

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

**ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**  
**сборник учебно-методических материалов**

для направления подготовки

03.03.02 – Физика

Благовещенск 2021

*Составитель: Нецименко В.В.*

Физическое материаловедение: сборник учебно-методических материалов для направления подготовки 03.03.02. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2021.

© Амурский государственный университет, 2021

© Кафедра физики, 2021

© Нецименко В.В. составление

## *ВВЕДЕНИЕ*

Целью дисциплины «Физическое материаловедение» является формирование у студентов в рамках компетентного подхода навыков выбора материалов в области инженерных изысканий с позиции современных представлений о физических процессах и закономерностях, которым подчинены структура и свойства металлических, полимерных и композиционных материалов.

Основными задачами дисциплины является овладение студентами принципами и методами теоретического и экспериментального исследования состава, структуры и свойства твердых тел различной природы; получение знаний теории и практики различных способов упрочнения материалов; ознакомление с основными группами металлических и неметаллических материалов, их свойствами и областями применения; применение современных технологий технического обслуживания, ремонта и восстановления деталей машин для обеспечения постоянной работоспособности.

Для формирования умений и навыков в учебной программе дисциплины предусмотрены лекции, практические и лабораторные работы, а также самостоятельная работа студентов, роль которой в настоящее время в системе высшего образования значительно возросла и является формой самообразования.

В процессе обучения происходит закрепление и систематизация знаний, углубление теоретических знаний, развитие умений работать с различными источниками информации и как результат – освоения основных компетенций.

# 1 КРАТКИЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## *1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции*

В высшем учебном заведении лекция является важной формой учебного процесса и представляет собой в основном устное систематическое и последовательное изложение материала по какой-либо проблеме, методу, теме вопроса и т. д.

Основные функций, которые осуществляет вузовская лекция – это информативная, ориентирующая и стимулирующая, методологическая, развивающая и воспитывающая, поскольку на лекции студенты получают глубокие и разносторонние знания, развивают свои творческие способности.

Лекции могут быть вводными, обзорными, тематическими (лекции по изучению нового материала), итоговыми.

Вводные лекции подготавливают студента к восприятию данной дисциплины (физики) или ее раздела. На вводной лекции излагаются цели и задачи дисциплины, ее актуальность, практическая значимость, методы научного исследования и т.д. для того, чтобы дать целостное представление о дисциплине и вызывать интерес к предмету.

Тематические лекции посвящены глубоко осмысленному и методически подготовленному систематическому изложению содержания курса (дисциплины).

Итоговая лекция содержит основные идеи и выводы по курсу, выводы о достижении поставленных учебных целей.

На обзорных лекциях рассматриваются наиболее сложные, проблемные вопросы курса или новейшие достижения в данной области, что позволит установить взаимосвязь учебного материала с производством и новейшими научными достижениями.

Подготовка к самостоятельной работе над лекционным материалом должна начинаться на самой лекции. На лекции студент должен совместить два момента: внимательно слушать лектора, прикладывая максимум усилий для понимания излагаемого материала и одновременно вести его осмысленную запись. И как бы внимательно студент не слушал лекцию, большая часть информации вскоре после воспри-

ятия будет забыта. Поэтому при изучении дисциплины студентам рекомендуется составлять подробный конспект лекций, так как это обеспечивает полноценную систематизацию и структурирование материала, подлежащего изучению. Конспект лекций должен отражать специфику данного курса, которая состоит в обобщении физической теории, рассматривающей процессы обмена энергией в макроскопических системах, на случай сложных, полифункциональных систем.

Очень важным является умение правильно конспектировать лекционный материал и работать с ним. Ниже приведены *рекомендации по конспектированию лекций и дальнейшей работе с записями*.

1. Конспект лекций должен быть в отдельной тетради. Ее нужно сделать удобной, практичной и полезной, ведь именно она является основным информативным источником при подготовке к различным отчетным занятиям, зачетам, экзаменам.

2. Конспект должен легко восприниматься зрительно (чтобы максимально использовать «зрительную» память), поэтому он должен быть аккуратным. Выделяйте заголовки, отделите один вопрос от другого, соблюдайте абзацы, подчеркните термины.

3. При прослушивании лекции обращайтесь внимание на интонацию лектора и вводные слова «таким образом», «итак», «необходимо отметить» и т.п., которыми он акцентирует наиболее важные моменты. Не забывайте пометать это при конспектировании.

4. Не пытайтесь записывать каждое слово лектора, иначе потеряете основную нить изложения и начнете писать автоматически, не вникая в смысл. Не нужно просить лектора несколько раз повторять одну и ту же фразу для того, чтобы успеть записать. Лекция не должна превращаться в своеобразный урок-диктант. Техника прочтения лекций преподавателем такова, что он повторяет свою мысль два-три раза. Постарайтесь вначале понять ее, а затем записать, используя сокращения.

Конспектируйте только самое важное в рассматриваемом параграфе, то, что старается выделить лектор, на чем акцентирует внимание студентов.

Старайтесь отфильтровывать и сжимать подаваемый материал. Научитесь в процессе лекции разбивать текст на смысловые части и заменять их содержание ко-

роткими фразами и формулировками. Более подробно записывайте основную информацию и кратко – дополнительную.

5. По возможности записи ведите своими словами, своими формулировками. Используйте общепринятую в данном разделе физики аббревиатуру и систему сокращений. Придумайте собственную систему сокращений, аббревиатур и символов, удобную только вам (но не забудьте сделать словарь, иначе существует угроза не расшифровать текст). Однако при дальнейшей работе с конспектом символы лучше заменить обычными словами для быстрого зрительного восприятия текста.

6. Конспектируя лекцию, надо оставлять поля, на которых позднее, при самостоятельной работе с конспектом, можно сделать дополнительные записи, отметить непонятные места. Полезно после каждой лекции оставлять одну страницу свободной, она потребуется при самостоятельной подготовке. Сюда можно будет занести дополнительную информацию по данной теме, полученную из других источников: чертежи, графики, схемы, и т.п.

7. После прослушивания лекции необходимо проработать и осмыслить полученный материал. Насколько эффективно студент это сделает, зависит и прочность усвоения знаний, и, соответственно, качество восприятия предстоящей лекции, так как он более целенаправленно будет её слушать. В процессе изучения лекционного материала рекомендуется использовать опорные конспекты, учебники и учебные пособия.

## ***1.2 Краткое содержание курса лекций***

# **ТЕМА 1. СТРОЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

## ***1.1 Материаловедение как отрасль науки***

**Материаловедение** – наука о связях между составом, строением и свойствами материалов (твердых тел) и закономерностях их изменений при внешних физико-химических воздействиях.

К изучаемым свойствам относятся: структура веществ, электронные, термические, химические, магнитные, оптические свойства этих веществ. Материаловедение

можно отнести к тем разделам физики и химии, которые занимаются изучением свойств материалов.

Направления в материаловедении: металловедение; керамика и стекла; композиционные материалы; полимерные материалы; полупроводниковые материалы; космическое материаловедение; наноматериалы; биоматериалы.

### ***1.2 Факторы, влияющие на физические свойства материала***

По химической основе материалы делятся на:

1) металлические материалы, к которым относятся металлы и их сплавы, разделяющиеся на черные (на основе Fe) и цветные. Металлы составляют более 2/3 всех известных химических элементов.

2) неметаллические материалы, к которым относят полимерные материалы, композиционные материалы, резины, клеи, герметики, лакокрасочные покрытия, стекло, керамика.

По ширине запрещенной зоны:

1) Диэлектрики - вещество с шириной запрещенной зоны больше 3 эВ.

2) Полупроводники - с шириной запрещенной зоны порядка 1 эВ.

3) Металлы - запрещенная зона отсутствует.

Основные факторы, влияющие на физические свойства материала:

1. Наличие или отсутствие упорядочения в расположении атомов (кристаллические или аморфные тела);

2. Тип кристаллической структуры для кристаллов или наличие ближнего порядка (для аморфных тел);

3. Точечные или линейные дефекты в твердом теле (вакансии, дислокации и т.д.);

4. Макродефекты (поры, границы зерен);

5. Макрокристаллическая структура (монокристалл, поликристалл, текстурированный материал);

6. Фазовый состав:

- фазовый состав (однофазный или многофазный);
- тип фаз, входящих в состав материала;

- факторы, определяющие стабильность фаз (электронный или размерный).

**Фазой** называется часть системы, ограниченная замкнутой поверхностью, обладающая определенным набором физических и химических свойств и отличающаяся хотя бы по одному из этих параметров от свойств системы вне замкнутой поверхности.

7. электронно-зонные характеристики:

- Тип межатомной связи (ионная, ковалентная, металлическая, Ван-дер-ваальсова, водородная);
- Характер заполнения верхних электронных зон твердого тела (пустая или частично заполненная зона проводимости, величина ширины запрещенной зоны, наличие и расположения электронных уровней или дефектов в запрещенной зоне);
- Наличие перекрытия электронных зон в твердом теле.

**Ковалентная связь** – наиболее общий вид химической связи, возникающий за счет обобществления электронной пары посредством обменного механизма, когда каждый из взаимодействующих атомов поставляет по одному электрону, или по донорно-акцепторному механизму, если электронная пара передается в общее пользование одним атомом (донором) другому атому (акцептору).

**Ионная связь** – частный случай ковалентной, когда образовавшаяся электронная пара полностью принадлежит более электроотрицательному атому, становящемуся анионом. Основой для выделения этой связи в отдельный тип служит то обстоятельство, что соединения с такой связью можно описывать в электростатическом приближении, считая ионную связь обусловленной притяжением положительных и отрицательных ионов.

**Металлическая связь** возникает в результате частичной делокализации валентных электронов, которые достаточно свободно движутся в решетке металлов, электростатически взаимодействуя с положительно заряженными ионами. Силы связи не локализованы и не направлены, а делокализованные электроны обуславливают высокую тепло- и электропроводность.



**Водородная связь** – обусловлена тем, что в результате сильного смещения электронной пары к электроотрицательному атому атом водорода, обладающий эффективным положительным зарядом, может взаимодействовать с другим электроотрицательным атомом (F, O, N, реже Cl, Br, S).

**Ван-дер-ваальсова** (межмолекулярная) связь – наиболее универсальный вид межмолекулярной связи, обусловлен дисперсионными силами, индукционным взаимодействием и ориентационным взаимодействием.

### ***1.3 Особенности атомно-кристаллического строения твердых тел***

**Твёрдое тело** – это одно из четырёх агрегатных состояний вещества, отличающееся от других агрегатных состояний (жидкости, газов, плазмы) стабильностью формы и характером теплового движения атомов, совершающих малые колебания около положений равновесия.

Твёрдые тела могут быть в кристаллическом и аморфном состоянии. Кристаллы характеризуются пространственной периодичностью в расположении равновесных положений атомов, которая достигается наличием дальнего порядка и носит название кристаллической решётки. Естественная форма кристаллов – правильные многогранники.

В аморфных телах атомы колеблются вокруг хаотически расположенных точек, у них отсутствует дальний порядок, но сохраняется ближний, при котором молекулы расположены согласованно на расстоянии, сравнимом с их размерами.

Элементарная ячейка характеризует особенности строения кристалла. **Элементарная ячейка** – элемент объёма из минимального числа атомов, многократным переносом которого в пространстве можно построить весь кристалл.

Основными параметрами кристаллической ячейки являются:

- размеры рёбер элементарной ячейки.  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – периоды решётки – расстояния между центрами ближайших атомов.
- углы между осями ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ).
- координационное число ( $K$ ) указывает на число атомов, расположенных на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома в решетке.

- базис решетки количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки.
- плотность упаковки атомов в кристаллической решетке – объем, занятый атомами, которые условно рассматриваются как жесткие шары.

В зависимости от пространственной симметрии, все кристаллические решётки подразделяются на семь кристаллических систем. По форме элементарной ячейки они могут быть разбиты на шесть сингоний. **Сингония** – классификация кристаллографических групп симметрии, кристаллов и кристаллических решёток в зависимости от системы координат.

Помимо основных трансляций, на которых строится элементарная ячейка, в кристаллической решётке могут присутствовать дополнительные трансляции, называемые решётками Браве. В трёхмерных решётках бывают гранецентрированная (F), объёмноцентрированная (I), базоцентрированная (A, B или C), примитивная (P) и ромбоэдрическая (R) решётки Браве.

#### ***1.4 Понятие об изотропии и анизотропии. Особенности металлов, как тел имеющих кристаллическое строение***

Геометрическая правильность расположения атомов в кристаллических решётках придаёт металлам особенности, которых нет у аморфных тел.

1. Первой особенностью металлов является анизотропия свойств кристаллов, т. е. различие свойств кристаллов в разных направлениях.

2. Второй особенностью металлов как тел кристаллического строения является наличие у них плоскостей скольжения (спайности). По этим плоскостям происходит сдвиг или отрыв (разрушение) частиц кристаллов под действием внешних усилий.

3. Третьей особенностью является то, что процесс перехода их из твёрдого состояния в жидкое и наоборот происходит при определённой температуре, называемой температурой плавления (затвердевания). Аморфные тела переходят в жидкое состояние постепенно.

Чтобы понять явление анизотропии необходимо выделить кристаллографические плоскости и кристаллографические направления в кристалле. Плоскость, про-

ходящая через узлы кристаллической решетки, называется **кристаллографической плоскостью**. Прямая, проходящая через узлы кристаллической решетки, называется **кристаллографическим направлением**.

Для обозначения кристаллографических плоскостей и направлений пользуются **индексами Миллера**. Чтобы установить индексы Миллера, элементарную ячейку вписывают в пространственную систему координат (оси X, Y, Z – кристаллографические оси). За единицу измерения принимается период решетки.

Индексы кристаллографических направлений указываются в квадратных скобках [111]

В кубической решетке индексы направления, перпендикулярного плоскости (hkl) имеют те же индексы [hkl].

У металлических тел анизотропия свойств не выражена так резко, как у отдельных кристаллов. Металлы являются поликристаллическими телами, т. е. они состоят не из одного, а из бесчисленного количества кристаллов, по-разному ориентированных. Произвольность ориентировки каждого кристалла приводит к тому, что в любом направлении располагается приблизительно одинаковое количество различно ориентированных кристаллов. В результате получается, что свойства поликристаллических тел будут одинаковы во всех направлениях - это явление получило название «квазиизотропия» (ложная изотропия).

### ***1.5 Дефекты кристаллического строения***

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, линейные, поверхностные, объемные.

**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, в результате пластической деформации, при бомбардировке тела атомами или частицами высоких энергий.

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

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

**Дислокация** – это дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей. Простейшие виды дислокаций – краевые и винтовые.

**Краевая дислокация** представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край “лишней“ полуплоскости.

Другой тип дислокаций был описан Бюргерсом, и получил название **винтовая дислокация**.

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

**Плоские (двумерные) дефекты** – это границы кристаллических зерен и двойников, межфазные границы, дефекты упаковок. Дефект упаковки – нарушение последовательности слоев плотнейшей упаковки шаров. Двойник – это кристаллический комплекс, две части которого соединяются либо двойниковой поверхностью, либо двойниковой осью.

**Объемные дефекты** – нарушения структуры, включающие в себя макроскопические ассоциации точечных дефектов (поры, пустоты, включения группировок частиц другой фазы, кристаллические и жидкие включения и т. п.).

### *1.6 Сущность процессов кристаллизации металлов и сплавов*

Сущность процессов кристаллизации заключается в том, что переход из одного агрегатного состояния в другое возможно, если новое состояние в новых условиях является более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

С изменением внешних условий свободная энергия изменяется по сложному закону различно для жидкого и кристаллического состояний. Характер изменения свободной энергии жидкого и твердого состояний с изменением температуры показан на рис. 1.1.

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:  $\Delta T = T_{\text{теор}} - T_{\text{крист}}$ .

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).

При нагреве всех кристаллических тел наблюдается четкая граница перехода из твердого состояния в жидкое. Такая же граница существует при переходе из жидкого состояния в твердое.

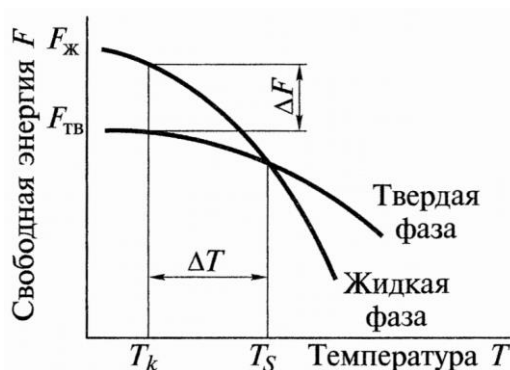


Рис.1.1. Изменение свободной энергии в зависимости от температуры.

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

Кристаллизация протекает в условиях, когда система переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с минимумом свободной энергии. Процесс перехода металла из жидкого состояния в кристаллическое можно изобразить кривыми в координатах время – температура.

### *1.7 Механизм и закономерности кристаллизации металлов*

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.

Переход из жидкого состояния в кристаллическое требует затраты энергии на образование поверхности раздела жидкость – кристалл. Процесс кристаллизации будет осуществляться, когда выигрыш от перехода в твердое состояние больше потери энергии на образование поверхности раздела. Зародыши с размерами равными и большими критического растут с уменьшением энергии и поэтому способны к существованию.

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.

В свою очередь, число центров кристаллизации (ч.ц.) и скорость роста кристаллов (с.р.) зависят от степени переохлаждения (рис. 1.2).

Размеры образовавшихся кристаллов зависят от соотношения числа образовавшихся центров кристаллизации и скорости роста кристаллов при температуре кристаллизации.

