схема кристаллической решетки

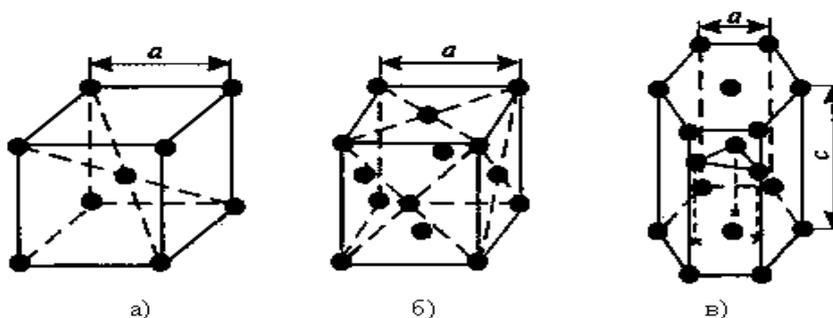


Рис. 1.2. Основные типы кристаллических решеток: а – объемно-центрированная кубическая; б– гранецентрированная кубическая; в – гексагональная плотноупакованная

Основными типами кристаллических решеток являются:

- а) Объемно - центрированная кубическая (ОЦК) (см. рис.1.2а), атомы располагаются в вершинах куба и в его центре (V, W, Ti, Fe<sub>α</sub>);
- б) Гранецентрированная кубическая (ГЦК) (см. рис. 1.2б), атомы располагаются в вершинах куба и по центру каждой грани (Ag, Au, Fe<sub>γ</sub>);
- в) Гексагональная плотноупакованная (ГПУ) – имеется 3 дополнительных атома в средней плоскости (цинк) (см. рис.1.2в)

В кристаллических телах атомы правильно располагаются в пространстве, причем по разным направлениям расстояния между атомами неодинаковы, что предопределяет

существенные различия в силах взаимодействия между ними и, в конечном результате, разные свойства. Зависимость свойств от направления называется *анизотропией*.



Способность некоторых металлов существовать в различных кристаллических формах в зависимости от внешних условий (давление, температура) называется *аллотропией* или *полиморфизмом*. Примером аллотропического видоизменения в зависимости от температуры является железо (Fe).

$Fe: t < 911^{\circ}C$  – ОЦК -  $Fe_{\alpha}$ ;

$911 < t < 1392^{\circ}C$  – ГЦК -  $Fe_{\gamma}$ ;

$1392 < t > 1539^{\circ}C$  – ОЦК -  $Fe_{\delta}$ ; (высокотемпературное  $Fe_{\alpha}$ )

Видоизменения элемента обозначается буквами греческого алфавита в виде индекса у основного обозначения металла. Примером аллотропического видоизменения, обусловленного изменением давления, является углерод: при низких давлениях образуется графит, а при высоких – алмаз. Используя явление полиморфизма, можно упрочнять и разупрочнять сплавы при помощи термической обработки.



Некоторые металлы намагничиваются под действием магнитного поля. После удаления магнитного поля они обладают остаточным магнетизмом. Это явление впервые обнаружено на железе и получило название *ферромагнетизма*. К ферромагнетикам относятся железо, кобальт, никель и некоторые другие металлы. При нагреве ферромагнитные свойства металла уменьшаются постепенно: вначале слабо, затем резко, и при определенной температуре (точка Кюри) исчезают (точка Кюри для железа –  $768^{\circ}C$ ). Магнитные превращения не связаны с изменением кристаллической решетки или микроструктуры, они обусловлены изменениями в характере межэлектронного взаимодействия.

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, то есть, имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы называются зернами. Они имеют неправильную форму и различно ориентированы в пространстве. В кристаллической решетке реальных металлов имеются различные дефекты (несовершенства), которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов. Различают следующие структурные несовершенства:

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

Одним из распространенных несовершенств кристаллического строения является наличие точечных дефектов: вакансий, дислоцированных атомов и примесей. (рис. 1.3.)

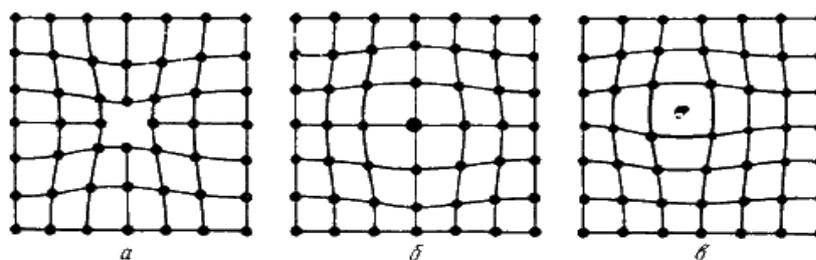


Рис.1.3. Точечные дефекты

*Вакансия* – отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки, «дырки», которые образовались в результате различных причин. Образуется при переходе атомов с поверхности в окружающую среду или из узлов решетки на поверхность (границы зерен, пустоты, трещины и т. д.), в результате пластической деформации, при бомбардировке тела атомами или частицами высоких энергий. Концентрация вакансий в значительной степени определяется температурой тела. Скопление многих вакансий может привести к образованию пор и пустот.

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

*Дислокация* – это линейные дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. *Краевая дислокация* представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край «лишней» полуплоскости (рис. 1.4)

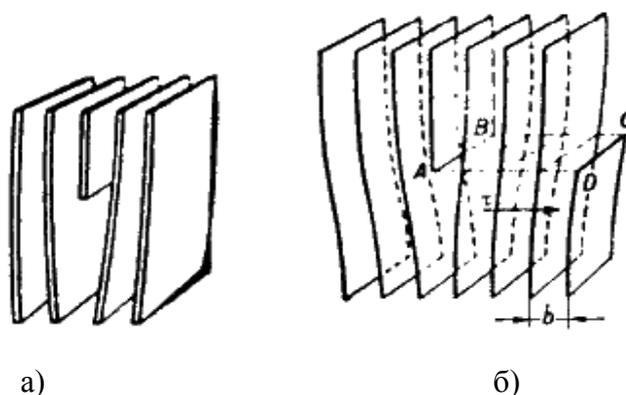


Рис. 1.4. Краевая дислокация (а) и механизм ее образования (б)

*Винтовая дислокация* получена при помощи частичного сдвига по плоскости Q вокруг линии EF (рис. 1.5) На поверхности кристалла образуется ступенька, проходящая от точки E до края кристалла. Такой частичный сдвиг нарушает параллельность атомных слоев, кристалл превращается в одну атомную плоскость, закрученную по винту.

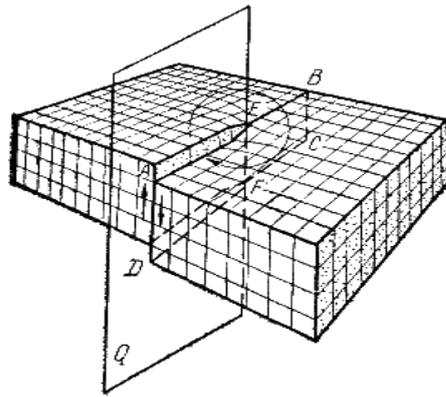


Рис. 1.5. Механизм образования винтовой дислокации



Дислокации влияют не только на прочность и пластичность, но и на другие свойства кристаллов. С увеличением плотности дислокаций изменяются оптические свойства, повышается электросопротивление металла, увеличивается средняя скорость диффузии в кристалле, ускоряется старение и другие процессы, уменьшается химическая стойкость, поэтому в результате обработки поверхности кристалла специальными веществами в местах выхода дислокаций образуются ямки. Образуются дислокации при деформации, в процессе кристаллизации, при термической обработке.

### 1.3. Кристаллизация металлов

С изменением внешних условий свободная энергия изменяется по сложному закону различно для жидкого и кристаллического состояний. Характер изменения свободной энергии жидкого и твердого состояний с изменением температуры показан на рис. 1.6. В соответствии с этой схемой выше температуры  $T_S$  вещество должно находиться в жидком состоянии, а ниже  $T_S$  – в твердом. При температуре равной  $T_S$  жидкая и твердая фаза обладают одинаковой энергией, металл в обоих состояниях находится в равновесии, поэтому две фазы могут существовать одновременно бесконечно долго. Температура  $T_S$  – *равновесная или теоретическая температура кристаллизации*.

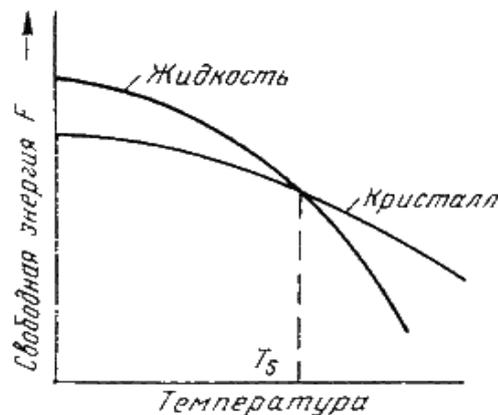


Рис.1.6. Изменение свободной энергии в зависимости от температуры

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

*кристаллизации*. Охлаждение жидкости ниже равновесной температуры кристаллизации называется *переохлаждением*, которое характеризуется *степенью переохлаждения* ( $\Delta T$ ). Степень переохлаждения зависит от природы металла, от степени его загрязненности (чем чище металл, тем больше степень переохлаждения), от скорости охлаждения (чем выше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения).

*Кристаллизация* – это процесс образования участков кристаллической решетки в жидкой фазе и рост кристаллов из образовавшихся центров. Процесс перехода металла из жидкого состояния в кристаллическое можно изобразить кривыми в координатах время – температура. Кривая охлаждения чистого металла представлена на рис. 1.7.

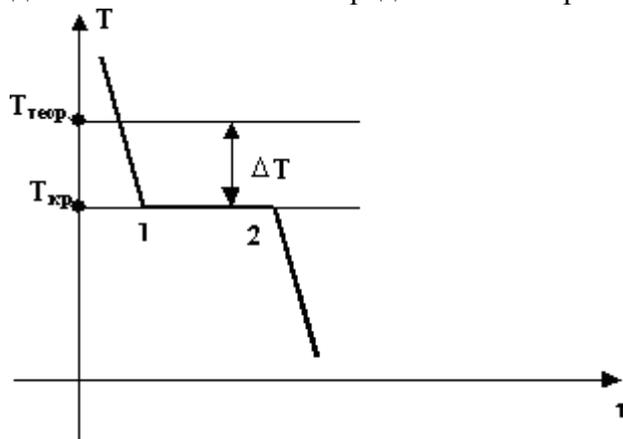


Рис.1.7. Кривая охлаждения чистого металла

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

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

*Процесс кристаллизации чистого металла*: до точки 1 охлаждается металл в жидком состоянии, процесс сопровождается плавным понижением температуры. На участке 1 – 2 идет процесс кристаллизации, сопровождающийся выделением тепла, которое называется *скрытой теплотой кристаллизации*. Оно компенсирует рассеивание теплоты в пространство, и поэтому температура остается постоянной. После окончания кристаллизации в точке 2 температура снова начинает снижаться, металл охлаждается в твердом состоянии.

При соответствующем понижении температуры в жидком металле начинают образовываться кристаллики – *центры кристаллизации* или *зародыши*. Для начала их роста необходимо уменьшение свободной энергии металла, в противном случае зародыш растворяется. Минимальный размер способного к росту зародыша называется *критическим размером*, а зародыш – устойчивым.

Механизм кристаллизации представлен на рис.1.8. Центры кристаллизации образуются в исходной фазе независимо друг от друга в случайных местах. Сначала кристаллы имеют правильную форму, но по мере столкновения и срастания с другими кристаллами форма нарушается. Рост продолжается в направлениях, где есть свободный доступ питающей среды. После окончания кристаллизации имеем поликристаллическое тело. Процесс вначале ускоряется, пока столкновение кристаллов не начинает препятствовать их росту. Объем жидкой фазы, в которой образуются кристаллы, уменьшается. После кристаллизации 50 % объема металла, скорость кристаллизации будет замедляться. Таким образом, процесс кристаллизации состоит из образования центров кристаллизации и роста кристаллов из этих центров.

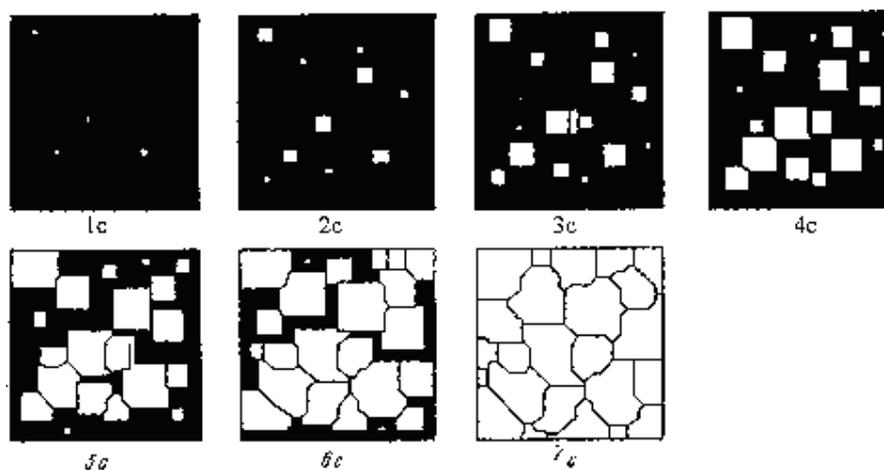


Рис.1.8. Модель процесса кристаллизации

Стремятся к получению мелкозернистой структуры. Оптимальными условиями для этого являются: максимальное число центров кристаллизации и малая скорость роста кристаллов. Размер зерен при кристаллизации зависит и от числа частичек нерастворимых примесей, которые играют роль готовых центров кристаллизации – оксиды, нитриды, сульфиды. Чем больше частичек, тем мельче зерна закристаллизовавшегося металла. Стенки изложниц имеют неровности, шероховатости, которые увеличивают скорость кристаллизации. Мелкозернистую структуру можно получить в результате *модифицирования*, когда в жидкие металлы добавляются посторонние вещества – *модификаторы*.

#### 1.4.Строение металлического слитка.

Схема стального слитка, данная Черновым Д.К., представлена на рис.1.9.

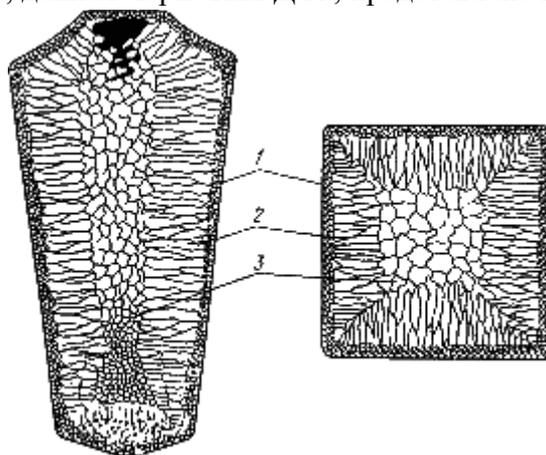


Рис. 1.9. Схема стального слитка

Слиток состоит из трех зон:

1. мелкокристаллическая корковая зона;
2. зона столбчатых кристаллов;
3. внутренняя зона крупных равноосных кристаллов.

Кристаллизация корковой зоны идет в условиях максимального переохлаждения. Скорость кристаллизации определяется большим числом центров кристаллизации. Образуется мелкозернистая структура. Жидкий металл под корковой зоной находится в условиях меньшего переохлаждения. Число центров ограничено и процесс кристаллизации

реализуется за счет их интенсивного роста до большого размера. Рост кристаллов во второй зоне имеет направленный характер. Они растут перпендикулярно стенкам изложницы, образуются древовидные кристаллы – дендриты. Растут дендриты с направлением, близким к направлению теплоотода. Так как теплоотвод от незакристаллизовавшегося металла в середине слитка в разные стороны выравнивается, то в центральной зоне образуются крупные дендриты со случайной ориентацией. Зоны столбчатых кристаллов в процессе кристаллизации стыкуются, это явление называется *транскристаллизацией*. Для малопластичных металлов и для сталей это явление нежелательное, так как при последующей прокатке, ковке могут образовываться трещины в зоне стыка. В верхней части слитка образуется усадочная раковина, которая подлежит отрезке и переплавке, так как металл более рыхлый (около 15...20 % от длины слитка)

### 1.5. Качество материалов и его оценка

*Качеством материала* называется совокупность его свойств, удовлетворяющих определенные потребности в соответствии с назначением. Уровень качества определяется соответствующими показателями. *Единичный* показатель качества характеризуется только одним свойством (например, твердость стали). *Комплексный* показатель характеризуется несколькими свойствами продукции. При этом продукция считается качественной только в том случае, если весь комплекс оцениваемых свойств удовлетворяет установленным требованиям качества. Примером комплексного показателя качества стали могут служить оценка химического состава, механических свойств, микро- и макроструктуры. Комплексные показатели качества устанавливаются государственными стандартами. Методы контроля качества могут быть самые разнообразные: визуальный осмотр, органолептический анализ и инструментальный контроль. По стадии определения качества различают контроль предварительный, промежуточный и окончательный. При предварительном контроле оценивается качество исходного сырья, при промежуточном — соблюдение установленного технологического процесса. Окончательный контроль определяет качество готовой продукции, ее годность и соответствие стандартам. Годной считается продукция, полностью отвечающая требованиям стандартов и технических условий. Продукция, имеющая дефекты и отклонения от стандартов, считается браком.

Существуют различные методы изучения структуры материалов. С помощью макроанализа изучают структуру, видимую невооруженным глазом или при небольшом увеличении с помощью лупы. *Макроанализ* позволяет выявить различные особенности строения и дефекты (трещины, пористость, раковины и др.). *Микроанализом* называется изучение структуры с помощью оптического микроскопа при увеличении до 3000 раз. Электронный микроскоп позволяет изучать структуру при увеличении до 25000 раз. *Рентгеновский анализ* применяют для выявления внутренних дефектов. Он основан на том, что рентгеновские лучи, проходящие через материал и через дефекты, ослабляются в разной степени. Глубина проникновения рентгеновских лучей в сталь составляет 80 мм. *Магнитная дефектоскопия* позволяет выявить дефекты в поверхностном слое (до 2 мм) металлических материалов, обладающих магнитными свойствами и основана на искажении магнитного поля в местах дефектов. *Ультразвуковая дефектоскопия* позволяет осуществлять эффективный контроль качества на большой глубине. Она основана на том, что при наличии дефекта интенсивность проходящего через материал ультразвука меняется. *Капиллярная*

*дефектоскопия* служит для выявления невидимых глазом тонких трещин. Она использует эффект заполнения этих трещин легко смачивающими материал жидкостями.

### 1.6. Вопросы самопроверки.

- 1) Как называется способность металла образовывать разные типы кристаллических решеток?
- 2) Что определяет металлическое состояние металлов и сплавов? Какие свойства характеризуют металлы?
- 3) Что такое кристаллическая решетка? Основные типы кристаллических решеток.
- 4) Классификация дефектов кристаллического строения.
- 5) Что называется кристаллизацией?
- 6) Условия прохождения процесса кристаллизации.
- 7) Что такое дендрит?
- 8) Как влияют условия кристаллизации на строение слитка

### 1.7. Глоссарий по теме 1.

**АЛЛОТРОПИЯ или ПОЛИМОРФИЗМ**

– способность некоторых металлов существовать в нескольких кристаллических формах.

**АНИЗОТРОПИЯ**

– различие свойств металлов и сплавов в разных кристаллографических направлениях.

**ВАКАНСИЯ**

– точечный дефект кристаллической решетки – узел кристаллической решетки, в котором отсутствует атом или ион.

**ГЕТЕРОГЕННАЯ СИСТЕМА**

– макроскопически неоднородная физико-химическая система, состоящая из различных фаз, разграниченных поверхностями раздела.

**ГОМОГЕННАЯ СИСТЕМА**

– макроскопически однородная система, состоящая из одной фазы

**ГРАНИЦА ЗЕРНА**

– поверхность соприкосновения между зернами одной фазы в металлах или сплавах, поверхностный дефект кристаллического строения.

**ДВОЙНИК**

– объемный дефект кристаллической решетки в виде слоя конечной толщины, кристаллическая решетка которого

является зеркальным отражением решетки основной части кристалла.

## **ДЕНДРИТ**

– кристалл древовидной формы, возникающий при кристаллизации в результате различий в скоростях роста зародыша в разных кристаллографических направлениях.

## **ДЕНДРИТНАЯ ЛИКВАЦИЯ**

– ликвация внутри одного дендрита или зерна, определяемая интервалом и скоростью кристаллизации.

## **Зональная ликвация**

– ликвация в отдельных частях слитка или изделия.

## **ДИСЛОКАЦИЯ**

– линейный дефект кристаллической решетки, нарушающий правильное чередование атомных плоскостей и образующий внутри кристалла границу зоны сдвига.

## **ДЕФЕКТ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ**

– нарушение строгой периодичности расположения частиц в кристаллической решетке.

### **линейный Д.**

– дефект кристаллической решетки, имеющий малые размеры (несколько атомных диаметров) в двух измерениях и значительную протяженность.

### **поверхностный Д.**

– дефект кристаллической решетки, имеющий малые размеры (несколько атомных диаметров) только в одном измерении, в двух других он соизмерим с размерами кристалла.

### **точечный Д.**

– дефект кристаллической решетки, размеры которого малы (не более нескольких атомных диаметров) во всех трех измерениях.

## **ЗАРОДЫШ**

– 1) частица твердой фазы, образовавшаяся при кристаллизации из жидкости или газа;  
– 2) частица новой фазы, образовавшаяся при распаде пересыщенного раствора.

### **закритический З.**

– зародыш, размер которого больше критического; способен к самопроизвольному росту.

### **критический З.**

– зародыш критического размера.

## **ЗЕРНО**

– отдельные кристаллиты поликристаллического конгломерата, разделенные между собой границами.

<b>ИЗЛОМ</b>	– поверхность разрушения образца или изделия.
<b>вязкий или волокнистый И.</b>	– поверхность вязкого разрушения с характерными “волокнами”, вытянутыми в направлении нагружения под действием деформации зерен, разорванных в процессе разрушения.
<b>усталостный И.</b>	– излом, возникающий под давлением знакопеременных или циклических нагрузок.
<b>хрупкий И.</b>	– излом без видимых следов пластической деформации на поверхности разрушения.
<b>КРИВАЯ НАГРЕВА (охлаждения)</b>	– график, характеризующий увеличение (уменьшение) температуры от времени.
<b>КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ</b>	– процесс образования кристаллов из жидкого, газообразного и твердого состояний.
<b>ЛИКВАЦИЯ</b>	– неоднородность сплава по химическому составу, структуре и неметаллическим включениям, образующаяся при кристаллизации слитка.
<b>МАКРОСТРУКТУРА</b>	– строение металлов и сплавов, видимое невооруженным глазом или с помощью лупы на шлифованных и/или протравленных образцах.
<b>МИКРОСТРУКТУРА</b>	– строение металлов и сплавов, выявляемое с помощью микроскопа на шлифованных и (или) протравленных образцах (в оптическом и растровом электронных микроскопах) или на репликах и фольгах (в просвечивающем электронном микроскопе).
<b>ШЛИФ</b>	– полированная поверхность сечения металла или минерала, подготовленная для визуального или микроскопического исследования.

### **1.8. Используемые информационные ресурсы.**

1. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2008. – 877 с.
2. Материаловедение [Текст]: учебник для вузов / Ю.М.Лахтин, В.П. Леонтьева –М.: Машиностроение, 2009. - 526 с.
3. Курс материаловедения в вопросах и ответах [Текст]: учебное пособие / С. И. Богодухов, А. В. Синюхин, Е.С. Козик– 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2010. – 349 с.

## **Тема 2. Механические свойства металлов.**

**Аннотация.** Данная тема раскрывает основные понятия упругой и пластической деформации. Предусматривается изучение механических свойств металлов и методов их определения.

**Ключевые слова.** *Прочность, надежность, долговечность, деформация, наклеп, нагружение.*

### **2.1 Конструкционная прочность материалов**

*Конструкционная прочность* – комплекс прочностных свойств, которые находятся в наибольшей корреляции со служебными свойствами данного изделия, обеспечивают длительную и надежную работу материала в условиях эксплуатации. На конструкционную прочность влияют следующие факторы:

- конструкционные особенности детали (форма и размеры);
- механизмы различных видов разрушения детали;
- состояние материала в поверхностном слое детали;
- процессы, происходящие в поверхностном слое детали, приводящие к отказам при работе.

Необходимым условием создания качественных конструкций при экономном использовании материала является учет дополнительных критериев, влияющих на конструкционную прочность. Этими критериями являются *надежность* и *долговечность*.

*Надежность* – свойство изделий, выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого времени или сопротивление материала хрупкому разрушению. Развитие хрупкого разрушения происходит при низких температурах, при наличии трещин, при повышенных остаточных напряжениях, а также при развитии усталостных процессов и коррозии. Критериями, определяющими надежность, являются температурные пороги хладоломкости, сопротивление распространению трещин, ударная вязкость, характеристики пластичности, живучесть.

*Долговечность* – способность детали сохранять работоспособность до определенного состояния. Долговечность определяется усталостью металла, процессами износа, коррозии и другими, которые вызывают постепенное разрушение и не влекут аварийных последствий, то есть условиями работы. Критериями, определяющими долговечность, являются усталостная прочность, износостойкость, сопротивление коррозии, контактная прочность.

### **2.2. Особенности деформации поликристаллических тел.**

Рассмотрим холодную пластическую деформацию поликристалла. Пластическая деформация металлов и сплавов как тел поликристаллических, имеет некоторые особенности по сравнению с пластической деформацией монокристалла. Деформация поликристаллического тела складывается из деформации отдельных зерен и деформации в приграничных объемах. Деформация начинается в отдельных зернах, в плоскостях скольжения которых возникают максимальные касательные напряжения. Соседние зерна будут разворачиваться и постепенно вовлекаться в процесс деформации. Деформация

приводит к изменению формы зерен: зерна получают форму, вытянутую в направлении наиболее интенсивного течения металла (поворачиваются осями наибольшей прочности вдоль направления деформации). Изменение структуры при деформации показано на рис. 2.1.

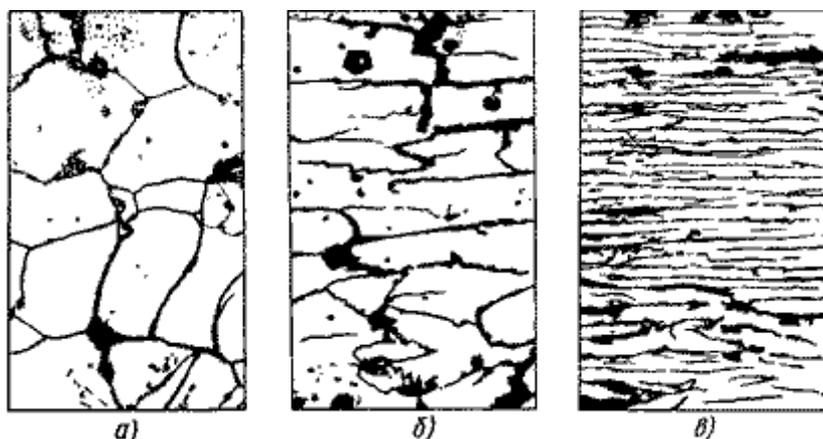


Рис.2.1. Изменение структуры при деформации: а) до деформации; б) после обжатия на 35%; в) после обжатия на 90%.

Металл приобретает волокнистое строение. Волокна с вытянутыми вдоль них неметаллическими включениями являются причиной неодинаковости свойств вдоль и поперек волокон. Одновременно с изменением формы зерен в процессе пластической деформации происходит изменение ориентировки в пространстве их кристаллической решетки.

Совокупность явлений, связанных с изменением механических, физических и других свойств металлов в процессе пластической деформации называют *деформационным упрочнением* или *наклепом*. Упрочнение при наклепе объясняется возрастанием на несколько порядков плотности дислокаций:  $\rho = 10^6 \dots 10^8 \rightarrow 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Деформированный металл находится в неравновесном состоянии. Волокнистое строение и наклеп могут быть устранены при нагреве металла. Частичное снятие наклепа происходит уже при небольшом нагреве (до 300...400 °С для железа). Но волокнистая структура при этом сохраняется. При нагреве до более высокой температуры в металле происходит образование новых равноосных зерен. Этот процесс называется рекристаллизацией. Наклеп при этом снимается полностью.



При повышении температуры металла в процессе нагрева после пластической деформации диффузия атомов увеличивается и начинают действовать процессы разупрочнения, приводящие металл в более равновесное состояние – *возврат* и *рекристаллизация*.

*Возврат.* Небольшой нагрев вызывает ускорение движения атомов, снижение плотности дислокаций, устранение внутренних напряжений и восстановление кристаллической решетки. Процесс частичного разупрочнения и восстановления свойств называется *отдыхом* (первая стадия возврата). Имеет место при температуре  $T = (0,25 \dots 0,3)T_{\text{пл}}$ . Возврат уменьшает искажение кристаллической решетки, но не влияет на размеры и форму зерен и не препятствует образованию текстуры деформации.

*Полигонизация* – процесс деления зерен на части: фрагменты, полигоны в результате скольжения и переползания дислокаций.

При нагреве до достаточно высоких температур подвижность атомов возрастает и происходит *рекристаллизация*. *Рекристаллизация* – процесс зарождения и роста новых недеформированных зерен при нагреве наклепанного металла до определенной температуры.

Температура, при которой начинается процесс рекристаллизации называется температурой рекристаллизации. Абсолютная температура рекристаллизации  $T_p$  связана с абсолютной температурой плавления простой зависимостью:  $T_p = a \cdot T_{пл}$ , где  $a$  – коэффициент, зависящий от состава и структуры металла. Для особо чистых металлов  $a = 0,2$ , для металлов технической чистоты  $a = 0,3 \dots 0,4$ , для сплавов  $a = 0,5 \dots 0,6$ .