При равновесной температуре кристаллизации  $T_S$  число образовавшихся центров кристаллизации и скорость их роста равняются нулю, поэтому процесса кристаллизации не происходит.

Если жидкость переохладить до температуры, соответствующей  $T_a$ , то образуются крупные зерна (число образовавшихся центров небольшое, а скорость роста – большая).

При переохлаждении до температуры соответствующей  $T_b$  – мелкое зерно (образуется большое число центров кристаллизации, а скорость их роста небольшая).

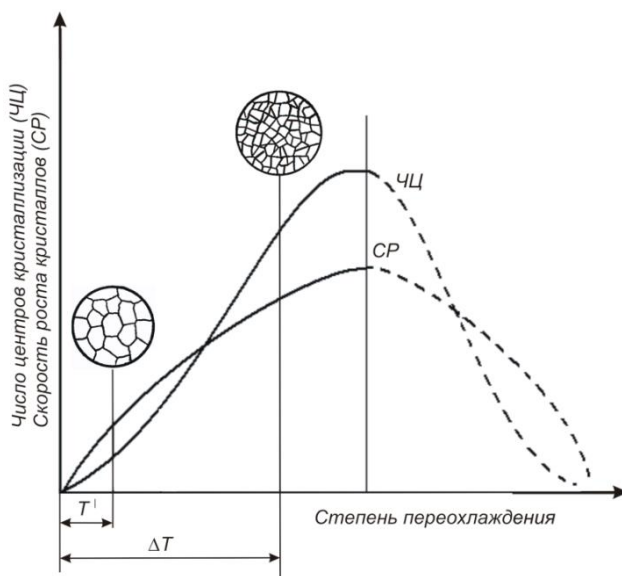


Рис. 1.2. Зависимость числа центров кристаллизации (а) и скорости роста кристаллов (б) от степени переохлаждения.

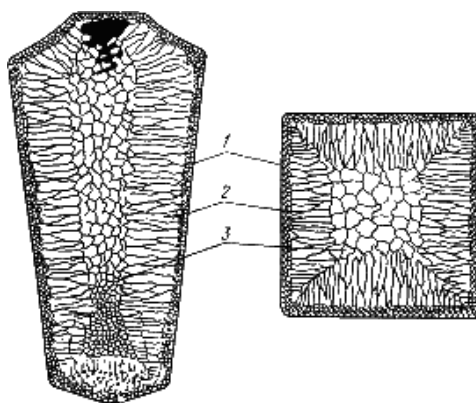
Если металл очень сильно переохладить, то число центров и скорость роста кристаллов равны нулю, жидкость не кристаллизуется, образуется аморфное тело. Для металлов, обладающих малой склонностью к переохлаждению, экспериментально обнаруживаются только восходящие ветви кривых.

### ***1.8 Особенности строения металлического слитка***

Слиток состоит из трех зон (рис. 1.3):

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.



*Рис. 1.3. Схема стального слитка.*

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 теплоотвода.

Так как теплоотвод от не закристаллизовавшегося 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).

### ***1.9. Понятие о ликвации***

Слитки сплавов имеют неоднородный состав. Например, в стальных слитках по направлению от поверхности к центру и снизу вверх увеличивается концентрация углерода и вредных примесей – серы и фосфора. Химическая неоднородность по отдельным зонам слитка называется зональной ликвацией. Она отрицательно влияет на механические свойства. В реальных слитках помимо зональной встречаются и другие виды ликвации. Дендритная ликвация свойственна сплавам с широким температурным интервалом кристаллизации. Гравитационная ликвация образуется в результате разницы в плотностях твёрдой и жидкой фаз: например, в антифрикционном сплаве олова с сурьмой - твёрдая фаза ( кристаллы сурьмы ) опускаются на дно слитка, а эвтектика всплывает вверх.

## **ТЕМА 2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ДИАГРАММ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ**

### ***2.1 Основные понятия в теории сплавов***

**Система** – группа металлов, 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 (С)** (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 (К), числом фаз (Ф) и вариантностью системы (С). Это правило фаз или **закон Гиббса**:

$$C=K-\Phi+2 \quad (2.1)$$

Если принять, что все превращения происходят при постоянном давлении, то число переменных уменьшится:

$$C=K-\Phi+1,$$

где С – число степеней свободы, К – число компонентов, Ф – число фаз, 1 – учитывает возможность изменения температуры.

## ***2.2 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. При образовании сплавов в процессе их затвердевания возможно различное взаимодействие компонентов. В зависимости от характера взаимодействия компонентов различают сплавы: механические смеси, твердые растворы, химические соединения.

Если элементы, входящие в состав сплава, при кристаллизации из жидкого состояния не растворяются друг в друге и не взаимодействуют, то образуется **механическая смесь**. При кристаллизации у каждого из таких компонентов образуется своя кристаллическая решетка. В структуре различаются зерна каждого из компонентов, т.е. образуются две фазы. При этом компоненты кристаллизуются обособленно друг от друга, но одновременно. Механическую смесь могут образовывать не только компоненты, но и два твердых раствора или один из компонентов и ограниченный

твердый раствор. В металловедении механическую смесь двух компонентов называют эвтектикой. **Эвтектика** – механическая смесь двух и более компонентов, кристаллизующихся при постоянной температуре одновременно и обособленно друг от друга.

**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

- ярко выраженные индивидуальные свойства;

- постоянство температуры кристаллизации, как у чистых компонентов

**Сплавы твердые растворы** – фазы переменного состава, в которых атомы различных элементов расположены в общей кристаллической решётке. Характерной особенностью твердых растворов является: наличие в их кристаллической решетке разнородных атомов, при сохранении типа решетки растворителя.

По степеням растворимости компонентов различают твердые растворы:

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

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

Для образования растворов с неограниченной растворимостью необходимы:

- изоморфность (однотипность) кристаллических решеток компонентов;
- -близость атомных радиусов компонентов, которые не должны отличаться более чем на 8...13 %.

- близость физико-химических свойств подобных по строению валентных оболочек атомов.

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

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

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

Твердые растворы внедрения образуются внедрением атомов растворенного компонента в поры кристаллической решетки растворителя.

Образование таких растворов, возможно, если атомы растворенного элемента имеют малые размеры. Такими являются элементы, находящиеся в начале периодической системы Менделеева, углерод, водород, азот, бор. Размеры атомов превышают размеры межатомных промежутков в кристаллической решетке металла, это вызывает искажение решетки и в ней возникают напряжения. Концентрация таких растворов не превышает 2-2.5%

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.

### ***2.3 Диаграмма состояния***

**Диаграмма состояния сплавов** – графическое изображение фазового и структурного состояния сплавов при определенной температуре и определенной концентрации компонентов.

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

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

### ***2.3.1 Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (механические смеси) (I рода)***

Проведем анализ диаграммы состояния.

1. Количество компонентов:  $K = 2$  (компоненты А и В);

2. Число фаз:  $f = 3$  (кристаллы компонента А, кристаллы компонента В, жидкая фаза).

3. Основные линии диаграммы:

- линия ликвидус  $ac'b$ , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
- линия солидус  $ec'f$ , параллельна оси концентраций стремится к осям компонентов, но не достигает их;

5. Типовые сплавы системы.

а) Чистые компоненты, кристаллизуются при постоянной температуре, на рис.

2.1.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. 2.1.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 смотрим на рис 2.1.б.

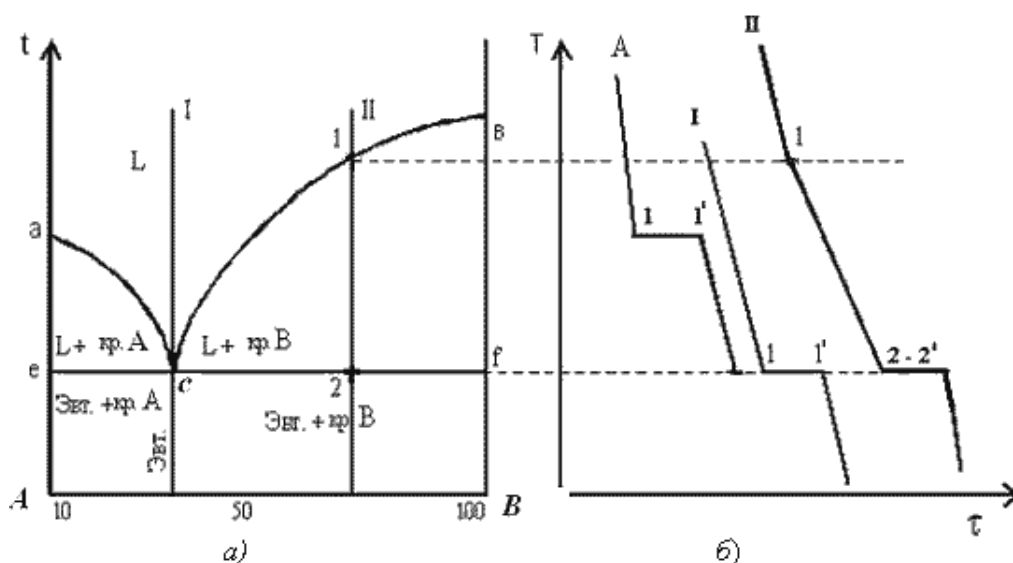


Рис. 2.1. Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения сплавов (б).

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. Ниже точки 2' охлаждается сплав, состоящий из кристаллов первоначально закристаллизовавшегося избыточного компонента В и эвтектики.

### ***2.3.2 Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (II рода)***

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

Проведем анализ полученной диаграммы.

1. Количество компонентов:  $K = 2$  (компоненты А и В).

2. Число фаз:  $f = 2$  (жидкая фаза L, кристаллы твердого раствора  $\alpha$ )

3. 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.

4. Характерные сплавы системы:

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

Остальные сплавы кристаллизуются аналогично сплаву I, кривая охлаждения которого представлена на рис. 2.2, 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  $\alpha$ .

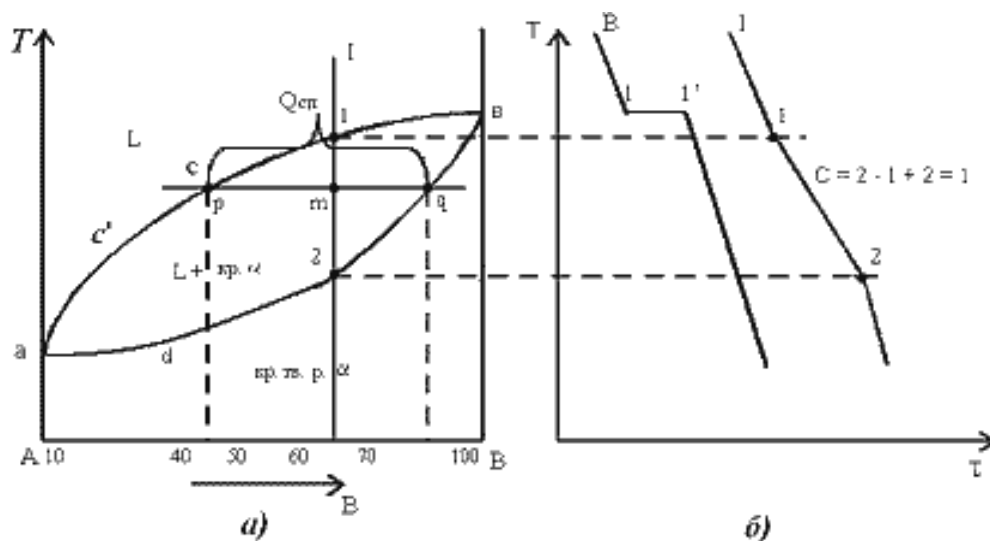


Рис.2.2. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а); кривые охлаждения типичных сплавов (б).

## 5. 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).

а). Определение состава фаз в точке  $m$ :

Для его определения через точку  $m$  проводят горизонталь до пересечения с ближайшими линиями диаграммы: ликвидус и солидус.

Состав жидкой фазы определяется проекцией точки пересечения горизонтали с линией ликвидус  $p$  на ось концентрации.

Состав твердой фазы определяется проекцией точки пересечения горизонтали с линией солидус  $q$  (или осью компонента) на ось концентрации.

Состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидуса, а состав твердой фазы – по линии солидуса.

С понижением температуры состав фаз изменяется в сторону уменьшения содержания компонента В.

б). Определение количественного соотношения жидкой и твердой фазы при заданной температуре (в точке  $m$ ):

Количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам проведенной коноды. Рассмотрим проведенную через точку  $m$  коноду и ее отрезки.

Количество всего сплава ( $Q_{\text{сп}}$ ) определяется отрезком  $pq$ .

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

$$Q_{\text{тв}} = \frac{pm}{pq} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

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

$$Q_{\text{ж}} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

### **2.3.3 Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (III рода)**

Диаграмма состояния и кривые охлаждения типичных сплавов системы представлены на рис.2.3.

1. Количество компонентов:  $K = 2$  (компоненты А и В);
2. Число фаз:  $f = 3$  (жидкая фаза и кристаллы твердых растворов (раствор компонента В в компоненте А) и (раствор компонента А в компоненте В));
3. 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.

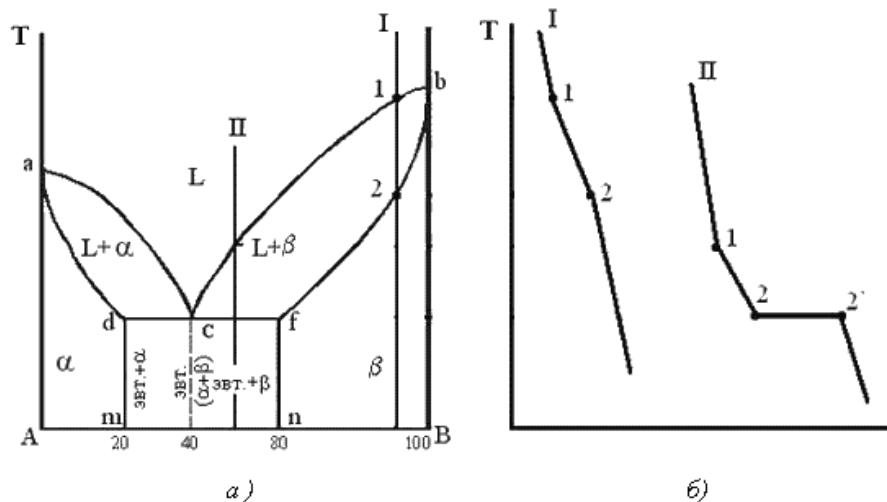


Рис. 2.3. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения типичных сплавов (б).

#### 4. 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. 2.3.б. При концентрации компонентов, превышающей предельные значения (на участке  $dcf$ ), сплавы кристаллизуются аналогично сплавам механическим смесям, см. кривую охлаждения сплава II на рис. 2.3. б.

Сплав с концентрацией компонентов, соответствующей точке  $s$ , является эвтектическим сплавом. Сплав состоит из мелкодисперсных кристаллов твердых растворов  $\alpha$  и  $\beta$ , эвт. (кр. тв. р-ра  $\alpha$ + кр. тв. р-ра  $\beta$ )

Кристаллы компонентов в чистом виде ни в одном из сплавов не присутствуют.

### 2.3.4 Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения (IV рода).

В этих сплавах компоненты химически реагируют друг с другом, образуя химическое соединение  $A_mB_n$ . Это соединение представляет собой новую фазу и имеет соответствующую однородную область на диаграмме состояния (линия  $PF$  на рис.6). Линия хим. соединения проходит через точку  $P$ , соответствующую содержанию компонента  $B$  в  $A_mB_n$  и разделяет общую диаграмму  $A$ - $B$  на две независимые части:  $A+A_mB_n$  и  $A_mB_n+B$ , каждую из которых можно рассматривать отдельно и для каждой из них соединение  $A_mB_n$  играет роль «компонента». В каждой части тип диаграммы состояния может быть, вообще говоря, любым. В частности, на рисунке в качестве примера приведены системы  $A+A_mB_n$  и  $A_mB_n+B$  эвтектического типа.

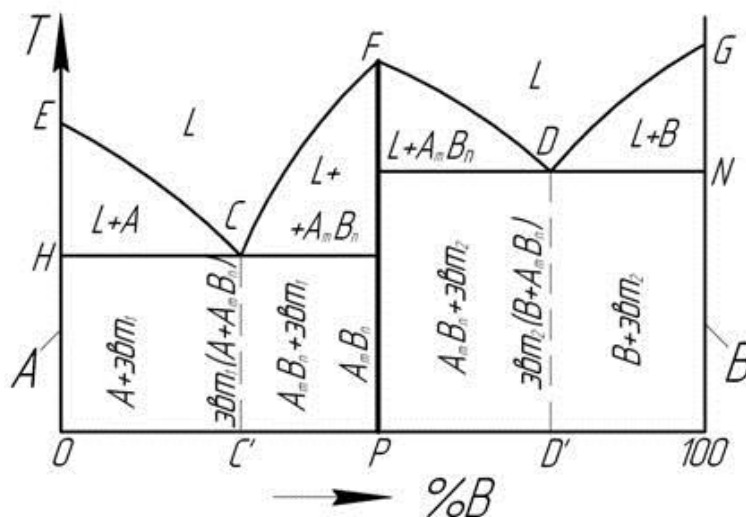


Рис. 2.4. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения.

Однофазные области этой диаграммы:

- 1) жидкость  $L$  – выше линии ликвидус  $ECFDG$ ;

- 2) компонент А – линия ОНЕ;
- 3) компонент В – линия 100NG;
- 4) химическое соединение  $A_mB_n$  – линия PF.

Структурные составляющие сплавов этой системы и их области на диаграмме:

- 1) кристаллы А – линия ОНЕ;
- 2) кристаллы В – линия 100NG;
- 3) кристаллы  $A_mB_n$  – линия PF;
- 4) эвтектика  $эвт_1(A + A_mB_n)$  – линия  $CC'$ ;
- 5) эвтектика  $эвт_2(A_mB_n + B)$  – линия  $DD'$ .

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

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

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. 2.5. б.

Процесс кристаллизации сплава I: до точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1, начинают образовываться центры кристаллизации твердого раствора. На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий при понижающейся температуре.

При достижении температуры соответствующей точке 2, сплав затвердевает, при дальнейшем понижении температуры охлаждается сплав в твердом состоянии, состоящий из однородных кристаллов твердого раствора  $\beta$ .

При достижении температуры, соответствующей точке 3, твердый раствор оказывается насыщенным компонентом В, при более низких температурах растворимость второго компонента уменьшается, поэтому из  $\alpha$ -раствора начинает выделяться избыточный компонент в виде кристаллов  $\beta$ . За точкой 3 сплав состоит из двух фаз: кристаллов твердого раствора  $\alpha$  и вторичных кристаллов твердого раствора  $\beta$ .

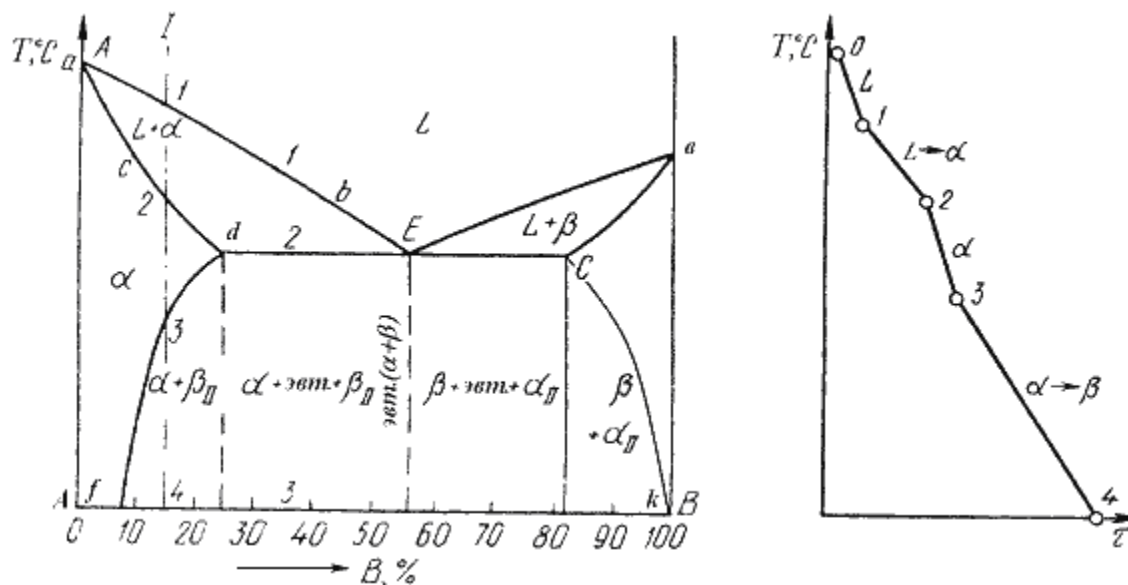


Рис. 2.5. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии (а) и кривая охлаждения сплава (б).

#### 2.4. Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния

Так как вид диаграммы, также как и свойства сплава, зависит от того, какие соединения или какие фазы образовали компоненты сплава, то между ними должна существовать определенная связь. Эта зависимость установлена Курнаковым (рис. 2.6).

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.

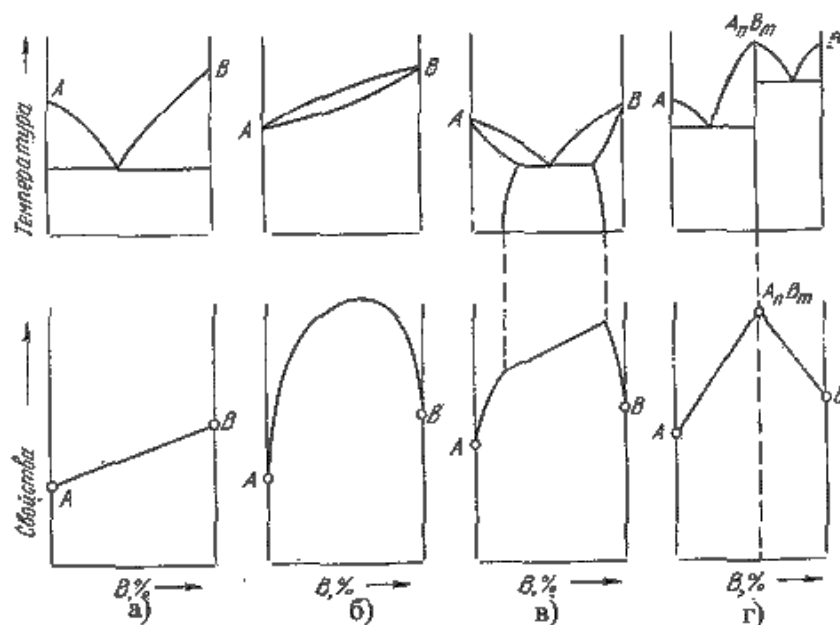


Рис. 2.6. Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния.

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.

### ТЕМА 3 «ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Fe-C. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ, ЧУГУНЫ»

#### 3.1 Аллотропические превращения железа при нагреве и охлаждении

Чистое Железо (Fe, атомный номер 26, радиус 0,127 нм) имеет температуру плавления 1539°C, плотность  $7,68 - 7,85 \text{ г/см}^3$ . Металл обладает невысокой твердостью и прочностью  $HВ \approx 80$ , предел прочности  $\sigma_b \approx 250 \text{ МПа}$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$

= 120 МПа и хорошей пластичностью; относительное удлинение  $\delta = 50 \%$  ; относительное сужение  $\psi = 80 \%$ .

В твердом состоянии испытывает два полиморфных превращения. Важнейшее из них – превращение при 911 °С. Ниже этой температуры железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК) с параметром  $a = 0,286$  нм (рис.3.1). Это  $\alpha$ -железо ( $Fe_\alpha$ ). Выше 911°С существует  $\gamma$ -железо ( $Fe_\gamma$ ) с гранецентрированной кубической решеткой (ГЦК) и параметром  $a = 0,356$  нм.

Способность некоторых металлов существовать в различных кристаллических формах в зависимости от внешних условий (давление, температура) называется аллотропией или полиморфизмом. Каждый вид решетки представляет собой аллотропическое видоизменение или модификацию.

Превращение одной модификации в другую протекает при постоянной температуре и сопровождается тепловым эффектом.

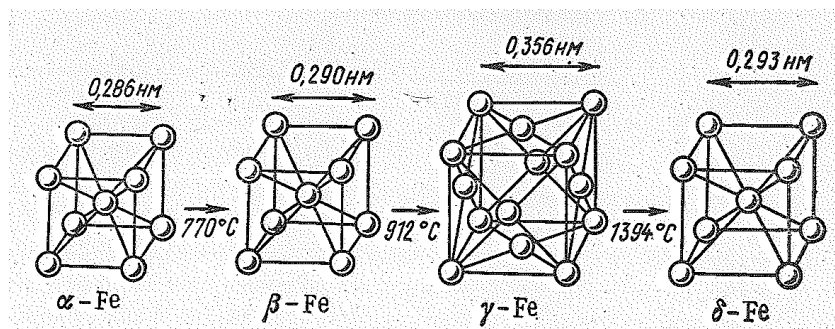


Рис.3.1. Аллотропические превращения железа.

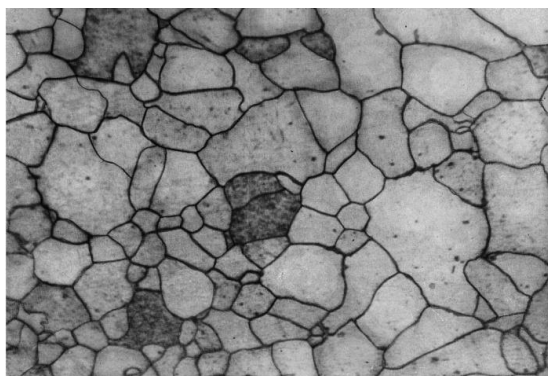
Другой пример аллотропического видоизменения, обусловленного изменением давления, является углерод: при низких давлениях образуется графит, а при высоких – алмаз. Углерод – химический элемент II периода IV группы периодической системы, химический знак - C, атомный номер 6, радиус 0,077 нм или 0,77 Å; масса 12,011; неметалл. Массовая доля углерода в земной коре составляет 0,1 %. Алмаз – прозрачное кристаллическое вещество с атомной кубической решеткой. Графит имеет темно-серую окраску с металлическим блеском. Он является жирным на ощупь. По своему строению это слоистое кристаллическое вещество с гексагональной структурой.

Углерод может растворяться в жидком железе и в решетках обеих полиморфных модификаций, а также образует с железом химическое соединение. Поэтому в сплавах могут присутствовать следующие фазы: жидкий раствор (Ж), феррит (Ф), аустенит (А), цементит (Ц), графит (Г).

### **3.2 Структурные составляющие системы железо-углерод**

Твердые растворы внедрения углерода и других примесей в  $\alpha$ -железе называют **ферритом**, а в  $\gamma$ -железе – **аустенитом**.

Феррит получил свое название от латинского наименования железа – «Ferrum». Различают низкотемпературный  $\alpha$ -феррит с растворимостью углерода до 0,02 % и высокотемпературный  $\delta$ -феррит с предельной растворимостью углерода 0,1 %. Атом углерода в решетке феррита располагается в центре объема куба. Под микроскопом феррит выявляется в виде однородных полиэдрических зерен. Твердость и механические свойства феррита близки к таковым технически чистого железа ( $\sigma_b = 250$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 120$  МПа,  $\delta = 50$  %,  $\psi = 80$  %, НВ 80 – 90 кгс/мм<sup>2</sup> или 800 – 900 МПа), они зависят от количества элементов, присутствующих в нем. Микроструктура феррита представлена на рис.3. 2.



*Рис.3.2. Микроструктура феррита.*

Аустенит был назван так в честь английского ученого Роберта Аустена, который занимался исследованиями структуры составляющих системы железо - углерод и разработкой вариантов ее диаграммы состояния. Атом углерода в решетке  $\gamma$ -железа располагается в центре элементарной ячейки (рис. 3.3,б).



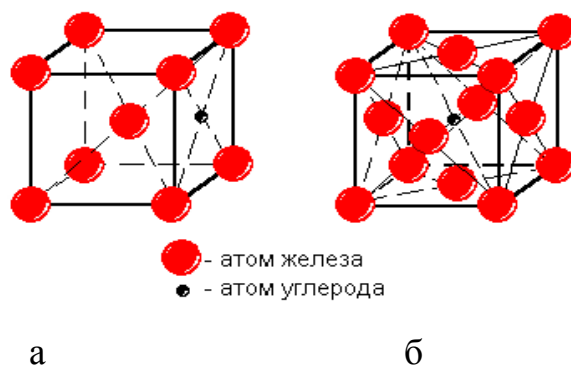


Рис.3.3. Кристаллическая решетка феррита (а) и аустенита (б).

Аустенит – парамагнитен, высокопластичен (НВ = 170-220 кгс/мм<sup>2</sup> или 1700-2200 МПа), имеет низкие механические характеристики, такие как пределы текучести и Аустенит – парамагнитен, высокопластичен (НВ = 170-220 кгс/мм<sup>2</sup> или 1700-2200 МПа), имеет низкие механические характеристики, такие как пределы текучести и прочности. Микроструктура аустенита - полиэдрические зерна (рис.3.4).

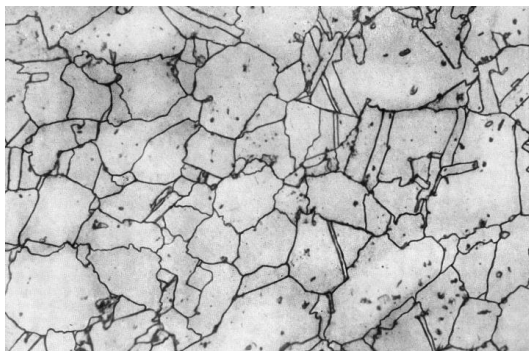


Рис.3.4. Микроструктура аустенита.

Железо и углерод, взаимодействуя друг с другом, могут образовывать ряд металлических карбидов с различными химическими формулами:  $Fe_3C$ ,  $Fe_2C$ ,  $FeC$  и другие. Наиболее распространенным и широко применяемым из них является карбид железа среднего состава  $Fe_3C$  – **цементит**. Стехиометрическое соотношение элементов в нем соответственно равно 3 : 1. Содержание углерода составляет 6,67 % масс.

Кристаллическая решетка карбида железа очень сложная. Она представляет собой орторомбическую структуру с плотной упаковкой атомов (в элементарной ячейке расположено 12 атомов железа и 4 углерода). Данное соединение обладает высокой твердостью, сравнимой только с алмазом, он легко царапает стекло (НВ

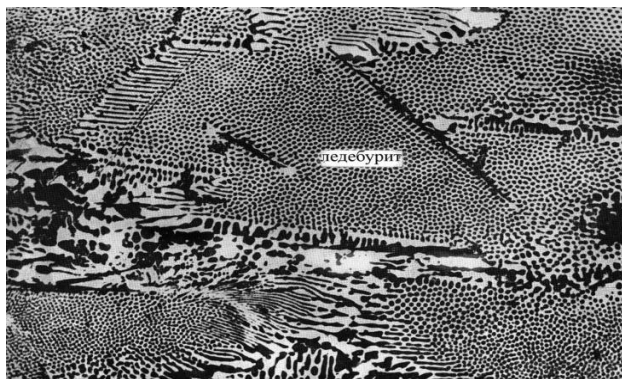
более  $800 \text{ кгс/мм}^2$ ), но чрезвычайно низкой практически нулевой пластичностью (большой хрупкостью), значительной жаропрочностью и обычно более высокой температурой плавления, чем исходный металл.

Кроме перечисленных фаз, в структуре сплавов железа с углеродом присутствуют две структурные составляющие: эвтектика и эвтектоид.

В системе железо – углерод эвтектика содержит 4,3 % С и кристаллизуется при температуре  $1147^\circ\text{C}$ . Она представляет собой смесь кристаллов аустенита и цементита и называется **ледебурит** ( $\text{Л} = \text{А} + \text{Ц}$ ).

Ледебурит - образуется в процессе эвтектического превращения по реакции:  
 $\text{Ж} = \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ .

По своей структуре он представляет собой чередующиеся пластинки аустенита и цементита. При температурах ниже  $727^\circ\text{C}$  аустенит в этой смеси изотермически превращается в перлит. Ледебурит такого состава называется низкотемпературным. Микроструктура ледебурита представлена на рис.3.5.



*Рис.3.5. Микроструктура ледебурита.*

**Перлит** – смесь пластин феррита и цементита образующаяся при  $727^\circ\text{C}$  по реакции:  $\text{А} = \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ .

Он имеет перламутровый цвет (отсюда и название), концентрация углерода в нем -0,8 % масс. Структура его также как и ледебурита состоит из следующих друг за другом пластинок феррита и цементита.

Перлит имеет наиболее удачное сочетание механических свойств из всех равновесных структур в сплавах железа с углеродом. В нем мягкие, вязкие пластины феррита чередуются с прочными, твердыми, жесткими пластинами цементита:  $\text{П} =$

Ф + Ц (рис. 3.6). Такая структура хорошо сопротивляется самым разным механическим нагрузкам, обладает высокой прочностью и достаточной вязкостью. Твердость перлита составляет 180-220 НВ, в зависимости от размера зерна.

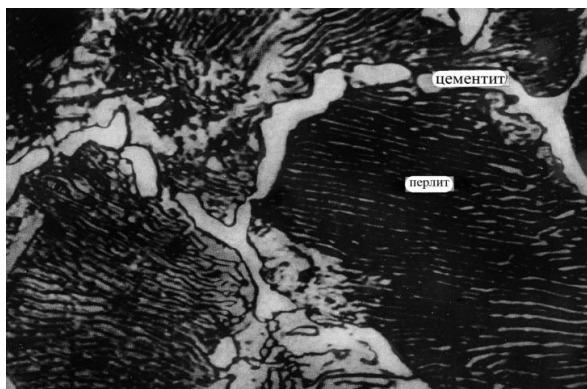


Рис.3.6. Микроструктура перлита и цементита вторичного.

### 3.3 Диаграмма состояния желез- цементит

Диаграмму системы железо-углерод можно проанализировать только до образования в ней карбида железа -  $Fe_3C$  – концентрация углерода 6,67 %. Это связано с тем, что наибольшее практическое значение имеет только часть диаграммы состояния железо-углерод, в которой показано формирование цементита, так как сплавы, содержащие большее количество углерода, очень хрупкие и практически не применяются в промышленности. Поэтому диаграмму состояния системы железо-углерод изображают только до концентрации углерода 6,67 % масс и называют диаграммой состояний железо-цементит (рис.3.7).