Если деформирование металла происходит при температуре, которая выше температуры рекристаллизации, то наклеп после деформации не возникает. Такая деформация называется горячей. При горячей деформации идут одновременно процессы упрочнения и рекристаллизации. Деформация, которая происходит ниже температуры рекристаллизации называется холодной.

### 2.3. Физическая природа деформации металлов.

*Деформацией* называется изменение формы и размеров тела под действием напряжений.

*Напряжение* – сила, действующая на единицу площади сечения детали. Напряжения и вызываемые ими деформации могут возникать при действии на тело внешних сил растяжения, сжатия и т.д., а также в результате фазовых (структурных) превращений, усадки и других физико-химических процессов, протекающих в металлах, и связанных с изменением объема. Металл, находящийся в напряженном состоянии, при любом виде нагружения всегда испытывает напряжения нормальные и касательные (рис. 2.2.).

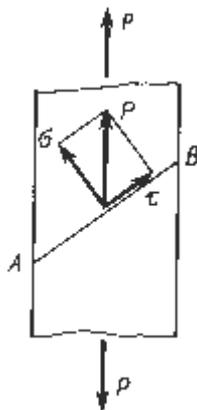


Рис.2.2. Схема возникновения нормальных и касательных напряжений в металле при его нагружении

Рост нормальных и касательных напряжений приводит к разным последствиям. Рост нормальных напряжений приводит к хрупкому разрушению. Пластическую деформацию вызывают касательные напряжения. Деформация металла под действием напряжений может быть упругой и пластической.

*Упругой* называется деформация, полностью исчезающая после снятия вызывающих ее напряжений. При упругом деформировании изменяются расстояния между атомами металла

в кристаллической решетке. Снятие нагрузки устраняет причину, вызвавшую изменение межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места, и деформация исчезает. Упругая деформация на диаграмме деформации характеризуется линией ОА (рис.2.3.).

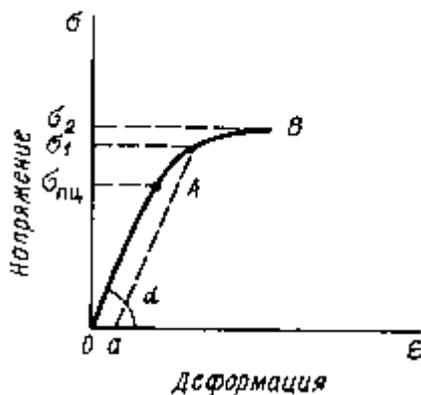


Рис. 2.3. Диаграмма зависимости деформации металла  $\epsilon$  от действующих напряжений  $\sigma$

Если нормальные напряжения достигают значения сил межатомных связей, то наблюдается хрупкое разрушение путем отрыва. Зависимость между упругой деформацией  $\epsilon$  и напряжением  $\sigma$  выражается законом Гука  $\sigma = E \cdot \epsilon$ , где:  $E$  - модуль упругости. Модуль упругости является важнейшей характеристикой упругих свойств металла. По физической природе величина модуля упругости рассматривается как мера прочности связей между атомами в твердом теле. Эта механическая характеристика структурно нечувствительна, т. е. термическая обработка или другие способы изменения структуры не изменяют модуля упругости, а повышение температуры, изменяющее межатомные расстояния, снижает модуль упругости.

*Пластической* или *остаточной* называется деформация после прекращения действия вызвавших ее напряжений. При пластическом деформировании одна часть кристалла перемещается по отношению к другой под действием касательных напряжений. При снятии нагрузок сдвиг остается, т.е. происходит пластическая деформация. В результате развития пластической деформации может произойти *вязкое* разрушение путем сдвига. Процесс деформации при достижении высоких напряжений завершается разрушением. Тела разрушаются по сечению не одновременно, а вследствие развития трещин. Разрушение включает три стадии: зарождение трещины, ее распространение через сечение, окончательное разрушение.

Различают *хрупкое* разрушение – отрыв одних слоев атомов от других под действием нормальных растягивающих напряжений. Отрыв не сопровождается предварительной деформацией. Когда напряжения достигают определенного значения, размер трещины становится критическим и дальнейший рост осуществляется произвольно. Для хрупкого разрушения характерна острая, часто ветвящаяся трещина. Результатом хрупкого разрушения является блестящий светлый кристаллический излом с ручьистым строением.

*Вязкое* разрушение – путем среза под действием касательных напряжений. Ему всегда предшествует значительная пластическая деформация. Трещина тупая раскрывающаяся. Величина пластической зоны впереди трещины велика. Малая скорость распространения трещины. Поверхность излома негладкая, рассеивает световые лучи, матовая (волоконистый) излом. Плоскость излома располагается под углом. По излому можно определить характер разрушения.

## 2.4. Механические свойства и способы определения их количественных характеристик

Основными механическими свойствами являются прочность, упругость, вязкость, твердость. Зная механические свойства, конструктор обоснованно выбирает соответствующий материал, обеспечивающий надежность и долговечность конструкций при их минимальной массе. В зависимости от условий нагружения механические свойства могут определяться при:

- статическом нагружении – нагрузка на образец возрастает медленно и плавно.
- динамическом нагружении – нагрузка возрастает с большой скоростью, имеет ударный характер.
- повторно, переменном или циклическом нагружении – нагрузка в процессе испытания многократно изменяется по величине или по величине и направлению.

При статическом испытании на растяжение: ГОСТ 1497 получают характеристики прочности и пластичности. *Прочность* – способность материала сопротивляться деформациям и разрушению. Испытания проводятся на специальных машинах, которые записывают диаграмму растяжения, выражающую зависимость удлинения образца  $\Delta l$  (мм) от действующей нагрузки  $P$ , т.е.  $\Delta l = f(P)$ .

Но для получения данных по механическим свойствам перестраивают: зависимость относительного удлинения  $\Delta l$  от напряжения  $\sigma$

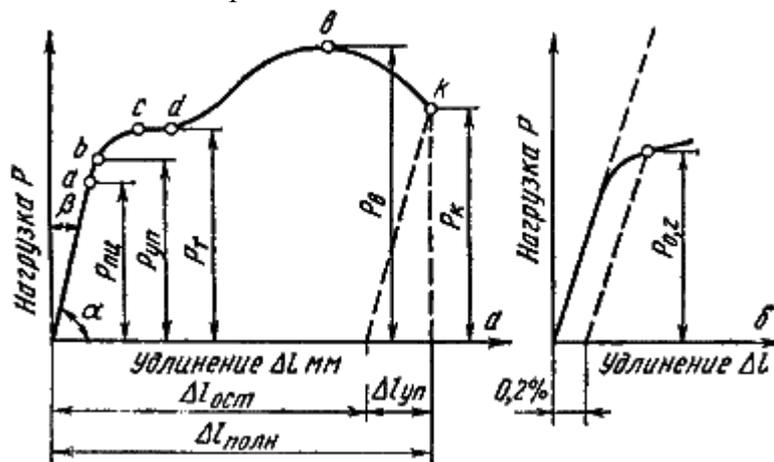


Рис. 2.4. Диаграмма растяжения: *a* – абсолютная, *б* – относительная; *в* – схема определения условного предела текучести

Участок *oa* на диаграмме соответствует упругой деформации материала, когда соблюдается закон Гука. Напряжение, соответствующее упругой предельной деформации в точке *a*, называется *пределом пропорциональности*. Предел пропорциональности ( $\sigma_{п\propto}$ ) – максимальное напряжение, до которого сохраняется линейная зависимость между деформацией и напряжением.

$$\sigma_{п\propto} = \frac{P_{п\propto}}{F_0}$$

При напряжениях выше предела пропорциональности происходит равномерная пластическая деформация (удлинение или сужение сечения). Каждому напряжению соответствует остаточное удлинение, которое получаем проведением из соответствующей точки диаграммы растяжения линии параллельной *oa*. Так как практически невозможно

установить точку перехода в неупругое состояние, то устанавливают *условный предел упругости*, – максимальное напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию. Считают напряжение, при котором остаточная деформация очень мала (0,005...0,05%). В обозначении указывается значение остаточной деформации ( $\sigma_{0,05}$ ).

$$\sigma_{0,05} = \frac{F_{0,05}}{F_0}$$

*Предел текучести* характеризует сопротивление материала небольшим пластическим деформациям. *Условный предел текучести* ( $\sigma_{0,2}$ ) – это напряжение вызывающее остаточную деформацию  $\delta = 0,2\%$

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{F_0}$$

*Предел прочности* ( $\sigma_\epsilon$ ) – напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, которую выдерживает образец до разрушения (временное сопротивление разрыву).  $\sigma_\epsilon = \frac{F_\epsilon}{F_0}$

*Пластичность* - способность материала к пластической деформации, т.е. способность получать остаточное изменение формы и размеров без нарушения сплошности.

-относительное удлинения. ( $\delta$ )  $\delta = \frac{l_x - l_0}{l_0} 100\% = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} 100\%$ , где  $l_0$  и  $l_x$  – начальная и конечная длина образца,  $\Delta l_{\text{ост}}$  – абсолютное удлинение образца, определяется измерением образца после разрыва.

- относительное сужение  $\Psi = \frac{F_0 - F_x}{F_0} 100\%$ , где  $F_0$  - начальная площадь поперечного сечения,  $F_x$  - площадь поперечного сечения в шейке после разрыва. Относительное сужение более точно характеризует пластичность и служит технологической характеристикой при листовой штамповке.

*Твердость* – это сопротивление материала проникновению в его поверхность стандартного тела (индентора), не деформирующегося при испытании. Это неразрушающий метод контроля. Основной метод оценки качества термической обработке изделия. О твердости судят либо по глубине проникновения индентора (метод Роквелла), либо по величине отпечатка от вдавливания (методы Бринелля, Виккерса, микротвердости). Во всех случаях происходит пластическая деформация материала. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем выше твердость.

Схемы испытаний представлены на рис. 2.5.

*Хладоломкостью* называется склонность металла к переходу в хрупкое состояние с понижением температуры. Хладоломкими являются железо, вольфрам, цинк и другие металлы, имеющие объемноцентрированную кубическую и гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку. В технике за порог хладоломкости принимают температуру, при которой в изломе 50 % вязкой составляющей. Причем эта температура должна быть ниже температуры эксплуатации изделий не менее чем на 40°C.

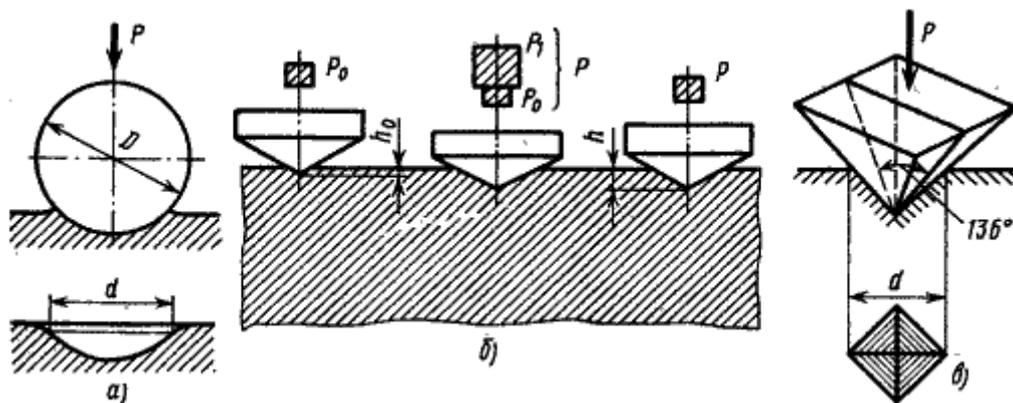


Рис. 2.5. Схемы определения твердости: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Ударная вязкость характеризует надежность материала, его способность сопротивляться хрупкому разрушению. Испытание проводят на образцах с надрезами определенной формы и размеров. Образец устанавливают на опорах копра надрезом в сторону, противоположную удару ножа маятника, который поднимают на определенную высоту (рис. 2.6)

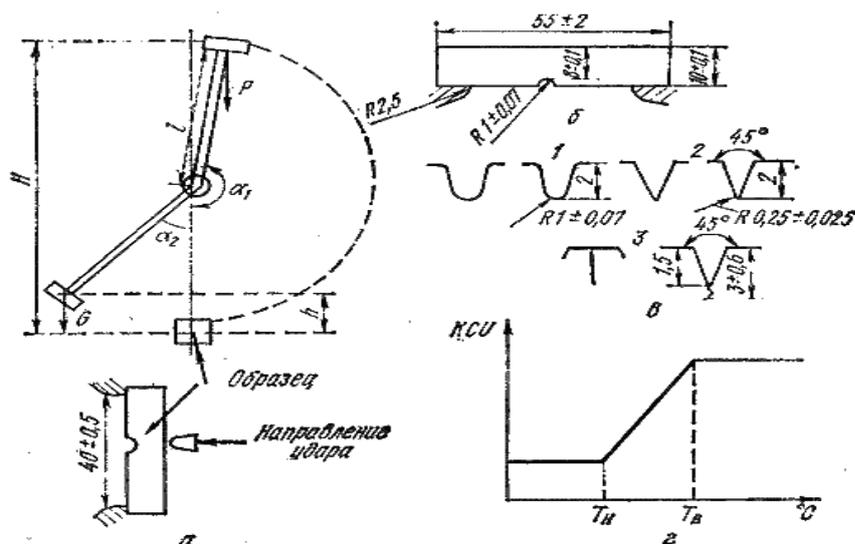


Рис.2.6. Схема испытания на ударную вязкость: а – схема маятникового копра; б – стандартный образец с надрезом; в – виды концентраторов напряжений; г – зависимость вязкости от температуры

Характеристикой вязкости является ударная вязкость ( $a_n$ ), - удельная работа разрушения.  $a_n = \frac{A}{F_0}$ , где:  $F_0$  - площадь поперечного сечения в месте надреза. ГОСТ 9454 – 78 ударную вязкость обозначает КСВ. КСУ. КСТ. КС – символ ударной вязкости, третий символ показывает вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U), трещина (Т) (рис. 2.8 в).

Испытания на выносливость (ГОСТ 2860) дают характеристики усталостной прочности. Усталость - разрушение материала при повторных знакопеременных напряжениях, величина которых не превышает предела текучести. Усталостная прочность

– способность материала сопротивляться усталости. *Предел выносливости* ( $\sigma_{-1}$  – при симметричном изменении нагрузки,  $\sigma_{-2}$  – при несимметричном изменении нагрузки) – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за произвольно большое число циклов нагружения N.

*Живучесть* – разность между числом циклов до полного разрушения и числом циклов до появления усталостной трещины.

## 2.5. Технологические свойства

*Технологические свойства* характеризуют способность материала подвергаться различным способам холодной и горячей обработки.

### 1. Литейные свойства.

Характеризуют способность материала к получению из него качественных отливок.

*Жидкотекучесть* – характеризует способность расплавленного металла заполнять литейную форму.

*Усадка (линейная и объемная)* – характеризует способность материала изменять свои линейные размеры и объем в процессе затвердевания и охлаждения. Для предупреждения линейной усадки при создании моделей используют нестандартные метры.

*Ликвация* – неоднородность химического состава по объему.

### 2. Способность материала к обработке давлением.

Это способность материала изменять размеры и форму под влиянием внешних нагрузок не разрушаясь. Она контролируется в результате технологических испытаний, проводимых в условиях, максимально приближенных к производственным.

Листовой материал испытывают на перегиб и вытяжку сферической лунки. Проволоку испытывают на перегиб, скручивание, на навивание. Трубы испытывают на раздачу, сплющивание до определенной высоты и изгиб. Критерием годности материала является отсутствие дефектов после испытания.

### 3. Свариваемость.

Это способность материала образовывать неразъемные соединения требуемого качества. Оценивается по качеству сварного шва.

### 4. Способность к обработке резанием.

Характеризует способность материала поддаваться обработке различным режущим инструментом. Оценивается по стойкости инструмента и по качеству поверхностного слоя.

## 2.6. Эксплуатационные свойства

Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях.

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

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

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

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

5. *Хладостойкость* – способность материала сохранять пластические свойства при отрицательных температурах.

6. *Антифрикционность* – способность материала прирабатываться к другому материалу.

Эти свойства определяются специальными испытаниями в зависимости от условий работы изделий. При выборе материала для создания конструкции необходимо полностью учитывать механические, технологические и эксплуатационные свойства.

## 2.7. Вопросы самопроверки

1. Что такое механические свойства материалов
2. Какие виды нагружения вы знаете, в чем их отличие?
3. Что такое статические испытания, какие свойства можно определить этим видом испытаний?
4. В чем разница в понятиях  $\sigma_T$  и  $\sigma_{0,2}$ ?
5. Что такое ударная вязкость КСЧ, как определить эту характеристику?
6. Какие свойства металла можно определить при усталостных испытаниях?
7. Что такое твердость материала?
8. Какие виды испытаний на твердость вы знаете?
9. Как проводятся испытания на твердость по Бринеллю?
10. Что такое – HRA, HRB, и HRC?

## 2.8. Глоссарий по теме 2

**ВРЕМЕННОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ  
РАЗРЫВУ ( $\sigma_B$ )**

- Значение предела прочности материала при испытаниях на растяжение.

**ВЯЗКОСТЬ**

- Свойство твердых тел необратимо поглощать энергию при их пластичной деформации.

**ДЕФОРМАЦИЯ**

- Изменение взаимного расположения точек твердого тела под воздействием внешних или внутренних сил.

**горячая Д.**

- Деформирование, протекающие при температурах выше температуры рекристаллизации.

**холодная Д.**

- Деформирование без предварительного нагрева материала или деформирование при температурах не превышающих температуры рекристаллизации (тепловое деформирование).

<b>МОДУЛЬ УПРУГОСТИ (E)</b>	- Коэффициент пропорциональности между приложенным к телу напряжением (в упругой области) и обусловленной им величиной деформации.
<b>НАКЛЕП</b>	- Изменение структуры и свойств металлов и сплавов в результате пластической деформации. Сопровождается повышением твердости и прочности и понижением пластичности и ударной вязкости.
<b>ОТНОСИТЕЛЬНОЕ УДЛИНЕНИЕ РАЗРЫВА</b>	- Отношение приращения расчетной длины образца после разрушения к начальной расчетной длине, выраженной в процентах.
<b>ПЛАСТИЧНОСТЬ</b>	- Способность твердых тел к развитию пластических деформаций без разрушения под действием внешних сил при напряжениях, превышающих предел текучести.
<b>ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ</b>	- Условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдерживаемой образцом.
<b>ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ УСЛОВНЫЙ</b>	- Условное напряжение, соответствующее определенной величине остаточной пластической деформации; наиболее распространен условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ соответствует остаточной деформации в 0,2 %.
<b>ПРОЧНОСТЬ</b>	- Способность твердых тел сопротивляться разрушению или пластической деформации под действием внешних нагрузок.
<b>конструкционная П.</b>	- Прочность изделия при работе в готовой конструкции.
<b>теоретическая П.</b>	- Максимальный достигнутый уровень прочности твердого тела, определяемый силами межатомных связей данной кристаллической решетки (составляет примерно 1/6 от величины модуля упругости).
<b>усталостная П.</b>	- Способность материала противостоять усталости, характеризуемая, как правило, пределом выносливости или долговечности при заданном напряжении циклического нагружения.
<b>СУЖЕНИЕ</b>	- Уменьшение площади сечения образца или изделия в процессе деформации.
<b>относительное С.</b>	- Отношение разности площадей исходного и минимального конечного сечения образца после разрушения к площади исходного сечения, выраженное в процентах.

<b>ТРЕЩИНА</b>	- Двумерный дефект – нарушение сплошности материала с образованием свободных поверхностей.
<b>ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ</b>	- Способность материала противостоять образованию трещин, характеризуемая величиной вязкости разрушения.
<b>УДАРНАЯ ВЯЗКОСТЬ</b>	- Механическая характеристика материала, соответствующая отношению работы разрушения при ударном изгибе образца к начальной площади его конечного сечения в плоскости излома.
<b>УПРУГОСТЬ</b>	- Способность тел восстанавливать свою форму и объем или только объем после прекращения действия внешних сил.

## **2.9. Используемые информационные ресурсы**

1. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2008. – 877 с.
2. Материаловедение[Текст]: учебник для вузов /Ю.М.Лахтин, В.П. Леонтьева –М.: Машиностроение, 2009. - 526 с.
3. Курс материаловедения в вопросах и ответах[Текст]: учебное пособие / С. И. Богодухов, А. В. Синюхин, Е.С. Козик– 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2010. – 349 с.
- 4.Библиотека стандартов ГОСТ Р [сайт] URL: <http://www.gost.ru>

### Тема 3. Строение сплавов. Диаграммы состояния сплавов

**Аннотация.** Данная тема раскрывает основные понятия в теории сплавов, особенности строения, кристаллизации и свойств сплавов: механических смесей, твердых растворов, химических соединений. Предусматривается изучение кристаллизации сплавов

**Ключевые слова.** *Диаграмма состояния, механические смеси, твердые растворы, химические соединения, эвтектика.*

#### 3.1. Основные понятия в теории сплавов

Под сплавом понимают вещество, полученное сплавлением двух или более элементов. Возможны другие способы приготовления сплавов: спекания, электролиз, возгонка. В этом случае вещества называются псевдосплавами. Сплав, приготовленный преимущественно из металлических элементов и обладающий металлическими свойствами, называется металлическим сплавом. Сплавы обладают более разнообразным комплексом свойств, которые изменяются в зависимости от состава и метода обработки.

*Система* – группа тел выделяемых для наблюдения и изучения. В металловедении системами являются металлы и металлические сплавы. Чистый металл является простой однокомпонентной системой, сплав – сложной системой, состоящей из двух и более компонентов.

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

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

*Вариантность* ( $C$ ) (число степеней свободы) – это число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация), которые можно изменять без изменения количества фаз в системе. Если вариантность  $C = 1$  (моновариантная система), то возможно изменение одного из факторов в некоторых пределах, без изменения числа фаз. Если вариантность  $C = 0$  (нонвариантная система), то внешние факторы изменять нельзя без изменения числа фаз в системе. Существует математическая связь между числом компонентов ( $K$ ), числом фаз ( $\Phi$ ) и вариантностью системы ( $C$ ). Это *правило фаз* или *закон Гиббса*  $C = K - \Phi + 2$ . Если принять, что все превращения происходят при постоянном давлении, то число переменных уменьшится  $C = K - \Phi + 1$ , где:  $C$  – число степеней свободы,  $K$  – число компонентов,  $\Phi$  – число фаз, 1 – учитывает возможность изменения температуры.

#### 3.2. Особенности строения, кристаллизации и свойств сплавов: механических смесей, твердых растворов, химических соединений

Строение металлического сплава зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, составляющие сплав. Почти все металлы в жидком состоянии растворяются друг в друге в любых соотношениях. В зависимости от характера взаимодействия компонентов различают сплавы: механические смеси; химические соединения; твердые растворы.

Сплавы *механические смеси* образуются, когда компоненты не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения. Образуются между элементами значительно различающимися по строению и свойствам, когда сила взаимодействия между однородными атомами больше чем между разнородными. Сплав состоит из кристаллов входящих в него компонентов (рис. 3.1). В сплавах сохраняются кристаллические решетки компонентов.

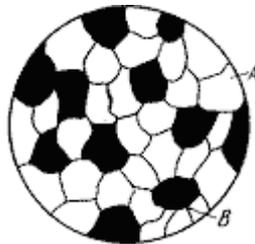


Рис. 3.1. Схема микроструктуры механической смеси

Сплавы *химические соединения* образуются между элементами, значительно различающимися по строению и свойствам, если сила взаимодействия между разнородными атомами больше, чем между однородными. Особенности этих сплавов: постоянство состава, то есть сплав образуется при определенном соотношении компонентов, химическое соединение обозначается  $A_nB_m$ ; образуется специфическая, отличающаяся от решеток элементов, составляющих химическое соединение, кристаллическая решетка с правильным упорядоченным расположением атомов (рис. 3.2); ярко выраженные индивидуальные свойства; постоянство температуры кристаллизации, как у чистых компонентов

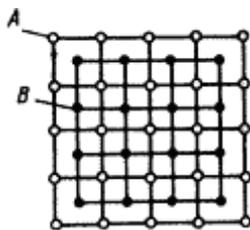


Рис. 3.2. Кристаллическая решетка химического соединения

Сплавы *твердые растворы* – это твердые фазы, в которых соотношения между компонентами могут изменяться. Являются кристаллическими веществами. Характерной особенностью твердых растворов является: наличие в их кристаллической решетке разнородных атомов, при сохранении типа решетки растворителя. Твердый раствор состоит из однородных зерен (рис. 3.3). По степеням растворимости компонентов различают твердые растворы: с неограниченной растворимостью компонентов; с ограниченной растворимостью компонентов.

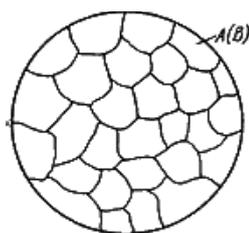


Рис.3.3. Схема микроструктуры твердого раствора

Для образования растворов с *неограниченной растворимостью* необходимы:

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

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

По характеру распределения атомов растворенного вещества в кристаллической решетке растворителя различают твердые растворы: замещения; внедрения; вычитания.

В растворах замещения в кристаллической решетке растворителя часть его атомов замещена атомами растворенного элемента (рис. 3.4 а). Замещение осуществляется в случайных местах, поэтому такие растворы называют неупорядоченными твердыми растворами.

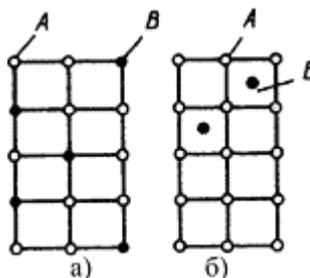


Рис.3.4. Кристаллическая решетка твердых растворов замещения (а), внедрения (б)

При образовании растворов замещения периоды решетки изменяются в зависимости от разности атомных диаметров растворенного элемента и растворителя. Изменение параметров решетки при образовании твердых растворов – важный момент, определяющий изменение свойств. Уменьшение параметра ведет к большему упрочнению, чем его увеличение.

*Твердые растворы внедрения* образуются внедрением атомов растворенного компонента в поры кристаллической решетки растворителя (рис. 3.4 б). Образование таких растворов, возможно, если атомы растворенного элемента имеют малые размеры. Такими являются элементы: углерод, водород, азот, бор. Размеры атомов превышают размеры межатомных промежутков в кристаллической решетке металла, это вызывает искажение решетки и в ней возникают напряжения. Концентрация таких растворов не превышает 2-2.5%

*Твердые растворы вычитания* или растворы с дефектной решеткой образуются на базе химических соединений, при этом возможна не только замена одних атомов в узлах кристаллической решетки другими, но и образование пустых, не занятых атомами, узлов в решетке. К химическому соединению добавляют, один из входящих в формулу элементов, его атомы занимают нормальное положение в решетке соединения, а места атомов другого элемента остаются, незанятыми.

### 3.3. Кристаллизация сплавов.

Кристаллизация сплавов подчиняется тем же закономерностям, что и кристаллизация чистых металлов. Необходимым условием является стремление системы в состояние с минимумом свободной энергии. Основным отличием является большая роль диффузионных процессов, между жидкостью и кристаллизующейся фазой. Эти процессы необходимы для перераспределения разнородных атомов, равномерно распределенных в жидкой фазе.

В сплавах в твердых состояниях, имеют место процессы перекристаллизации, обусловленные аллотропическими превращениями компонентов сплава, распадом твердых растворов, выделением из твердых растворов вторичных фаз, когда растворимость компонентов в твердом состоянии меняется с изменением температуры. Эти превращения называют фазовыми превращениями в твердом состоянии. Процессы кристаллизации сплавов изучаются по диаграммам состояния.

*Диаграмма состояния* представляет собой графическое изображение состояния любого сплава изучаемой системы в зависимости от концентрации и температуры. Диаграммы состояния показывают устойчивые состояния, т.е. состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии, и поэтому ее также называют диаграммой равновесия, так как она показывает, какие при данных условиях существуют равновесные фазы. Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называют критическими точками. Некоторые критические точки имеют названия, например, точки отвечающие началу кристаллизации называют точками *ликвидус*, а концу кристаллизации – точками *солидус*. По кривым охлаждения строят диаграмму состава в координатах: по оси абсцисс – концентрация компонентов, по оси ординат – температура. По диаграмме состояния можно определить температуры фазовых превращений, изменение фазового состава, приблизительно, свойства сплава, виды обработки, которые можно применять для сплава.

### 3.4. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов.

**Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (сплавы твердые растворы с неограниченной растворимостью).**

Диаграмма состояния и кривые охлаждения сплавов системы представлены на рис. 3.5.

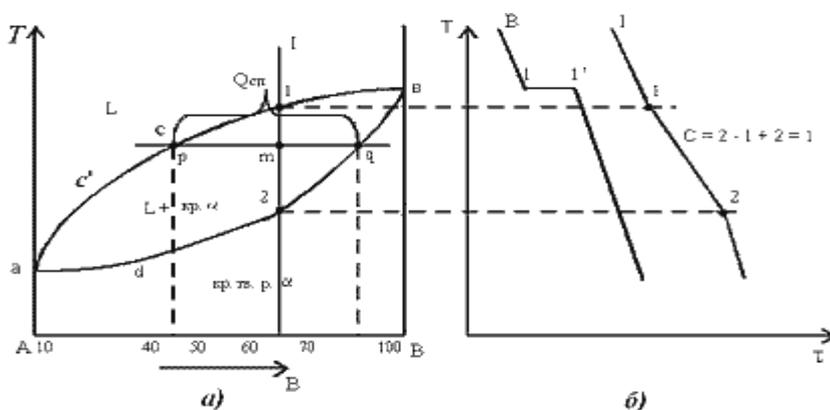


Рис.3.5 Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а); кривые охлаждения типичных сплавов (б)

1. Основные линии диаграммы:

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

2. Характерные сплавы системы: Чистые компоненты А и В кристаллизуются при постоянной температуре. Остальные сплавы кристаллизуются аналогично сплаву I, кривая охлаждения которого представлена на рис. 3.5, б.