Кривая  $ABCD$  - линия ликвидус, которая на участке  $AB$  соответствует температурам начала выпадения кристаллов феррита ( $\alpha$ ), а на участке  $BC$  соответствует температурам начала выпадения кристаллов аустенита ( $\gamma$ ) из жидкого сплава ( $L$ ). В области  $CD$  – она представляет геометрическое место точек, отвечающих температурам начала кристаллизации первичного цементита ( $Fe_3C_I$ ) из жидкой фазы ( $L$ ).

Линия  $AHJECFD$  - солидус, криволинейный участок  $AHJE$  которой, определяет окончание затвердевания жидкой фазы.

На горизонтальной линии  $HJB$  происходит неинвариантная реакция с участием трех фаз образования аустенита из жидкости и феррита.



Горизонтальный участок  $ECF$  является геометрическим местом точек, соответствующих также концу кристаллизации аустенита ( $EC$ ) и первичного цементита -  $Fe_3C_I$  ( $CF$ ), и одновременно отвечает температурам изотермического превращения жидкого сплава состава точки  $C$  в двухфазную эвтектику – ледебурит.

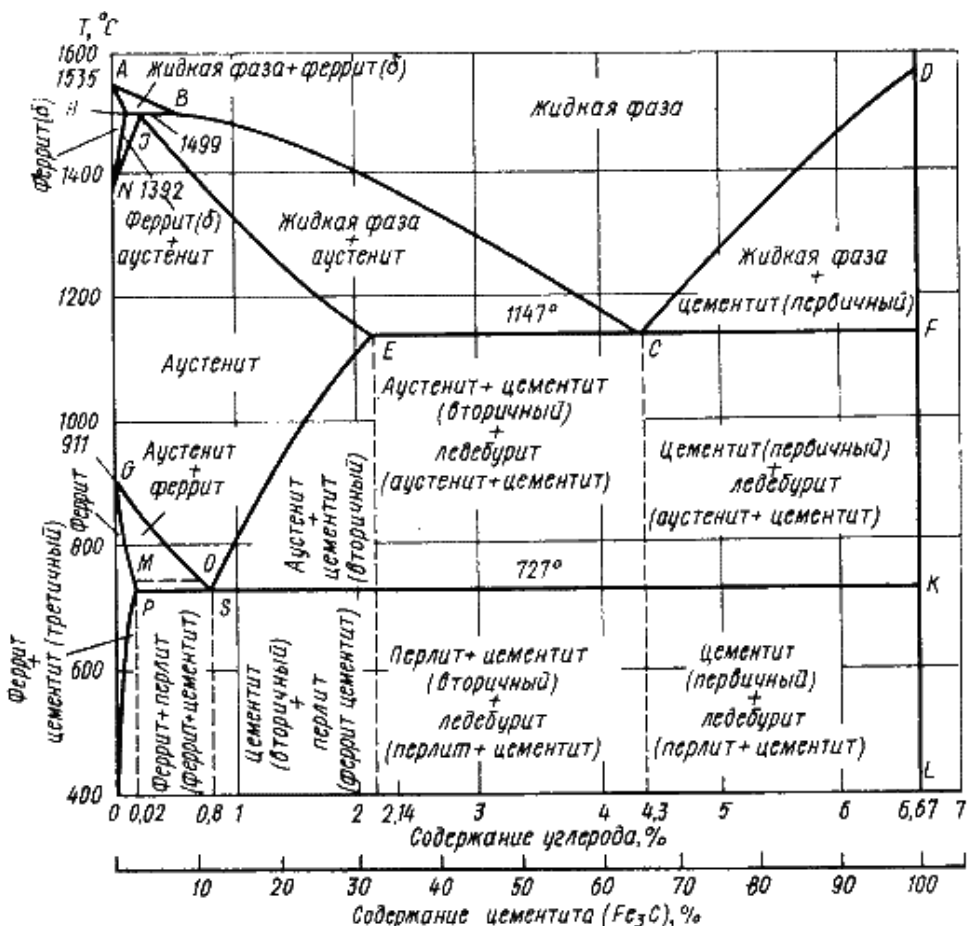


Рис. 3.7. Диаграмма железо-углерод.



Данная реакция наблюдается только у сплавов с содержанием углерода более 2,14 % масс.

На горизонтальной линии  $PSK$  происходит неинвариантная реакция с участием трех фаз образования перлита из аустенита.



Линии  $NH$  и  $NJ$  отражают начало и конец полиморфного превращения аустенита и  $\delta$ -феррита, а линии  $GS$  и  $GP$  соответственно начало и конец полиморфного превращения аустенита и  $\alpha$ -феррита.

Кривые  $DC$ ,  $ES$  и  $PQ$  показывают на ограничение максимальной растворимости углерода в фазовых составляющих железоуглеродистых сплавов. Эти линии определяют максимальную растворимость углерода в той фазе, которая расположена на диаграмме левее данной кривой.

Диаграмму состояния  $Fe - Fe_3C$  по оси абсцисс – концентрация углерода – делят на следующие участки: 0 - 0,02 % (точка  $P$ ) - технически чистое железо; 0,02 - 0,80 % (отрезок  $PS$ ) - доэвтектоидные стали; 0,80 % (точка  $S$ ) - эвтектоидная сталь; 0,80 - 2,14 % - заэвтектоидные стали; 2,14 - 4,31 % (отрезок  $EC$ ) - доэвтектические чугуны; 4,31 % (точка  $C$ ) - эвтектический чугун; 4,31 - 6,67 % (отрезок  $CF$ ) - заэвтектические чугуны.

Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода до 2,14 %, называют сталями. Они после затвердевания не содержат хрупкой структурной составляющей - ледебурита и при высоком нагреве имеют только аустенитную структуру, обладающую высокой пластичностью. Поэтому они легко деформируются при нормальных и повышенных температурах, т. е. являются ковкими сплавами.

### **3.4 Кристаллизация и формирование структуры сплавов**

#### **3.4.1 Кристаллизация стали**

Первичная кристаллизация стали в зависимости от содержания углерода происходит по-разному. При содержании углерода от 0 до 0,5% из жидкости начинает выделяться феррит, а при содержании углерода от 0,5% до 2,14% из жидкости первоначально выделяется аустенит. Диаграмма состояния и кривые охлаждения типовых сплавов представлены на рис.3.8.

Рассмотрим кристаллизацию сплава 1, относящегося к доэвтектоидной стали, с содержанием углерода менее 0,5% (Рис.3.8,а).

Кристаллизация этого сплава начинается в точке  $t_1$  выделением из жидкости кристаллов феррита. При температуре 1499<sup>0</sup>С в сплаве происходит перитектическая реакция, при которой выделившийся ранее феррит взаимодействует с жидкостью, в

результате образуется новая фаза – аустенит. Окончательное формирование структуры стали происходит в результате превращений аустенита при дальнейшем охлаждении. Основой этого превращения является полиморфизм, связанный с перегруппировкой атомов из ГЦК решетки аустенита в ОЦК решетку феррита, а также изменение растворимости углерода по линии  $ES$  в аустените и  $PQ$  в феррите.

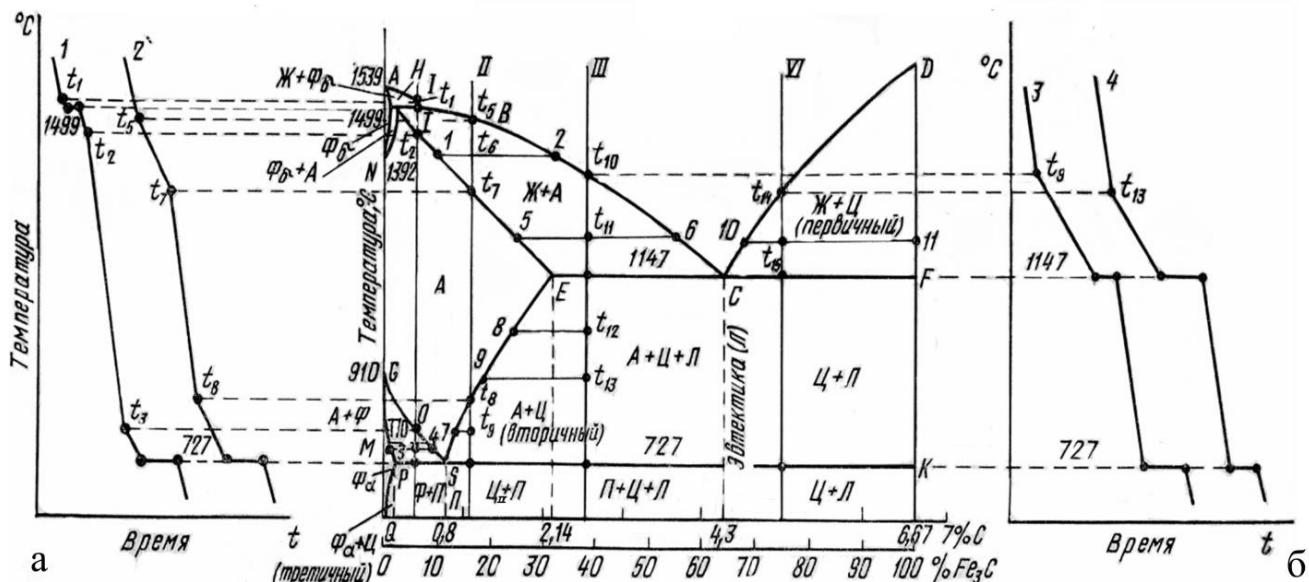


Рис.3.8. Кривые охлаждения при кристаллизации:

а) - кристаллизация сталей; б)- кристаллизация чугунов.

В данном сплаве в интервале температур  $t_3-727^\circ\text{C}$  идет полиморфное превращение  $A \rightarrow \Phi$ . На стыках и границах зерен аустенита возникают зародыши феррита, которые растут и развиваются за счет атомов аустенитной фазы. Состав аустенита меняется по линии  $GS$ , а феррита – по линии  $GP$ . При  $727^\circ\text{C}$  концентрация углерода в аустените равна  $0,8\%$  (точка  $S$ ) и в феррите –  $0,025\%$  (точка  $P$ ). Ниже этой температуры происходит эвтектоидное превращение. В равновесии находятся три фазы: феррит состава точки  $P$ , аустенит состава точки  $S$ , цементит. Так как число степеней свободы равно нулю, т.е. имеется нонвариантное равновесие, то процесс протекает при постоянном составе фаз. На кривых охлаждения или нагрева наблюдается температурная остановка. Таким образом, структура доэвтектоидной стали характеризуется избыточными кристаллами феррита и эвтектоидной смесью феррита с цементитом, называемой перлитом. Количественные соотношения феррита и перлита за-

висят от состава сплава. Чем больше углерода в доэвтектоидной стали, тем больше в структуре ее перлита и, наоборот, чем меньше углерода, тем больше феррита и меньше перлита. При дальнейшем охлаждении в результате изменения растворимости углерода в феррите (соответственно линии  $PQ$ ) выделяется третичный цементит. Однако в структуре обнаружить его при наличии перлита невозможно.

Сплавы с содержанием углерода менее 0,025 % (левее т.  $P$ ) не испытывают эвтектоидного превращения.

Сплав 2 относится по составу к заэвтектоидной стали. Кристаллизация этого сплава начинается в точке  $t_5$  выделением из жидкости кристаллов аустенита. В  $t_7$  кристаллизация заканчивается и до температуры  $t_8$  (линия  $ES$ ) аустенит охлаждается без изменения состава. Несколько ниже этой температуры аустенит достигает предельного насыщения углеродом согласно линии растворимости углерода в аустените  $ES$ . В интервале температур  $t_{10} - 727\text{ }^\circ\text{C}$  из пересыщенного аустенита выделяется высокоуглеродистая фаза – цементит, который называется вторичным. Состав аустенита меняется по линии  $ES$  и при температуре  $727\text{ }^\circ\text{C}$  достигает точки  $S$  (0,8 %C). Ниже  $727\text{ }^\circ\text{C}$  происходит эвтектоидное превращение: аустенит состава точки  $S$  (0,8 %C) распадается на смесь феррита состава точки  $P$  (0,025 %C) и цементита. Таким образом, структура заэвтектоидной стали характеризуется зернами перлита и вторичного цементита. При медленном охлаждении цементит, как правило, располагается в виде тонкой оболочки. В разрезе это выглядит как сетка цементита. Более благоприятной формой цементита является зернистая, она не приводит к значительному снижению пластических свойств стали. В реальной стали с 1,2%С (У12) количество вторичного цементита составляет всего около 6 %.

### **3.4.2 Кристаллизация чугунов**

Все превращения в белых чугунах, начиная от затвердевания и до комнатных температур, полностью проходят по метастабильной диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C. Наличие цементита придает излому светлый блестящий цвет, что привело к термину “белый чугун”. Независимо от состава сплава обязательной структурной составляющей белого чугуна является цементитная эвтектика (ледебурит). На рис. изображена

структурная диаграмма равновесия железо-цементит и кривые охлаждения типичных сплавов.

Железоуглеродистые сплавы состава 2,14-4,3% С называются доэвтектическими белыми чугунами. Рассмотрим процесс кристаллизации и вторичных превращений на примере сплава 3 (рис.3.8,б). От температуры несколько ниже линии ликвидус  $AC$  до  $1147^{\circ}\text{C}$ , из жидкости выделяются кристаллы аустенита. Аустенит кристаллизуется в форме дендритов, которые, как правило, обладают химической неоднородностью, называемой дендритной ликвацией. Состав жидкой фазы меняется по линии ликвидус, стремясь к эвтектическому, а твердой фазы по линии солидус, стремясь к составу точки  $E$ . При температуре  $1147^{\circ}\text{C}$  концентрация жидкой фазы достигает точки  $C$  (4,3 % С), а аустенита – точки  $E$  (2,14 % С). Из жидкости эвтектического состава образуется смесь аустенита и цементита – ледебурит  $1147^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, ниже эвтектической линии  $ECF$  структура характеризуется избыточными кристаллами аустенита и эвтектикой (ледебуритом). При охлаждении от  $1147$  до  $727^{\circ}\text{C}$  состав аустенита непрерывно меняется по линии  $ES$ , при этом выделяется цементит вторичный. Он выделяется как из избыточного аустенита, так и из аустенита эвтектики. Однако, если вторичный цементит, выделяющийся из аустенита эвтектики, присоединяется к эвтектическому цементиту, то из избыточного аустенита он выделяется в виде оболочек вокруг дендритов аустенита и представляет собой самостоятельную структурную составляющую. Ниже  $727^{\circ}\text{C}$  весь аустенит: и избыточный, и тот, который входит в состав эвтектики – претерпевает эвтектоидное превращение, при котором образуется перлит. Таким образом, ниже  $727^{\circ}\text{C}$  структура доэвтектического белого чугуна характеризуется следующими структурными составляющими: избыточным перлитом (бывшим аустенитом), ледебуритом превращенным, состоящим из перлита и цементита и цементитом вторичным

Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода от 4,3 до 6,67 % (сплав 4, рис.3.8,б) называются заэвтектическими белыми чугунами. Кристаллизация начинается при температуре  $t_{13}$  несколько ниже линии  $CD$  выпадением цементита, который называется цементитом первичным. Состав жидкой фазы меняется по линии  $CD$ , состав твердой остается без изменения. При температуре  $1147^{\circ}\text{C}$  заканчивается



кристаллизация избыточных кристаллов. Жидкость состава точки  $C$  (4,3 %  $C$ ) согласно эвтектической реакции образует ледебурит. При дальнейшем охлаждении изменение состава аустенита по линии  $ES$  приводит к выделению цементита вторичного, который присоединяется к эвтектическому. Температура  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  является температурой эвтектоидного равновесия аустенита, феррита и цементита. Ниже этой температуры аустенит превращается в перлит. Таким образом, ниже  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  структура заэвтектического белого чугуна характеризуется избыточными кристаллами цементита первичного (белые пластины) и превращенным ледебуритом, состоящим из темных полосок или зернышек перлита и светлой основы – цементита.

### ***3.5 Влияние постоянных примесей на структуру и свойства стали***

Примеси в сталях и чугунах делят на 4 группы:

1. Постоянные примеси: кремний, марганец, сера, фосфор;
2. Скрытые примеси – газы (азот, кислород, водород) – попадают в сталь при выплавке.
3. Специальные примеси – специально вводятся в сталь для получения заданных свойств. Примеси называются легирующими элементами, а стали – легированные сталями.
4. Случайные примеси (мышьяк, свинец, олово, сурьма) – химические элементы, которые не добавлялись специально в сталь, в том числе, косвенно, например, при раскислении стали, и которые нельзя удалить простыми металлургическими процессами.

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

Содержание кремния не превышает 0,35...0,4 %. Кремний, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает проч-

ность стали, особенно повышается предел текучести. Но наблюдается некоторое снижение пластичности, что снижает способность стали к вытяжке.

Содержание фосфора в стали 0,025...0,045 %. Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности и предел текучести, но снижает пластичность и вязкость. Располагаясь вблизи зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладоломкость, уменьшает работу распространения трещин. Повышение содержания фосфора на каждую 0,01 % повышает порог хладоломкости на 20...25°C.

Содержание серы в сталях составляет 0,025...0,06 %. Сера – вредная примесь, попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – сульфид серы FeS, которое, в свою очередь, образует с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 988 °C. Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, а так же предел выносливости. Она ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

Углерод – важнейший компонент сталей и чугунов, от количества которого зависят ее свойства. С увеличением содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита – очень твердой и хрупкой фазы (твердость цементита HB = 800 больше твердости феррита HB = 80). Поэтому прочность и твердость стали растут с повышением содержания углерода, а пластичность и вязкость, наоборот, снижаются.

Азот и кислород находятся в стали в виде хрупких неметаллических включений: окислов (FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) нитридов (Fe<sub>2</sub>N), в виде твердого раствора или в свободном состоянии, располагаясь в дефектах (раковинах, трещинах).

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

Легирующие элементы оказывают влияние на электронную и дислокационную структуру металла. Замещая атомы в решетке основы, они создают барьеры ближнего действия на пути движущихся дислокаций. Плотность дислокаций, их подвижность, значения констант диффузии и упругости, условия протекания фазовых превращений и в конечном итоге прочность твердого раствора связаны с легированием. Легированные стали характеризуются лучшим комплексом физико-химических (в том числе и механических) свойств по сравнению с углеродистыми: они отличаются повышенной жаростойкостью, сопротивлением коррозии, значительной ударной вязкостью, высоким пределом текучести, большим электросопротивлением и т. д. Оптимальные механические свойства обеспечиваются формированием в результате термической обработки дисперсных структур и более мелкого зерна.

1. Все легирующие элементы, растворяясь в феррите, аустените, цементите, а также образуя химические соединения (карбиды, интерметаллиды), упрочняют сталь. Пластичность и вязкость при этом падают.

2. Никель одновременно повышает и прочность, и вязкость.

3. Алюминий, кремний, хром и медь повышают коррозионную стойкость стали.

4. Алюминий, ванадий, молибден, вольфрам, титан измельчают зерно и тем самым повышают вязкость стали.

5. Марганец и кремний способствуют получению крупнозернистой структуры в стали.

6. Молибден и вольфрам устраняют хрупкость стали при отпуске.

7. Молибден, вольфрам, ванадий, титан повышают жаропрочность стали, а также ее красностойкость (твердость при высоких температурах).

8. Никель, марганец, медь, азот являются аустенизаторами, т. е. растворяясь в железе, расширяют область аустенита.

9. Карбидообразующие элементы: хром, молибден, ванадий, вольфрам и другие, растворяясь в железе, расширяют область феррита и поэтому называются ферритизаторами.

10. Ванадий, титан, ниобий и цирконий образуют труднорастворимые в аустените карбиды. Способствуют измельчению зерна, снижению порога хладноломко-

сти, уменьшают чувствительность стали к концентраторам напряжений (но только при микролегировании).

11. Все легирующие элементы, за исключением кобальта, кремния, алюминия, понижают температуру изотермического распада аустенита и способствуют увеличению количества остаточного аустенита при закалке. Они же уменьшают критическую скорость закалки стали, увеличивают прокаливаемость стали.

### ***3.6. Получение чугунов***

Выплавку чугуна осуществляют в печах шахтного типа – доменных печах. Сущность процесса получения чугуна в доменных печах заключается в восстановлении оксидов железа, входящих в состав руды оксидом углерода, водородом и твёрдым углеродом, выделяющимся при сгорании топлива.

При выплавке чугуна решаются задачи:

- Восстановление железа из окислов руды, науглероживание его и удаление в виде жидкого чугуна определённого химического состава.

- Оплавление пустой породы руды, образование шлака, растворение в нём золы кокса и удаление его из печи.

### ***3.7. Получение сталей***

Основными исходными материалами для производства стали являются переплавленный чугун и стальной лом (скрап). Сущность производства стали заключается в снижении содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе плавки.

Процессы выплавки стали осуществляют в три этапа.

**Первый этап** – расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла, при этом происходит окисление железа, образование оксида железа и окисление примесей: кремния, марганца и фосфора.

Наиболее важная задача этапа – удаление фосфора.

**Второй этап** – кипение металлической ванны (основной этап). При повышении температуры более интенсивно протекает реакция окисления углерода, происходящая с поглощением теплоты:  $FeO + C = CO + Fe - Q$

Для окисления углерода в металл вводят незначительное количество руды, окалины и вдувают кислород. Также создаются условия для удаления серы.

**Третий этап** – раскисление стали заключается в восстановлении оксида железа, растворённого в жидком металле.

При плавке повышение содержания кислорода в металле необходимо для окисления примесей, но в готовой стали кислород – вредная примесь, так как понижает механические свойства стали, особенно при высоких температурах.

Сталь раскисляют двумя способами: осаждающим и диффузионным.

Осаждающее раскисление осуществляется введением в жидкую сталь растворимых раскислителей (ферромарганца, ферросилиция, алюминия), содержащих элементы, которые обладают большим сродством к кислороду, чем железо.

В результате раскисления восстанавливается железо и образуются оксиды:  $MnO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , которые имеют меньшую плотность, чем сталь, и удаляются в шлак.

В зависимости от степени раскисления выплавляют стали: спокойные, кипящие, полуспокойные.

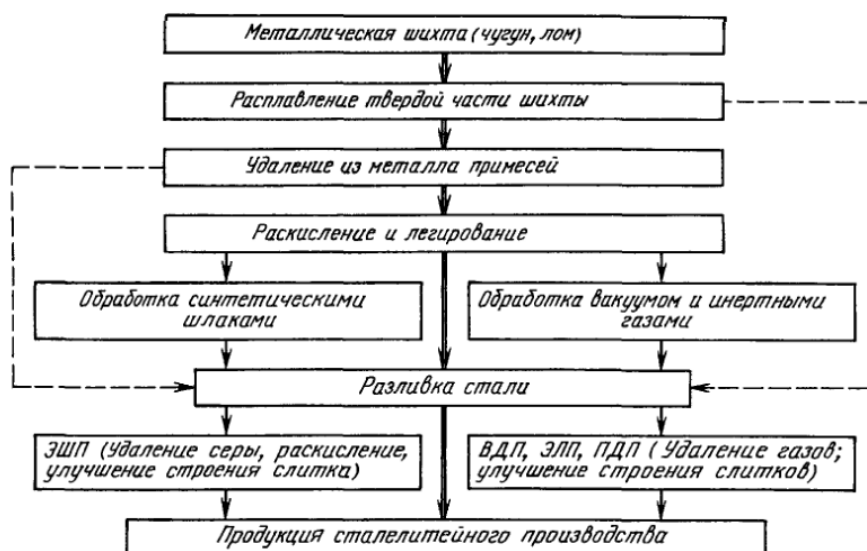


Рис.3.11. Схема технологических процессов производства стали.

Легирование стали осуществляется введением ферросплавов или чистых металлов в необходимом количестве в расплав. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду меньше, чем у железа ( $Ni$ ,  $Co$ ,  $Mo$ ,  $Cu$ ), при плавке и разливке не

окисляются, поэтому их вводят в любое время плавки. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду больше, чем у железа (Si, Mn, Al, Cr, V, Ti), вводят в металл после раскисления или одновременно с ним в конце плавки, а иногда в ковш.

Чугун переделывается в сталь в различных по принципу действия металлургических агрегатах: мартеновских печах, кислородных конвертерах, электрических печах.

### ***3.7.1. Производство стали в мартеновских печах***

Основной принцип действия - вдувание раскаленной смеси горючего газа и воздуха в печь с низким сводчатым потолком, отражающим жар вниз, на расплав. Нагревание воздуха происходит посредством продувания его через предварительно нагретый регенератор (специальная камера, в которой выложены каналы огнеупорным кирпичом). Нагрев регенератора до нужной температуры осуществляется очищенными горячими печными газами. Происходит попеременный процесс: сначала нагрев регенератора продувкой печных газов, затем продувка холодного воздуха.

Продолжительность плавки составляет 3...6 часов, для крупных печей – до 12 часов. Готовую плавку выпускают через отверстие, расположенное в задней стенке на нижнем уровне пода. Отверстие плотно забивают малоспекающимися огнеупорными материалами, которые при выпуске плавки выбивают. Печи работают непрерывно, до остановки на капитальный ремонт – 400...600 плавков.

В основных мартеновских печах выплавляют стали углеродистые конструкционные, низко- и среднелегированные (марганцовистые, хромистые), кроме высоколегированных сталей и сплавов, которые получают в плавильных электропечах.

В кислых мартеновских печах выплавляют качественные стали. Применяют шихту с низким содержанием серы и фосфора.

Стали содержат меньше водорода и кислорода, неметаллических включений. Следовательно, кислая сталь имеет более высокие механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, её используют для особо ответственных деталей: коленчатых валов крупных двигателей, роторов мощных турбин, шарикоподшипников.

### ***3.7.2. Производство стали в кислородных конвертерах***

Кислородно-конвертерный процесс – выплавка стали из жидкого чугуна в конвертере с основной футеровкой и продувкой кислородом через водоохлаждаемую фурму. Кислородный конвертер – сосуд грушевидной формы из стального листа, футерованный основным кирпичом. Вместимость конвертера – 130...350 т жидкого чугуна. В процессе работы конвертер может поворачиваться на  $360^{\circ}$  для загрузки скрапа, заливки чугуна, слива стали и шлака. Шихтовыми материалами кислородно-конвертерного процесса являются жидкий передельный чугун, стальной лом (не более 30%), известь для наведения шлака, железная руда, а также боксит  $Al_2O_3$  и плавиковый шпат  $CaF_2$  для разжижения шлака.

В кислородных конвертерах выплавляют стали с различным содержанием углерода, кипящие и спокойные, а также низколегированные стали. Легирующие элементы в расплавленном виде вводят в ковш перед выпуском в него стали. Плавка в конвертерах вместимостью 130...300 т заканчивается через 25...30 минут.

### ***3.7.3 Производство стали в электропечах***

Плавильные электропечи имеют преимущества по сравнению с другими плавильными агрегатами:

- а) легко регулировать тепловой процесс, изменяя параметры тока;
- б) можно получать высокую температуру металла,
- в) возможность создавать окислительную, восстановительную, нейтральную атмосферу и вакуум, что позволяет раскислять металл с образованием минимального количества неметаллических включений.

В металлургических цехах используют электропечи с основной футеровкой, а в литейных – с кислой.

В основной дуговой печи осуществляется плавка двух видов:

- а) на шихте из легированных отходов (методом переплава),
- б) на углеродистой шихте (с окислением примесей).

*Плавку на шихте из легированных отходов* ведут без окисления примесей. После расплавления шихты из металла удаляют серу, наводя основной шлак, при необходимости науглероживают и доводят металл до заданного химического состава. Проводят диффузионное раскисление, подавая на шлак измельченные ферросили-

ций, алюминий, молотый кокс. Так выплавляют легированные стали из отходов машиностроительных заводов.

*Плавку на углеродистой шихте* применяют для производства конструкционных сталей. В печь загружают шихту: стальной лом, чушковый передельный чугун, электродный бой или кокс, для науглероживания металлов и известь.

В дуговых печах выплавляют высококачественные углеродистые стали – конструкционные, инструментальные, жаростойкие и жаропрочные. Под действием электромагнитного поля индуктора при плавке происходит интенсивная циркуляция жидкого металла, что способствует ускорению химических реакций, получению однородного по химическому составу металла, быстрому всплыванию неметаллических включений, выравниванию температуры.

В индукционных печах выплавляют сталь и сплавы из легированных отходов *методом переплава*, или из чистого шихтового железа и скрапа с добавкой ферросплавов *методом сплавления*.

После расплавления шихты на поверхность металла загружают шлаковую смесь для уменьшения тепловых потерь металла и уменьшения угара легирующих элементов, защиты его от насыщения газами.

В основных печах выплавляют высококачественные легированные стали с высоким содержанием марганца, титана, никеля, алюминия, а в печах с кислой футеровкой – конструкционные, легированные другими элементами стали.

В печах можно получать стали с незначительным содержанием углерода и безуглеродистые сплавы, так как нет науглероживающей среды.

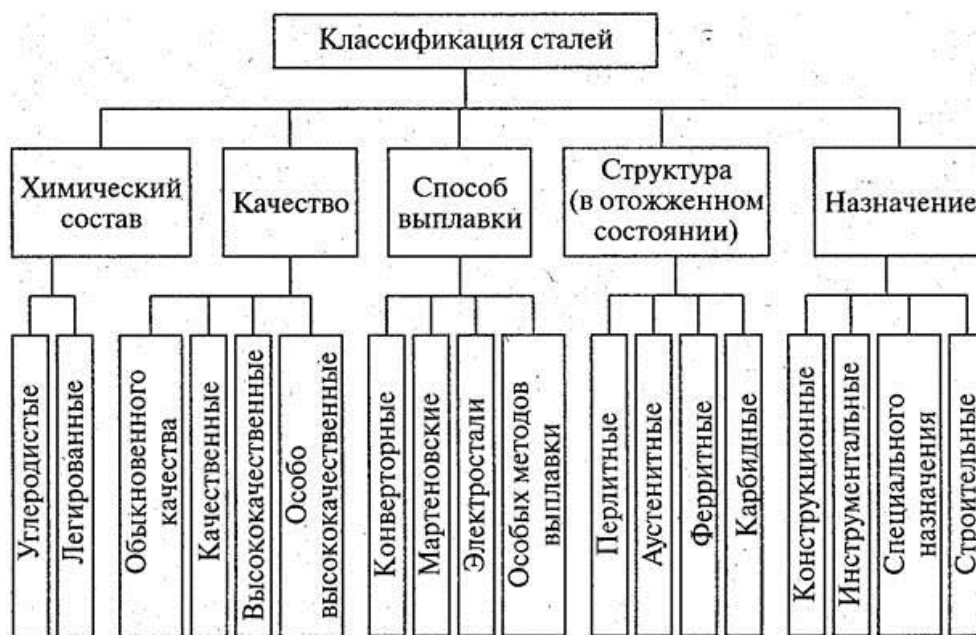
При вакуумной индукционной плавке индуктор, тигель, дозатор шихты и изложницы, помещают в вакуумные камеры. Получают сплавы высокого качества с малым содержанием газов, неметаллических включений и сплавы, легированные любыми элементами.

### ***3.8 Принципы классификации и маркировки сталей***

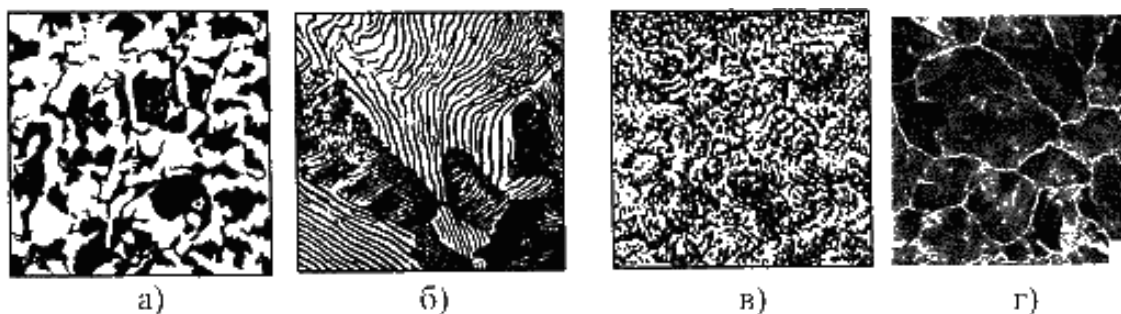
**По структуре в отожженном (равновесном) состоянии различают следующие группы сталей:**



- 1) техническое железо с содержанием углерода менее 0,02 %. Структура сплава однофазная – феррит ;
- 2) доэвтектоидные стали с содержанием углерода от 0,02 до 0,8%. Структура сплавов состоит из феррита и перлита, причем с увеличением содержания углерода доля перлита в структуре возрастает;
- 3) эвтектоидная сталь с содержанием углерода 0,8%. Структура стали – перлит: чередующиеся пластинки феррита и цементита;
- 4) заэвтектоидные стали с содержанием углерода от 0,8 до 2,14 %.



Структура состоит из участков перлита, разделенных хрупкими цементитными оболочками.



*Рис. 3.16. Микроструктуры сталей:*

а – доэвтектоидная сталь (феррит+перлит); б – эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит); в – эвтектоидная сталь (зернистый перлит); г – заэвтектоидная сталь (перлит + вторичный цементит).

**Классификация сталей по качеству** лежит в основе маркировки сталей. Качество стали – это металлургическое понятие. Оно определяется содержанием вредных примесей: серы, фосфора и газов. Чем этих примесей меньше, тем качество стали выше. Дальнейшая обработка, механическая или термическая, не способна изменить качество стали, сложившееся в процессе выплавки. Выделяют четыре группы сталей (таблица 3.1).

Таблица 3.1

Классификация стали по качеству.

Обыкновенного качества, маркировка «Ст»	Качественные, маркировка «Сталь»	Высококачественные, маркировка «А» в конце марки	Особо высококачественные, маркировка «Ш» в конце марки
ГОСТ 380-94 ≤ 0,05 % S ≤ 0,04 % P	ГОСТ 1050-88 ≤ 0,04 % S ≤ 0,035 % P	≤ 0,025 % S и P	≤ 0,015 % S и P

Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-88) маркируют буквенно-цифровым кодом и по гарантии свойств, при поставке подразделяют на три группы: А, Б и В. Буквы «Ст» означают сталь, цифры от 0 до 6 – условный номер марки, например Ст0, Ст2 и т. д.

**Стали группы А.** Поставляются с определёнными регламентированными механическими свойствами. Их химический состав не регламентируется. Эти стали применяются в конструкциях, узлы которых не подвергаются горячей обработке — ковке, горячей штамповке, термической обработке и т. д. В связи с этим механические свойства горячекатаной стали сохраняются.

**Стали группы Б.** Поставляются с определённым регламентированным химическим составом, без гарантии механических свойств. Эти стали применяются в изде-

лиях, подвергаемых горячей обработке, технология которой зависит от их химического состава, а конечные механические свойства определяются самой обработкой.