*Процесс кристаллизации сплава I:* до точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, начинают образовываться центры кристаллизации твердого раствора  $\alpha$ . На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий при понижающейся температуре, так как согласно правилу фаз в двухкомпонентной системе при наличии двух фаз (жидкой и кристаллов твердого раствора  $\alpha$ ) число степеней свободы будет равно единице ( $C = 2 - 2 + 1 = 1$ ). При достижении температуры соответствующей точке 2, сплав затвердевает, при дальнейшем понижении температуры охлаждается сплав в твердом состоянии, состоящий из однородных кристаллов твердого раствора  $\alpha$ .

Схема микроструктуры сплава представлена на рис. 3.6.

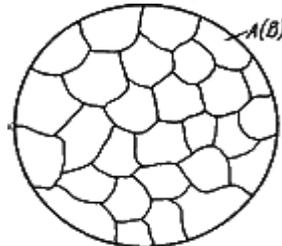


Рис. 3.6. Схема микроструктуры сплава – однородного твердого раствора

3. Количественный структурно-фазовый анализ сплава.

Пользуясь диаграммой состояния можно для любого сплава при любой температуре определить не только число фаз, но и их состав и количественное соотношение. Для этого используется *правило отрезков*. Для проведения количественного структурно-фазового анализа через заданную точку проводят горизонталь (коноду) до пересечения с ближайшими линиями диаграммы (ликвидус, солидус или оси компонентов).

Определение количественного соотношения жидкой и твердой фазы при заданной температуре (в точке  $m$ ): рассмотрим проведенную через точку  $m$  коноду и ее отрезки. Количество всего сплава ( $Q_{cn}$ ) определяется отрезком  $pq$ . Количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам проведенной коноды.

Отрезок, прилегающий к линии ликвидус  $pm$ , определяет количество твердой фазы.

$$Q_{тв} = \frac{pm}{pq} \cdot 100\%$$

Отрезок, прилегающий к линии солидус (или к оси компонента)  $mq$ , определяет количество жидкой фазы.

$$Q_{ж} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\%$$

**Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (механические смеси)**

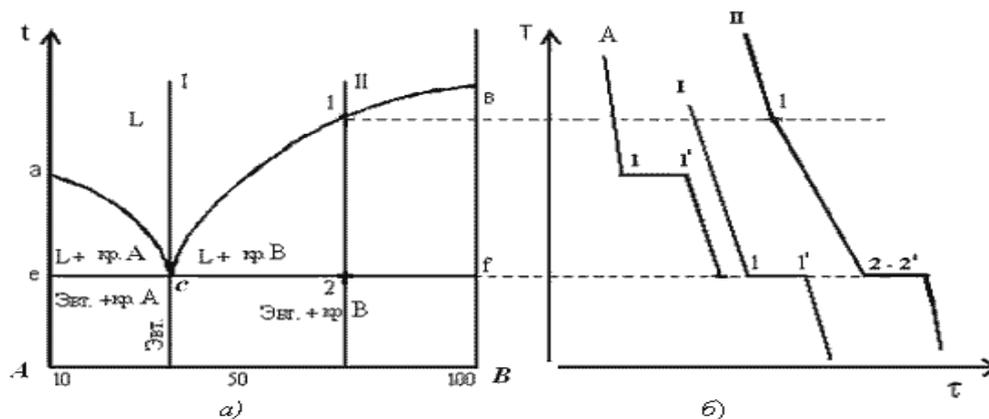


Рис. 3.7. Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения сплавов (б)

Проведем анализ диаграммы состояния.

1. Основные линии диаграммы:

- линия ликвидус  $acb$ , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
- линия солидус  $cef$ , параллельна оси концентраций стремится к осям компонентов, но не достигает их;

2. Типовые сплавы системы.

а) Чистые компоненты, кристаллизуются при постоянной температуре, на рис 3.7 б показана кривая охлаждения компонента А.

б). *Эвтектический сплав* – сплав, соответствующий концентрации компонентов в точке с (сплав I). Кривая охлаждения этого сплава, аналогична кривым охлаждения чистых металлов (рис.3.7 б). *Эвтектика* – мелкодисперсная механическая смесь разнородных кристаллов, кристаллизующихся одновременно при постоянной, самой низкой для рассматриваемой системы, температуре. При образовании сплавов механических смесей эвтектика состоит из кристаллов компонентов А и В: Эвт. (кр. А + кр. В). *Процесс кристаллизации эвтектического сплава*: до точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, начинается одновременная кристаллизация двух разнородных компонентов. На кривой охлаждения отмечается температурная остановка, т.е. процесс идет при постоянной температуре, так как согласно правилу фаз в двухкомпонентной системе при наличии трех фаз (жидкой и кристаллов компонентов А и В) число степеней свободы будет равно нулю ( $C = 2 - 3 + 1 = 0$ ). В точке 1' процесс кристаллизации завершается. Ниже точки 1' охлаждается сплав, состоящий из дисперсных разнородных кристаллов компонентов А и В.

в) Другие сплавы системы аналогичны сплаву II, кривую охлаждения сплава см на рис 3.7.б. *Процесс кристаллизации сплава II*: до точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, начинают образовываться центры кристаллизации избыточного компонента В. На кривой охлаждения отмечается перегиб

(критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий при понижающейся температуре, так как согласно правилу фаз в двухкомпонентной системе при наличии двух фаз (жидкой и кристаллов компонента В) число степеней свободы будет равно единице ( $C = 2 - 2 + 1 = 1$ ). При охлаждении состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус до эвтектического. На участке 2–2' кристаллизуется эвтектика (см. кристаллизацию эвтектического сплава). Ниже точки 2' охлаждается сплав, состоящий из кристаллов первоначально закристаллизовавшегося избыточного компонента В и эвтектики.

Схема микроструктуры сплава представлена на рис. 3.8.

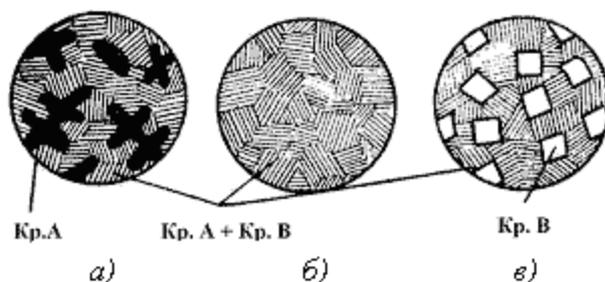


Рис. 3.8. Схема микроструктур сплавов: а – доэвтектического, б – эвтектического, в – заэвтектического

### Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

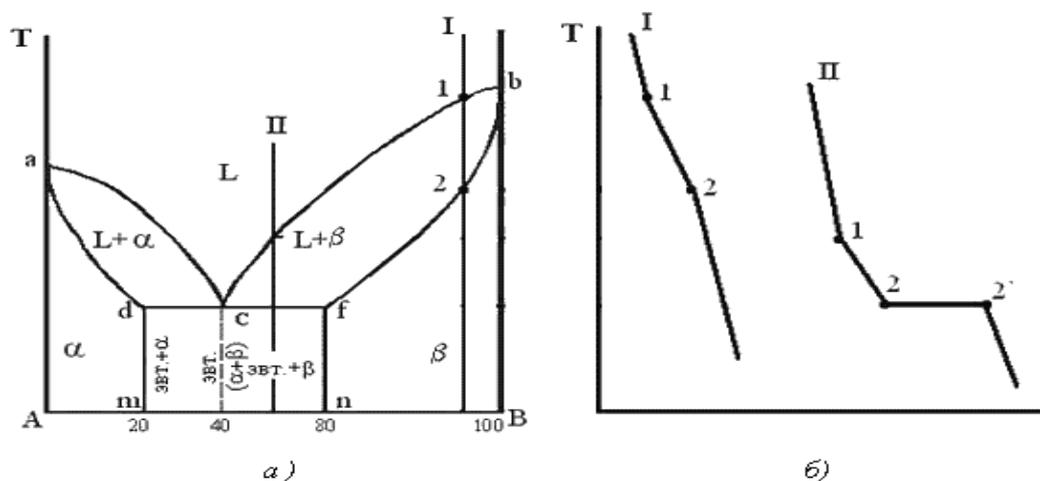


Рис. 3.9 Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения типичных сплавов (б)

Диаграмма состояния и кривые охлаждения типичных сплавов системы представлены на рис.3.9.

#### 1. Основные линии диаграммы:

- линия ликвидус  $acb$ , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
- линия солидус  $adcfb$ , состоит из трех участков;
- $dm$  – линия предельной концентрации компонента В в компоненте А;
- $fn$  – линия предельной концентрации компонента А в компоненте В.

2. Типовые сплавы системы.

При концентрации компонентов, не превышающей предельных значений (на участках Am и nB), сплавы кристаллизуются аналогично сплавам твердым растворам с неограниченной растворимостью, см кривую охлаждения сплава I на рис. 3.9 б. При концентрации компонентов, превышающей предельные значения (на участке dcf), сплавы кристаллизуются аналогично сплавам механическим смесям, см. кривую охлаждения сплава II на рис. 3.9 б

**Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения.**

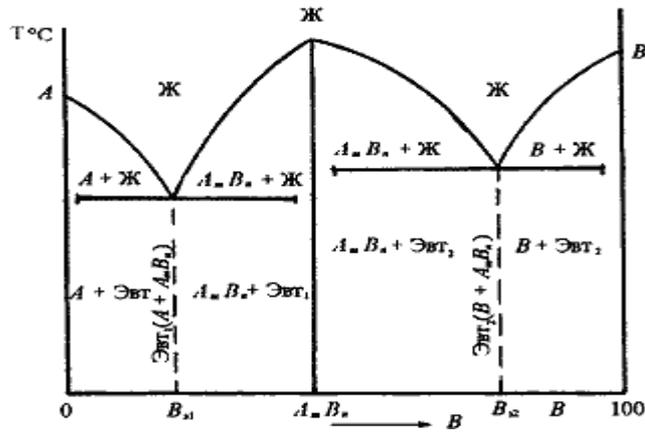


Рис. 3.10 Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения

Диаграмма состояния сложная, состоит из нескольких простых диаграмм. Число компонентов и количество диаграмм зависит от того, сколько химических соединений образуют основные компоненты системы. Число фаз и вид простых диаграмм определяются характером взаимодействия между компонентами.

Эвт<sub>1</sub> (кр. A + кр. AmBn);

Эвт<sub>2</sub> (кр. B + кр. AmBn).

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

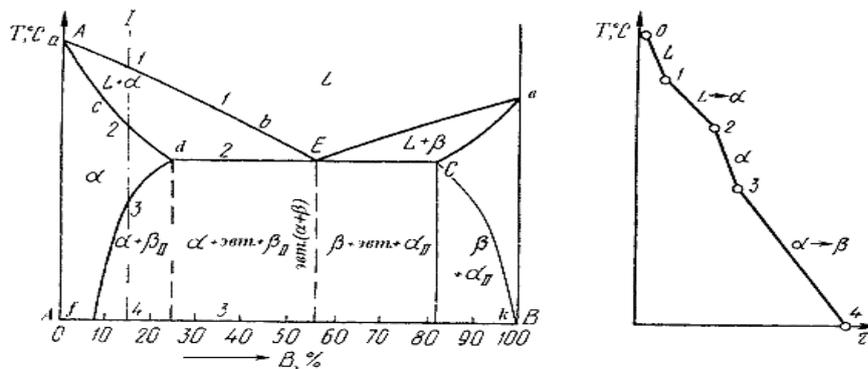


Рис. 3.11. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии (а) и кривая охлаждения сплава (б)

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

На диаграмме:

- $df$  – линия переменной предельной растворимости компонента В в компоненте А;
- $ek$  – линия переменной предельной растворимости компонента А в компоненте В.

Кривая охлаждения сплава I представлена на рис.3.11 б. При достижении температуры, соответствующей точке 3, твердый раствор  $\alpha$  оказывается насыщенным компонентом В, при более низких температурах растворимость второго компонента уменьшается, поэтому из  $\alpha$ -раствора начинает выделяться избыточный компонент в виде кристаллов  $\beta_{II}$ . За точкой 3 сплав состоит из двух фаз: кристаллов твердого раствора  $\alpha$  и вторичных кристаллов твердого раствора  $\beta_{II}$ .

1.  При образовании механических смесей свойства изменяются по линейному закону. Значения характеристик свойств сплава находятся в интервале между характеристиками чистых компонентов.
2.  При образовании твердых растворов с неограниченной растворимостью свойства сплавов изменяются по криволинейной зависимости, причем некоторые свойства, например, электросопротивление, могут значительно отличаться от свойств компонентов.
3.  При образовании твердых растворов с ограниченной растворимостью свойства в интервале концентраций, отвечающих однофазным твердым растворам, изменяются по криволинейному закону, а в двухфазной области – по линейному закону. Причем крайние точки на прямой являются свойствами чистых фаз, предельно насыщенных твердых растворов, образующих данную смесь.
4.  При образовании химических соединений концентрация химического соединения отвечает максимуму на кривой. Эта точка перелома, соответствующая химическому соединению, называется сингулярной точкой.

### 3.5. Вопросы самопроверки

1. Опишите процесс первичной кристаллизации в сплавах – твердых растворах.
2. Какова микроструктура однофазного сплава после равновесной кристаллизации?
3. Как определить долю эвтектики и первичных кристаллов по диаграмме состояния?
4. Что такое эвтектика? Какое строение она имеет?
5. Какие структурные составляющие имеют до и заэвтектические сплавы?
6. Какова возможная форма выделений вторичных кристаллов?
7. В чем заключается рекристаллизация металлов и как он отражается на их структуре и свойствах?
8. Что такое компонент фаза, физико-химическая система, число степеней свободы.
9. Как строятся диаграммы состояния?

10. Объясните принцип построения кривых нагрева и охлаждения с помощью правила фаз.

### 3.6. Глоссарий по теме 3

<b>ГЕТЕРОГЕННЫЕ СПЛАВЫ</b>	- Сплавы, структура которых состоит из двух или более фаз.
<b>ГОМОГЕННАЯ СИСТЕМА</b>	-Макроскопически однородная система, состоящая из одной фазы
<b>ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ</b>	- Физико-химические системы, состоящие из двух независимых составных частей (компонентов).
<b>ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ</b>	- Диаграмма, показывающая равновесное фазовое состояние сплавов при разных температурах (давлениях) в зависимости от их концентрации или графическое изображение соотношения между параметрами состояния термодинамически равновесной системы (температурой, химическим и фазовым составом).
<b>КОНОДА</b>	- Связующая прямая, соединяющая сопряженные точки, изображающие составы равновесных фаз
<b>КОНЦЕНТРАЦИЯ</b>	- Количество вещества, содержащееся в единице массы или объема сплава.
<b>КРИВАЯ НАГРЕВА (охлаждения)</b>	- График, характеризующий увеличение (уменьшение) температуры от времени
<b>КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ</b>	- Точки, соответствующие изменению фазового состояния в сплаве.
<b>ЛИКВИДУС</b>	- Геометрическое место точек температур начала кристаллизации всех сплавов системы или графическое изображение на диаграмме состояния (точка, линия или поверхность) зависимости температур начала кристаллизации (или завершения расплавления) от химического состава сплава.
<b>НЕОГРАНИЧЕННЫЙ ТВЕРДЫЙ РАСТВОР</b>	- Твердый раствор замещения между двумя или более компонентами, неограниченно растворимыми в твердом состоянии.
<b>ОГРАНИЧЕННЫЙ ТВЕРДЫЙ РАСТВОР</b>	-Твердый раствор между двумя или более компонентами, существующий до определенной, ограниченной концентрации компонентов.

<b>ПРАВИЛО ОТРЕЗКОВ</b>	- Используют для определения количественного соотношения фаз, находящихся в равновесии при данной температуре.
<b>ПРАВИЛО ФАЗ</b>	- Позволяет определить закономерность изменения числа фаз в гетерогенной системе, устанавливая зависимость между числом термодинамических степеней свободы (С), числом компонентов (К), образующих систему, и числом фаз (Ф), находящихся в равновесии.
<b>ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЕ</b>	- Охлаждение высокотемпературной фазы ниже температуры ее равновесного фазового перехода в низкотемпературную.
<b>РАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ</b>	- Характеризуется при постоянных внешних условиях неизменностью термодинамических параметров во времени и отсутствием в системе потоков энергии и вещества.
<b>СОЛИДУС</b>	- Геометрическое место точек температур конца кристаллизации всех сплавов системы.
<b>СОЛЬВУС</b>	- Линия ограниченной растворимости в твердом состоянии на диаграмме состояния
<b>СПЛАВЫ</b>	- Однородные системы из двух или более элементов, претерпевающие переход из жидкого состояния в твердое агрегатное состояние и обладающие характерными металлическими свойствами.
<b>СТРУКТУРНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ</b>	- Элемент микроструктуры сплава с характерным и однообразным строением, а также или отдельные элементы микроструктуры сплава с характерным строением при средних увеличениях
<b>ТВЕРДЫЙ РАСТВОР</b>	- Однородные твердые вещества, состоящие из нескольких компонентов, концентрация которых может быть изменена без нарушения однородности, или однофазное твердое состояние сплава, представляющее собой кристаллическую решетку растворителя, в которой находятся атомы одного или более растворенных элементов.
<b>ТВЕРДЫЙ РАСТВОР ВНЕДРЕНИЯ</b>	- Раствор между металлом и неметаллом, в котором атомы неметалла располагаются в междоузлиях атомов металла.

**ТВЕРДЫЙ РАСТВОР  
ЗАМЕЩЕНИЯ**

- Раствор между двумя или более металлами, в котором атом одного компонента занимает место любого атома в кристаллической решетке второго компонента.

**ФАЗА**

- Однородная по химическому составу, кристаллической структуре и физическим свойствам часть системы, отделенная от других ее частей поверхностью раздела.

**ФАЗОВОЕ РАВНОВЕСИЕ**

- Это равновесное состояние термодинамической системы, состоящей из двух или большего числа фаз.

**ФАЗОВОЕ  
ПРЕВРАЩЕНИЕ**

- Превращение, при котором происходит изменение фазового состояния системы

**ЭВТЕКТИКА**

- Смесь двух или более твердых фаз, одновременно образующаяся из расплава, характеризующаяся постоянством состава.

**ЭВТЕКТИЧЕСКОЕ  
ПРЕВРАЩЕНИЕ**

- Превращение, происходящее при постоянной температуре и неизменных составах участвующих фаз, одной из которых является жидкость или процесс образования двух или более твердых фаз из жидкой; в равновесных условиях происходит при постоянной температуре.

**ЭВТЕКТОИДНОЕ  
ПРЕВРАЩЕНИЕ**

- Превращение, происходящее при постоянной температуре и неизменных составах участвующих фаз, находящихся в твердом состоянии, или полиморфное превращение, заключающееся в распаде при охлаждении равновесного твердого раствора на две стабильные фазы.

**3.7. Используемые информационные ресурсы**

1. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2008. – 877 с.
2. Материаловедение[Текст]: учебник для вузов /Ю.М.Лахтин, В.П. Леонтьева –М.: Машиностроение, 2009. - 526 с.
3. Курс материаловедения в вопросах и ответах[Текст]: учебное пособие / С. И. Богодухов, А. В. Синюхин, Е.С. Козик– 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2010. – 349 с.
- 4.База данных микроструктур металлов и сплавов <http://www.microstructure.ru>

#### Тема 4. Железо-углеродистые сплавы.

**Аннотация.** Данная тема раскрывает основные понятия железоуглеродистых сплавов, рассматривает свойства сталей и чугунов. Предусматривается изучение микроструктуры сталей и чугунов.

**Ключевые слова.** *Диаграмма состояния, сплавы, стали, чугуны, графитизация, аустенит, феррит, перлит, ледебурит, углерод, примеси.*

##### 4.1. Диаграмма состояния железо-углерод.

Железоуглеродистые сплавы – стали и чугуны – важнейшие металлические сплавы современной техники. Производство чугуна и стали по объему превосходит производство всех других металлов вместе взятых более чем в десять раз.

Диаграмма состояния железо – углерод дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов. Начало изучению диаграммы железо – углерод положил Чернов Д.К. в 1868 году.

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо, углерод и цементит.

1. Железо – переходный металл серебристо-светлого цвета. Имеет высокую температуру плавления – 1539°C. В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения происходят при температурах 911°C и 1392°C. При температуре ниже 911°C существует с объемно-центрированной кубической решеткой. В интервале температур 911...1392°C устойчивым является с гранцентрированной кубической решеткой. Выше 1392°C железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку. При температуре ниже 768°C железо ферромагнитно, а выше – парамагнитно. Точка Кюри железа 768°C. Железо технической чистоты обладает невысокой твердостью (80 НВ) и прочностью и высокими характеристиками пластичности. Железо характеризуется высоким модулем упругости.

2. *Углерод* относится к неметаллам. Обладает полиморфным превращением, в зависимости от условий образования существует в форме графита с гексагональной кристаллической решеткой (температура плавления – 3500 °C, плотность – 2,5 г/см<sup>3</sup>) или в форме алмаза со сложной кубической решеткой с координационным числом равным четырем (температура плавления – 5000 °C). В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита ( $Fe_3C$ ), а также в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

3. *Цементит* ( $Fe_3C$ ) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода. Аллотропических превращений не испытывает. Кристаллическая решетка цементита состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу. Температура плавления цементита точно не установлена (1250, 1550°C). При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 217°C. Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ, легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность. Такие свойства являются следствием сложного строения кристаллической решетки.

Диаграмма состояния железо – цементит представлена на рис.4.1.

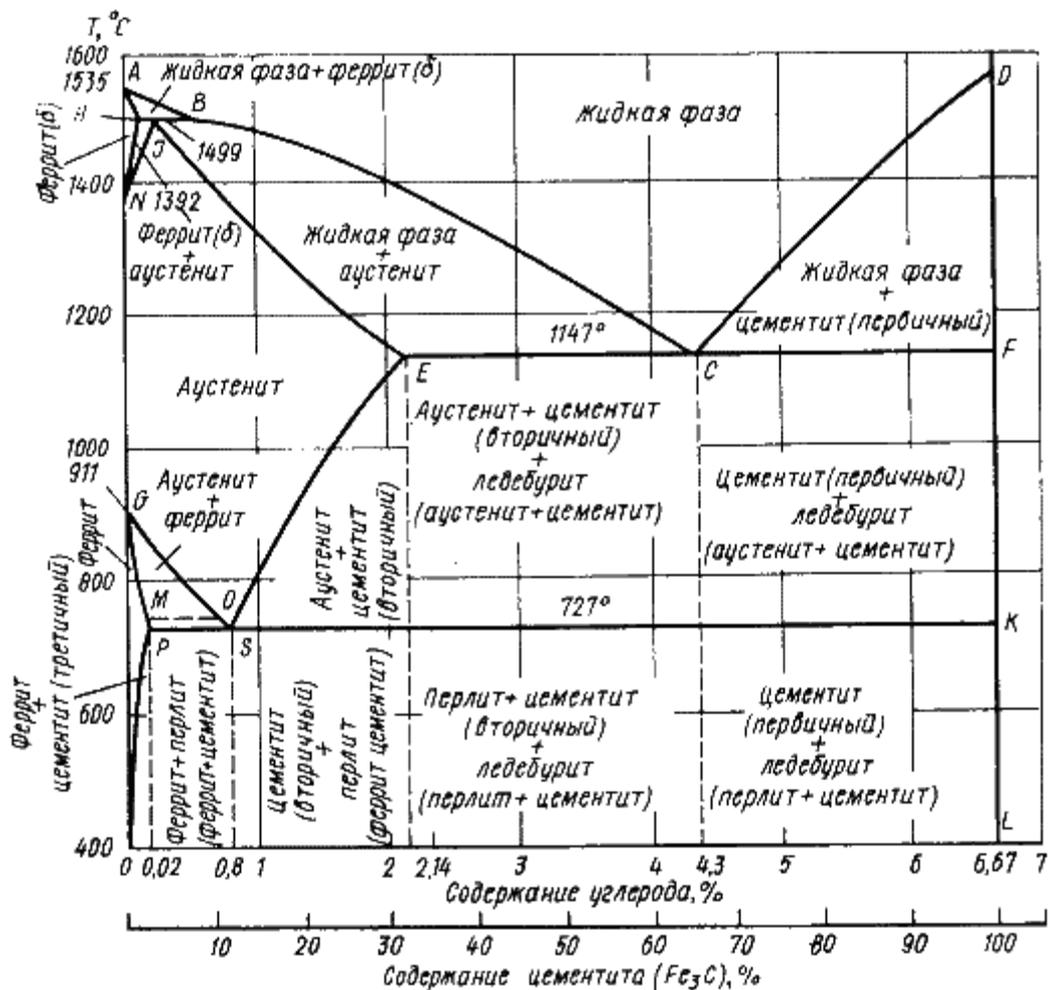


Рис. 4.1. Диаграмма состояния железо - цементит

В системе железо – углерод существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит, аустенит, цементит.

1. Жидкая фаза. В жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

2. Феррит ( $\Phi$ )  $Fe_{\alpha}(C)$  – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железо. Феррит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – 0,006 % при комнатной температуре (точка Q), максимальную – 0,02 % при температуре 727°C (точка P). Углерод располагается в дефектах решетки. При температуре выше 1392°C существует высокотемпературный феррит ( $\delta$ ) ( $Fe_{\delta}(C)$ ), с предельной растворимостью углерода 0,1 % при температуре 1499°C (точка J). Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость – 130 НВ, предел прочности –  $\sigma_B = 300 \text{ МПа}$ ) и пластичен (относительное удлинение –  $\delta = 30\%$ ), магнитен до 768°C.

3. Аустенит (A)  $Fe_{\gamma}(C)$  – твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо. Углерод занимает место в центре гранцентрированной кубической ячейки. Аустенит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – 0,8 % при температуре 727°C (точка S), максимальную – 2,14 % при температуре 1147°C (точка E). Аустенит имеет твердость 200...250 НВ, пластичен (относительное удлинение –  $\delta = 40...50\%$ ), парамагнитен.

При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования.

Все сплавы системы железо – цементит по структурному признаку делят на две большие группы: *стали и чугуны*. Особую группу составляют *сплавы с содержанием углерода менее 0,02%* (точка Р), их называют *техническое железо*. Микроструктуры сплавов представлены на рис.4.2. Структура таких сплавов после окончания кристаллизации состоит или из зерен феррита (рис.4.2 а), при содержании углерода менее 0,006 %, или из зерен феррита и кристаллов цементита третичного, расположенных по границам зерен феррита (рис.4.2.б), если содержание углерода от 0,006 до 0,02 %.

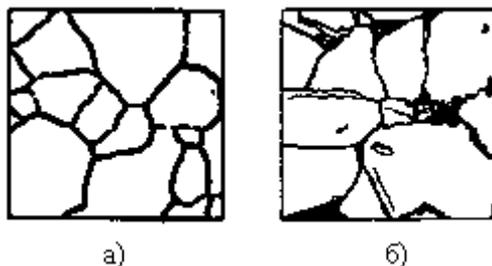


Рис.4.2. Микроструктуры технического железа: а – содержание углерода менее 0,006%; б – содержание углерода 0,006...0,02 %

#### 4.2. Классификация, структура и маркировка углеродистых сталей

Стали классифицируются по множеству признаков.

1. *По химическому составу*: углеродистые и легированные.

2. *По содержанию углерода*:

- низкоуглеродистые, с содержанием углерода до 0,25 %;
- среднеуглеродистые, с содержанием углерода 0,3...0,6 %;
- высокоуглеродистые, с содержанием углерода выше 0,7 %

3. *По содержанию углерода и по структуре* подразделяются на доэвтектоидные , структура феррит + перлит (рис.4.3 а); эвтектоидные , структура перлит (П), перлит может быть пластинчатый или зернистый (рис. 4.3 б и 4.3 в); заэвтектоидные , структура перлит + цементит вторичный (П + Ц<sub>II</sub>), цементитная сетка располагается вокруг зерен перлита.

4. *По качеству*. Качественные стали поставляют с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Количественным показателем качества является содержания вредных примесей: серы и фосфора:

- углеродистые стали обыкновенного качества:
- качественные стали;
- высококачественные стали.

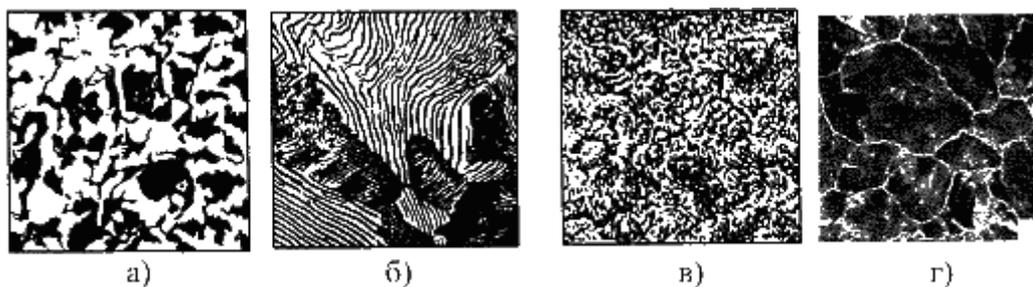


Рис. 4.3. Микроструктуры сталей: а – доэвтектоидная сталь ; б – эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит); в – эвтектоидная сталь (зернистый перлит); г – заэвтектоидная сталь

#### 4. По способу выплавки:

- в мартеновских печах;
- в кислородных конверторах;
- в электрических печах: электродуговых, индукционных и др.

#### 5. По назначению:

- конструкционные – применяются для изготовления деталей машин и механизмов;
- инструментальные – применяются для изготовления различных инструментов;
- специальные – стали с особыми свойствами: электротехнические, с особыми магнитными свойствами и др.