**Стали группы В.** Поставляются с регламентируемыми механическими свойствами и химическим составом. Эти стали применяются для изготовления сварных конструкций. Их свариваемость определяется химическим составом, а механические свойства вне зоны сварки определены в состоянии поставки. Такие стали применяют для более ответственных деталей.

#### **По степени раскисления:**

Степень раскисления определяется содержанием кремния (Si) в этой стали. По степени раскисления углеродистые стали обыкновенного качества делятся на: спокойные (СП) – не менее 0,12 % (Si), полуспокойные (ПС) – 0,07-0,12 % (Si), кипящие (КП) – не более 0,07 % (Si)

Раскислением называют последний этап выплавки стали, когда в расплав добавляют более активные, чем железо, металлы с целью отнять у железа кислород, восстановить его из оксида FeO. Марганец и кремний вводятся в жидкую сталь в виде ферросплавов – ферромарганца и ферросилиция, алюминий – в виде металла технической чистоты.

**Маркировка конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества:** Ст1кп2; БСт2пс; ВСт3Гпс; Ст4-2; ... ВСт6сп3. Буква перед маркой показывает группу стали. Сталь группы А буквой не обозначается. Ст — показывает, что сталь обыкновенного качества. Первая цифра — номер по ГОСТу (от 0 до 6). Буква Г после первой цифры — повышенное содержание марганца (Mn) (служит для повышения прокаливаемости стали). сп; пс; кп – степень раскисления стали (Для стали группы А отсутствие обозначения подразумевает «сп»). Вторая цифра — номер категории стали (от 1 до 6 — основные механические свойства). Сталь 1-й категории цифрой не обозначается.

**Качественными углеродистыми сталями** являются стали марок: Сталь08; Сталь10; Сталь15 ...; Сталь78; Сталь80; Сталь85. Сталь – слово «Сталь» указывает, что данная углеродистая сталь качественная. Цифра – указывает на содержание в стали углерода (С) в сотых долях процента.

**Стали повышенной обрабатываемости (автоматные)** являются стали марок: например А12, А20, А35, где вначале стоит буква «А». Имеют высокое содержание серы и фосфора, а также они, специально легированны селеном (Se), теллуrom (Te) или свинцом (Pb). Указанные элементы способствуют повышению скорости резания, уменьшают усилие резания и изнашиваемость инструмента, улучшают чистоту и размерную точность обработанной поверхности, облегчают отвод стружки из зоны резания и т. д.

**Легированные конструкционные стали.** Две цифры в начале маркировки указывают на конструкционные стали. Это содержание в стали углерода в сотых долях процента. Буква без цифры – определённый легирующий элемент с содержанием в стали менее 1 %. (А – азот, Р – бор, Ф – ванадий, Г – марганец, Д – медь, К – кобальт, М – молибден, Н – никель, С – кремний, Х – хром, П – фосфор, Ч – редкоземельные металлы, В – вольфрам, Т – титан, Ю – алюминий, Б – ниобий)

Буква и цифра после неё — определённый легирующий элемент с содержанием в процентах (цифра). Буква А в конце маркировки – указывает на высококачественную сталь. Например 38Х2Н5МА – это среднелегированная высококачественная хромоникелевая конструкционная сталь. Химический состав: углерод – около 0,38 %; хром – около 2 %; никель – около 5 %; молибден – около 1 %.

### ***3.9 Применение сталей***

Применение **углеродистых конструкционные стали** обыкновенного качества: Ст1; Ст2 – проволока, гвозди, заклёпки. Ст3; Ст4 – крепёжные детали, фасонный прокат; Ст5; Ст6 – слабонагруженные валы, оси.

Стали **углеродистые качественные** Сталь08, Сталь08КП, Сталь08ПС относятся к мягким сталям, применяемым чаще всего в отожжённом состоянии для изготовления деталей методом холодной штамповки – глубокой вытяжки. Стали марок Сталь10, Сталь15, Сталь20, Сталь25 обычно используют как цементируемые, а высокоуглеродистые Сталь60 ... Сталь85 – для изготовления пружин, рессор, высокопрочной проволоки и других изделий с высокой упругостью и износостойкостью. Сталь30 ... Сталь50 и аналогичные стали с повышенным содержанием марганца

Сталь30Г, Сталь40Г, Сталь50Г применяют для изготовления самых разнообразных деталей машин.

**Стали повышенной обрабатываемости** используют в массовом производстве для изготовления деталей на станках-автоматах. Стали с повышенным содержанием серы и фосфора обладают пониженными механическими свойствами и их используют для изготовления малонагруженных неответственных деталей.

**Легированные конструкционные стали** применяются для наиболее ответственных и тяжелонагруженных деталей машин. Практически всегда эти детали подвергаются окончательной термической обработке — закалке с последующим высоким отпуском в районе 550-680 °С (улучшение), что обеспечивает наиболее высокую конструктивную прочность.

Хромистые, обладающие хорошей твердостью, прочностью, сравнительно недорогие. К ним относятся стали марок 15Х, 20Х, 30Х, 45Х, боросодержащие 40ХР, с цирконием 40ХЦ.

Марганцевые, например 15Г, 20Г, 40Г, 45Г2, отличающиеся износоустойчивостью. Особенно износоустойчива сталь марки Г13, которую применяют для гусениц "тракторов, железнодорожных стрелок.

Кремнистые и хромокремнистые (33ХС, 55ХС), обладающие высокой твердостью и упругостью; применяются для пружин, рессор.

Хромованадиевые (45ХФ, 40ХФА) особо прочные, плотные, хорошо противостоящие истиранию, применяемые для автомобильных деталей, осей, валов.

Хромомолибденовые (20ХМА, 30ХМА) очень прочные, хорошо сваривающиеся, штампуемые, используемые для осей, роторов.

Хромомарганцевокремнистые стали — хромансиль (25ХГСА, 30ХГСА), которые заменяют хромомрлибде - новую сталь и значительно дешевле ее.

Хромоникелевые (12Х2Н4А, 20ХН3А), очень прочные и пластичные; применяются для изготовления коленчатых валов, поршней, деталей турбин.

Хромоникелевольфрамовые, хромоникелеванадиевые и другие стали марок 40ХН2МА, 13Х3НФА, 45ХН2МФА; применяют для высоконагруженных деталей машин: зубчатых колес, шатунов, Деталей турбин и т. д.

**Стали конструкционные теплоустойчивые.** К теплоустойчивым конструкционным относятся стали, используемые в энергетическом машиностроении для изготовления котлов, сосудов, паронагревателей, паропроводов, а также в других отраслях промышленности для работы при повышенных температурах. Рабочие температуры теплоустойчивых сталей достигают 600-650 °С, причём детали из них должны работать без замены длительное время (до 10000-20000 ч.).

При давлениях 6 МПа и температурах до 400 °С используются углеродистые котельные стали (12К, 15К, 18К, 20К). Для деталей энергоблоков, работающих при давлении до 25.5 МПа и температурой до 585 °С применяются стали, легированные хромом, молибденом, ванадием. Содержание углерода 0.08-0.27 %. Термообработка этих сталей заключается в закалке или нормализации с обязательным высоким отпуском.

**Стали конструкционные подшипниковые.** Особенностью эксплуатации подшипников являются высокие локальные нагрузки. В связи с этим к чистоте стали предъявляются чрезвычайно высокие требования, особенно по неметаллическим включениям карбидной неоднородности. Обеспечение высокой статической грузоподъёмности достигается применением в качестве материала для подшипников заэвтектонидных легированных хромом сталей, обработанных на высокую твёрдость. Сталь ШХ4, ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ.

**Стали конструкционные рессорно-пружинные.** Общее требование, предъявляемое к рессорно-пружинным сталям, — обеспечение высокого сопротивления малым пластическим деформациям (предел упругости) и релаксационной стойкости (сопротивление релаксации напряжений). 14ХН4А, 38Х2Н5М, 20ХН3А, 50ХФА, 55С2. Пружины, рессоры, упорные шайбы, тормозные ленты, фрикционные диски, шестерни, фланцы, корпуса подшипников, зажимные и подающие цанги и другие детали, к которым предъявляются требования повышенной износостойкости, и детали, работающие без ударных нагрузок.

**Инструментальные стали** предназначены для изготовления инструментов 4-х типов: режущих, измерительных, штампов холодного деформирования и штампов горячего деформирования. Важнейшее условие работоспособности инструментов —

высокая износостойкость, а так же высокая твердость (в 2-3 раза большей, чем у обрабатываемого материала), прочностью и теплостойкостью (т.е. способностью сохранять высокую твердость при повышенных температурах, т.к. происходит нагрев режущей кромки). Для сталей теплостойкость определяется сопротивлением разупрочнению при отпуске (т.е. максимальная температура, до которой сохраняется мартенситная структура). Для штампов важна ударная вязкость. У10А, У11, У11А, У8ГА, 55Х7ВСМФ, 5ХВ2СФ, 5ХНВ, 5ХНВС, 6Х3МФС, 8ХФ, 9Г2Ф,....

**Ферритные криогенные стали.** Широкое распространение в качестве материала для криогенной техники получили ферритные низкоуглеродистые железоникелевые стали, содержание 3,5-9 % Ni и менее 0,1 % углерода. Эти стали более технологичны и имеют более высокие прочностные свойства по сравнению с хромоникелевыми аустенитными сталями. Никель, уменьшая энергию взаимодействия дислокаций с атомами примесей внедрения в кристаллической решетке железа, эффективно снижает порог хладноломкости и повышает работу развития трещины в условиях вязкого разрушения. Чем больше содержание никеля в стали, тем ниже ее рабочая температура Ni = 3-4 % T = -120 °С, Ni=6-9 % T=-196 °С. Практическое применение для изготовления криогенного оборудования получили стали: ОН6 (6-7 % Ni, 0,03-0,06 % С) и ОН9 (8,5-9,5 %Ni, 0,06-0,07 % С). Эти стали обычно подвергают нормализации (Н) и двойной нормализации с отпуском (ДНО). Термическая обработка обычно указывается в маркировке: ОН9Н, ОН9ДНО.

### ***3.10. Принципы классификации и маркировки чугунов и их применение***

Чугуны маркируют двумя буквами, обозначающих разновидность чугуна, и двумя цифрами, соответствующими минимальному значению временного сопротивления  $\sigma_B$  при растяжении в МПа. Серый чугун обозначают буквами "СЧ" (ГОСТ 1412-85), высокопрочный - "ВЧ" (ГОСТ 7293-85), ковкий - "КЧ" (ГОСТ 1215-85), чугун с вермикулярным графитом – ЧВГ (ГОСТ 28384 -89): СЧ 10 - серый чугун с пределом прочности при растяжении 100 МПа, ВЧ 70 - высокопрочный чугун с пределом прочности при растяжении 700 МПа, КЧ 35 - ковкий чугун с пределом прочности при растяжении 350 МПа, ЧВГ 40 – чугун с вермикулярным графитом с пределом прочности при растяжении 400 МПа.

Антифрикционные чугуны (ГОСТ 1585-85) – обозначаются первыми буквами АЧ и порядковым номером, например, АЧС-1 – антифрикционный серый чугун с порядковым номером марки 1, АЧВ-2 – антифрикционный высокопрочный чугун с порядковым номером марки 2, АЧК-2 – антифрикционный ковкий чугун с порядковым номером марки 2.

Жаростойкие чугуны (ГОСТ 7769 – 82) – обозначаются буквами ЖЧ, после которых идет буквенное обозначение легирующих элементов (Н – никель, Д – медь и др., аналогично обозначению легирующих элементов в стали) и цифры, указывающие концентрацию элементов в %; например, ЖЧХ-2,5 – жаростойкий чугун хромистый с содержанием Cr 2,5%, ЖЧС-5,5 – жаростойкий чугун, легированный Si с содержанием 5,5%.

**Серые чугуны** – это литейный чугун. Серый чугун поступает в производство в виде отливок. Серый чугун является дешевым конструкционным материалом. Он обладает хорошими литейными свойствами, хорошо обрабатывается резанием, сопротивляется износу, обладает способностью рассеивать колебания при вибрационных и переменных нагрузках. Свойство гасить вибрации называется демпфирующей способностью. Демпфирующая способность чугуна в 2-4 раза выше, чем стали. Высокая демпфирующая способность и износостойкость обусловили применение чугуна для изготовления станин различного оборудования, коленчатых и распределительных валов тракторных и автомобильных двигателей и др. Выпускают следующие марки серых чугунов (в скобках указаны числовые значения твердости HB) :СЧ 10(143-229), СЧ 15 (163-229), СЧ 20 (170-241), СЧ 25 (180-250), СЧ 30(181-255), СЧ 35 (197-269), СЧ 40 (207-285), СЧ 45 (229-289). Серые чугуны применяют для изготовления деталей, работающих с небольшими нагрузками, в основном, на сжатие. Это могут быть колонны, опоры, корпуса, станины, крышки, суппорты, зубчатые колеса, канализационные трубы, ванны, батареи.

**Высокопрочный чугун.** Механические свойства высокопрочного чугуна позволяют применять его для изготовления деталей машин, работающих в тяжелых условиях, вместо поковок или отливок из стали. Такие чугуны выдерживают значительные растягивающие нагрузки, поэтому применяются для более ответственных



деталей: кузнечно-прессового оборудования, станин прокатных станов, коленчатых валов автомобилей, поршней, вентилях, крыльчаток, распределительных валиков. Отливки из высокопрочного чугуна широко используются в автомобиле- и тракторостроении вместо более дорогих стальных поковок. Их можно подвергать упрочняющей термообработке. Низкое содержание серы и фосфора и небольшие пределы содержания других химических элементов обеспечиваются тем, что такой чугун выплавляют не в вагранке, а в электрической печи. После термической обработки механические свойства чугуна получаются весьма высокими:  $\sigma_B = 620-650$  МПа;  $\delta = 8-12$  % и твердость HB = 192-240.

**Ковкий чугун** – условное название более пластичного чугуна по сравнению с серым. Ковкий чугун никогда не куется. Отливки из ковкого чугуна получают длительным отжигом отливок из белого чугуна с перлитно-цементитной структурой. Толщина стенок отливки не должна превышать 40-50 мм. При отжиге цементит белого чугуна распадается с образованием графита хлопьевидной формы. У отливок с толщиной стенок более 50 мм при отжиге будет образовываться нежелательный пластинчатый графит. Ковкий чугун широко применяют в автомобильном, сельскохозяйственном и текстильном машиностроении. Из него изготавливают детали высокой прочности, способные воспринимать повторно-переменные и ударные нагрузки и работающие в условиях повышенного износа, такие как картер заднего моста, тормозные колодки, ступицы, пальцы режущих аппаратов сельскохозяйственных машин, шестерни, крючковые цепи и др.

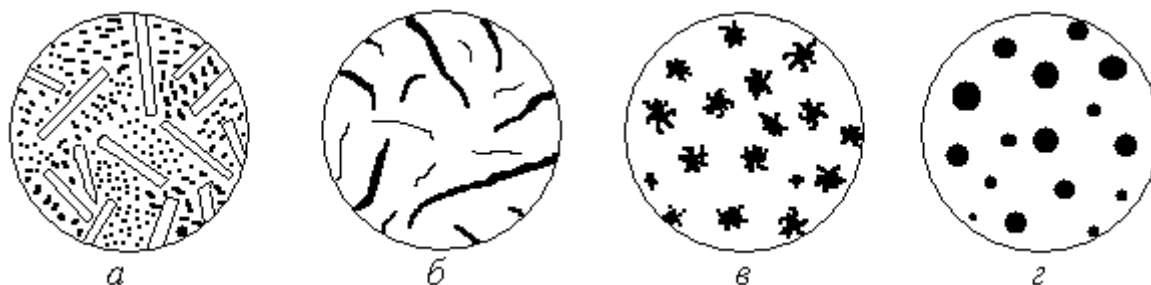


Рис.3.17. Виды чугунов:

*а* – белый заэвтектический; *б* – серый; *в* – ковкий; *г* – высокопрочный  
(*б*, *в*, *г* – структура металлической основы не показана).

## ТЕМА 4. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ

### 4.1. Превращения при термической обработке стали

Основой для изучения термической обработки стали является диаграмма железо – углерод (область сталей).

При рассмотрении разных видов термообработки железо-углеродистых сплавов (стали, чугуны) используются следующие условные обозначения критических точек этих сплавов (рис. 4.1).

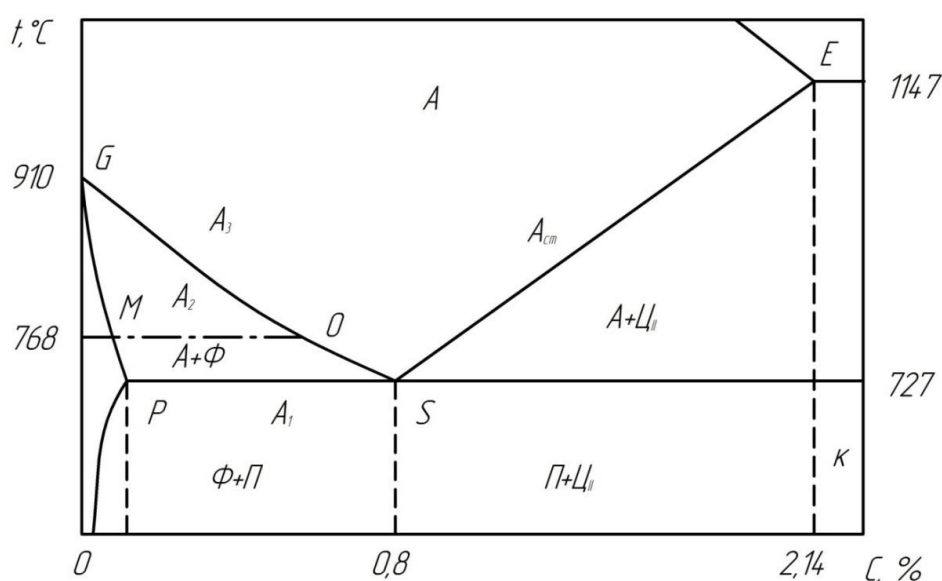


Рис. 4.1. Обозначение критических точек стали.

Температуры равновесных превращений (критические точки) принято обозначать буквой *A* с соответствующим индексом:

Эвтектоидную температуру (линия PSK) обозначают  $A_1$  (727 °C), температуру магнитного превращения  $A_2$  (точка Кюри 768 °C), температуру линии GS –  $A_3$ , температуру полиморфного превращения  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\delta$  –  $A_4$ , температуру линии SE –  $A_{cm}$ .

Вследствие гистерезиса температуры превращений при нагреве всегда выше соответствующих температур при охлаждении, поэтому введена дополнительная индексация – при нагреве – индекс *c*, при охлаждении – индекс *r*.

Четыре основных превращения при термической обработке в стали:

1. Превращение **перлита в аустенит**, протекающее выше точки  $A_1$ :  $(\alpha + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \gamma)$
2. Превращение **аустенита в перлит**, протекающее ниже  $A_1$ :  $(\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C})$
3. Превращение **аустенита в мартенсит**:  $\gamma \rightarrow M$
4. Превращение **мартенсита в перлит** (в феррито-карбидную смесь):  $M \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ .

С увеличением степени переохлаждать (т.е. чем ниже температура изотермической выдержки) растет число зародышей новых зерен, число феррито-цементитных пластинок увеличивается, а их размеры и расстояния между ними сильно сокращаются. Образуются механические смеси феррита и цементита – перлит, сорбит, троостит. Они различаются только по степени дисперсности. При этом повышается их твердость.

При медленном охлаждении со скоростью  $V_1$  (вместе с печью) образуется сравнительно грубая пластинчатая смесь – обычный перлит. Твердость по Роквеллу  $\text{HRC} = 10$ ;  $\sigma_{\text{в}} = 600$  МПа (рис. 4.2).

При охлаждении на воздухе со скоростью  $V_2$  образуется **сорбит**, который отличается от перлита более тонкодисперсным строением  $\text{HRC} = 20$ ;  $\sigma_{\text{в}} = 850$  МПа.

При охлаждении в масле со скоростью  $V_3$  образуется еще более высокодисперсный **троостит**,  $\text{HRC} = 30$ ;  $\sigma_{\text{в}} = 1100$  МПа.

Лучшую пластичность и вязкость, а вместе с тем и прочность, имеет структура сорбита. Стали с сорбитной структурой более износостойкие. Они используются для изготовления нагруженных изделий. Стали со структурой троостита обладают значительной упругостью и используются для изготовления пружин, рессор.

При переохлаждении до температуры  $200^\circ\text{C}$  скорость диффузии атомов железа и углерода практически равна нулю, следовательно, при этой температуре скорость превращения переохлажденного аустенита в перлит также равна нулю. Скорость диффузии мала, превращение носит бездиффузионный характер и весь углерод, растворенный в решетке аустенита, остается в решетке феррита.

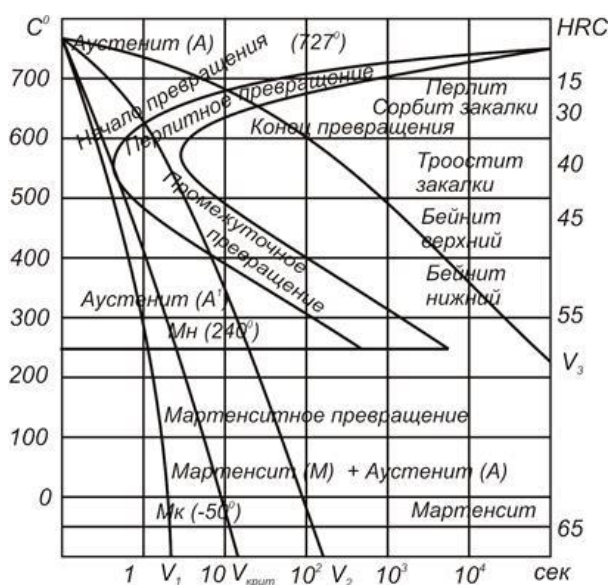


Рис.4.2. Диаграмма изотермического превращения аустенита.

В результате образуется пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе – **мартенсит**. При этом ОЦК-решетка сильно искажается, превращаясь из кубической в тетрагональную. Мартенсит – очень твердая и хрупкая структура. Свойства зависят от количества углерода:  $HRC = 55-65$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 1600 - 2200$  МПа.

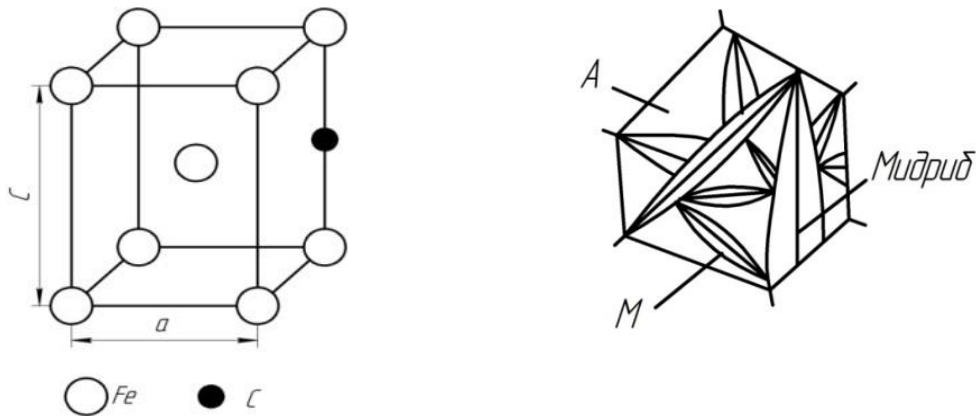


Рис.4.3. Структура мартенсита.

В интервале температур между перлитным и мартенситным превращениями происходит промежуточное превращение – **бейнитное**. В отличие от перлитного превращения, протекающего по диффузионному механизму, бейнитное превращение протекает как по диффузионному, так и по бездиффузионному (мартенситному) механизму. Поэтому бейнитное превращение иначе называют промежуточным. При таких степенях переохлаждения диффузия атомов возможна, а диффузия атомов железа практически проходить не может. Результатом распада аустенита в бейнитной

области является структура бейнита – пересыщенного углеродом феррита, имеющего игольчатое строение. Обладает благоприятным сочетанием свойств прочности ( $\sigma_{\text{в}} = 1350 \text{ МПа}$ ), твердости ( $\text{HRC} = 40$ ) и пластичности.

#### 4.2 Отжиг

**Отжиг** – термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла до определенной температуры, выдержки и охлаждении с отключенной печью (т.е. с минимально возможной скоростью, порядка 50-100 град/час).

Цели отжига – снижение твердости и улучшение обрабатываемости стали, изменение формы и величины зерна, выравнивание химического состава, снятие внутренних напряжений. Для стали применяют различные виды отжига: полный, неполный, диффузионный, рекристаллизационный, низкий, отжиг на зернистый перлит, нормализация.

Различают 2 вида отжига:

Отжиг 1-го рода – без фазовой перекристаллизации – применяется для приведения металла в более равновесное структурное состояние: снимается наклёп, понижается твёрдость, возрастают пластичность и ударная вязкость, снимаются внутренние напряжения (в связи с процессами отдыха и рекристаллизации).

Отжиг 2-го рода осуществляется с фазовой перекристаллизацией: металл нагревается до температуры выше критических точек, затем следует выдержка различной продолжительности и последующее сравнительно медленное охлаждение.

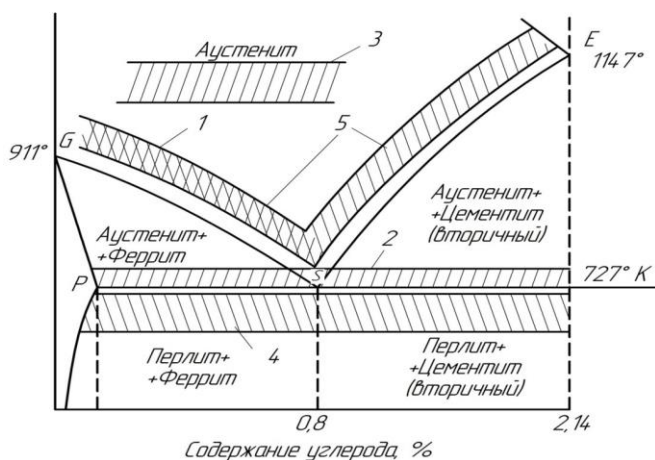


Рис. 4.4. Области температур нагрева для различных видов отжига:

- 1 - полный отжиг; 2 - неполный отжиг; 3 -диффузионный отжиг;
- 4 - рекристаллизационный отжиг; 5 – нормализация

**Полный отжиг** осуществляется главным образом после горячей механической обработки и литья углеродистых и легированных сталей. Основной целью полного отжига кованых и литых деталей является измельчение зерна, смягчение металла для улучшения его обработки режущим инструментом и устранение внутренних напряжений. Это достигается нагревом, не превышающим 20-40°C верхней критической точки  $A_{C3}$ , и медленным охлаждением. Время выдержки при температуре отжига обычно складывается из времени, необходимого для полного прогрева всей массы деталей, и времени, нужного для окончания структурных превращений. В результате полного отжига деталей, изготовленных из доэвтектоидной углеродистой стали, получается пластинчатый перлит, а зерна феррита располагаются в виде разорванной сетки.

**Неполный отжиг.** Если до отжига структура стали была удовлетворительная, но сталь обладает повышенной твердостью и в деталях имеются внутренние напряжения, то целесообразнее применять неполный отжиг. Детали при таком отжиге нагревают при температуре, немного превышающей точку  $A_{C1}$ . Неполный отжиг изменяет структуру перлита, однако, структура феррита может оставаться неизменной. Внутренние напряжения снимаются полностью, и сталь получает пониженную твердость и хорошо обрабатывается механически.

**Рекристаллизационный отжиг** предназначен для снятия наклепа и внутренних напряжений после холодной деформации и подготовки структуры к дальнейшему деформированию. Нагрев необходимо осуществлять выше температуры рекристаллизации, которая для железа составляет 450 °C. Обычно, для повышения скорости рекристаллизационных процессов применяют значительно более высокие температуры, которые, однако, должны быть ниже линии PSK диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C. Поэтому температура нагрева для рекристаллизационного отжига составляет 650-700 °C. В результате рекристаллизационного отжига образуется однородная мелкозернистая структура с небольшой твердостью и значительной вязкостью. Этот вид отжига применяют в основном для малоуглеродистых сталей, предназначенных для холодной деформации.

**Диффузионный отжиг** (гомогенизация) заключается в нагреве стали до 1000-1100°C, длительной выдержке (10-15 часов) при этой температуре и последующем медленном охлаждении. В результате диффузионного отжига происходит выравнивание неоднородности стали по химическому составу. Благодаря высокой температуре нагрева и продолжительной выдержке получается крупнозернистая структура, которая может быть устранена последующим полным отжигом. Этот вид отжига применяют в основном для легированных сталей.

**Нормализация** – это термическая операция, которая заключается в нагреве стали до аустенитного состояния (выше  $A_3$  или выше  $A_{cm}$ ) и охлаждение на воздухе. При нормализации охлаждение проводят на спокойном воздухе. При этом скорость охлаждения составляет 200–250 град/час. Нормализация – более дешевая операция, чем отжиг, т.к. печи используют только для нагрева и выдержки при температуре нормализации. Охлаждение осуществляют на воздухе, вне печи. Цель нормализации – устранить дефекты предыдущих операций горячей обработки (литья иковки), или подготовить структуру к последующим технологическим операциям (например, обработке резанием или закалке).

**Изотермический отжиг.** В заводской практике с целью экономии времени чаще проводят изотермический отжиг. Сталь нагревают выше критической точки, быстро охлаждают до температуры, лежащей на 50-100 град ниже равновесной точки  $A_1$  и выдерживают до полного распада аустенита. Поскольку температуру контролировать легче, чем скорость охлаждения, такой отжиг дает более стабильные результаты. В настоящее время изотермический отжиг применяют чаще, чем отжиг с непрерывным охлаждением, особенно для легированных сталей, так как это сокращает продолжительность операции.

**Патентирование.** Патентирование применяется для получения высокопрочной канатной проволоки. При этом сталь нагревают до температуры превышающей  $A_3$  на 1050-2000 °С, а затем охлаждают до 450-550 °С в соляной или свинцовой ванне и наматывают на барабан. После такого отжига сталь имеет структуру мелкозернистого троостита. Затем сталь подвергается волочению, что позволяет получить предел прочности до 2000-3000 МПа.

### 4.3 Закалка

**Закалка** – это термическая операция, которая заключается в нагреве сплава до температуры выше критических точек и охлаждении с высокой скоростью. В зависимости от того происходит ли в сплаве полиморфное превращение, цель закалки различна. Если в сплаве не протекает полиморфного превращения, закалкой можно зафиксировать при комнатной температуре высокотемпературное структурное состояние. Если в сплаве протекает полиморфное превращение, что происходит, например, в углеродистой стали, закалку применяют для получения другой структуры – мартенсита.

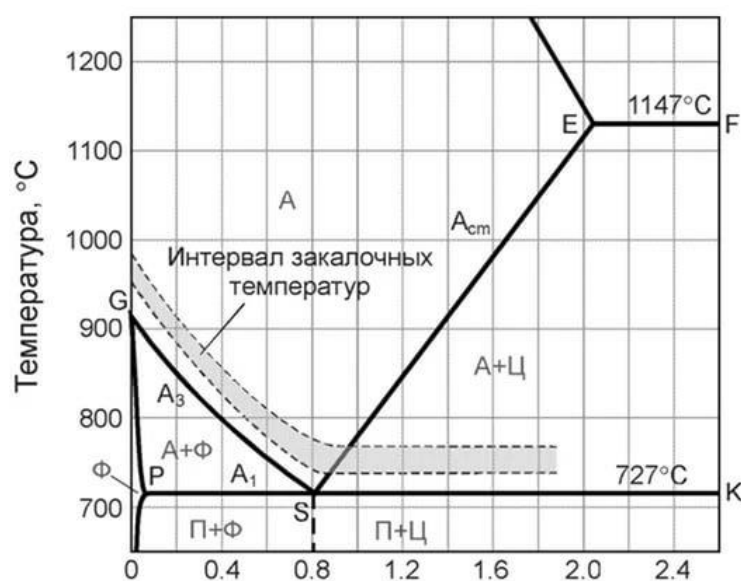


Рис. 4.5. Температурный интервал нагрева под закалку.

В зависимости от температуры нагрева, закалку подразделяют на полную и неполную.

В случае **полной закалки** (рис. 4.6.) материал нагревают на 30-50°C выше линии GS для доэвтектоидной стали и эвтектоидной, и выше линии SK для заэвтектоидной стали. При этом сталь приобретает структуру аустенит и аустенит + цементит, затем при быстром охлаждении преимущественно образуется мартенсит (для доэвтектоидной стали) и мартенсит +цементит (для заэвтектоидной стали).

При **неполной закалке** (рис.4.7.) производят нагрев выше линии PSK диаграммы на 30 - 50°C, что приводит к образованию феррита + аустенита (для доэв-



тектоидной стали) и аустенита (для заэвтектоидной стали). При быстром охлаждении будет образован феррит + мартенсит (для доэвтектоидной стали) и аустенит + мартенсит (для заэвтектоидной стали). Неполная закалка, как правило, применяется для инструментальных сталей.

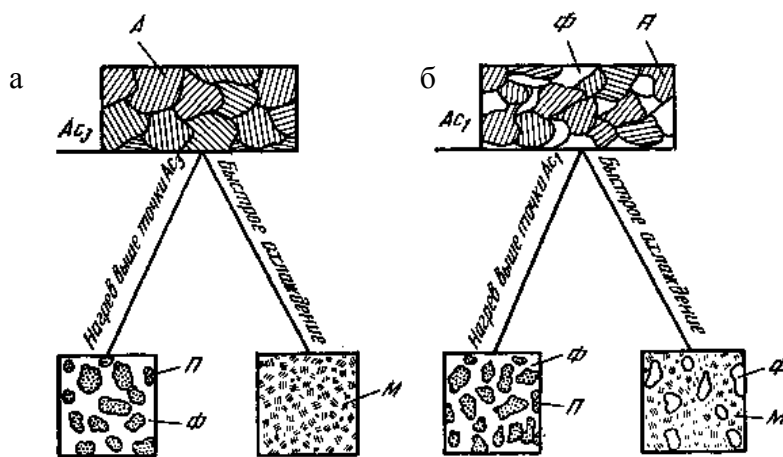


Рис. 4.6. Структурные превращения в доэвтектоидной стали при закалке:  
а – полная закалка; б – неполная закалка.