При маркировке углеродистых сталей принято буквенно-цифровое обозначение. Углеродистыми сталями называют сплавы железа с углеродом, содержащие 0,02...2,14 % углерода, заканчивающие кристаллизацию образованием аустенита. Углеродистые стали являются основными. Их свойства определяются количеством углерода и содержанием примесей, которые взаимодействуют с железом и углеродом

**Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380)** маркируются: Ст.2кп., БСт.3кп, ВСт.3пс, ВСт.4сп. Ст – индекс данной группы стали. Цифры от 0 до 6 - это условный номер марки стали. С увеличением номера марки возрастает прочность и снижается пластичность стали. По гарантиям при поставке существует три группы сталей: А, Б и В. Для сталей группы А при поставке гарантируются механические свойства, в обозначении индекс группы А не указывается. Для сталей группы Б гарантируется химический состав. Для сталей группы В при поставке гарантируются и механические свойства, и химический состав. Поведение стали при разливке и кристаллизации (кп — кипящая, пс — полуспокойная и сп — спокойная) связано со степенью удаления из стали кислорода (степенью раскисления). При разливке малораскисленной стали в изложнице происходит бурное выделение пузырьков окиси углерода — сталь как бы кипит (кп); чем полнее удален из стали кислород, тем спокойнее (пс и сп) проходит процесс кристаллизации.

**Конструкционные качественные углеродистые стали** маркируются двухзначным числом, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента. Указывается степень раскисленности, если она отличается от спокойной. Сталь 08 кп, сталь 10 пс, сталь 45. Содержание углерода, соответственно, 0,08 %, 0,10 %, 0,45 %.

**Инструментальные качественные углеродистые стали** маркируются буквой У (углеродистая инструментальная сталь) и числом, указывающим содержание углерода в десятых долях процента. Сталь У8, сталь У13. Содержание углерода, соответственно, 0,8 % и 1,3 % **Инструментальные высококачественные углеродистые стали.** Маркируются аналогично качественным инструментальным углеродистым сталям, только в конце марки ставят букву А, для обозначения высокого качества стали. Сталь У10А.

#### 4.3. Влияние углерода и постоянных примесей на структуру и свойства стали.



С ростом содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита, при одновременном снижении доли феррита. Изменение соотношения между составляющими приводит к уменьшению пластичности, а также к повышению прочности и твердости. Прочность повышается до содержания углерода около 1%, а затем она уменьшается, так как образуется грубая сетка цементита вторичного. Углерод влияет на вязкие свойства. Увеличение содержания углерода повышает порог хладоломкости, снижает ударную вязкость. Повышаются электросопротивление и коэрцитивная сила, снижаются магнитная проницаемость и плотность магнитной индукции. Углерод оказывает влияние и на технологические свойства. Повышение содержания углерода ухудшает литейные свойства стали (используются стали с содержанием углерода до 0,4 %), обрабатываемость давлением и резанием, свариваемость.

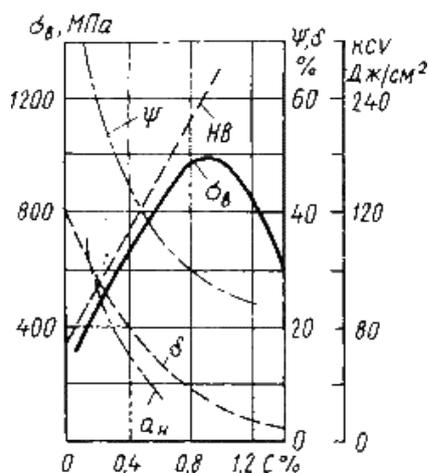


Рис.4.4. Влияние углерода на свойства сталей

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

**1. Постоянные примеси:** кремний, марганец, сера, фосфор.

*Марганец и кремний* вводятся в процессе выплавки стали для раскисления, они являются технологическими примесями. Содержание марганца не превышает 0,5...0,8 %. Марганец повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Содержание кремния не превышает 0,35...0,4 %. Кремний, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает прочность стали, особенно повышается предел текучести, но наблюдается некоторое снижение пластичности, что снижает способность стали к вытяжке.

Содержание *фосфора P* в стали 0,025...0,045 %. Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности и предел текучести, но снижает пластичность и вязкость. Располагаясь вблизи зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладоломкость, уменьшает работу распространения трещин. Фосфор обладает склонностью к ликвации, поэтому в центре слитка отдельные участки имеют резко пониженную вязкость. Для некоторых сталей возможно увеличение содержания фосфора до 0,10...0,15 %, для улучшения обрабатываемости резанием.

*Сера S* – уменьшается пластичность, свариваемость и коррозионная стойкость. P-искажает кристаллическую решетку. Содержание серы в сталях составляет 0,025...0,06 %. Сера – вредная примесь, попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – сульфид серы FeS, которое, в свою очередь, образует с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 988оС. При деформации в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается – явление краснеломкости. *Краснеломкость* – повышение хрупкости при высоких температурах. Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость  $\alpha$  и пластичность ( $\delta$  и  $\psi$ ), а так же предел выносливости. Она ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

2. **Скрытые примеси** - газы (азот, кислород, водород) – попадают в сталь при выплавке. Неметаллические включения (окислы, нитриды), являясь концентраторами напряжений, могут значительно понизить предел выносливости и вязкость. Очень вредным является растворенный в стали водород, который значительно охрупчивает сталь. Он приводит к образованию в катаных заготовках и поковках флокенов. Флокены – тонкие трещины овальной или округлой формы, имеющие в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета. Металл с флокенами нельзя использовать в промышленности, при сварке образуются холодные трещины в наплавленном и основном металле.

3. **Специальные примеси** – специально вводятся в сталь для получения заданных свойств. Примеси называются легирующими элементами, а стали - легированные сталями.

#### 4.4. Свойства и микроструктуры чугуна.

Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода более 2,14 % (до 6,67 %), заканчивающие кристаллизацию образованием эвтектики (ледебурита), называют *чугунами*. Наличие легкоплавкого ледебурита в структуре чугунов повышает их литейные свойства. Чугуны, кристаллизующиеся в соответствии с диаграммой состояния железо – цементит, отличаются высокой хрупкостью. Цвет их излома – серебристо-белый. Такие чугуны называются белыми чугунами.

По количеству углерода и по структуре белые чугуны подразделяются на: доэвтектические ( $2,14\% < C < 4,3\%$ ), структура перлит + ледебурит + цементит вторичный ( $П + Л + Ц_2$ ); эвтектические ( $C = 4,3\%$ ), структура ледебурит (Л) (рис. 4.5 б); заэвтектические ( $4,3\% < C < 6,67\%$ ), структура ледебурит + цементит первичный ( $Л + Ц_1$ ) (рис. 4.5 в). В структуре *доэвтектических* белых чугунов присутствует цементит вторичный, который образуется в результате изменения состава аустенита при охлаждении (по линии ES). В структуре цементит вторичный сливается с цементитом, входящим в состав ледебурита. Фазовый состав сталей и чугунов при нормальных температурах один и тот же,

они состоят из феррита и цементита. Однако свойства сталей и белых чугунов значительно различаются. Таким образом, основным фактором, определяющим свойства сплавов системы железо – цементит является их структура. Из рассмотрения структур чугунов можно заключить, что их металлическая основа похожа на структуру эвтектоидной или доэвтектоидной стали или технического железа. Отличаются от стали только наличием графитовых включений, определяющих специальные свойства чугунов.



Рис. 4.5. Микроструктуры белых чугунов: а – доэвтектический белый чугун ; б – эвтектический белый чугун (Л); в – заэвтектический белый чугун .

#### 4.5. Влияние графитовых включений на свойства чугунов. Процесс графитизации.

В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый – с пластинчатым графитом; высокопрочный – с шаровидным графитом; ковкий – с хлопьевидным графитом.

Наиболее широкое распространение получили чугуны с содержанием углерода 2,4...3,8%. Чем выше содержание углерода, тем больше образуется графита и тем ниже его механические свойства, следовательно, количество углерода не должно превышать 3,8 %. В то же время для обеспечения высоких литейных свойств (хорошей жидкотекучести) углерода должно быть не менее 2,4 %.

Графитовые включения можно рассматривать как соответствующей формы пустоты в структуре чугуна. Около таких дефектов при нагружении концентрируются напряжения, значение которых тем больше, чем острее дефект. Отсюда следует, что графитовые включения пластинчатой формы в максимальной мере разупрочняют металл. Более благоприятна хлопьевидная форма, а оптимальной является шаровидная форма графита. Пластичность зависит от формы таким же образом. Относительное удлинение для серых чугунов составляет - 0,5 %, для ковких – до 10 %, для высокопрочных – до 15%. Наличие графита наиболее резко снижает сопротивление при жестких способах нагружения: удар; разрыв. Сопротивление сжатию снижается мало. Графит – это полиморфная модификация углерода, является более стабильной фазой, чем цементит. Возможны два пути образования графита в чугуне.

1. При благоприятных условиях (наличие в жидкой фазе готовых центров кристаллизации графита и очень медленное охлаждение) происходит непосредственное образование графита из жидкой фазы.
2. При разложении ранее образовавшегося цементита. При температурах выше  $738^{\circ}\text{C}$  цементит разлагается на смесь аустенита и графита по схеме  $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe}_\gamma(\text{C}) + \text{C}(\text{графит})$ .

При температурах ниже  $738^{\circ}\text{C}$  разложение цементита осуществляется по схеме:  $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe}_\alpha(\text{C}) + \text{C}(\text{графит})$ .

Схемы микроструктур чугуна в зависимости от металлической основы и формы графитовых включений представлены на рис. 4.6.

Металлическая основа	Класс чугуна		
	Серый А	Ковкий Б	Высокопрочный В
Феррит			
Феррит + Перлит			
Перлит			

Рис. 4.6. Схемы микроструктур чугуна в зависимости от металлической основы и формы графитовых включений

Процесс образования графита в сплавах железа с углеродом называется *графитизацией*.



Структура чугунов зависит от степени графитизации, т.е. от того, сколько углерода находится в связанном состоянии. *Углерод и кремний* способствуют графитизации, *марганец* затрудняет графитизацию и способствует отбеливанию чугуна. *Сера* способствует отбеливанию чугуна и ухудшает литейные свойства, ее содержание ограничено – 0,08...0,12 %. *Фосфор* на процесс графитизации не влияет, но улучшает жидкотекучесть, Фосфор является в чугунах полезной примесью, его содержание – 0,3...0,8 %.



*Положительные стороны наличия графита.*

- графит улучшает обрабатываемость резанием, так как образуется ломкая стружка;
- чугун имеет лучшие антифрикционные свойства, по сравнению со сталью, так как наличие графита обеспечивает дополнительную смазку поверхностей трения;
- из-за микропустот, заполненных графитом, чугун хорошо гасит вибрации и имеет повышенную циклическую вязкость;
- детали из чугуна не чувствительны к внешним концентраторам напряжений (выточки, отверстия, переходы в сечениях);
- чугун значительно дешевле стали;
- производство изделий из чугуна литьем дешевле изготовления изделий из стальных заготовок обработкой резанием, а также литьем и обработкой давлением с последующей механической обработкой.

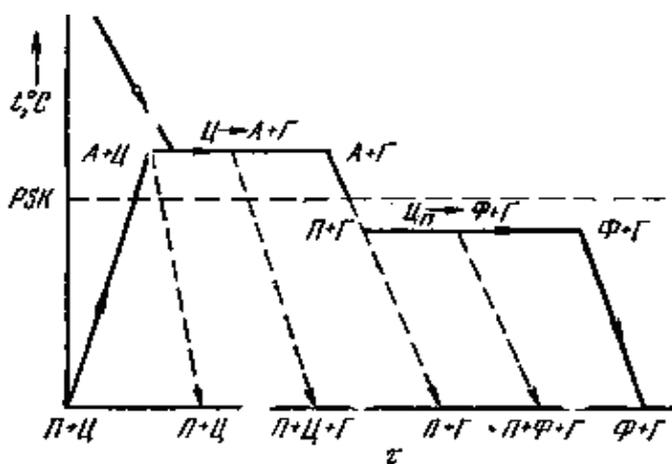


Рис. 4.7. Схема образования структур при графитизации

#### 4.6. Классификация и маркировка чугунов

**Серый чугун.** Серый чугун широко применяется в машиностроении, так как легко обрабатывается и обладает хорошими свойствами. В зависимости от прочности серый чугун подразделяют на 10 марок (ГОСТ 1412). Обозначаются индексом СЧ (серый чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на  $10^{-1}$  СЧ 15.

**Высокопрочный чугун с шаровидным графитом.** Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293) могут иметь ферритную (ВЧ 35), феррито-перлитную (ВЧ45) и перлитную (ВЧ 80) металлическую основу. Получают эти чугуны из серых, в результате модифицирования магнием или церием (добавляется 0,03...0,07% от массы отливки). Обозначаются индексом ВЧ (высокопрочный чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, умноженное на  $10^{-1}$  ВЧ 100.

**Ковкий чугун** получают отжигом белого доэвтектического чугуна. Ковкие чугуны содержат: углерода – 2,4...3,0 %, кремния – 0,8...1,4 %, марганца – 0,3...1,0 %, фосфора – до 0,2 %, серы – до 0,1 %. Различают 7 марок ковкого чугуна: три с ферритной (КЧ 30 – 6) и четыре с перлитной (КЧ 65 – 3) основой (ГОСТ 1215). Обозначаются индексом КЧ (высокопрочный чугун) и двумя числами, первое из которых показывает значение предела прочности, умноженное на  $10^{-1}$ , а второе – относительное удлинение - КЧ 30 - 6.

#### 4.7. Вопросы самопроверки

1. Назовите структурные составляющие, которые присутствуют в железоуглеродистых сплавах.
2. Как изменяются механические свойства стали в зависимости от содержания в ней углерода?
3. Каковы классификация и маркировка углеродистых сталей?
4. Укажите возможные виды металлической основы, которые могут встретиться в серых чугунах.
5. Классификация и обозначение серых чугунов по ГОСТу.
6. Что такое феррит, аустенит, перлит, цементит и ледебурит?
7. Какие превращения происходят в сплавах при температурах  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_{ст}$ ?
8. Какие легирующие элементы способствуют графитизации?

10. С какой металлической основой чугуны обладают наиболее высокими механическими свойствами?

11. В чем различие в строении ковкого и модифицированного чугунов?

#### 4.8. Глоссарий по теме 4

<b>АУСТЕНИТ</b>	Фаза, структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – твердый раствор углерода в $\gamma$ -железе.
<b>ГРАФИТ</b>	- Аллотропическая модификация углерода с гексагональной кристаллической решеткой
<b>ЖЕЛЕЗО</b>	- Химический элемент, Fe, с атомной массой 55,84; относится к группе черных металлов, $t_{пл}$ 1539 °С;
<b><math>\alpha</math> -железо</b>	- Низкотемпературная аллотропическая модификация железа с о.ц.к. решеткой.
<b><math>\gamma</math> -железо</b>	- Высокотемпературная аллотропическая модификация железа с г.ц.к. решеткой.
<b><math>\delta</math> -железо</b>	- Высокотемпературная аллотропическая модификация железа с о.ц.к. решеткой.
<b>ЛЕДЕБУРИТ</b>	- Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов (главным образом чугунов) – эвтектическая смесь аустенита и цементита.
<b>ПЕРЛИТ</b>	- Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – эвтектоидная смесь феррита и цементита, имеющая межпластинчатое расстояние более 0,3 мкм.
<b>СТАЛЬ</b>	- Сплав железа с углеродом, содержащий от 0,025 до 2,14 % углерода, а также ряд других элементов.
<b>УГЛЕРОД</b>	- Химический элемент, C, с атомной массой 12; имеет две аллотропические модификации. Входит в состав стали и чугуна.
<b>ФЕРРИТ</b>	- Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – твердый раствор углерода (до 0,025 %) в $\alpha$ -железе.
<b>ЦЕМЕНТИТ</b>	- Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов – карбид железа, Fe <sub>3</sub> C, содержащий 6,67 % углерода.
<b>ЧУГУН</b>	- Сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14 % углерода, постоянные примеси, а иногда и легирующие элементы.

<b>белый Ч.</b>	- Чугун, в котором весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита; имеет матово-белый цвет излома.
<b>высокопрочный Ч</b>	- Чугун со структурой графита шаровидной формы; отличается высокой прочностью и пластичностью; часто используется вместо стали.
<b>с вермикулярным графитом (ЧВГ)</b>	- Vermikulus” – червячок, графитизированный чугун с червеобразной формой графита. Отношение длины графитной пластинки к ее ширине больше 10.
<b>доэвтектический Ч.</b>	- Чугун, углеродный эквивалент которого ниже 4,3 %.
<b>заэвтектический Ч.</b>	- Чугун, углеродный эквивалент которого выше 4,3 %.
<b>ковкий Ч.</b>	- Чугун в котором углерод частично или полностью (кроме углерода в феррите) находится в структурно свободном состоянии в форме хлопьевидного графита, что обеспечивает высокий уровень его пластичности и прочности.
<b>серый Ч.</b>	- Чугун в котором углерод частично или полностью (кроме углерода в феррите) находится в структурно свободном состоянии.
<b>эвтектический Ч</b>	-Чугун, углеродный эквивалент которого составляет 4,3 %.

#### 4.9. Используемые информационные ресурсы

1. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2008. – 877 с.
2. Материаловедение[Текст]: учебник для вузов /Ю.М.Лахтин, В.П. Леонтьева –М.: Машиностроение, 2009. - 526 с.
3. Металловедение / А.И. Самохоцкий, М.Н. Кунявский, Т.М. Кунявская и др. – М.: Металлургия, 1990.
4. Справочник- экзаменатор по материаловедению [Текст]: учебное пособие / В.В. Тарасов, Г.Б. Кривошеева, А.П. Герасимов - Владивосток: ДВГМА, 2000. – 76 с.
6. Солнцев Ю.П. Материаловедение. – СПб.:ХИМИЗДАТ, 2007. – 784с.
- 7.База данных микроструктур металлов и сплавов <http://www.microstructure.ru>

## Тема 5 Термическая обработка сталей.

**Аннотация.** Данная тема раскрывает основные понятия термической обработки, рассматривает превращения, протекающие в структуре стали при нагреве и охлаждении, технологические возможности термической обработки. Предусматривается изучение основных видов термообработки: отжиг, нормализация, закалка, отпуск.

**Ключевые слова.** *Превращения. отжиг, нормализация, закалка, отпуск, сорбит, троостит, мартенсит, скорость охлаждения, закалочная среда.*

### 5.1. Виды термической обработки металлов.

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, следовательно, и свойства является термическая обработка. Основы термической обработки разработал Чернов Д.К.. В дальнейшем они развивались в работах Бочвара А.А., Курдюмова Г.В., Гуляева А.П.

Термическая обработка представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, выполняемых в определенной последовательности при определенных режимах, с целью изменения внутреннего строения сплава и получения нужных свойств (представляется в виде графика в осях температура – время. (см. рис. 5.1)

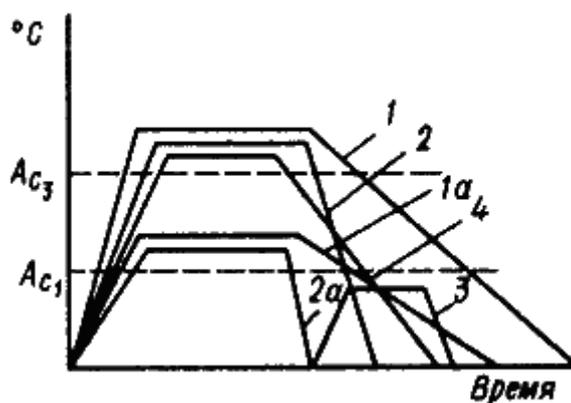


Рис.5.1. Графики различных видов термообработки: отжига (1, 1а), закалки (2, 2а), отпуска (3), нормализации (4)

Различают следующие виды термической обработки:

1. **Отжиг 1 рода** – возможен для любых металлов и сплавов. Его проведение не обусловлено фазовыми превращениями в твердом состоянии. Нагрев, при отжиге первого рода, повышая подвижность атомов, частично или полностью устраняет химическую неоднородность, уменьшает внутреннее напряжения. Основное значение имеет температура нагрева и время выдержки. Характерным является медленное охлаждение

Разновидностями отжига первого рода являются:

- диффузионный;
- рекристаллизационный;
- отжиг для снятия напряжения послековки, сварки, литья.

2. **Отжиг II рода** – отжиг металлов и сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве и охлаждении. Проводится для сплавов, в которых имеются полиморфные или эвтектоидные превращения, а также переменная растворимость компонентов в твердом состоянии. Проводят отжиг второго рода с целью получения более равновесной структуры и подготовки ее к дальнейшей обработке. В результате отжига измельчается зерно, повышаются пластичность и вязкость, снижаются прочность и твердость, улучшается обрабатываемость резанием. Характеризуется нагревом до температур выше критических и очень медленным охлаждением, как правило, вместе с печью (рис. 5.1 (1, 1а)).

3. **Закалка** – проводится для сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве и охлаждении, с целью повышение твердости и прочности путем образования неравновесных структур (сорбит, троостит, мартенсит). Характеризуется нагревом до температур выше критических и высокими скоростями охлаждения (рис. 5.1 (2, 2а)).

4. **Отпуск** – проводится с целью снятия внутренних напряжений, снижения твердости и увеличения пластичности и вязкости закаленных сталей. Характеризуется нагревом до температуры ниже критической  $A_1$  (рис. 5.1 (3)). Скорость охлаждения роли не играет. Происходят превращения, уменьшающие степень неравновесности структуры закаленной стали.

## 5.2. Превращения, протекающие в структуре стали при нагреве и охлаждении

Любая разновидность термической обработки состоит из комбинации четырех основных превращений, в основе которых лежат стремления системы к минимуму свободной энергии.

1. Превращение перлита в аустенит ( $\Pi \rightarrow A$ ), происходит при нагреве выше критической температуры  $A_1$ , минимальной свободной энергией обладает аустенит.  
 $Fe_{\alpha}(C) + Fe_3C \rightarrow Fe_{\gamma}(C)$

2. Превращение аустенита в перлит ( $A \rightarrow \Pi$ ), происходит при охлаждении ниже  $A_1$ , минимальной свободной энергией обладает перлит:  $Fe_{\gamma}(C) + Fe_{\alpha}C \rightarrow Fe_3(C)$

3. Превращение аустенита в мартенсит ( $A \rightarrow M$ ), происходит при быстром охлаждении ниже температуры неустойчивого равновесия  $Fe_{\gamma}(C) \rightarrow Fe_{\alpha}(C)'$

4. Превращение мартенсита в перлит ( $M \rightarrow \Pi$ ); – происходит при любых температурах, т.к. свободная энергия мартенсита больше, чем свободная энергия перлита.  
 $Fe_{\alpha}(C)' \rightarrow Fe_{\alpha}(C) + Fe_3C$

Образцы нагревают до температуры, при которой структура состоит из однородного аустенита ( $770^{\circ}C$ ). Затем переносят в термостаты с заданной температурой (интервал  $25 - 50^{\circ}C$ ). Превращение аустенита можно легко обнаружить с помощью наблюдений за изменением магнитных характеристик, так как аустенит парамагнитен, а феррит и цементит обладают магнитными свойствами. Получают серию кинетических кривых (рис. 5.2 а),

которые показывают количество образовавшегося перлита в зависимости от времени, прошедшего с начала превращения.

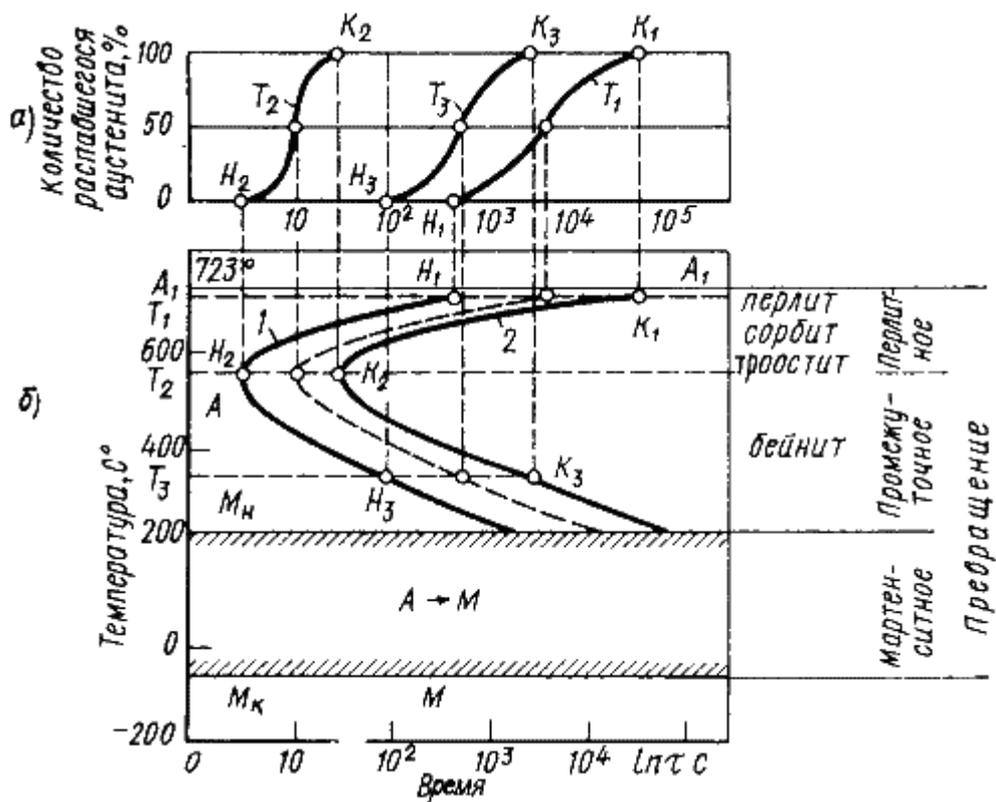


Рис. 5.2. Кинетические кривые превращения аустенита при охлаждении (а); диаграмма изотермического превращения аустенита (б)

В начале наблюдается инкубационный подготовительный период, время, в течение которого сохраняется переохлажденный аустенит. Превращение протекает с различной скоростью и достигает максимума при образовании 50 % продуктов распада. Затем скорость начинает уменьшаться и постепенно затухает. С увеличением степени переохлаждения устойчивость аустенита уменьшается, а затем увеличивается. Горизонтальная линия  $M_H$  показывает температуру начала без диффузного мартенситного превращения. Такие диаграммы называются *диаграммами изотермического превращения аустенита* (рис. 5.2 б).

При малых степенях переохлаждения, в области температур 727...550°C, сущность превращения заключается в том, что в результате превращения аустенита образуется механическая смесь феррита и цементита, состав которой отличается от состава исходного аустенита. Аустенит содержит 0,8 % углерода, а образующиеся фазы: феррит – 0,02 %, цементит – 6,67 % углерода. Время устойчивости аустенита и скорость его превращения зависят от степени переохлаждения. Максимальная скорость превращения соответствует переохлаждению ниже температуры  $A_1$  на 150...200°C, то есть соответствует минимальной устойчивости аустенита.

Механизм превращения представлен на рис. 5.3.

При образовании перлита из аустенита ведущей фазой является цементит. Зарождение центров кристаллизации цементита облегчено на границе аустенитных зерен. Образовавшаяся пластинка цементита растет, удлиняется и обедняет соседние области

углеродом. Рядом с ней образуются пластинки феррита. Эти пластинки растут как по толщине, так и по длине. Рост образовавшихся колоний перлита продолжается до столкновения с кристаллами перлита, растущими из других центров. Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит процесс его распада.

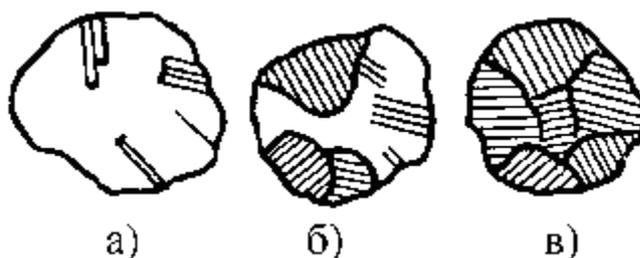


Рис. 5.3. Механизм превращения аустенита в перлит

Толщина соседних пластинок феррита и цементита определяет дисперсность структуры и обозначается  $\Delta_0$ . Она зависит от температуры превращения. В зависимости от дисперсности продукты распада имеют различное название.  $\Delta_0 \approx (0,5...0,7)10^{-3}$  мм – **перлит**.

Образуется при переохлаждении до температуры  $T = 650...700$  °C, или при скорости охлаждения  $V_{охл} = 30...60$  °C/ч. Твердость составляет 180...250 НВ.  $\Delta_0 = 0,25 \cdot 10^{-3}$  мм – **сорбит**

Образуется при переохлаждении до температуры  $T = 600...650$  °C, или при скорости охлаждения  $V_{охл} = 60$  °C/с. Твердость составляет 250...350 НВ. Структура характеризуется высоким пределом упругости, достаточной вязкостью и прочностью.  $\Delta_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$  мм – **троостит**

Превращение обедненного углеродом аустенита в феррит происходит по сдвиговому механизму, путем возникновения и роста зародышей феррита. Образующиеся при этом кристаллы имеют игольчатую форму. Такая структура, состоящая из цементита и феррита, называется *бейнитом*. Особенностью является повышенное содержание углерода в феррите (0.1...0.2 %). При температуре 550°С –  $\Delta_0 = 0,12 \cdot 10^{-3}$  мм – *верхний бейнит*. Структура характеризуется недостаточной прочностью, при низких относительном удлинении ( $\delta$ ) и ударной вязкости ( $\alpha_u$ ). При температуре 300°С –  $\Delta_0 = 0,08 \cdot 10^{-3}$  мм – *нижний бейнит*. Структура характеризуется высокой прочностью в сочетании с пластичностью и вязкостью.

При охлаждении стали со скоростью, большей критической ( $V > V_k$ ), превращение начинается при температуре начала мартенситного превращения ( $M_n$ ) и заканчивается при температуре окончания мартенситного превращения ( $M_k$ ). В результате такого превращения аустенита образуется продукт закалки – **мартенсит**. *Мартенсит* – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $Fe_\alpha$ . Минимальная скорость охлаждения  $V_k$ , при которой весь аустенит переохлаждается до температуры  $t_{M_n}$  и превращается, называется **критической скоростью закалки**.

### 5.3. Технологические возможности и особенности отжига, нормализации, закалки и отпуска

При разработке технологии необходимо установить: режим нагрева деталей (температуру и время нагрева); характер среды, где осуществляется нагрев и ее влияние на материал стали; условия охлаждения. Режимы термической обработки назначают в соответствии с диаграммами состояния и диаграммой изотермического распада аустенита.

*Нагрев* может осуществляться в нагревательных печах, топливных или электрических, в соляных ваннах или в ваннах с расплавленным металлом, пропусканием через изделие электрического тока или в результате индукционного нагрева. С точки зрения производительности, нагрев с максимальной скоростью уменьшает окалинообразование, обезуглероживание и рост аустенитного зерна. Однако необходимо учитывать перепад температур по сечению, что ведет к возникновению термических напряжений. Если растягивающие напряжения превысят предел прочности или предел текучести, то возможно коробление или образование трещин. Скорость нагрева тем выше, чем менее легирована сталь, однороднее ее структура, проще конфигурация. Скорость нагрева принимается  $0,8 \dots 1$  мин на  $1$  мм сечения. Время выдержки принимается около  $20\%$  от времени нагрева.

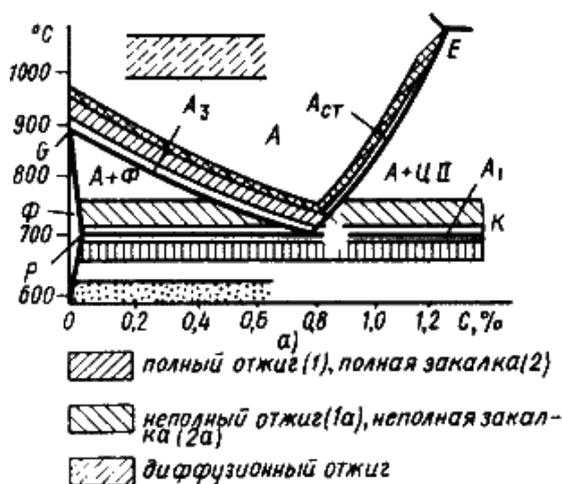


Рис. 5. 4. Левый угол диаграммы состояния железо – цементит и температурные области нагрева при термической обработке сталей

#### **Отжиг и нормализация.**

*Отжиг*, снижая твердость и повышая пластичность и вязкость за счет получения равновесной мелкозернистой структуры, позволяет: улучшить обрабатываемость заготовок давлением и резанием; исправить структуру сварных швов, перегретой при обработке давлением и литые стали; подготовить структуру к последующей термической обработке. Характерно медленное охлаждение со скоростью  $30 \dots 100^\circ\text{C}/\text{ч}$ .

#### **Отжиг первого рода.**

1. *Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг.* Применяется для устранения ликвации, выравнивания химического состава сплава. В его основе – диффузия. В результате нагрева выравнивается состав, растворяются избыточные карбиды. Применяется, в основном, для легированных сталей. Температура нагрева зависит от температуры плавления,  $T_H = 0,8 T_{пл}$ . Продолжительность выдержки:  $\tau = 8 \dots 20$  часов.

2. *Рекристаллизационный отжиг* проводится для снятия напряжений после холодной пластической деформации. Температура нагрева связана с температурой плавления:  $T_H = 0,4 T_{пл}$ . Продолжительность зависит от габаритов изделия.

3. *Отжиг для снятия напряжений* после горячей обработки (литья, сварки, обработки резанием, когда требуется высокая точность размеров). Температура нагрева выбирается в зависимости от назначения, находится в широком диапазоне:  $T_H = 160 \dots 700^\circ C$ . Продолжительность зависит от габаритов изделия. Детали прецизионных станков (ходовые винты, высоконагруженные зубчатые колеса, червяки) отжигают после основной механической обработки при температуре  $570 \dots 600^\circ C$  в течение 2...3 часов, а после окончательной механической обработки, для снятия шлифовочных напряжений – при температуре  $160 \dots 180^\circ C$  в течение 2...2,5 часов.

**Отжиг второго рода** предназначен для изменения фазового состава.

Температура нагрева и время выдержки обеспечивают нужные структурные превращения. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы успели произойти обратные диффузионные фазовые превращения. Является подготовительной операцией, которой подвергают отливки, поковки, прокат. Отжиг снижает твердость и прочность, улучшает обрабатываемость резанием средне- и высокоуглеродистых сталей. Измельчая зерно, снижая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность способствует повышению пластичности и вязкости.

В зависимости от температуры нагрева различают отжиг:

1. *полный*, с температурой нагрева на  $30 \dots 50^\circ C$  выше критической температуры  $A_3$   
 $T_n = A_3 + (30 \dots 50)^\circ C$  Проводится для доэвтектоидных сталей для исправления структуры. При такой температуре нагрева аустенит получается мелкозернистый, и после охлаждения сталь имеет также мелкозернистую структуру.

2. *неполный*, с температурой нагрева на  $30 \dots 50^\circ C$  выше критической температуры  $A_1$   
 $T_n = A_1 + (30 \dots 50)^\circ C$  Применяется для заэвтектоидных сталей. При таком нагреве в структуре сохраняется цементит вторичный, в результате отжига цементит приобретает сферическую форму (сфероидизация). Получению зернистого цементита способствует предшествующая отжигу горячая пластическая деформация, при которой дробится цементитная сетка. Структура с зернистым цементитом лучше обрабатывается и имеет лучшую структуру после закалки. Неполный отжиг является обязательным для инструментальных сталей. Иногда неполный отжиг применяют для доэвтектоидных сталей, если не требуется исправление структуры (сталь мелкозернистая), а необходимо только понизить твердость для улучшения обрабатываемости резанием.

3. *изотермический отжиг* – после нагрева до требуемой температуры, изделие быстро охлаждают до температуры на  $50 \dots 100^\circ C$  ниже критической температуры  $A_1$  и выдерживают до полного превращения аустенита в перлит, затем охлаждают на спокойном воздухе (рис. 5.6). Температура изотермической выдержки близка к температуре минимальной устойчивости аустенита. В результате получают более однородную структуру, так как превращение происходит при одинаковой степени переохлаждения. Значительно сокращается длительность процесса. Применяют для легированных сталей.

4. *Нормализация* – разновидность отжига. Термическая обработка, при которой изделие нагревают до аустенитного состояния, на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше  $A_3$  или  $A_{cm}$  с последующим охлаждением на воздухе.  $T_{\text{н}} = A_3 + (30...50)^{\circ}\text{C}$  или  $T_{\text{н}} = A_{cm} + (30...50)^{\circ}\text{C}$

В результате нормализации получают более тонкое строение эвтектоида (тонкий перлит или сорбит), уменьшаются внутренние напряжения, устраняются пороки, полученные в процессе предшествующей обработки. Твердость и прочность несколько выше чем после отжига. В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет грубую сетку вторичного цементита. Нормализацию чаще применяют как промежуточную операцию, улучшающую структуру. Иногда проводят как окончательную обработку, например, при изготовлении сортового проката. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. Для среднеуглеродистых сталей нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки с высоким отпуском. В этом случае механические свойства несколько ниже, но изделие подвергается меньшей деформации, исключаются трещины.

### **Закалка**

Конструкционные стали подвергают закалке и отпуску для повышения прочности и твердости, получения высокой пластичности, вязкости и высокой износостойкости, а инструментальные – для повышения твердости и износостойкости. Верхний предел температур нагрева для заэвтектоидных сталей ограничивается, так как приводит к росту зерна, что снижает прочность и сопротивление хрупкому разрушению. Основными параметрами являются температура нагрева и скорость охлаждения. Продолжительность нагрева зависит от нагревательного устройства, по опытным данным на  $1\text{ мм}$  сечения затрачивается: в электрической печи –  $1,5...2\text{ мин.}$ ; в пламенной печи –  $1\text{ мин.}$ ; в соляной ванне –  $0,5\text{ мин.}$ ; в свинцовой ванне –  $0,1...0,15\text{ мин.}$

По температуре нагрева различают виды закалки:

– *полная*, с температурой нагрева на  $30...50^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_3$   
 $T_{\text{н}} = A_3 + (30...50)^{\circ}\text{C}$ .

Применяют ее для доэвтектоидных сталей. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:  $P + \Phi \xrightarrow{\text{нагрев } A_3} A \xrightarrow{\text{охлаждение}} M$ .

– *неполная* с температурой нагрева на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A$   
 $T_{\text{н}} = A_1 + (30...50)^{\circ}\text{C}$

Применяется для заэвтектоидных сталей. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:  $P + C_{II} \xrightarrow{\text{нагрев } A} A + C_{II} \xrightarrow{\text{охлаждение}} M + C_{II}$ .

После охлаждения в структуре остается вторичный цементит, который повышает твердость и износостойкость режущего инструмента. После полной закалки заэвтектоидных сталей получают дефектную структуру грубоиглочатого мартенсита. Заэвтектоидные стали перед закалкой обязательно подвергают отжигу – сфероидизации, чтобы цементит имел зернистую форму.

Для получения требуемой структуры изделия охлаждают с различной скоростью, которая в большой степени определяется охлаждающей средой, формой изделия и теплопроводностью стали. Режим охлаждения должен исключить возникновение больших закалочных напряжений. При высоких скоростях охлаждения при закалке возникают внутренние напряжения, которые могут привести к короблению и растрескиванию. Для предупреждения образования трещин необходимо избегать растягивающих напряжений в поверхностных слоях изделия. Перегрев содействует образованию закалочных трещин, увеличивает деформации. Очень медленное охлаждение может привести к частичному отпуску мартенсита и увеличению количества аустенита остаточного, и, следовательно, к снижению твердости.



В качестве охлаждающих сред при закалке используют воду при различных температурах, технические масла, растворы солей и щелочей, расплавленные металлы. Вода имеет существенный недостаток: высокая скорость охлаждения в интервале мартенситного превращения приводит к образованию закалочных дефектов. С повышением температуры воды ухудшается ее закалочная способность. Наиболее высокой и равномерной охлаждающей способностью отличаются холодные 8...12 %-ные водные растворы  $NaCl$  и  $NaOH$ . Для легированных сталей с высокой устойчивостью аустенита используют минеральное масло (нефтяное). Обеспечивающее небольшую скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения и постоянство закалывающей способности. Недостатками минеральных масел являются повышенная воспламеняемость, низкая охлаждающая способность в интервале температур перлитного превращения, высокая стоимость.

При выборе охлаждающей среды необходимо учитывать *закалываемость* и *прокалываемость* стали.

*Закалываемость* – способность стали приобретать высокую твердость при закалке. Закалываемость определяется содержанием углерода. Стали с содержанием углерода менее 0,20 % не закалываются.

*Прокалываемость* – способность получать закаленный слой с мартенситной и троост-мартенситной структурой, обладающей высокой твердостью, на определенную глубину. За глубину закаленной зоны принимают расстояние от поверхности до середины слоя, где в структуре одинаковые объемы мартенсита и троостита. Чем меньше критическая скорость закалки, тем выше прокалываемость. Укрупнение зерен повышает прокалываемость. Если скорость охлаждения в сердцевине изделия превышает критическую, то сталь имеет сквозную прокалываемость. Нерастворимые частицы и неоднородность аустенита уменьшают прокалываемость. Характеристикой прокалываемости является *критический диаметр*. *Критический диаметр* – максимальное сечение, прокалывающееся в данном охладителе на глубину, равную радиусу изделия. С введением в сталь легирующих элементов закалываемость и прокалываемость увеличиваются (особенно молибден и бор, кобальт – наоборот).

### **Отпуск**

Отпуск является окончательной термической обработкой. Целью отпуска является повышение вязкости и пластичности, снижение твердости и уменьшение внутренних

напряжений закаленных сталей. С повышением температуры нагрева прочность обычно снижается, а пластичность и вязкость растут. Температуру отпуска выбирают, исходя из требуемой прочности конкретной детали.

Различают три вида отпуска:

1. *Низкий отпуск* с температурой нагрева  $T_n = 150...300^\circ\text{C}$ .

В результате его проведения частично снимаются закалочные напряжения. Получают структуру – *мартенсит отпуска*. Проводят для инструментальных сталей; после закалки токами высокой частоты; после цементации.

2. Средний отпуск с температурой нагрева  $T_n = 300...450^\circ\text{C}$ .

Получают структуру – *троостит отпуска*, сочетающую высокую твердость 40...45HRC с хорошей упругостью и вязкостью. Используется для изделий типа пружин, рессор.

3. Высокий отпуск с температурой нагрева  $T_n = 450...650^\circ\text{C}$ .

Получают структуру, сочетающую достаточно высокую твердость и повышенную ударную вязкость (оптимальное сочетание свойств) – *сорбит отпуска*. Используется для деталей машин, испытывающих ударные нагрузки. Комплекс термической обработки, включающий закалку и высокий отпуск, называется *улучшением*.

#### 5.4. Понятие отпускной хрупкости.

Обычно с повышением температуры отпуска ударная вязкость увеличивается, а скорость охлаждения не влияет на свойства. Но для некоторых сталей наблюдается снижение ударной вязкости. Этот дефект называется *отпускной хрупкостью* (рис. 5.5).

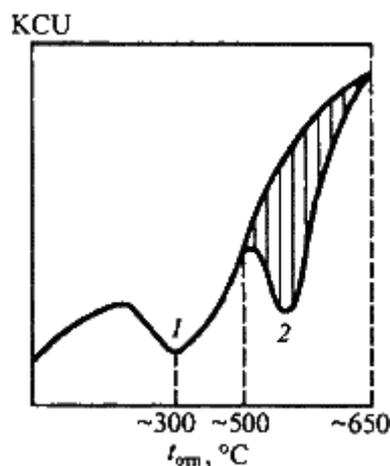


Рис.5.5. Зависимость ударной вязкости от температуры отпуска

*Отпускная хрупкость I рода* наблюдается при отпуске в области температур около  $300^\circ\text{C}$ . Она не зависит от скорости охлаждения. Это явление связано с неравномерностью превращения отпущенного мартенсита. Процесс протекает быстрее вблизи границ зерен по сравнению с объемами внутри зерна. У границ наблюдается концентрация напряжений,

поэтому границы хрупкие. Отпускная хрупкость I рода “необратима“, то есть при повторных нагревах тех же деталей не наблюдается.

*Отпускная хрупкость II рода* наблюдается у легированных сталей при медленном охлаждении после отпуска в области 450...650°С. При высоком отпуске по границам зерен происходит образование и выделение дисперсных включений карбидов. Приграничная зона обедняется легирующими элементами. При последующем медленном охлаждении происходит диффузия фосфора к границам зерна. Приграничные зоны обогащаются фосфором, снижаются прочность и ударная вязкость. Этому дефекту способствуют хром, марганец и фосфор. Уменьшают склонность к отпускной хрупкости II рода молибден и вольфрам, а также быстрое охлаждение после отпуска. Отпускная хрупкость II рода “обратима“, то есть при повторных нагревах и медленном охлаждении тех же сталей в опасном интервале температур дефект может повториться. Стали, склонные к отпускной хрупкости II рода, нельзя использовать для работы с нагревом до 650°С без последующего быстрого охлаждения.

В высокоуглеродистых и многих легированных сталей в структуре после закалки наблюдается значительное количество остаточного аустенита, который снижает твердость изделия, а также ухудшает магнитные характеристики. Для устранения аустенита остаточного проводят дополнительное охлаждение детали в области отрицательных температур, до температуры ниже  $t_{M_s}$  (- 80°С). Обычно для этого используют сухой лед. Такая обработка называется *обработкой стали холодом*. Обработку холодом необходимо проводить сразу после закалки, чтобы не допустить стабилизации аустенита. Увеличение твердости после обработки холодом обычно составляет 1...4 HRC. После обработки холодом сталь подвергают низкому отпуску, так как обработка холодом не снижает внутренних напряжений. Обработке холодом подвергают детали шарикоподшипников, точных механизмов, измерительные инструменты.

## 5.5 Особенности термообработки чугунов

Для чугунов можно применять термическую обработку.

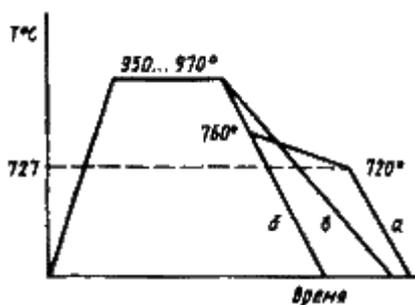


Рис. 5.6. Отжиг ковкого чугуна.

Отливки выдерживаются в печи при температуре 950...1000°С в течении 15...20 часов. Происходит разложение цементита:  $Fe_3C \rightarrow Fe_\gamma(C) + C$ . Структура после выдержки состоит из аустенита и графита (углерод отжига). При медленном охлаждении в интервале

760...720°C, происходит разложение цементита, входящего в состав перлита, и структура после отжига состоит из феррита и углерода отжига (получается ферритный ковкий чугун). При относительно быстром охлаждении (режим б, рис. 5.8) вторая стадия полностью устраняется, и получается перлитный ковкий чугун. Структура чугуна, отожженного по режиму в, состоит из перлита, феррита и графита отжига (получается феррито-перлитный ковкий чугун). Отжиг является длительной 70...80 часов и дорогостоящей операцией. В последнее время, в результате усовершенствований, длительность сократилась до 40 часов. Различают 7 марок ковкого чугуна: три с ферритной (КЧ 30 – 6) и четыре с перлитной (КЧ 65 – 3) основой (ГОСТ 1215). По механическим и технологическим свойствам ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. Недостатком ковкого чугуна по сравнению с высокопрочным является ограничение толщины стенок для отливки и необходимость отжига. Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. Из ферритных чугунов изготавливают картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы, хомутики, муфты, фланцы. Из перлитных чугунов, характеризующихся высокой прочностью, достаточной пластичностью, изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, тормозные колодки.

## 5.6. Вопросы для самопроверки

1. В чем различие между перлитом, сорбитом и трооститом?
2. Что такое мартенсит и в чем сущность и особенности мартенситного превращения?
3. Что такое критическая скорость закалки?
4. От чего зависит количество остаточного аустенита?
5. В чем сущность превращений, происходящих при отпуске?
6. В чем сущность явления отпускной хрупкости?
7. Как можно устранить отпускную хрупкость второго рода?
8. Какие вам известны разновидности процесса отжига и для чего они применяются?
10. Как при отпуске изменяются структура и свойства стали?
11. Какие виды и причины брака при закалке?
12. Какие вам известны группы охлаждающих сред, и каковы их особенности?
13. От чего зависит прокаливаемость стали и в чем ее технологическое значение?
14. Для чего и как производится обработка холодом?

## 5.7. Глоссарий по теме 5

### **АУСТЕНИЗАЦИЯ**

- Процесс образования аустенита при нагреве сталей выше критических температур.

### **ВАННА для термической обработки**

- Ванна с раствором или расплавом солей, металлов и т.п., в которой поддерживается постоянная температура и осуществляется изотермическая обработка металлов и сплавов.

### **соляная В.**

- Расплав солей для изотермической обработки изделий.

<b>ВОЗВРАТ</b>	- Частичное восстановление совершенства кристаллической структуры и свойств деформированных металлов или сплавов при их нагреве ниже температуры рекристаллизации.
<b>ЗАКАЛКА</b>	- Термическая обработка с нагревом до температур, превышающих температуру фазовых превращений, с выдержкой и с последующим охлаждением металла или сплава со скоростью, превышающей критическую; обеспечивает получение неравновесной структуры.
<b>неполная З.</b>	- Закалка доэвтектоидной стали с нагревом до температур межкритического интервала $A_{c1} - A_{c3}$ , не обеспечивающая полного превращения в аустенит; приводит к формированию феррито-мартенситной структуры.
<b>поверхностная З.</b>	- Закалка, при которой только поверхностный слой изделия нагревают до заданной температуры.
<b>полная З.</b>	- Закалка доэвтектоидной стали с нагревом выше критической температуры $A_{c3}$ , обеспечивающая полный переход в аустенитное состояние; последующее охлаждение приводит к образованию в основном мартенситной структуры.
<b>ступенчатая З.</b>	- Закалка стали, при которой для уменьшения закалочных напряжений осуществляют вторую изотермическую выдержку метастабильного аустенита при температуре выше температуры начала мартенситного превращения; распад аустенита осуществляется при последующем медленном охлаждении в области образования мартенсита.
<b>ЗАКАЛИВАЕМОСТЬ</b>	- Способность стали повышать твердость при закалке. Возрастает с ростом содержания углерода.
<b>КРИТИЧЕСКАЯ ТОЧКА</b> (температура)	- Температура начала или конца фазового превращения в сплаве; может быть определена из диаграммы состояния элементов, входящих в состав сплава.
<b>T. A<sub>1</sub></b>	- Температура в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, при которой протекает превращение перлит ⇌ аустенит.
<b>T A<sub>2</sub></b>	- Температура соответствующая точке Кюри феррита.
<b>T. A<sub>3</sub></b>	- Температура, в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, выше которой в доэвтектоидных сталях присутствует одна фаза – аустенит.

<b>T. A<sub>c</sub></b>	- Температура в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, при которой фазовое превращение протекает в процессе нагрева.
<b>T. A<sub>cm</sub></b>	- Температура в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, выше которой в заэвтектоидных сталях присутствует одна фаза – аустенит.
<b>T. A<sub>r</sub></b>	- Температура в равновесной системе Fe – Fe <sub>3</sub> C, при которой фазовое превращение протекает в процессе охлаждения.
<b>КОАГУЛЯЦИЯ</b>	- Процесс увеличения размеров частиц твердой фазы в металлах и сплавах при повышенных температурах.
<b>КОРОБЛЕНИЕ</b>	- Искажение формы изделия вследствие действия внутренних напряжений, образующийся из-за неравномерной деформации по длине и ширине заготовки.
<b>МАРТЕНСИТ</b>	- Пересыщенный твердый раствор углерода в $\alpha$ -железе, образующийся при закалке из аустенита.
<b>отпущенный М.</b>	- Мартенсит, образованный из мартенсита закалки в процессе отпуска или самоотпуска стали в результате частичного выделения углерода из пересыщенного твердого раствора.
<b>НОРМАЛИЗАЦИЯ</b>	- Термическая обработка стали или чугуна, заключающаяся в нагреве выше критических точек (с получением преимущественно структуры аустенита), выдержке и охлаждении на воздухе.
<b>НАСЛЕДСТВЕННО-МЕЛКОЗЕРНИСТАЯ СТАЛЬ</b>	- Сталь, при нагреве которой в аустенитной области до температуры 1000 °С ее зерно практически не растет.
<b>НАСЛЕДСТВЕННО-КРУПНОЗЕРНИСТАЯ СТАЛЬ</b>	- Сталь, при нагреве которой в аустенитной области размер зерна непрерывно возрастает.
<b>ОТЖИГ</b>	- Термическая обработка с нагревом до температур, выше либо ниже фазовых или структурных превращений, с выдержкой и последующим медленным охлаждением; при этом обеспечивается получение равновесной структуры.
<b>ОТПУСК</b>	- Термическая обработка стали с нагревом ниже температуры полиморфного превращения, с выдержкой и охлаждением; обеспечивает получение более равновесной структуры и оптимальное сочетание служебных свойств.

<b>высокий О.</b>	- Отпуск с нагревом до 500 – 700 °С, обеспечивающий высокую конструкционную прочность стали.
<b>низкий О.</b>	- Отпуск с нагревом до температур ниже 300 °С, обеспечивающий твердость, прочность и износостойкость стали на высоком уровне.
<b>средний О.</b>	- Отпуск с нагревом до 300 – 500 °С, обеспечивающий сочетание высокой прочности, упругости и вязкости.
<b>сорбит О.</b>	- Сорбит, образовавшийся при отпуске закаленной стали в результате коагуляции зерен цементита, имеет зернистое строение.
<b>троостит О.</b>	- Троостит с зернистым строением, образовавшийся при распаде мартенсита в процессе отпуска.
<b>ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ</b>	- Дефект термической обработки, заключающийся в обеднении поверхностного слоя стали углеродом.
<b>ПЕРЕЖОГ</b>	- Необратимый дефект металла или сплава, заключающийся в окислении или оплавлении границ зерен в результате значительного превышения заданной температуры нагрева
<b>ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ</b>	- Глубина слоя от поверхности детали на которую сталь восприняла закалку. Зависит от содержания легирующих элементов.
<b>индукционная ПЕЧЬ</b>	- Электрическая печь с индукционным нагревом материала.
<b>муфельная П.</b>	- Термическая печь, в которой обрабатываемый материал защищен муфелем от контакта с атмосферой продуктов сгорания (топливная печь) или с воздухом (электрическая печь).
<b>термическая П.</b>	- Печь для термической или химико-термической обработки изделий.
<b>пересыщенный твердый РАСТВОР</b>	- Раствор, в котором концентрация растворенного элемента больше равновесной для данной температуры.
<b>РЕЖИМ</b>	- Совокупность параметров реализации технологического процесса (длительность, температура, давление и пр.).

## **САМООТПУСК**

-Отпуск стали, происходящий за счет теплоты, аккумулированной при закалке.

## **С-ОБРАЗНЫЕ КРИВЫЕ**

- Кривые, имеющие С-образную форму и характеризующие заданную степень развития некоторых процессов (фазовых превращений, коррозионного охрупчивания, растворения фаз и т.п.) в координатах “температура – время”.

## **ТЕРМООБРАБОТКА (ТО)**

- Совокупность операций теплового воздействия на материал с целью изменения его структуры и свойств в нужном направлении

### **5.8. Используемые информационные ресурсы**

1. Материаловедение[Текст]: учебник для вузов /Ю.М.Лахтин, В.П. Леонтьева –М.: Машиностроение, 2009. - 526 с.
2. Металловедение / А.И. Самохоцкий, М.Н. Кунявский, Т.М. Кунявская и др. – М.: Металлургия, 1990.
3. Справочник- экзаменатор по материаловедению [Текст]: учебное пособие / В.В. Тарасов, Г.Б. Кривошеева, А.П. Герасимов - Владивосток: ДВГМА, 2000. – 76 с.
6. Солнцев Ю.П. Материаловедение. – СПб.:ХИМИЗДАТ, 2007. – 784с.
- 7.База данных микроструктур металлов и сплавов <http://www.microstructure.ru>

## Тема 6. Химико-термическая обработка сталей.

**Аннотация.** Данная тема раскрывает основные понятия поверхностной обработки металлов. Предусматривается изучение методов поверхностного упрочнения металлов

**Ключевые слов.** *Диссоциация, адсорбция, диффузия, азотирование, поверхностная закалка,*

### 6.1. Физические основы химико-термической обработки

*Химико-термическая обработка (ХТО)* – процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали. Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной, плазменной), в которой осуществляется нагрев. В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура. Химико-термическая обработка является основным способом поверхностного упрочнения деталей. Основными параметрами химико-термической обработки являются температура нагрева и продолжительность выдержки. В основе любой разновидности химико-термической обработки лежат процессы *диссоциации, адсорбции, диффузии.*

*Диссоциация* – получение насыщающего элемента в активированном атомарном состоянии в результате химических реакций, а также испарения.

*Адсорбция* – захват поверхностью детали атомов насыщающего элемента. Адсорбция – всегда экзотермический процесс, приводящий к уменьшению свободной энергии.

*Диффузия* – перемещение адсорбированных атомов вглубь изделия. Для осуществления процессов адсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом, образуя твердые растворы или химические соединения.

Основными разновидностями химико-термической обработки являются:

- цементация (насыщение поверхностного слоя углеродом);
- азотирование (насыщение поверхностного слоя азотом);
- нитроцементация или цианирование (насыщение поверхностного слоя одновременно углеродом и азотом);
- диффузионная металлизация (насыщение поверхностного слоя различными металлами).

### 6.2. Назначение и виды цементации.

*Цементация* – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве до температуры 900...950 °С. Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (до 0,25 %). Нагрев изделий осуществляют в среде, легко отдающей углерод. Подобрав режимы обработки, поверхностный слой насыщают углеродом до требуемой глубины. *Глубина цементации (h)* – расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита ( $h = 1...2$  мм).

*Степень цементации* – среднее содержание углерода в поверхностном слое (обычно, не более 1,2 %). Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств цементита вторичного, сообщающего слою повышенную хрупкость. На практике применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде). Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрываются медью (электролитическим способом) или глиняной смесью.



*Недостатками цементации в твердом карбюризаторе являются:*

- значительные затраты времени (для цементации на глубину 0,1 мм затрачивается 1 час);
- низкая производительность процесса;
- громоздкое оборудование;
- сложность автоматизации процесса.

Способ применяется в мелкосерийном производстве.



*Преимущества газовой цементации:*

- возможность получения заданной концентрации углерода в слое (можно регулировать содержание углерода, изменяя соотношение составляющих атмосферу газов);
- сокращение длительности процесса за счет упрощения последующей термической обработки;
- возможность полной механизации и автоматизации процесса.
- Способ применяется в серийном и массовом производстве.

Структура цементованного слоя представлена на рис. 6.1.

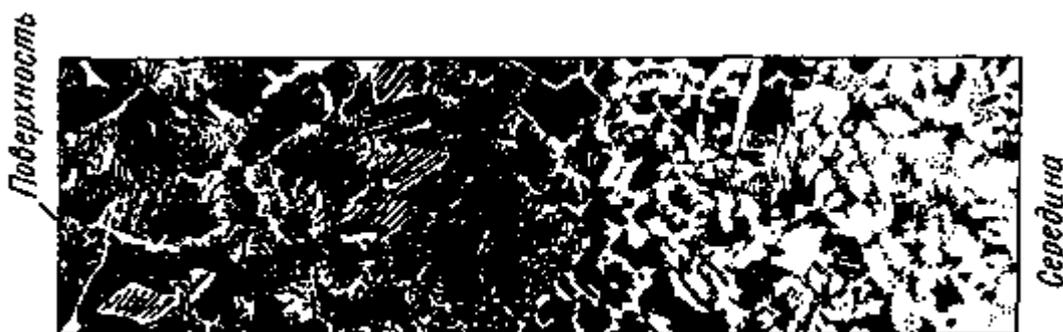


Рис. 6.1. Структура цементованного слоя

На поверхности изделия образуется слой заэвтектоидной стали, состоящий из перлита и цементита. По мере удаления от поверхности, содержание углерода снижается и следующая зона состоит только из перлита. Затем появляются зерна феррита, их количество, по мере удаления от поверхности увеличивается. И, наконец, структура становится отвечающей исходному составу. Окончательно формирует свойства цементованной детали последующая термообработка. Все изделия подвергают закалке с низким отпуском. После закалки цементованное изделие приобретает высокую твердость и износостойкость,

повышается предел контактной выносливости и предел выносливости при изгибе, при сохранении вязкой сердцевины.

Графики различных комплексов термической обработки представлены на рис. 6.2.

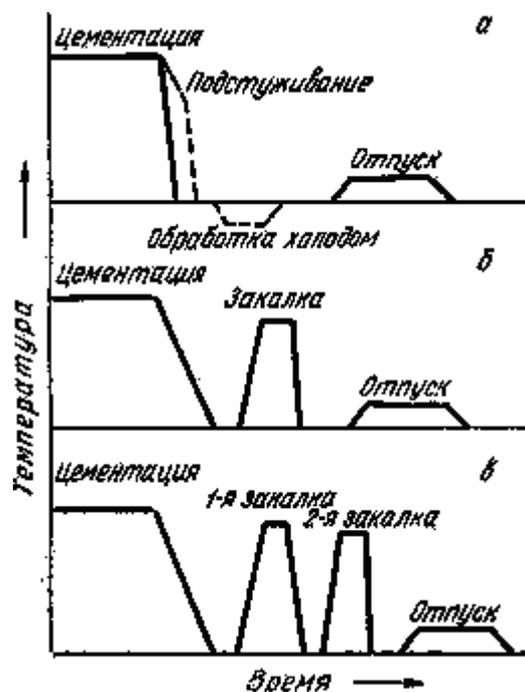


Рис. 6.2. Режимы термической обработки цементованных изделий

Если сталь наследственно мелкозернистая или изделия неответственного назначения, то проводят однократную закалку с температуры  $820...850^{\circ}\text{C}$  (рис. 6.2 б). При этом обеспечивается получение высокоуглеродистого мартенсита в цементованном слое, а также частичная перекристаллизация и измельчение зерна сердцевины. При газовой цементации изделия по окончании процесса подстуживают до этих температур, а затем проводят закалку (не требуется повторный нагрев под закалку) (рис. 6.2 а). Для удовлетворения особо высоких требований, предъявляемых к механическим свойствам цементованных деталей, применяют двойную закалку (рис. 6.2 в). Первая закалка (или нормализация) проводится с температуры  $880...900^{\circ}\text{C}$  для исправления структуры сердцевины. Вторая закалка проводится с температуры  $760...780^{\circ}\text{C}$  для получения мелкоиглочатого мартенсита в поверхностном слое. Завершающей операцией термической обработки всегда является низкий отпуск, проводимый при температуре  $150...180^{\circ}\text{C}$ . В результате отпуска в поверхностном слое получают структуру мартенсита отпуска, частично снимаются напряжения. Цементации подвергают зубчатые колеса, поршневые кольца, червяки, оси, ролики.

### 6.3. Азотирование стали и цианирование стали.

*Азотирование* – химико-термическая обработка, при которой поверхностные слои насыщаются азотом. Впервые азотирование осуществил Чижевский И.П., промышленное применение – в двадцатые годы. При азотировании увеличиваются не только твердость и износостойкость, но также повышается коррозионная стойкость. Фазы, получающиеся в азотированном слое углеродистых сталей, не обеспечивают высокой твердости, и образующийся слой хрупкий. Для азотирования используют стали, содержащие алюминий, молибден, хром, титан. Нитриды этих элементов дисперсны и обладают высокой твердостью

и термической устойчивостью. Типовые азотируемые стали: *38ХМЮА*, *35ХМЮА*, *30ХТ2НЗЮ*.

Глубина и поверхностная твердость азотированного слоя зависят от ряда факторов, из которых основные: температура азотирования, продолжительность азотирования и состав азотируемой стали. Азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную механическую и термическую обработку (закалка с высоким отпуском). После азотирования в сердцевине изделия сохраняется структура сорбита, которая обеспечивает повышенную прочность и вязкость.

*Цианирование* – химико-термическая обработка, при которой поверхность насыщается одновременно углеродом и азотом. Глубина слоя и концентрация в нем углерода и азота зависят от температуры процесса и его продолжительности. Цианированный слой обладает высокой твердостью  $58...62$  HRC и хорошо сопротивляется износу. Повышаются усталостная прочность и коррозионная стойкость. Продолжительности процесса  $0,5...2$  часа. Основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей.

*Нитроцементация* – газовое цианирование, осуществляется в газовых смесях из цементующего газа и диссоциированного аммиака. Нитроцементация характеризуется безопасностью в работе, низкой стоимостью.

#### **6.4. Диффузионная металлизация**

*Диффузионная металлизация* – химико-термическая обработка, при которой поверхность стальных изделий насыщается различными элементами: алюминием, хромом, кремнием, бором и др. При насыщении хромом процесс называют *хромированием*, алюминием – *алитированием*, кремнием – *силицированием*, бором – *борированием*. Диффузионную металлизацию можно проводить в твердых, жидких и газообразных средах. Диффузионная металлизация – процесс дорогостоящий, осуществляется при высоких температурах ( $1000...1200^{\circ}\text{C}$ ) в течение длительного времени. Одним из основных свойств металлизированных поверхностей является жаростойкость, поэтому жаростойкие детали для рабочих температур  $1000...1200^{\circ}\text{C}$  изготавливают из простых углеродистых сталей с последующим *алитированием*, *хромированием* или *силицированием*. Исключительно высокой твердостью ( $2000$  HV) и высоким сопротивлением износу из-за образования боридов железа ( $\text{FeB}$ ,  $\text{FeB}_2$ ) характеризуются *борированные* слои, но эти слои очень хрупкие.

#### **6.5. Поверхностное упрочнение**

Конструкционная прочность часто зависит от состояния материала в поверхностных слоях детали. Одним из способов поверхностного упрочнения стальных деталей является *поверхностная закалка*. В результате поверхностной закалки увеличивается твердость поверхностных слоев изделия с одновременным повышением сопротивления истиранию и предела выносливости. Общим для всех видов поверхностной закалки является нагрев поверхностного слоя детали до температуры закалки с последующим быстрым охлаждением. Эти способы различаются методами нагрева деталей. Толщина закаленного слоя при поверхностной закалке определяется глубиной нагрева. Наибольшее распространение имеют электротермическая закалка с нагревом изделий токами высокой частоты (ТВЧ) и газопламенная закалка с нагревом газовой-кислородным или кислородно-керосиновым пламенем.

К материалам, подвергнутым закалке без полиморфного превращения, применяется *старение*. Закалка без полиморфного превращения – термическая обработка, фиксирующая при более низкой температуре состояние, свойственное сплаву при более высоких температурах (пересыщенный твердый раствор). *Старение* – термическая обработка, при которой главным процессом является распад пересыщенного твердого раствора. В результате старения происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска, после старения увеличиваются прочность и твердость, и уменьшается пластичность. Основное назначение старения – повышение прочности и стабилизация свойств.

Различают старение естественное, искусственное и после пластической деформации. *Естественным старением* называется самопроизвольное повышение прочности и уменьшение пластичности закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре. Повышение прочности в процессе выдержки при повышенных температурах называется *искусственным старением*. Если закаленный сплав, имеющий структуру пересыщенного твердого раствора, подвергнуть пластической деформации, то также ускоряются процессы, протекающие при старении – это *деформационное старение*. После старения повышается прочность и снижается пластичность низкоуглеродистых сталей в результате дисперсных выделений в феррите цементита третичного и нитридов. Старение является основным способом упрочнения алюминиевых и медных сплавов, а также многих жаропрочных сплавов.

Основное назначение методов механического упрочнения поверхности – повышение усталостной прочности. Методы механического упрочнения – наклепывание поверхностного слоя на глубину 0,2...0,4 мм. Разновидностями являются дробеструйная обработка и обработка роликами.

*Дробеструйная обработка* – обработка дробью поверхности готовых деталей. Осуществляется с помощью специальных дробеструйных установок, выбрасывающих стальную или чугунную дробь на поверхность обрабатываемых деталей. Диаметр дроби – 0,2...4 мм. Удары дроби вызывают пластическую деформацию на глубину 0,2...0,4 мм. Применяют для упрочнения деталей в канавках, на выступах. Подвергают изделия типа пружин, рессор, звенья цепей, гусениц, гильзы, поршни, зубчатые колеса.

При *обработке роликами* деформация осуществляется давлением ролика из твердого металла на поверхность обрабатываемого изделия. При усилиях на ролик, превышающих предел текучести обрабатываемого материала, происходит наклеп на нужную глубину. Обработка улучшает микрогеометрию. Создание остаточных напряжений сжатия повышает предел усталости и долговечность изделия. Обкатка роликами применяется при обработке шеек валов, проволоки, при калибровке труб, прутков. Не требуется специальное оборудование, можно использовать токарные или строгальные станки.

## 6.6. Вопросы самопроверки

1. Каковы назначение и способы химико-термической обработки стали?
2. В чем заключаются физические основы химико-термической обработки?
3. Назначение и режим термической обработки после цементации.
4. Каковы свойства цементированных и азотированных изделий?
5. Сущность и назначение процесса борирования.

6. Как изменяются свойства изделий при дробеструйной обработке и какова природа этих изменений?
7. Как влияет поверхностное упрочнение на эксплуатационные характеристики изделий.
8. В чем сущность и особенности термомеханической обработки?
9. Как влияет поверхностная закалка на эксплуатационные характеристики изделия?
10. Как регулируется глубина закаленного слоя при нагреве токами высокой частоты?
11. Какие преимущества перед обычной закалкой имеет термомеханическая обработка и почему?

## 6.7. Глоссарий по теме 6

### **АЗОТИРОВАНИЕ**

- ХТО с насыщением поверхностного слоя стали, чугуна и сплавов тугоплавких металлов азотом при температуре 500 – 1200 ° С.

#### **газовое А.**

- Низкотемпературное азотирование в среде частично диссоциированного аммиака; дополнительное введение азота, кислорода, углекислого газа и их смесей ускоряет процесс насыщения.

#### **двухступенчатое А.**

- Газовое азотирование, осуществляемое в два этапа: сначала при 500 – 520 ° С, а затем при 540 – 600 ° С, что позволяет резко сократить продолжительность процесса.

#### **А. в жидкой среде**

- Углеродоазотирование стали или чугуна при температуре 560 – 580 ° С в расплаве, содержащем цианистые соли.

#### **ионное А.**

- Азотирование поверхности насыщения (катод) ионами азота, ускоренными электростатическим полем; проводится при пониженном давлении, обеспечивающем поддержание тлеющего разряда; осуществляется в две стадии: очистка поверхности и собственно азотирование.

### **АЛИТИРОВАНИЕ**

- ХТО с диффузионным насыщением поверхности металлов и сплавов алюминием.

### **Алюмохромирование**

- ХТО с одновременным насыщением поверхностного слоя сталей, никель, хромовых, медных или титановых сплавов алюминием и хромом.

### **АТМОСФЕРА**

- Газовая среда, в которой производится обработка материала.

### **БОРИРОВАНИЕ**

- ХТО с насыщением поверхности металлов и сплавов бором для повышения износостойкости, твердости и коррозионной стойкости.

<b>КАРБИУРИЗАТОР</b>	- Жидкая, твердая или газообразная среда с высоким углеродным потенциалом, в которой происходит насыщение поверхности стали углеродом.
<b>НИТРОЦЕМЕНТАЦИЯ</b>	- ХТО с одновременным насыщением стали углеродом и азотом в газовой среде при температуре 850 – 870 °С.
<b>УПРОЧНЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ</b>	- Упрочнение, достигаемое одним способом термической обработки или совокупностью нескольких операций термической обработки.
<b>ЦИНКОВАНИЕ</b>	- Нанесение цинкового покрытия на поверхность металлического изделия. ХТО с насыщением поверхности стальных изделий цинком при 300 – 550 °С.

### **6.8. Используемые информационные ресурсы**

1. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2008. – 877 с.
2. Материаловедение[Текст]: учебник для вузов /Ю.М.Лахтин, В.П. Леонтьева –М.: Машиностроение, 2009. - 526 с.
- 3.Справочник- экзаменатор по материаловедению [Текст]: учебное пособие / В.В. Тарасов, Г.Б. Кривошеева, А.П. Герасимов - Владивосток: ДВГМА, 2000. – 76 с.
4. Солнцев Ю.П. Материаловедение. – СПб.:ХИМИЗДАТ, 2007. – 784с.

### **6.9. Список сокращений**

ХТО – химикотермическая обработка

ТВЧ – токи высокой частоты

ВТМО - высокотемпературная термомеханическая обработка

НТМО - низкотемпературная термомеханическая обработка

ТМО - термомеханическая обработка

## Тема 7. Легированные стали

**Аннотация.** Данная тема раскрывает классификацию, основные свойства, особенности легированных сталей. Предусматривается изучение легирующих элементов на свойства сталей, особенности термообработки легированных сталей.

**Ключевые слова.** Легирование, степень легирования, карбидообразующие, жаропрочность, износостойкость, особые свойства сталей.

### 7.1. Классификация легированных сталей.

Стали, в которых суммарное количество содержание легирующих элементов не превышает 2.5%, относятся к низколегированным, содержащие 2.5-10% - к легированным, и более 10% к высоколегированным (содержание железа более 45%). Наиболее широкое применение в строительстве получили низколегированные стали, а в машиностроении - легированные стали.

Легированные конструкционные стали маркируют цифрами и буквами. Двухзначные цифры, приводимые в начале марки, указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буквы справа от цифры обозначают легирующий элемент. Пример, сталь 12Х2Н4А содержит 0.12% С, 2% Cr, 4% Ni и относится к высококачественным, на что указывает в конце марки буква "А".

### 7.2. Влияние легирующих элементов на свойства стали.

По влиянию на устойчивость аустенита и на форму С-образных кривых легирующие элементы разделяются на две группы. Элементы, которые растворяются в феррите и цементите (кобальт, кремний, алюминий, медь, никель), оказывают только количественное влияние на процессы превращения. Замедляют превращение (большинство элементов), или ускоряют его (кобальт) (рис.7.1 а)

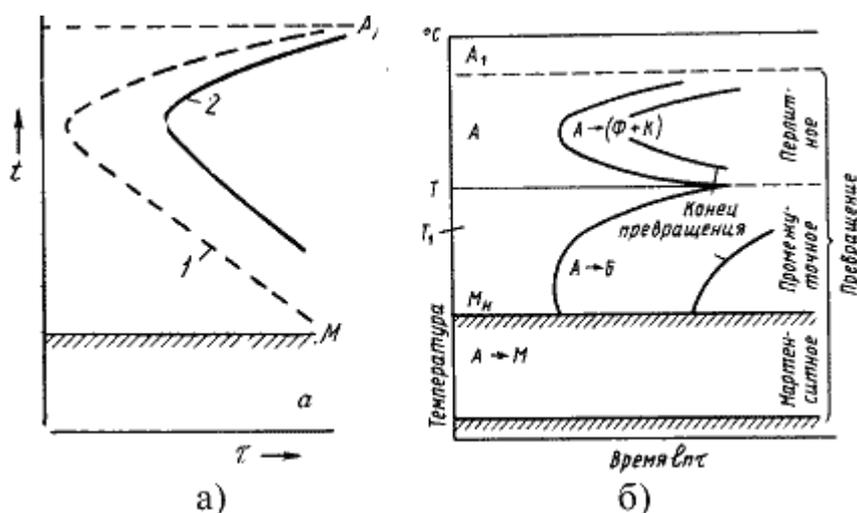


Рис 7.1. Влияние легирующих элементов на превращение переохлажденного аустенита: а – некарбидообразующие элементы; б — карбидообразующие элементы

Карбидообразующие элементы (хром, молибден, вольфрам, ванадий, титан) вносят и качественные изменения в кинетику изотермического превращения. При разных температурах они по разному влияют на скорость распада аустенита: при температуре

700...500оС — замедляют превращение в перлит-ной области, при температуре 500...400оС (образование троостита) – очень сильно замедляют превращение, при температуре 400...300оС (промежуточное превращение) – замедляет превращение аустенита в бейнит, но меньше, чем образование троостита. Это отражается на форме С-образных кривых: наблюдаются два максимума скорости изотермического распада, разделенных областью высокой устойчивости переохлажденного аустенита (рис. 7.1б). Температура максимальной устойчивости аустенита зависит от карбидообразующего элемента: хром – 400...500оС, вольфрам – 500...550оС, молибден – 550...575оС, ванадий – 575...600оС. Время максимальной устойчивости при заданной температуре возрастает с увеличением степени легированности (очень велико для высоколегированных сталей). Важным является замедление скорости распада. Это способствует более глубокой прокаливаемости и переохлаждению аустенита до интервала мартен-ситного превращения при более медленном охлаждении (масло, воздух). Увеличивают прокаливаемость хром, никель, молибден, марганец, особенно при совместном легировании

При нагреве большинство легирующих элементов растворяются в аустените. Карбиды титана и ниобия не растворяются. Эти карбиды тормозят рост аустенитного зерна при нагреве и обеспечивают получение мелкоигольчатого мартенсита при закалке. Остальные карбидообразующие элементы, а также некарбидообразующие, при нагреве растворяются в аустените и при закалке образуют легированный мартенсит. Некоторые легирующие элементы (алюминий, кобальт) повышают мартенситную точку и уменьшают количество остаточного аустенита, другие не влияют на эту точку (кремний). Большинство элементов снижают мартенситную точку и увеличивают количество остаточного аустенита.

Легирующие элементы замедляют процесс распада мартенсита: никель, марганец – незначительно; хром, молибден, кремний – заметно. Это связано с тем, что процессы при отпуске имеют диффузионный характер, а большинство элементов замедляют карбидное превращение. Легированные стали сохраняют структуру мартенсита отпуска до температуры 400...500оС. Так как в легированных сталях сохраняется значительное количество остаточного аустенита, то превращение его в мартенсит отпуска способствует сохранению твердости до высоких температур. Таким образом, легированные стали при отпуске нагревают до более высоких температур или увеличивают выдержку.

### **7.3. Конструкционные стали.**

#### **Конструкционные (машиностроительные) упрочняемые легированные стали.**

Для изготовления деталей, упрочняемых цементацией, применяют низкоуглеродистые (0.15-0.25% С) стали. Содержание легирующих элементов в сталях не должно быть слишком высоким, но должно обеспечить требуемую прокаливаемость поверхностного слоя и сердцевины.

*Хромистые стали* 15Х, 20Х предназначены для изготовления небольших изделий простой формы, цементируемых на глубину 1.0-1.5мм. Хромистые стали по сравнению с углеродистыми обладают более высокими прочностными свойствами при некоторой меньшей пластичности в сердцевине и лучшей прочностности в цементируемом слое.,

чувствительна к перегреву, прокаливаемость невелика. Сталь 20X -  $\sigma_B=800\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=650\text{МПа}$ ,  $\delta=11\%$ ,  $\psi=40\%$ .

*Хромованадиевые стали.* Легирование хромистой стали ванадием (0.1-0.2%) улучшает механические свойства (сталь 20ХФ). Кроме того, хромованадиевые стали менее склонны к перегреву. Используют только для изготовления сравнительно небольших деталей.

*Хромоникелевые стали* применяются для крупных деталей ответственного значения, испытывающих при эксплуатации значительные динамические нагрузки. Повышенная прочность, пластичность и вязкость сердцевины и цементированного слоя. Стали малочувствительны к перегреву при длительной цементации и не склонны к перенасыщению поверхностных слоев углеродом. Сталь 12Х2Н4А -  $\sigma_B=1150\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=950\text{МПа}$ ,  $\delta=10\%$ ,  $\psi=50\%$ .

*Хромомарганцевые стали* применяют во многих случаях вместо дорогих хромоникелевых. Однако они менее устойчивы к перегреву и имеют меньшую вязкость по сравнению с хромоникелевыми. В автомобильной и тракторной промышленности, в станкостроении применяют стали 18ХГТ и 25ХГТ. Сталь 25ХГМ -  $\sigma_B=1200\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=1100\text{МПа}$ ,  $\delta=10\%$ ,  $\psi=45\%$ .

*Хромомарганцевоникелевые стали.* Повышение прокаливаемости и прочности хромомарганцевых сталей достигается дополнительным легированием их никелем. На ВАЗе широко применяют стали 20ХГНМ, 19ХГН и 14ХГН. После цементации эти стали имеют высокие механические свойства. Сталь 15ХГН2ТА -  $\sigma_B=950\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=750\text{МПа}$ ,  $\delta=11\%$ ,  $\psi=55\%$ .

*Стали, легированные бором.* Бор увеличивает прокаливаемость стали, делает сталь чувствительной к перегреву. В промышленности для деталей, работающих в условиях износа при трении, применяют сталь 20ХГР, а также сталь 20ХГНР. Сталь 20ХГНР -  $\sigma_B=1300\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=1200\text{МПа}$ ,  $\delta=10\%$ ,  $\psi=09\%$ .

### **Конструкционные (машиностроительные) улучшаемые легированные стали.**

Стали имеют высокий предел текучести, малую чувствительность к концентраторам напряжений, в изделиях, работающих при многократном приложении нагрузок, высокий предел выносливости и достаточный запас вязкости. Кроме того, улучшаемые стали обладают хорошей прокаливаемостью и малой чувствительностью к отпускной хрупкости. При полной прокаливаемости сталь имеет лучшие механические свойства, особенно сопротивление хрупкому разрушению - низкий порог хладноломкости, высокое значение работы развития трещины КСТ и вязкость разрушения  $K_{1c}$ .

*Хромистые стали* 30X, 38X, 40X и 50X применяют для средненагруженных деталей небольших размеров. С увеличением содержания углерода возрастает прочность, но снижаются пластичность и вязкость. Прокаливаемость хромистых сталей невелика. Сталь 30X -  $\sigma_B=900\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=700\text{МПа}$ ,  $\delta=12\%$ ,  $\psi=45\%$ .

*Хромомарганцевые стали.* Совместное легирование хромом (0.9-1.2%) и марганцем (0.9-1.2%) позволяет получить стали с достаточно высокой прочностью и прокаливаемостью (40ХГ). Однако хромомарганцевые стали имеют пониженную вязкость, повышенный порог

хладноломкости (от 20 до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), склонность к отпускной хрупкости и росту зерна аустенита при нагреве. Сталь 40ХГТР -  $\sigma_{\text{в}}=1000\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=800\text{МПа}$ ,  $\delta=11\%$ ,  $\psi=45\%$ .

*Хромокремнемарганцевые стали.* Высоким комплексом свойств обладают хромокремнемарганцевые стали (хромансил). Стали 20ХГС, 25ХГС и 30ХГС обладают высокой прочностью и хорошей свариваемостью. Стали хромансил применяют также в виде листов и труб для ответственных сварных конструкций (самолетостроение). Стали хромансил склонны к обратимой отпускной хрупкости и обезуглероживанию при нагреве. Сталь 30ХГС -  $\sigma_{\text{в}}=1100\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=850\text{МПа}$ ,  $\delta=10\%$ ,  $\psi=45\%$ .

*Хромоникелевые стали* обладают высокой прокаливаемостью, хорошей прочностью и вязкостью. Они применяются для изготовления крупных изделий сложной конфигурации, работающих при динамических и вибрационных нагрузках. Сталь 40ХН -  $\sigma_{\text{в}}=1000\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=800\text{МПа}$ ,  $\delta=11\%$ ,  $\psi=45\%$ .

*Хромоникелемолибденовые стали.* Хромоникелевые стали обладают склонностью к обратимой отпускной хрупкостью, для устранения которой многие детали небольших размеров из этих сталей охлаждают после высокого отпуска в масле, а более крупные детали в воде для устранения этого дефекта стали дополнительно легируют молибденом (40ХН2МА) или вольфрамом. Сталь 40ХН2МА -  $\sigma_{\text{в}}=1100\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=950\text{МПа}$ ,  $\delta=12\%$ ,  $\psi=50\%$ .

*Хромоникелемолибденованадиевые стали* обладают высокой прочностью, пластичностью и вязкостью и низким порогом хладноломкости. Этому способствует высокое содержание никеля. Недостатками сталей являются трудность их обработки резанием и большая склонность к образованию флокенов. Стали применяют для изготовления наиболее ответственных деталей турбин и компрессорных машин. Сталь 38ХН3МФА -  $\sigma_{\text{в}}=1200\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0.2}=1100\text{МПа}$ ,  $\delta=12\%$ ,  $\psi=50\%$ .

#### **7.4. Стали и сплавы с особыми свойствами.**

##### **Стали с повышенной обрабатываемостью резанием.**

Наиболее часто применяют автоматные стали А12, А20, А40, имеющие повышенное содержание серы (0.08-0.3%), фосфора ( $\leq 0.05\%$ ) и марганца (0.7-1.0%). Сталь 40Г содержит 1.2-1.55% Mn. Фосфор, повышая твердость, прочность и охрупчивая сталь, способствует образованию ломкой стружки и получению высокого качества поверхности. Стали обладают большой анизотропией механических свойств, склонны к хрупкому разрушению, имеют пониженный предел выносливости. Поэтому сернистые автоматные стали применяют лишь для изготовления неответственных изделий - преимущественно нормалей или метизов.

##### **Мартенсито-старяющие высокопрочные стали**

Широкое применение в технике получила высокопрочная мартенсито-старяющая сталь Н18К9М5Т ( $\leq 0.03\%$  С,  $\sim 18\%$  Ni,  $\sim 9\%$  Co,  $\sim 5\%$  Mo,  $\sim 0.6$  Ti). Кроме стали Н18К9М5Т нашли применение менее легированные мартенсито-старяющие стали: Н12К8М3Г2, Н10Х11М2Т ( $\sigma_{\text{в}}=1400\div 1500\text{МПа}$ ), Н12К8М4Г2, Н9Х12Д2ТБ ( $\sigma_{\text{в}}=1600\div 1800\text{МПа}$ ),  $K_{\text{CU}}=0.35\div 0.6$  МДж/м<sup>2</sup>,  $\sigma_{0.2}=1800\div 2000\text{МПа}$ . Мартенсито-старяющие стали имеют высокий предел упругости  $\sigma_{0.002}=1500\text{МПа}$ . Мартенсито-старяющие стали применяют в авиационной промышленности,

в ракетной технике, в судостроении, в приборостроении для упругих элементов, в криогенной технике и т.д. Эти стали дорогостоящие.

### **Высокопрочные стали с высокой пластичностью (ТРИП- или ПНП-стали)**

Метастабильные высокопрочные аустенитные стали называют ТРИП-сталями или ПНП-сталями. Эти стали содержат 8-14% Cr, 8-32% Ni, 0.5-2.5% Mn, 2-6% Mo, до 2% Si (30X9N8M4Г2С2 и 25Н25М4Г1). Механические свойства ПНП-сталей:  $\sigma_b=1500\div1700$ МПа,  $\sigma_{0.2}=1400\div1550$ МПа,  $\delta=50\div60\%$ . Характерным для этой группы сталей является высокое значение вязкости разрушения и предела выносливости. Широкому применению ПНП-сталей препятствует их высокая легированность, необходимость использования мощного оборудования для деформации при сравнительно низких температурах, трудность сварки. Эти стали используют для изготовления высоконагруженных деталей, проволоки, тросов, крепежных деталей и др.

### **Рессорно-пружинные стали общего назначения**

Рессорно-пружинные стали предназначены для изготовления пружин, упругих элементов и рессор различного назначения. Они должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, пределом выносливости и релаксационной стойкостью при достаточной пластичности и вязкости. Для пружин малого сечения применяют углеродистые стали 65, 70, 75, 85. Сталь 85 -  $\sigma_{0.2}=1100$ МПа,  $\sigma_b=1150$ МПа,  $\delta=8\%$ ,  $\psi=30\%$ .

Более часто для изготовления пружин и рессор используют легированные стали. Стали 60С2ХФА и 65С2ВА, имеющие высокую прокаливаемость, хорошую прочность и релаксационную стойкость применяют для изготовления крупных высоконагруженных пружин и рессор. Сталь 65С2ВА -  $\sigma_{0.2}=1700$ МПа,  $\sigma_b=1900$ МПа,  $\delta=5\%$ ,  $\psi=20\%$ . Когда упругие элементы работают в условиях сильных динамических нагрузок, применяют сталь с никелем 60С2Н2А. Для изготовления автомобильных рессор широко применяют сталь 50ХГА, которая по техническим свойствам превосходит кремнистые стали. Для клапанных пружин рекомендуется сталь 50ХФА, не склонная к перегреву и обезуглероживанию.

### **Шарикоподшипниковые стали.**

Для изготовления тел качения и подшипниковых колец небольших сечений обычно используют высокоуглеродистую хромистую сталь ШХ15 (0.95-1.0% С и 1.3-1.65% Cr), а больших сечений - хромомарганцевую сталь ШХ15СГ (0.95-1.05% С, 0.9-1.2% Cr, 0.4-0.65% Si и 1.3-1.65% Mn), прокаливающуюся на большую глубину. Стали обладают высокой твердостью, износостойкостью и сопротивлением контактной усталости. К сталям предъявляются высокие требования по содержанию неметаллических включений, так как они вызывают преждевременное усталостное разрушение. Недопустима также карбидная неоднородность. Для изготовления деталей подшипников качения, работающих при высоких динамических нагрузках, применяют цементуемые стали 20Х2Н4А и 18ХГТ. После газовой цементации, высокого отпуска, закалки и отпуска детали подшипника из стали 20Х2Н4А имеют на поверхности 58-62 HRC и в сердцевине 35-45 HRC.

### **Износостойкие стали**

Для деталей, работающих на износ в условиях абразивного трения и высоких давлений и ударов, применяют высокомарганцевую литую аустенитную сталь 110Г13Л, содержащую

0.9-1.3% С и 11,5-14.5% Mn. Она обладает следующими механическими свойствами:  $\sigma_{0,2}=250\div350$ МПа,  $\sigma_B=800\div1000$ МПа,  $\delta=35\div45\%$ ,  $\psi=40\div50\%$ . Сталь 110Г13Л обладает высокой износостойкостью только при ударных нагрузках. При небольших ударных нагрузках в сочетании с абразивным изнашиванием либо при чистом абразивном изнашивании мартенситное превращение не протекает и износостойкость стали 110Г13Л невысокая. Для изготовления деталей, работающих в условиях изнашивания при кавитационной эрозии, применяют стали с нестабильным аустенитом 30Х10Г10, 0Х14АГ12 и 0Х14Г12М, испытывающим при эксплуатации частичное мартенситное превращение.

### **Коррозионно-стойкие и жаростойкие стали и сплавы**

*Жаростойкие стали и сплавы.* Повышение окалинстойкости достигается введением в сталь главным образом хрома, а также алюминия или кремния, т. е. Элементов, находящихся в твердом растворе и образующих в процессе нагрева защитные пленки оксидов (Cr, Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (Al, Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Для изготовления различного рода высокотемпературных установок, деталей печей и газовых турбин применяют жаростойкие ферритные (12Х17, 15Х25Т и др.) и аустенитные (20Х23Н13, 12Х25Н16Г7АР, 36Х18Н25С2 и др.) стали, обладающие жаропрочностью. Сталь 12Х17 -  $\sigma_B=520$ МПа,  $\sigma_{0,2}=350$ МПа,  $\delta=30\%$ ,  $\psi=75\%$ .

*Коррозионно-стойкие стали* устойчивы к электрохимической коррозии. Стали 12Х13 и 20Х13 применяют для изготовления деталей с повышенной пластичностью, подвергающихся ударным нагрузкам (клапанов гидравлических прессов, предметов домашнего обихода), а также изделий, испытывающих действие слабо агрессивных сред (атмосферных осадков, водных растворов солей органических кислот). Стали 30Х13 и 40Х13 используют для карбюраторных игл, пружин, хирургических инструментов и т. д. Стали 15Х25Т и 15Х28 используют чаще без термической обработки для изготовления сварных деталей, работающих в более агрессивных средах и не подвергающихся действию ударных нагрузок, при температуре эксплуатации не ниже -20°С. Сталь 12Х18Н10Т получила наибольшее распространение для работы в окислительных средах (азотная кислота). Сталь 12Х13 -  $\sigma_B=750$ МПа,  $\sigma_{0,2}=500$ МПа,  $\delta=20\%$ ,  $\psi=65\%$ .

*Коррозионно-стойкие сплавы на железоникелевой и никелевой основе.* Сплав 04ХН40МДТЮ предназначен для работы при больших нагрузках в растворах серной кислоты. Для изготовления аппаратуры, работающей в солянокислых средах, растворах серной и фосфорной кислоты, применяют никелевый сплав Н70МФ. Сплавы на основе Ni-Mo имеют высокое сопротивление коррозии в растворах азотной кислоты. Для изготовления сварной аппаратуры, работающей в солянокислых средах, применяют сплав Н70МФ. Наибольшее распространение получил сплав ХН65МВ для работы при повышенных температурах во влажном хлоре, солянокислых средах, хлоридах, смесях кислот и других агрессивных средах. Сталь Н70МФ -  $\sigma_B=950$ МПа,  $\sigma_{0,2}=480$ МПа,  $\delta=50\%$ .

### **Жаропрочные стали и сплавы**

*Жаропрочными* называют стали и сплавы, способные работать под напряжением при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной жаростойкостью. Жаропрочные стали и сплавы применяют для изготовления многих деталей котлов, газовых турбин, реактивных двигателей, ракет и т. д., работающих при высоких температурах. Жаропрочные стали благодаря невысокой стоимости широко применяются в высокотемпературной технике, их рабочая температура 500-750°С.

Механические свойства сталей перлитного класса (12К, 15К, 18К, 22К, 12Х1МФ):  $\sigma_b=360\div490$ МПа,  $\sigma_{0,2}=220\div280$ МПа,  $\delta=24\div19\%$ . Чем больше в стали углерода, тем выше прочность и ниже пластичность. Стали мартенситного и мартенсито-ферритного классов (15Х11МФ, 40Х9С2, 40Х10С2М) применяют для деталей и узлов газовых турбин и паросиловых установок. Стали аустенитного класса (10Х18Н12Т, 08Х15Н24В4ТР, 09Х14Н18В2БР) предназначены для изготовления пароперегревателей и турбоприводов силовых установок высокого давления.

### **Инструментальные стали и сплавы**

*Стали для режущего инструмента.* Углеродистые инструментальные стали У8, У10, У11, У12, У13 вследствие малой устойчивости переохлажденного аустенита имеют небольшую прокаливаемость, и поэтому эти стали применяют для инструментов небольших размеров. Стали У10, У11, У12, У13 применяют для режущего инструмента (фрезы, зенкеры, сверла, шабера, напильники и т. д.). Стали можно использовать в качестве режущего инструмента только для резания с малой скоростью, так как их высокая твердость (У10-У12 - 62-63HRC) сильно снижается при нагреве выше 190-200°C. Легированные стали повышенной прокаливаемости, не обладающие теплостойкостью (11ХФ, 13Х, ХВСГ, 9ХС, Х, В2Ф) пригодны для резания материалов невысокой прочности ( $\sigma_b=500\div600$ МПа) с небольшой скоростью (до 5-8м/мин). Их используют для инструмента, не подвергаемого в работе нагреву свыше 200-250°C. Легированные стали по сравнению с углеродистыми обладают большей прокаливаемостью. Сталь Х - 0.95-1% С, 0.15-0.4% Мп, 0.15-0.35% Si, 1.3-1.65% Cr, 64-65HRC.

*Быстрорежущие стали* (Р6М5, Р12Ф3, Р8М3К6С, Р9, Р8М3, Р8М5) в отличие от других инструментальных сталей обладают высокой теплостойкостью и соответственно высокую твердость, прочность и износостойкость при повышенных температурах, возникающих в режущей кромке при резании с большой скоростью. Основным легирующими элементами этих сталей являются вольфрам, молибден, кобальт и ванадий. Сталь Р18 - 0.7-0.8% С, 3.8-4.4% Cr, 17.5-19% W, 1-1.4% V, 0.5-1% Mo.

*Стали для измерительного инструмента.* Они (12Х1, Х) обладают высокой твердостью, износостойкостью, сохраняют постоянство размеров и хорошо шлифуются. Их твердость составляет 63-64HRC. Измерительные скобы, шкалы, линейки и другие плоские и длинные инструменты изготавливают из листовых сталей 15, 15Х.

*Стали для штампов холодного деформирования.* Для обеспечения высокой штампуемости отношение  $\sigma_b/\sigma_{0,2}$  стали должно быть 0.5-0.65 при  $\psi$  не менее 40%. Штампуемость стали тем хуже, чем больше в ней углерода. Кремний, повышая предел текучести, снижает штампуемость, особенно способность стали к вытяжке. Поэтому для холодной штамповки более широко используют холоднокатаные кипящие стали 08кп, 08Фкп (0.02-0.04% V) и 08Ю (0.02-0.07% Al). Эти стали (Х12Ф1, Х12М, Х6ВФ, 6Х5В3МФС, 7ХГ2ВМ) должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и прочностью, сочетающейся с достаточной вязкостью, также должны быть теплостойкими. Во многих случаях для изготовления штампов для холодного деформирования используют быстрорежущие стали. Сталь 7ХГ2ВМ - 0.68-0.76% С, 1.5-1.8% Cr, 0.1-0.25% V, 59-60HRC.

*Стали для штампов горячего деформирования.* Эти стали (5ХНМ, 5ХНВ, 4Х3ВМФ, 4Х5В2ФС, 3Х2В8Ф, 4Х2В5МФ) должны иметь высокие механические свойства (прочность и

вязкость) при повышенных температурах и обладать износостойкостью, окалиностойкостью и разгаростойкостью и высокую теплопроводность. Механические свойства стали 5ХНМ при температуре 500°C:  $\sigma_b=900\text{МПа}$ ,  $\sigma_{0,2}=650\text{МПа}$ ,  $\delta=20-22\%$ ,  $\psi=70\%$ .

*Твердые сплавы* (ВК3, ВК6, ВК10, Т30К4, Т15К6, Т5К12, ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ20К9), изготовленные методом порошковой металлургии и состоящие из карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC), соединенных кобальтовой связкой. Сплав ВК8 применяют для чернового точения и других видов черновой обработки, а также для волочения, калибровки труб, прутков и проволоки. Сплавы ВК10, ВК15 предназначены для изготовления быстроизнашивающихся деталей. Титановольфрамовые сплавы применяют для чистового (Т30К4) и чернового (Т15К6, Т5К10) точения, фрезерования и строгания стали, твердость сплавов 92-87HRC.

### **Стали и сплавы с особыми физическими свойствами**

Магнитные стали и сплавы применяют для изготовления постоянных магнитов. Для постоянных магнитов применяют высокоуглеродистые стали с 1% С, легированные хромом (3%) ЕХ3, а также одновременно хромом и кобальтом, ЕХ5К5, ЕХ9К15М2. Легирующие элементы повышают коэрцитивную и магнитную энергию. В промышленности наиболее широко применяют сплавы типа алнико. Сплавы тверды, хрупки и не поддаются деформации, поэтому магниты из них изготавливают литьем, затем проводят шлифование. Магнито-мягкие стали (электротехническая сталь) (1212, 1311, 1511, 2011, 2013, 2211, 2312, 2412, 3415, 3416, 79НМ, 81НМА) применяют для изготовления магнитопроводов постоянного и переменного тока. Они предназначены для изготовления якорей и полюсов машин постоянного тока, роторов и статоров асинхронных двигателей и др.

### **7.5. Вопросы самопроверки**

1. Почему сера, фосфор, кислород и водород относятся к вредным примесям в стали?
2. Какие фазы образуют легирующие элементы в стали?
3. Какие стали относятся к ледебуритным?
4. В каких случаях для изготовления деталей вместо углеродистой стали следует использовать легированную сталь?
5. Какие требования предъявляются к цементируемым изделиям?
6. Как влияет степень легирования на механические свойства улучшаемой стали?
7. Приведите примеры марок стали для рессор и пружин, работающих в различных условиях.
8. Каковы требования, предъявляемые к нержавеющей сталям?
9. Каковы требования, предъявляемые к жаростойким сталям?
10. Каковы требования, предъявляемые к жаропрочным сталям?

### **7.6. Глоссарий по теме 7**

**АНТИФРИКЦИОННОСТЬ** - это способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряженной детали

<b>ЖАРОПРОЧНОСТЬ</b>	- Способность материала сохранять необходимую длительную прочность при высоких температурах.
<b>ПРОКАЛИВАЕМОСТЬ</b>	- Способность стали воспринимать закалку на определенную глубину.
<b>СТАЛЬ</b>	
<b>быстрорежущая С.</b>	- Высоколегированная инструментальная сталь, обладающая красностойкостью и содержащая до 18 % ванадия, до 6 % молибдена, до 9 % кобальта и др. элементы.
<b>высококачественная С.</b>	- Сталь с низким содержанием вредных примесей (обычно фосфора не более 0,025 % и серы не более 0,025%), обладающая повышенными механическими свойствами.
<b>высоколегированная С.</b>	- Легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов составляет более 10 %.
<b>инструментальная С.</b>	- Сталь, применяемая для обработки материалов резанием или давлением, а также для изготовления измерительного инструмента; обладает высокой твердостью, прочностью, износостойкостью.
<b>коррозионностойкая С.</b>	- Сталь мартенситного, ферритного, аустенитного и промежуточных структурных классов, содержащая 11 – 30 % хрома, в которой могут также присутствовать др. элементы; обладает антикоррозионными свойствами в различных агрессивных средах.
<b>среднелегированная С.</b>	- Легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов составляет от 2,5 до 10,0 %.
<b>ледебуритная С.</b>	- Высоколегированная сталь, в структуре которой после нормализации присутствует ледебурит.
<b>жаростойкая С.</b>	- Конструкционная высоколегированная сталь, обладающая жаростойкостью.
<b>низколегированная С.</b>	- Легированная сталь, в которой сумма легирующих элементов не превышает 2,5 %.
<b>пружинная С.</b>	- Машиностроительная сталь, содержащая 0,6 – 1,2 % углерода, до 3 % кремния, до 1 % хрома, до 1 % марганца, а также др. элементы; обладает высокими значениями релаксационной стойкости, пределов упругости и выносливости.

<b>подшипниковая С.</b>	- Легированная сталь, содержащая 0,7 – 1,2 % углерода, а также хром, марганец, кремний; обладает высоким сопротивлением контактным нагрузкам и высокой износостойкостью (например сталь марки ШХ15).
<b>особовысококачественная С.</b>	- Сталь с содержанием вредных примесей не более: фосфора 0,025 % и серы 0,015 % (в конце марки стали стоит буква “Ш”).
<b>СПЛАВ ТВЕРДЫЙ СПЕЧЕННЫЙ</b>	- Сплавы на основе карбидов тугоплавких металлов (вольфрама, титана, тантала) с пластичной металлической связкой (кобальт, никель, молибден), обладающие высокой твердостью и износостойкостью.
<b>двухкарбидный Т.С.</b>	- Сплавы на основе карбидов вольфрама и титана со связкой – кобальтом (например сплав Т15К6).. Применяют для изготовления режущего инструмента для обработки материалов со “сливной” стружкой (например стали).
<b>трехкарбидные Т. С.</b>	- Сплавы, содержащие карбиды вольфрама, титана, тантала со связкой – кобальтом. Применяют для тяжелых условий резания.
<b>однокарбидный Т. С.</b>	- Сплавы на основе карбидов вольфрама со связкой – кобальтом (например сплав марки ВК-8), применяют для изготовления режущего инструмента для обработки материалов с хрупкой стружкой (например – чугуна).
<b>ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ</b>	- Способность материалов сохранять служебные свойства при нагреве до рабочих температур.
<b>ХЛАДНОЛОМКОСТЬ</b>	- Охрупчивание материала при понижении температуры.
<b>ЭЛЕМЕНТ легирующий</b>	Специально вводимый в сплав элемент, обеспечивающий улучшение структуры, свойств и прокаливаемости.

### **7.7. Используемые информационные ресурсы**

1. Материаловедение[Текст]: учебник для вузов /Ю.М.Лахтин, В.П. Леонтьева –М.: Машиностроение, 2009. - 526 с.
2. Металловедение / А.И. Самохоцкий, М.Н. Кунявский, Т.М. Кунявская и др. – М.: Металлургия, 1990.
- 3.Справочник- экзаменатор по материаловедению [Текст]: учебное пособие / В.В. Тарасов, Г.Б. Кривошеева, А.П. Герасимов - Владивосток: ДВГМА, 2000. – 76 с.
- 4.База данных микроструктур металлов и сплавов <http://www.microstructure.ru>

## Тема 8. Цветные металлы и сплавы

**Аннотация.** Данная тема раскрывает основные группы цветных металлов на основе алюминия и меди, их свойства. Предусматривается изучение особенностей порошковой металлургии.

**Ключевые слова.** *Алюминий, дуралюмины, медь, латунь, бронза, силумины, магний, титан, прирабатываемость.*

### 8.1. Алюминий и его сплавы.

Цветные металлы являются более дорогими и дефицитными по сравнению с черными металлами, однако область их применения в технике непрерывно расширяется. Это сплавы на основе титана, алюминия, магния, меди. Переход промышленности на сплавы из легких металлов значительно расширяет сырьевую базу. Титан, алюминий, магний можно получать из бедных и сложных по составу руд, отходов производства.

**Алюминий** – легкий металл с плотностью  $2,7 \text{ г/см}^3$  и температурой плавления  $660^\circ\text{C}$ . Имеет гранцентрированную кубическую решетку. Обладает высокой тепло- и электропроводностью. Химически активен, но образующаяся плотная пленка оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , предохраняет его от коррозии. Механические свойства: предел прочности 150 Мпа, относительное удлинение 50 %, модуль упругости 7000 Мпа. Алюминий высокой чистоты маркируется *A99 (99,999 % Al), A8, A7, A6, A5, A0* (содержание алюминия от 99,85 % до 99 %). Технический алюминий хорошо сваривается, имеет высокую пластичность. Из него изготавливают строительные конструкции, малонагруженные детали машин, используют в качестве электротехнического материала для кабелей, проводов.

#### *Алюминиевые сплавы.*

*Принцип маркировки алюминиевых сплавов.* В начале указывается тип сплава: Д – сплавы типа дуралюминов; А – технический алюминий; АК – ковкие алюминиевые сплавы; В – высокопрочные сплавы; АЛ – литейные сплавы. Далее указывается условный номер сплава. За условным номером следует обозначение, характеризующее состояние сплава: М – мягкий (отожженный); Т – термически обработанный (закалка плюс старение); Н – нагартованный; П – полунагартованный

По технологическим свойствам сплавы подразделяются на три группы:

- деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой;
- деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой;
- литейные сплавы.

### 8.2. Деформируемые и литейные алюминиевые сплавы.

Прочность алюминия можно повысить легированием. В сплавы, не упрочняемые термической обработкой, вводят марганец или магний. Атомы этих элементов существенно повышают его прочность, снижая пластичность. Обозначаются сплавы: с марганцем – Амц, с магнием – Амг; после обозначения элемента указывается его содержание (Амг3). Магний действует только как упрочнитель, марганец упрочняет и повышает коррозионную стойкость. Прочность сплавов повышается только в результате деформации в холодном

состоянии. Чем больше степень деформации, тем значительно растет прочность и снижается пластичность. В зависимости от степени упрочнения различают сплавы нагартованные и полунангартованные (АмгЗП). Эти сплавы применяют для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, мало- и средненагруженных конструкций.

*Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой.* К таким сплавам относятся дуралюмины (сложные сплавы систем алюминий – медь – магний или алюминий – медь – магний – цинк). Они имеют пониженную коррозионную стойкость, для повышения которой вводится марганец. Дуралюмины обычно подвергаются закалке с температуры 500°С и естественному старению, которому предшествует двух-, трехчасовой инкубационный период. Максимальная прочность достигается через 4...5 суток. Широкое применение дуралюмины находят в авиастроении, автомобилестроении, строительстве. Ковочные алюминиевые сплавы АК (АК8) применяются для изготовления поковок. Поковки изготавливаются при температуре 380...450°С, подвергаются закалке от температуры 500...560°С и старению при 150...165°С в течение 6...15 часов.

В состав алюминиевых сплавов дополнительно вводят никель, железо, титан, которые повышают температуру рекристаллизации и жаропрочность до 300°С. Изготавливают поршни, лопатки и диски осевых компрессоров, турбореактивных двигателей.

#### ***Литейные алюминиевые сплавы.***

К литейным сплавам относятся сплавы системы алюминий – кремний (силумины), содержащие 10...13 % кремния. Присадка к силуминам магния, меди содействует эффекту упрочнения литейных сплавов при старении. Титан и цирконий измельчают зерно. Марганец повышает антикоррозионные свойства. Никель и железо повышают жаропрочность. Литейные сплавы маркируются от АЛ2 до АЛ20. Силумины широко применяют для изготовления литых деталей приборов и других средне- и малонагруженных деталей, в том числе тонкостенных отливок сложной формы.

#### ***8.3. Медь и ее свойства.***

Медь имеет гранцентрированную кубическую решетку. Плотность меди 8,94 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1083°С. Характерным свойством меди является ее высокая электропроводность, поэтому она находит широкое применение в электротехнике. Технически чистая медь маркируется: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М2, М3 и М4 (99 % Cu). Механические свойства меди относительно низкие: предел прочности составляет 150...200 Мпа, относительное удлинение – 15...25 %. Поэтому в качестве конструкционного материала медь применяется редко. Повышение механических свойств достигается созданием различных сплавов на основе меди. Различают две группы медных сплавов: *латуни* – сплавы меди с цинком, *бронзы* – сплавы меди с другими (кроме цинка) элементами.

#### ***8.4. Латуни, их свойства, маркировка и применение.***

Латуни могут иметь в своем составе до 45 % цинка. Повышение содержания цинка до 45 % приводит к увеличению предела прочности до 450 Мпа. Максимальная пластичность имеет место при содержании цинка около 37 %. При сплавлении меди с цинком образуется ряд твердых растворов  $\alpha, \beta, \gamma, \epsilon$ .

По способу изготовления изделий различают латуни деформируемые и литейные. Деформируемые латуни маркируются буквой Л, за которой следует число, показывающее содержание меди в процентах, например в латуни Л62 содержится 62 % меди и 38 % цинка. Если кроме меди и цинка, имеются другие элементы, то ставятся их начальные буквы ( О – олово, С – свинец, Ж – железо, Ф – фосфор, Мц – марганец, А – алюминий, Ц – цинк). Количество этих элементов обозначается соответствующими цифрами после числа, показывающего содержание меди, например, сплав ЛАЖ60-1-1 содержит 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и 38 % цинка. Однофазные  $\alpha$ - латуни используются для изготовления деталей деформированием в холодном состоянии. Изготавливают ленты, гильзы патронов, радиаторные трубки, проволоку.

Из двухфазных латуней изготавливают листы, прутки и другие заготовки, из которых последующей механической обработкой изготавливают детали. Обрабатываемость резанием улучшается присадкой в состав латуни свинца, например, латунь марки ЛС59-1, которую называют “автоматной латунью”. Латуни имеют хорошую коррозионную стойкость, которую можно повысить дополнительно присадкой олова. Добавка никеля и железа повышает механическую прочность до 550 Мпа. Литейные латуни также маркируются буквой Л, После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 содержит 23 % цинка, 6 % алюминия, 3 % железа, 2 % марганца. Наилучшей жидкотекучестью обладает латунь марки ЛЦ16К4. К литейным латуням относятся латуни типа ЛС, ЛК, ЛА, ЛАЖ, ЛАЖМц. Литейные латуни не склонны к ликвации, имеют сосредоточенную усадку, отливки получаются с высокой плотностью. Латуни являются хорошим материалом для конструкций, работающих при отрицательных температурах.

### **8.5. Состав и свойства бронз.**

Сплавы меди с другими элементами кроме цинка называются *бронзами*. Бронзы подразделяются на деформируемые и литейные. При маркировке деформируемых бронз на первом месте ставятся буквы Бр, затем буквы, указывающие, какие элементы, кроме меди, входят в состав сплава. После букв идут цифры, показывающие содержание компонентов в сплаве. Например, марка БрОФ10-1 означает, что в бронзу входит 10 % олова, 1 % фосфора, остальное – медь. Маркировка литейных бронз также начинается с букв Бр, затем указываются буквенные обозначения легирующих элементов и ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, бронза БрО3Ц12С5 содержит 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца, остальное – медь. При сплавлении меди с оловом образуются твердые растворы. Эти сплавы очень склонны к ликвации из-за большого температурного интервала кристаллизации. Благодаря ликвации сплавы с содержанием олова выше 5 % имеют в структуре эвтектоидную составляющую  $\mathcal{E}(\alpha + \delta)$ , состоящую из мягкой и твердой фаз. Такое строение является благоприятным для деталей типа подшипников скольжения: мягкая фаза обеспечивает хорошую прирабатываемость, твердые частицы создают износостойкость. Поэтому оловянные бронзы являются хорошими антифрикционными материалами.

Оловянные бронзы подразделяются на деформируемые и литейные. В *деформируемых бронзах* содержание олова не должно превышать 6 %, для обеспечения необходимой

пластичности, БрОФ6,5-0,15. В зависимости от состава деформируемые бронзы отличаются высокими механическими, антикоррозионными, антифрикционными и упругими свойствами, и используются в различных отраслях промышленности. Из этих сплавов изготавливают прутки, трубы, ленту, проволоку. *Литейные оловянные бронзы*, БрОЗЦ7С5Н1, БрО4Ц4С17, применяются для изготовления пароводяной арматуры и для отливок антифрикционных деталей типа втулок, венцов червячных колес, вкладышей подшипников.

*Алюминиевые бронзы*, БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л, БрАЖН10-4-4. Бронзы с содержанием алюминия до 9,4 % имеют однофазное строение  $\alpha$  – твердого раствора. При содержании алюминия 9,4...15,6 % сплавы системы медь – алюминий двухфазные и состоят из  $\alpha$  – и  $\gamma$  – фаз. Оптимальными свойствами обладают алюминиевые бронзы, содержащие 5...8 % алюминия. Увеличение содержания алюминия до 10...11 % вследствие появления  $\lambda$  – фазы ведет к резкому повышению прочности и сильному снижению пластичности. Дополнительное повышение прочности для сплавов с содержанием алюминия 8...9,5 % можно достичь закалкой. Положительные особенности алюминиевых бронз по сравнению с оловянными: меньшая склонность к внутрикристаллической ликвации; большая плотность отливок; более высокая прочность и жаропрочность; меньшая склонность к хладоломкости. Основные недостатки алюминиевых бронз: значительная усадка; склонность к образованию столбчатых кристаллов при кристаллизации и росту зерна при нагреве, что охрупчивает сплав; сильное газопоглощение жидкого расплава; самоотпуск при медленном охлаждении; недостаточная коррозионная стойкость в перегретом паре.

#### **8.6. Магний и его сплавы.**

*Магний* — самый легкий металл, используемый в промышленности (плотность — 1,74 г/см<sup>3</sup>). Имеет гексагональную плотноупакованную решетку и полиморфных превращений не претерпевает. Температура плавления магния — 651°С. Недостатками магния являются низкая прочность и пластичность, низкая коррозионная стойкость, способность к возгоранию при нагреве. Поэтому чистый магний в качестве конструкционного материала не используется. Свойства магния значительно улучшаются при сплавлении его с другими элементами, основные из которых — алюминий, марганец и цинк.

Магниевые сплавы делятся на *литейные* и *деформируемые*. Литейные сплавы маркируются буквами МЛ, а деформируемые — МА. За буквами следует условный номер сплава. Магниевые сплавы, как и алюминиевые способны к упрочняющей термообработке (закалке и старению), но эффект повышения прочности при этом невысок. Основное преимущество сплавов магния — легкость. Поэтому они применяются в авиа- и ракетостроении. Сплавы магния хорошо свариваются и обрабатываются резанием, но имеют невысокую коррозионную стойкость.

*Титан и его сплавы*. Титан — легкий (плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>) и пластичный металл серебристо-белого цвета. Температура плавления титана — 1665 °С. Он обладает низкой электропроводностью и теплопроводностью. Механические свойства титана:  $\sigma_v \approx 300$  МПа,  $\delta = 60...70$  %. Главное достоинство титана и его сплавов — высокая коррозионная стойкость. Она достигается за счет образования на его поверхности плотной оксидной пленки. Недостатки титана — склонность к взаимодействию с газами при температурах выше 500...600°С, плохая обрабатываемость резанием, высокая стоимость. Главная цель легирования титана — повышение механических свойств. Основными легирующими

элементами являются алюминий, хром, молибден, ванадий, марганец. По технологическому признаку сплавы титана делятся на литейные и деформируемые. Маркируются титановые сплавы чаще всего буквами ВТ. Среди сплавов титана имеются обладающие высокой прочностью (ВТ6, ВТ14 с  $\sigma_{\text{в}} = 1000 \dots 1200$  МПа), жаропрочностью до 500°C (ВТ3-1, ВТ8). Литейные сплавы титана (ВТ5Л, ВТ6Л) обладают хорошими литейными свойствами. Используются титановые сплавы в химической промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости, в ракетной и авиационной технике благодаря легкости и высокой удельной прочности.

Другие цветные металлы нашли меньшее применение в технике. Тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден, хром, тантал, ниобий и никель), а также их сплавы используются как жаропрочные. Сплавы легкоплавких металлов (олова, цинка, свинца) используются в подшипниках скольжения (эти сплавы называются баббиты) и в качестве припоев для пайки металлов. Кроме того, значительная часть цинка расходуется на нанесение покрытий на металлические изделия, олова — на лужение консервной жести, свинца — на изготовление оболочек электрических кабелей, производство свинцовых аккумуляторов, емкостей для хранения радиоактивных материалов.

### 8.7. Вопросы самопроверки

1. Свойства и применение алюминия.
2. Как классифицируются алюминиевые сплавы?
3. Какие сплавы упрочняются путем термической обработки? Укажите их марки, состав, режим термической обработки, свойства.
4. В чем сущность процесса старения?
5. Какие сплавы упрочняются нагартовкой?
6. Какие вы знаете литейные алюминиевые сплавы? Приведите их марки, состав, обработку, свойства.
7. Как и для чего производится модифицирование силумина?
8. Какие вы знаете жаропрочные алюминиевые сплавы? Укажите предельные рабочие температуры их использования.
9. Каковы свойства магния?
10. Как классифицируются магниевые сплавы?

### 8.8. Глоссарий по теме 8

#### **АНТИФРИКЦИОННЫЕ СПЛАВЫ**

- Сплавы с низким коэффициентом трения и высоким уровнем износостойкости.

#### **БАББИТЫ**

- Антифрикционный сплав на основе олова или свинца; дополнительно может быть легирован Pb, Sn, Sb, Cu, Cd, Co, Na; высокие антифрикционные свойства обеспечиваются гетерогенной структурой сплава.

<b>БРОНЗА</b>	- Сплав меди (обычно многокомпонентный) с др. элементами (кроме цинка).
<b>ЛАТУНЬ</b>	- Сплав на основе меди, содержащий до 50 % цинка; может быть дополнительно легирован алюминием, никелем и др. элементами; используется в литом и деформированном состояниях.
<b>морская Л.</b>	- Латунь, легированная оловом, имеет хорошую коррозионную стойкость в морской воде.
<b>литейная Л.</b>	- Латунь, отличающаяся малой усадкой и высокой жидкотекучестью.
<b>однородная двухкомпонентная Л.</b>	- Латунь, содержащая до 39 процентов цинка.
<b>Сплавы на основе АЛЮМИНИЯ</b>	- Различают литейные и деформируемые алюминиевые сплавы. Деформируемые сплавы алюминия подразделяют на термически неупрочняемые и термически упрочняемые.
<b>деформируемые Al сплавы, упрочняемые термической обработкой</b>	- К ним относятся высокопрочные Al сплавы и дуралюмины. Упрочняющая термическая обработка заключается в закалке и последующем старении.
<b>литейный Al сплав</b>	- К ним относятся силумины. Силумины подвергают модифицированию для измельчения эвтектики.

### 8.9. Использованные информационные ресурсы

1. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2008. – 877 с.
2. Справочник - экзаменатор по материаловедению [Текст]: учебное пособие / В.В. Тарасов, Г.Б. Кривошеева, А.П. Герасимов - Владивосток: ДВГМА, 2000. – 76 с.
3. Солнцев Ю.П. Материаловедение. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784с.
4. База данных микроструктур металлов и сплавов <http://www.microstructure.ru>

## Тема 9. Неметаллические материалы.

**Аннотация.** Данная тема раскрывает классификацию неметаллических материалов и их использование в технике. Предусматривается изучение особенностей неметаллических материалов.

**Ключевые слова.** *Полимеры, пластики, эластичность, долговечность, композиционные материалы, керамика, резины.*

### 9.1. Пластические массы

К неметаллическим материалам относятся полимерные материалы органические и неорганические: различные виды пластических масс, композиционные материалы на неметаллической основе, каучуки и резины, клеи, герметики, лакокрасочные покрытия, а также графит, стекло, керамика. Они находят все большее применение в различных отраслях машиностроения.

*Пластмассами* называют искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ. Обязательным компонентом пластмассы является связующее вещество. В качестве связующих для большинства пластмасс используют синтетические смолы, реже применяют эфиры целлюлозы. Другим важным компонентом пластмасс является *наполнители* (порошкообразные, волокнистые и другие вещества), повышающие механические свойства, снижающие усадку при прессовании; *пластификаторы* для повышения пластичности, что необходимо при изготовлении изделий из пластмасс; *отвердители*, ускоряющие переход пластмасс в неплавкое, твердое и нерастворимое состояние; *стабилизаторы*, предотвращающие или замедляющие процесс старения; *красители*.

*По поведению при нагреве* все пластмассы делятся на термопластичные и терморезистивные. *Термопластичные пластмассы* при неоднократном нагревании и охлаждении каждый раз размягчаются и затвердевают. *Терморезистивные пластмассы* при нагревании размягчаются, затем еще до охлаждения затвердевают (вследствие протекания химических реакций) и при повторном нагревании остаются твердыми.

*По виду наполнителя* пластмассы делятся на порошковые, волокнистые, слоистые, газонаполненные и пластмассы без наполнителя.

*По способу переработки* в изделия пластмассы подразделяются на литевые и прессовочные. Литевые перерабатываются в изделия методами литейного прессования и являются термопластичными. Прессовочные перерабатываются в изделия методами горячего прессования и являются терморезистивными.

*По назначению* пластмассы делятся на конструкционные, химически стойкие, прокладочные и уплотнительные, фрикционные и антифрикционные, теплоизоляционные и теплозащитные, электроизоляционные, оптически прозрачные, облицовочно-декоративные и отделочные.

*Слоистые пластмассы* получают прессованием (или намоткой) слоистых наполнителей, пропитанных смолой. Они обычно выпускаются в виде листов, плит, труб, из которых механической обработкой получают различные детали. *Текстолит* — это материал, полученный прессованием пакета кусков хлопчатобумажной ткани, пропитанной

смолой. Обладает хорошей способностью поглощать вибрационные нагрузки, электроизоляционными свойствами, теплостоек до 80°C. *Стеклотекстолит* отличается от текстолита тем, что в качестве наполнителя используется стеклоткань. Более прочен и теплостоек, чем текстолит, имеет лучшие электроизоляционные свойства. В *асботекстолите* наполнителем является асбестовая ткань. Кроме электроизоляционных, он имеет хорошие теплоизоляционные и фрикционные свойства. *Гетинакс* представляет собой материал, полученный прессованием нескольких слоев бумаги, пропитанной смолой. Он обладает электроизоляционными свойствами, устойчив к действию химикатов, может применяться при температуре до 120-140°C.

*Волокнистые пластмассы* представляют собой композиции из волокнистого наполнителя, пропитанного смолой. Они делятся на волокниты, асбоволокниты и стекловолокниты. В *волокнитах* в качестве наполнителя применяется хлопковое волокно. Они используются для относительно крупных деталей общетехнического назначения с повышенной стойкостью к ударным нагрузкам. *Асбоволокниты* имеют наполнителем асбест — волокнистый минерал, расщепляющийся на тонкое волокно диаметром 0,5 мкм. Обладают теплостойкостью до 200 °С, устойчивостью к ударным воздействиям, химической стойкостью, электроизоляционными и фрикционными свойствами. *Стекловолокниты* имеют в качестве наполнителя короткое стекловолокно или стеклонити. Прочность, электроизоляционные свойства и водостойкость стекловолокнитов выше, чем у волокиитов. Применяются для изготовления деталей, обладающих повышенной прочностью.

*Порошковые пластмассы* в качестве наполнителя используют органические порошки (древесная мука, порошкообразная целлюлоза) и минеральные порошки (молотый кварц, тальк, цемент, графит). Эти пластмассы обладают невысокой прочностью, низкой ударной вязкостью, электроизоляционными свойствами. Пластмассы с органическими наполнителями применяются для ненагруженных деталей общетехнического назначения — корпусов приборов, рукояток, кнопок. Минеральные наполнители придают порошковым пластмассам химическую стойкость, водостойкость, повышенные электроизоляционные свойства. Рассмотренные выше пластмассы со слоистыми, волокнистыми и порошковыми наполнителями имеют чаще всего терморезистивные связующие, хотя имеются пластмассы с термопластичными связующими.

Пластмассы без наполнителя чаще всего являются *термопластичными материалами*.

*Полиэтилен*  $(-CH_2-CH_2-)_n$  — продукт полимеризации бесцветного газа — этилена. Один из самых легких материалов (плотность 0,92 г/см<sup>3</sup>), имеет высокую эластичность, химически стоек, морозостоек. Недостатки — склонность к старению и невысокая теплостойкость (до 60 °С). Используется для изготовления пленки, изоляции проводов, изготовления коррозионно-стойких труб, уплотнительных деталей. Занимает первое место в общем объеме производства пластмасс. *Полипропилен*  $(-CH_2-CHC_6H_5-)_n$  — продукт полимеризации газа пропилена. По свойствам и применению аналогичен полиэтилену, но более теплостоек (до 150 °С) и менее морозостоек (до 10 °С). *Поливинилхлорид*  $(-CH_2-CHCl-)_n$  используется для производства винипласта и пластика. *Винипласт* представляет собой твердый листовый материал, полученный из поливинилхлорида без добавки пластификаторов. Обладает высокой прочностью, химической стойкостью, электроизоляционными свойствами. Пластикат получают при добавлении в поливинилхлорид пластификаторов, повышающих его пластичность и морозостойкость. *Органическое стекло* — прозрачный термопластичный материал на основе полиакриловой

смолы. Отличается высокой оптической прозрачностью, в 2 раза легче минеральных стекол, обладает химической стойкостью. Недостатки — низкая твердость и низкая теплостойкость. Используется для остекления в автомобиле- и самолетостроении, для прозрачных деталей в приборостроении. *Фторопласты* имеют наибольшую термическую и химическую стойкость из всех термопластичных полимеров. Фторопласт-4  $(-\text{CF}_2-\text{CF}_2)_n$  водостоек, не горит, не растворяется в обычных растворителях, обладает электроизоляционными и антифрикционными свойствами. Применяется для изготовления изделий, работающих в агрессивных средах при высокой температуре, электроизоляции и др. Фторопласт-3  $(-\text{CF}_2-\text{CFC}_1-)_n$  по свойствам и применению аналогичен фторопласту-4, уступая ему по термохимической стойкости и превосходя по прочности и твердости.

*Газонаполненные пластмассы* представляют собой материалы на основе синтетических смол, содержащие газовые включения. В пенопластах поры, заполненные газом, не соединяются друг с другом и образуют замкнутые объемы. Они отличаются малой плотностью (0,02...0,2 г/см<sup>3</sup>), высокими тепло-, звуко- и электроизоляционными свойствами, водостойкостью. Недостатки пенопластов — низкая прочность и низкая теплостойкость (до 60°C). Используются для теплоизоляции и звукоизоляции, изготовления непотопляемых плавающих средств, в качестве легкого заполнителя различных конструкций. *Поропласты* — это газонаполненные пластмассы, поры которых сообщаются между собой. Их плотность составляет 0,02...0,5 г/см<sup>3</sup>. Они представляют собой мягкие эластичные материалы, обладающие водопоглощением.

## 9.2. Резиновые материалы

Резиной называется продукт специальной обработки (вулканизации) каучука и серы с различными добавками. Резина отличается от других материалов высокими эластическими свойствами, которые присущи каучуку - главному исходному материалу резины. Резину получают из каучука путем вулканизации, т. е. в процессе химического взаимодействия каучука с вулканизатором при высокой температуре, вулканизатором чаще всего является сера. В процессе вулканизации сера соединяет нитевидные молекулы каучука и образуется пространственная сетчатая структура. В зависимости от количества серы получается различная частота сетки. При введении 1...5 % серы образуется редкая сетка и резина получается мягкой. С увеличением содержания серы сетка становится все более частой, а резина более твердой. Приблизительно при 30 % серы получается твердый материал, называемый эбонитом.

Кроме *каучука* и *вулканизатора* в состав резины входит ряд других веществ. *Наполнители* вводят в состав резины от 15 до 50 % к массе каучука. Активные наполнители (сажа, оксид цинка и др.) служат для повышения механических свойств резин. Неактивные наполнители (мел, тальк и др.) снижают стоимость резиновых изделий. *Пластификаторы* (парафин, вазелин, стеариновая кислота, мазут, канифоль и др.) предназначены для облегчения переработки резиновой смеси, повышения эластичности и морозостойкости резины. *Противостарители* служат для замедления процесса старения резины, приводящего к ухудшению ее эксплуатационных свойств. *Красители* служат для придания резине нужного цвета. В резину также добавляются *регенераты* — продукты переработки старых резиновых изделий и отходы резинового производства. Они снижают стоимость резин.

Основное свойство резины — очень высокая эластичность. Резина способна к большим деформациям, которые почти полностью обратимы. Кроме того, резина характеризуется высоким сопротивлением разрыву и истиранию, газо- и водонепроницаемостью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, небольшой плотностью, малой сжимаемостью, низкой теплопроводностью. Для резиновых материалов характерна высокая стойкость к истиранию, газо- и водонепроницаемость, химическая стойкость, электроизолирующие свойства и небольшая плотность.

По назначению резины подразделяются на резины *общего* и *специального* назначения. Из резин *общего назначения* изготавливаются автомобильные шины, транспортные ленты, ремни ременных передач, изоляция кабелей, рукава и шланги, уплотнительные и амортизационные детали, обувь и др. Резины общего назначения могут использоваться в горячей воде, слабых растворах щелочей и кислот, а также на воздухе при температуре от  $-10$  до  $+150$  °С. *Резины специального назначения* подразделяются на теплостойкие, которые могут работать при температуре до  $250...350$  °С; морозостойкие, выдерживающие температуру до  $-70$  °С; маслобензостойкие, работающие в среде бензина, других топлив, масел и нефтепродуктов; светоозоностойкие, не разрушающиеся при работе в атмосферных условиях в течении нескольких лет, стойкие к действию сильных окислителей; электроизоляционные, применяемые для изоляции проводов и кабелей; электропроводящие, способные проводить электрический ток.

### 9.3. Неорганические материалы

*Стеклом* называется твердый аморфный термопластичный материал, получаемый переохлаждением расплава различных оксидов. В состав стекла входят стеклообразующие кислотные оксиды ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  и др.), а также основные оксиды ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и др.), придающие ему специальные свойства и окраску. Оксид кремния  $\text{SiO}_2$  является основой практически всех стекол и входит в их состав в количестве  $50 \dots 100$  %. По назначению стекла подразделяются на строительные (оконные, витринные и др.), бытовые (стеклотара, посуда, зеркала и др.) и технические (оптические, свето- и электротехнические, химико-лабораторные, приборные и др.). Важными свойствами стекла являются оптические. Обычное стекло пропускает около  $90$  %, отражает —  $8$  % и поглощает —  $1$  % видимого света. Механические свойства стекла характеризуются высоким сопротивлением сжатию и низким — растяжению. Термостойкость стекла определяется разностью температур которую оно может выдержать без разрушения при резком охлаждении в воде. Основным недостатком стекла — высокая хрупкость.

*Керамика* — это неорганический минеральный материал, получаемый из отформованного минерального сырья путем спекания при высоких температурах ( $1200...2500$  °С). Структура керамики состоит из кристаллической, стекловидной (аморфной) и газовой фазы. *Кристаллическая фаза* является основой керамики, ее количество составляет до  $100$  %. Она представляет собой различные химические соединения и твердые растворы. *Стекловидная фаза* находится в керамике в виде прослоек стекла. Ее количество составляет до  $40$  %. Она снижает качество керамики. *Газовая фаза* представляет собой газы, находящиеся в порах керамики. По назначению керамика может быть разделена на строительную, бытовую и художественно-декоративную, техническую. *Техническая керамика* имеет почти однофазную кристаллическую структуру и изготавливается из чистых оксидов (реже карбидов, боридов или нитридов). Техническая керамика используется в качестве огнеупорного, конструкционного и инструментального материала. Она обладает

высокой прочностью при сжатии и низкой при растяжении. Главный недостаток керамики, как и стекла — высокая хрупкость.

*Ситаллы* представляют собой материалы, полученные путем кристаллизации стекол. Ситаллы изготавливают путем плавления стекольного материала с добавкой катализаторов кристаллизации. Далее расплав охлаждается до пластического состояния и из него формируются изделия. Кристаллизация обычно происходит при повторном нагревании изделий. По структуре ситаллы занимают промежуточное место между стеклом и керамикой. Их структура состоит из зерен кристаллической фазы, скрепленных стекловидной прослойкой. Содержание кристаллической фазы составляет 30...95 %. Ситаллы имеют высокую твердость, высокую прочность при сжатии и низкую при растяжении, обладают жаропрочностью до 900...1200 °С, жаростойкостью, износостойкостью. Они характеризуются высокой химической стойкостью и хорошими электроизоляционными свойствами. Ситаллы отличаются хрупкостью, однако меньшей, чем стекло. Применяются ситаллы для деталей, работающих при высоких температурах и в агрессивных средах, деталей радиоэлектроники, инструментов.

#### **9. 4. Композиционные материалы**

*Композиционными* называют сложные материалы в состав которых входят отличающиеся по свойствам нерастворимые друг в друге компоненты. Основой композиционных материалов является сравнительно пластичный материал, называемый матрицей. В матрице равномерно распределены более твердые и прочные вещества, называемые упрочнителями или наполнителями. *Матрица* может быть металлической, полимерной, углеродной, керамической. По типу *упрочнителя* композиционные материалы делятся на *дисперсноупрочнённые*, в которых упрочнителем служат дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов и др., *волоконистые*, в которых упрочнителем являются волокна различной формы и слоистые, состоящие из чередующихся слоев волокон и листов матричного материала. Среди дисперсноупрочненных материалов ведущее место занимает САП (спеченная алюминиевая пудра), представляющий собой алюминий, упрочненный дисперсными частицами оксида алюминия. Получают САП из окисленной с поверхности алюминиевой пудры путем последовательного брикетирования, спекания и прессования. Структура САП состоит из алюминиевой основы с равномерно распределенными частицами  $Al_2O_3$ . С увеличением содержания  $Al_2O_3$  повышается прочность, твердость, жаропрочность САП, но снижается его пластичность. Марки САП-1, САП-2, САП-3, САП-4 содержат, соответственно, 6...8, 9...12, 13...17, 18...22 %  $Al_2O_3$ . Высокая прочность САП объясняется большой дисперсностью упрочнителя и малым расстоянием между его частицами. По жаропрочности САП превосходит все алюминиевые сплавы.

В *волоконистых композиционных материалах* упрочнителем служат углеродные, борные, синтетические, стеклянные и др. волокна, нитевидные кристаллы тугоплавких соединений (карбиды кремния, оксиды алюминия и др.) или металлическая проволока (стальная, вольфрамовая и др.). Свойства материала зависят от состава компонентов, количественного соотношения и прочности связи между ними. Для металлических композиционных материалов прочная связь между волокном и матрицей достигается благодаря их взаимодействию. Связь между компонентами в композиционных материалах на неметаллической основе осуществляется с помощью адгезии. Материалы, содержащие в

качестве упрочнителя углеродные волокна, называются *карбоволокнитами*. Они обладают низкими теплопроводностью и электропроводностью, хорошей износостойкостью. *Карбоволокниты* представляют собой композиции, состоящие из полимерного связующего (матрицы) и упрочнителей в виде углеродных волокон (карбоволокон). Они сохраняют прочность при очень высоких температурах, а также при низких температурах. Карбоволокниты отличаются высоким статическим и динамическим сопротивлением усталости, водо- и химически стойкие. Недостаток карбоволокнитов — низкая прочность при сжатии и сдвиге. Материалы с упрочнителем в виде волокон бора называют *бороволокнитами*. Они представляют собой композиции полимерного связующего и упрочнителя - борных волокон. Отличаются высокой прочностью при сжатии, сдвиге и срезе, низкой ползучестью, теплопроводностью и электропроводимостью. Материалы, содержащие в качестве упрочнителя синтетические волокна (капрон, лавсан и др.), называются *органоволокнитами*. Они обладают высокой удельной прочностью в сочетании с хорошей пластичностью и ударной вязкостью, электроизоляционными свойствами.

### 9.5. Экономические проблемы использования материалов

Правильный выбор материала для конкретного изделия является исключительно важной задачей. При этом технические критерии выбора материала определяются условиями эксплуатации изделия. Они определяют комплекс механических свойств (прочность, упругость, твердость, пластичность, вязкость), а в ряде случаев и требования к специальным свойствам (коррозионная стойкость, жаростойкость, жаропрочность, износостойкость, радиационная стойкость и др.). Способ изготовления изделий определяет требования к технологическим свойствам материала (ковкость, литейные свойства, обрабатываемость резанием, свариваемость). Если изделие должно подвергаться термической обработке, следует также учитывать прокаливаемость и закаливаемость. Приведенные требования накладывают определенные ограничения на выбор материала. Если они оказываются достаточно жесткими, то возможный выбор ограничивается весьма узкой группой материалов. При меньшей жесткости требований выбор становится более широким. В любом случае, когда возможны различные варианты решения задачи выбора материала, окончательный ответ должен дать экономический анализ вопроса. Исходными данными для этого служат цены материалов. Однако выбор наиболее дешевого материала далеко не всегда будет оптимальным.



Экономия также может быть получена за счет следующих факторов.

1. Использование более прочного материала. Это дает возможность уменьшить размеры изделия, т. е. позволяет снизить расход материала на единицу готовой продукции. Уменьшение размеров также способствует снижению затрат на транспортирование изделий. Кроме того, появляется возможность повысить мощность и производительность оборудования, изготовленного из более прочных материалов.

2. Применение более технологичного материала, позволяющего применять более экономичные методы изготовления и обработки изделий. При этом экономия может быть получена как непосредственно за счет снижения себестоимости изготовления, так и за счет снижения расхода материала благодаря уменьшению отходов и брака.

3. Применение материала с более длительным сроком службы, что приводит к повышению долговечности готового изделия.

4. Использование материалов, способных работать в более тяжелых условиях (при более высоких нагрузках, более высоких температурах, в более агрессивной среде). Применение таких материалов при изготовлении различных машин и оборудования позволяет изменить рабочие параметры машин (например, повысить давление или температуру), что приводит к повышению производительности и, соответственно, снижению себестоимости единицы работы или продукции.

Правильный выбор материала должен учитывать как экономический эффект от повышения качества, так и увеличение стоимости материала. Для этого производится сравнительный расчет экономической эффективности применения различных материалов, по результатам которого и делается окончательный выбор. Так для строительных конструкций могут быть применены как углеродистые, так и низколегированные стали. Низколегированные стали обеспечивают повышение предела текучести приблизительно в 1,5 раза по сравнению с углеродистыми. Благодаря этому масса конструкций снижается на 20...50 %. При этом себестоимость проката из низколегированных сталей на 10...15 % выше, чем из углеродистых. Отсюда видно, что себестоимость низколегированных сталей возрастает в меньшей степени, чем достигается экономия из-за увеличения прочности. Но не только этим обусловлена эффективность применения низколегированных сталей. В отличие от углеродистых сталей, они не склонны к хрупким разрушениям при температуре ниже - 40 °С. Это обеспечивает высокую надежность и долговечность конструкций. Таким образом, применение низколегированных строительных сталей экономически выгодно.

Целесообразность применения пластмасс диктуется техническими соображениями. Свойства пластмасс с одной стороны делают их незаменимыми, а с другой часто не позволяют им конкурировать с металлическими материалами. Если же применение пластмасс по техническим соображениям, возможно, оно обычно является экономически эффективным. Благодаря малой плотности пластмассы в 4 раза снижается материалоемкость изделий. Затраты на производство пластмассовых изделий значительно меньше, чем на производство металлических. Это происходит вследствие хорошей технологичности пластмасс: производство пластмассовых изделий происходит путем прессования, литья или выдавливания, а металлические изделия производятся литьем или обработкой давлением, путем механической и термической обработки с большим числом операций. Часто применение пластмасс в машинах и оборудовании приводит к уменьшению затрат на смазку, ремонт, повышению надежности, увеличению срока службы и т. д. Благодаря всему этому себестоимость пластмассовых изделий в 2...3 раза ниже себестоимости аналогичных металлических.

Доля стоимости материалов составляет от 40...70% всех затрат на изготовление готовых изделий. А для изделий, производство которых широко механизировано и автоматизировано (шарикоподшипники, болты, электрокабели), эта доля доходит до 80 %. Поэтому экономия материалов — один из важнейших резервов снижения себестоимости готовой продукции. Еще более важен тот факт, что запасы сырья для производства материалов (различные руды для металлов и сплавов, нефть и газ для полимерных материалов и др.) являются ограниченными. Отсюда ясно, что экономия и повышение эффективности использования материалов являются насущной задачей.

Огромное количество материалов теряется в процессе производства готовых изделий. Потери материала при производстве изделий характеризует коэффициент использования материала, представляющий собой отношение массы готового изделия к массе заготовки. Очень высок коэффициент использования при изготовлении изделий из металлических порошков. Благодаря хорошей технологичности пластмасс для них коэффициент использования материала выше, чем для металлов и сплавов: при прессовании он равен 0,9; при литье и выдавливании — 0,95. Из приведенных данных ясно, что основной путь экономии материала в процессе производства изделий — использование современных малоотходных и безотходных технологий: непрерывной разливки стали, малоотходных методов штамповки, специальных способов литья, методов порошковой металлургии.

Другое направление экономии материалов — максимальное использование, вторичных ресурсов. Это не только экономическая, но и экологическая задача, так как скопление отходов наносит огромный вред окружающей среде. Однако следует иметь в виду, что переработка отходов не всегда является технически выполнимой или экономически рентабельной. Производство стали из металлолома обходится в несколько раз дешевле, чем из чугуна. Производство цветных металлов из вторичного сырья также высокоэффективно. На производство тонны алюминия из металлолома затрачивается приблизительно в 20 раз меньше электроэнергии и в 7 раз меньше топлива. Значительно хуже обстоит дело с повторной переработкой пластмасс. Экологическая проблема заключается в том, что полимерные отходы разлагаются очень медленно или совсем не разлагаются. Некоторые виды пластмасс (термореактивные) вообще не поддаются вторичной обработке. Если же их сжигать, то это вызовет значительное загрязнение атмосферы. Из пластмасс, вторичное использование которых возможно, каждый вид требует своего способа переработки.

Важнейшее направление экономии металлических материалов — правильная защита их от коррозии. Значительные потери материалов вызывает износ. При этом происходит выход из строя элементов машин, работающих в условиях трения, что вызывает дополнительные материальные потери, связанные с ремонтом техники. Борьба с износом — один из путей экономии материалов.



Значительную экономию материалов может принести снижение материалоемкости изделий. Удельная материалоемкость многих видов отечественных машин и оборудования на 15...25 % выше, чем у лучших мировых образцов. По этой причине допускается большой перерасход материала. К способам снижения материалоемкости следует отнести рациональное конструирование и расчет изделий с использованием компьютера; правильный выбор материала; использование технологий производства изделия, снижающей материалоемкость (например, в свое время, переход от клепки к сварке сэкономил 20 % стали в каждом изделии). Важный путь снижения материалоемкости — увеличение единичной мощности машин и оборудования. Радикального снижения материалоемкости можно добиться за счет использования достижений научно-технического прогресса, т. е. при внедрении принципиально новых технических решений.

## 9.6. Вопросы для самоконтроля

1. Какие материалы относятся к неметаллическим, каковы их преимущества по сравнению с металлами и сплавами?
2. В чем сущность процесса вулканизации; как изменяются свойства резины после вулканизации
3. Как классифицируются полимерные материалы по происхождению, отношению к нагреву, полярности?
4. Какие полимеры называются термопластичными, терморезистивными? Приведите примеры.
5. Каковы температурные зависимости прочностных характеристик термопластичных и терморезистивных полимеров?
6. В чем сущность старения полимерных материалов?
7. Как изменяются свойства резин под действием озона, температуры, радиации и вакуума?
8. Что такое ситаллы, укажите способы их получения, разновидности, свойства и применение?
9. Что представляет собой техническая керамика, ее разновидности??
10. Изложите основные свойства и дайте характеристику металлических порошков.

## 9.7. Глоссарий по теме 9

### **ВАКУУМНОЕ СТАРЕНИЕ РЕЗИНЫ**

- Резины газопроницаемы, термоокисляемы, выделяют газы.

### **ГЕРМЕТИКИ**

- Полимерные композиции обычно на основе полисульфидных или кремнийорганических жидких каучуков), обеспечивающие непроницаемость болтовых и заклепочных соединений металлических конструкций.

### **КАУЧУК СИНТЕТИЧЕСКИЙ (СК)**

- Синтетические полимеры, которые при обычных температурах высокоэластичны и могут быть переработаны в резину..

### **КЕРАМИКА**

- Изделия и материалы, получаемые спеканием оксидов металлов, глин и смесей, а также других тугоплавких соединений; характеризуются как правило, повышенной твердостью, прочностью и жаростойкостью.

### **КЛЕЙ**

-Клей – пленкообразующий материал. Состоит из растворов или расплавов полимеров, а также неорганических веществ.

### **КОНСТРУКТИВНАЯ ПРОЧНОСТЬ**

- Конструктивную прочность сплавов оценивают проводя испытание на растяжение с концентраторами (надрезами). Прочность в этом случае ( $\sigma_b^H$ ) определяют как разрушающее напряжение, деленное на сечение нетто

(живое сечение в месте надреза) или с помощью диаграмм конструктивной прочности.

<b>ОТВЕРДИТЕЛЬ</b>	- Добавляют к термореактивным пластмассам для отверждения.
<b>ОРГАНИЧЕСКОЕ СТЕКЛО</b>	- Прозрачный аморфный термопласт на основе сложных эфиров акриловой и метакриловой кислот.
<b>ПЛАСТМАССА</b>	- искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ
<b>НАПОЛНИТЕЛИ</b>	- Наполнители добавляют в пластмассы для повышения механических свойств.
<b>ПОЛИМЕР</b>	- От греческого “состоящий из многих частей” – высокомолекулярные соединения.
<b>ПОЛИЭТИЛЕН</b>	- Твердый продукт полимеризации этилена.
<b>РЕЗИНА</b>	- Резиной называется продукт специальной обработки (вулканизации) смеси каучука и серы с различными добавками.
<b>СТАРЕНИЕ РЕЗИНЫ</b>	- В процессе эксплуатации резиновые изделия подвергаются световому, озонному, тепловому, радиационному, вакуумному старению.
<b>СТЕКЛО НЕОРГАНИЧЕСКОЕ</b>	- Аморфный изотропный, твердый и хрупкий термопластичный прозрачный материал, получаемый в результате переохладения расплава различных стеклообразующих компонентов.
<b>СТЕКЛО КВАРЦЕВОЕ</b>	- Наиболее чистое (практически однокомпонентное – SiO <sub>2</sub> ) силикатное стекло, получаемое плавлением (выше 1770 °С) природного кристаллического кварца (горный хрусталь, жильный кварц или чистый кварцевый песок).
<b>ФТОРОПЛАСТ</b>	- Техническое название фторсодержащих пластмасс политетрафторэтилена и политрифторхлорэтилена.

## **9.8. Используемые информационные ресурсы**

1. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2008. – 877 с.

2. Справочник - экзаменатор по материаловедению [Текст]: учебное пособие / В.В. Тарасов, Г.Б. Кривошеева, А.П. Герасимов - Владивосток: ДВГМА, 2000. – 76 с.

4. Солнцев Ю.П. Материаловедение. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2007. – 784с.