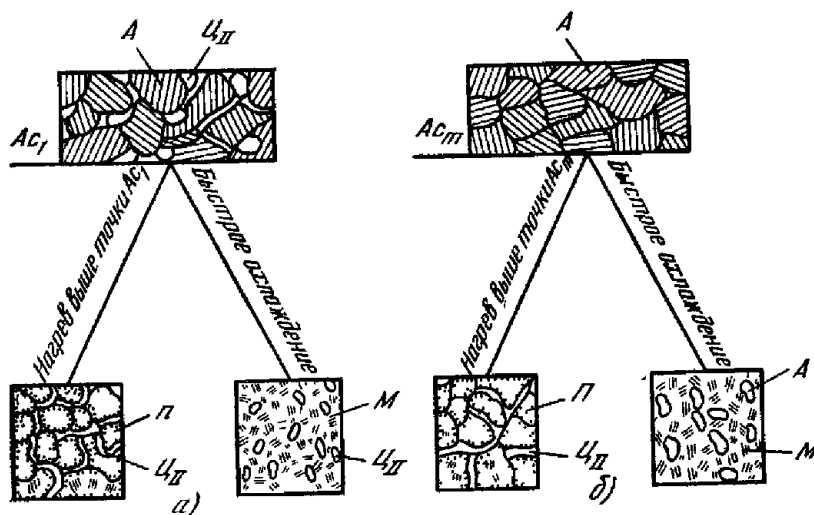


Рис. 4.7. Структурные превращения в заэвтектоидной стали при закалке: а – неполная закалка; б – полная закалка.

**Закалка в одном охладителе** – нагретую до определённых температур деталь погружают в закалочную жидкость, где она остаётся до полного охлаждения. Этот

способ применяется при закалке несложных деталей из углеродистых и легированных сталей.

**Прерывистая закалка в двух средах** — этот способ применяют при закалке высокоуглеродистых сталей. Деталь сначала быстро охлаждают в быстро охлаждающей среде (например в воде), а затем в медленно охлаждающей (масло).

**Струйчатая закалка** заключается в обрызгивании детали интенсивной струей воды и обычно её применяют тогда, когда нужно закалить часть детали. При этом способе не образуется паровая рубашка, что обеспечивает более глубокую прокаливаемость, чем простая закалка в воде. Такая закалка обычно производится в индукторах на установках ТВЧ.

**Ступенчатая закалка** — закалка, при которой деталь охлаждается в закалочной среде, имеющей температуру выше мартенситной точки для данной стали. При охлаждении и выдержке в этой среде закаливаемая деталь должна приобрести во всех точках сечения температуру закалочной ванны. Затем следует окончательное, обычно медленное, охлаждение, во время которого и происходит закалка, то есть превращение аустенита в мартенсит.

**Изотермическая закалка.** В отличие от ступенчатой при изотермической закалке необходимо выдерживать сталь в закалочной среде столько времени, чтобы успело закончиться изотермическое превращение аустенита.

#### **4.4 Отпуск**

Закаленная сталь очень твердая, но она хрупкая, у нее низкая пластичность и большие внутренние напряжения. В таком состоянии изделие не работоспособно, не надежно в эксплуатации. Поэтому для уменьшения внутренних напряжений и повышения пластичности после закалки всегда следует еще одна операция термической обработки, которая называется отпуск.

**Отпуск** — заключительная термическая операция, состоящая в нагреве закаленного сплава ниже температуры фазового превращения (для углеродистой стали это ниже температуры  $A_{c1}$ ), выдержке и охлаждении на воздухе. Целью отпуска является получение более равновесной структуры, снятие внутренних напряжений,

повышение вязкости и пластичности, создание требуемого комплекса эксплуатационных свойств стали.

**Низкий отпуск** углеродистой стали проводят при температуре 150-200 °С. При этом из мартенсита выделяется часть избыточного углерода с образованием мельчайших карбидных частиц. Но поскольку скорость диффузии здесь еще мала, некоторая часть углерода в мартенсите остается.

Целью низкого отпуска является снижение внутренних напряжений и некоторое уменьшение хрупкости при сохранении высокой твердости, прочности и износостойкости изделий. Структура стали в результате низкого отпуска представляет собой мартенсит отпуска или мартенсит отпуска и вторичный цементит. Закалке и низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент, а так же изделия, которые должны обладать высокой твердостью и износостойкостью. Закалке и низкому отпуску подвергают стали с 0,7-1,3 %С.

**Средний отпуск** проводят при температуре 350-450 °С. При этом из мартенсита уже выделяется весь избыточный углерод с образованием цементитных частиц. Тетрагональные искажения кристаллической решетки железа снимаются, она становится кубической. Мартенсит превращается в феррито-цементитную смесь с очень мелкими, в виде иголок, частицами цементита, которая называется трооститом отпуска.

При этом происходит некоторое снижение твердости при значительном увеличении предела упругости и улучшения сопротивляемости действию ударных нагрузок. Закалку и средний отпуск проводят для пружин, рессор, ударного инструмента. Средний отпуск применяют для стали с содержанием углерода 0,5–0,65 %.

**Высокий отпуск** проводят для среднеуглеродистых сталей с содержанием углерода 0,3-0,45 %. Он заключается в нагреве закаленной стали до температуры 550-650 °С. Цель высокого отпуск – достижение оптимального сочетания прочности, пластичности и вязкости. Структура стали после закалки и высокого отпуска – сорбит отпуска (мелкая смесь феррита и зернистого цементита, более крупного по сравнению с цементитом тростита отпуска). Термическая обработка, состоящая из закалки и последующего высокого отпуска, является основным видом термической

обработки изделий из конструкционных сталей, подвергающихся в процессе эксплуатации действию высоких напряжений и ударных, часто знакопеременных нагрузок. Закалку с последующим высоким отпуском называют улучшением.

## **ТЕМА 5. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА**

### ***5.1 Общая характеристика химико-термической обработки стали***

Химико-термической обработкой (ХТО) называют поверхностное насыщение стали химическими элементами путем их диффузии в атомарном состоянии из внешней среды при высокой температуре. В ходе данных процессов обязательно изменяется химический состав, микроструктура и свойства поверхностных слоев изделий. При ХТО обрабатываемые детали нагревают в каких-либо химически активных средах. Основные параметры обработки – температура нагрева и продолжительность выдержки. ХТО обычно осуществляется за длительное время. Температуру процесса выбирают конкретно для каждого вида обработки.

Первостепенными процессами любого вида ХТО являются диссоциация, абсорбция и диффузия. Диссоциация – разложение химического соединения для получения химических элементов в более активном, атомарном состоянии. Абсорбция – поглощение поверхностью детали атомов указанных неметаллов. Диффузия – перемещение абсорбированного элемента вглубь изделия. Скорости всех трех процессов обязательно должны согласовываться друг с другом. Для абсорбции и диффузии необходимо, чтобы насыщающий элемент взаимодействовал с основным металлом с образованием либо твердого раствора, либо химического соединения, так как при отсутствии этого химико-термическая обработка невозможна.

Скорость диффузии атомов в решетку железа неодинакова и зависит от состава и строения образующихся фаз. При насыщении углеродом или азотом, составляющими с железом твердые растворы внедрения, диффузия протекает быстрее, чем при насыщении металлами, образующими твердые растворы замещения. Поэтому в данном случае, используют более высокие температуры и длительное время обработки.

При определении толщины диффузионного слоя, полученного при насыщении стали тем или иным элементом, обычно указывается не полная его величина с измененным составом, а только глубина до определенной твердости или структуры (эффективная толщина).

Основными видами химико-термической обработки стали являются цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование и диффузионная металлизация.

## **5.2 Цементация**

**Цементацией** называется процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом с целью повышения работоспособности деталей металлургических машин (всевозможные шестерни, зубчатые муфты и втулки, пальцы), испытывающих в процессе эксплуатации статические, динамические и переменные нагрузки и подверженных изнашиванию. При этом изделия, состоящие из низкоуглеродистых сталей (0,10 - 0,25% С), нагревают в среде, содержащей углерод. Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом при цементации, сохраняла высокую вязкость после закалки.

Цементацию осуществляют в твёрдом карбюризаторе (угол, углекислый барий, углекислый натрий), в газовом карбюризаторе, в кипящем слое, в растворах электролитов, в пастах.

Изделия, подлежащие цементации в твёрдом карбюризаторе, после предварительной очистки укладывают в емкости, куда добавляют карбюризатор. После этого емкость помещают в печь. Смесь нагревают до 900-950°С. Продолжительность выдержки при рабочей температуре зависит от требуемой толщины слоя и размеров ящика. Для получения пласта глубиной 0,7-1,5 мм выдержка составляет 6-15 ч.

В основе процесса цементации лежат следующие химические превращения. В емкости имеется воздух, кислород которого при высокой температуре взаимодействует с углеродом карбюризатора, образуя СО. При этом угарный газ в присутствии железа разлагается по уравнению:  $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{ат}}$ . Углерод, выделяющийся в результате этой реакции, в момент его образования является атомарным и диффундирует в аустенит:  $\text{C}_{\text{ат}} \rightarrow \text{F}_\gamma \rightarrow \text{F}_\gamma(\text{C})$  - аустенит. Процесс твердого науглероживания имеет ряд недостатков: большое время (много вспомогательных операций),

трудно поддается автоматизации и контролю; требуется большое количество обслуживающего персонала; оборудование очень громоздкое.

Наиболее распространенным способом является газовое науглероживание, имеющее ряд преимуществ. В ходе него можно точно получить заданную концентрацию углерода в слое; сокращается длительность процесса, так как отпадает необходимость прогрева ящиков, наполненных малотеплопроводным карбюратором; обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процессов и значительно упрощается последующая термическая обработка изделий. При нем детали нагревают в атмосфере углеродсодержащих газов. Для этого используют природные или искусственные газы. Метан - более активный карбюратор. Основной реакцией, обеспечивающей науглероживание при газовой цементации, является диссоциация оксида углерода, образующегося в процессе окисления углеводородных газов, и диффузия формирующегося атомарного углерода в аустенит по вышеуказанным реакциям.

После цементации изделия приобретают мелкозернистую структуру заэвтектоидной стали, состоящей из перлита и вторичного цементита. Однако непосредственно по окончании процесса науглероживания детали не получают требуемых свойств. Это достигается термической обработкой. После цементации изделия подвергают закалке с отпуском. Это обеспечивает получение в поверхностном слое изделий высокой твердости при сохранении мягкой вязкой сердцевины, возникновение напряжений сжатия, увеличивающих предел выносливости и долговечность деталей.

### ***5.3 Азотирование***

Азотированием называется ХТО, при которой поверхностный слой детали насыщается азотом. Процесс осуществляется в атмосфере аммиака, который при нагревании разлагается. При этом увеличиваются не только твердость и износостойкость, а также предел выносливости и коррозионная стойкость в таких средах, как воздух, вода, пар и т. д.

Азотирование широко применяется для зубчатых колес, цилиндров мощных двигателей, многих деталей станков и других изделий.

В зависимости от условий работы деталей различают две разновидности процесса: для повышения поверхностной твердости и износостойкости, а также для улучшения коррозионной стойкости (антикоррозионное).

Продолжительность процесса в обоих случаях зависит от требуемой толщины азотированного слоя. Чем выше температура насыщения, тем ниже твердость и больше его глубина. Снижение твердости насыщаемого слоя связано с коагуляцией частиц нитридов легирующих элементов.

В первом случае детали насыщают азотом при 500- 520°C, процесс продолжается от 24 до 90 ч. Содержание азота в поверхностном слое достигает 10- 12 %, толщина - порядка 0,3-0,6 мм, твердость доходит до 1000-1200 единиц HV. Для ускорения процесса его проводят двух ступенчато: вначале при 500-520°C, а затем при 560-600°C. Последующее охлаждение осуществляют вместе с печью в потоке аммиака.

Во втором случае азотирование проводят при 650-700 °C. Скорость диффузии увеличивается, продолжительность процесса сокращается до нескольких часов. На поверхности изделий образуется слой толщиной 0,01 - 0,03 мм, который обладает высокой коррозионной стойкостью. Для сокращения длительности процесса применяют азотирование в плазме тлеющего разряда.

Механизм процесса в обоих способах описывается следующими превращениями, включающими диссоциацию аммиака и поглощение атомарного азота железом:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}_{\text{ат}}$  и  $\text{N}_{\text{ат}} \rightarrow \text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\alpha(\text{N}) \rightarrow \gamma'(\text{Fe}_4\text{N}) \rightarrow \varepsilon(\text{Fe}_{2-3}\text{N})$ .

Азотированный слой на железе состоит из нитридной зоны, представляющей собой смесь твердых растворов на основе нитридов железа  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  ( $\varepsilon$ , 8,0 - 11,2 %  $\text{N}_2$ ) и  $\text{Fe}_4\text{N}$  ( $\gamma'$ , 5,60-5,95 %  $\text{N}_2$ ), и подслоя азотистого феррита ( $\alpha$ ), в котором при охлаждении выделяется нитрид железа  $\text{Fe}_4\text{N}$ . При азотировании выше 600 °C между нитридным слоем и  $\alpha$ -фазой образуется слой азотистого аустенита ( $\gamma$ ).

Азотирование – завершающая операция при изготовлении деталей. Они подвергаются ей после окончательной механической и термической обработок – закалки с высоким отпуском. После этого в изделиях формируется структура сорбита, ко-

торая сохранится в его сердцевине и после насыщения и обеспечит ему повышенную прочность и вязкость. Такие детали имеют серый цвет.

Сравнивая цементацию и азотирование, можно отметить следующее: продолжительность первого вида обработки меньше; упрочненный слой получается более глубоким и допускает большие удельные давления при эксплуатации; твердость науглероженного слоя в 1,5 - 2,0 раза меньше и сохраняется при нагреве только до 180 – 125°C, в то время как азотированный удерживает твердость до 600-650°C.

#### ***5.4 Нитроцементация***

Нитроцементацией называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при 840-860°C в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4-10 ч. Основное назначение нитроцементации – повышение твердости, износостойкости и предела выносливости стальных деталей.

Для нитроцементации легированных сталей рекомендуется использовать контролируемую эндотермическую атмосферу, к которой добавляют от 1,5 до 5,5 % объемн. необработанного природного газа и 1,0-3,5 % объемн. NH<sub>3</sub>.

После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже вслед за повторным нагревом, применяют и ступенчатую закалку. Далее за закалкой проводят отпуск при 160-180 °C.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя должна состоять из мелкокристаллического мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25- 30 % остаточного аустенита. Твердость поверхности после закалки и низкого отпуска HRC 58-60. Высокое содержание остаточного аустенита обеспечивает хорошую прирабатываемость.

#### ***5.5. Цианирование***

Цианированием называют также совместное насыщение поверхности стали углеродом и азотом вследствие окисления расплавленных цианистых солей при нагревании до 820-960 °C.

Для получения слоя небольшой толщины (0,15 - 0,35 мм) процесс проводят при 820-860°C в ваннах, содержащих 20-25% цианистого натрия – NaCN, 25-50%



хлорида натрия – NaCl и 25-50% кальцинированной соды – Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Продолжительность насыщения определяется требуемой глубиной слоя и составляет 30-90 минут. Вслед за цианированием закалку выполняют непосредственно из цианистой ванны и дают низкотемпературный отпуск (180-200°C). Твердость цианированного слоя после термической обработки – HRC 58-62; толщина 0,15-0,30 мм. Этот вид цианирования применяют для мелких деталей.

Для получения слоя большой глубины (0,5-2,0 мм) цианирование проводят при 930 – 960°C в ванне, содержащей 8% NaCN, 82% BaC<sub>4</sub> и 10% NaCl. Зеркало ванны покрывают графитом для предупреждения больших потерь тепла и угара цианистых солей. Продолжительность выдержки изделий в ванне составляет 1,5 - 6,0 ч. При высоких температурах сталь с поверхности в большей степени насыщается углеродом (до 0,8 - 1,2% C) и в меньшей степени - азотом (0,2 - 0,3% N). После цианирования детали охлаждают на воздухе, а затем закаливают с нагревом в соляной ванне или печи и подвергают низкотемпературному отпуску. Структура цианированного слоя после закалки такая же, как цементованного. Глубокое цианирование применяют на некоторых заводах вместо цементации.

### ***5.6 Сульфазотирование***

Сульфазотирование применяют для улучшения приработки, повышения износостойкости и противозадирных свойств, особенно при «сухом» и «полусухом» трении, применяют сульфазотирование, т. е. одновременное насыщение поверхности изделий азотом, углеродом и серой. Сульфазотированный слой имеет строение аналогичное азотированному слою, но на поверхности образуется тонкая оксисульфидная пленка. Процесс осуществляется при 560-620°C в атмосфере аммиака и эндогаза с добавками серосодержащих веществ H<sub>2</sub>S, CS<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>.

### ***5.7 Борирование***

Борирование стали - химико-термическая обработка насыщением поверхностных слоев стальных изделий бором при температурах 900...950 °C. Цель борирования – повышение твердости, износостойкости и некоторых других свойств стальных изделий. Диффузионный слой толщиной 0,05...0,15 мм, состоящий из боридов FeB и Fe<sub>2</sub>B, обладает весьма высокой твердостью, стойкостью к абразивному изнашива-

нию и коррозионной стойкостью. Борирование применяют также для повышения износостойкости поверхностного слоя стального изделия при повышенных температурах. Изделия, подвергшиеся борированию, обладают повышенной до 800°C окалинстойкостью и теплостойкостью до 900-950°C. Твердость борированного слоя в сталях перлитного класса составляет 15 000-20 000 МПа. Борирование особенно эффективно для повышения стойкости (в 2...10 раз) штампового инструмента.

Борирование может осуществляться в твердых, жидких (электролизное и безэлектролизное борирование) и газообразных средах. При борировании в твердых средах, обрабатываемые детали помещаются в герметически закрываемые контейнеры, называемые боризаторами. Процесс твердофазного борирования, или борирования в порошковых средах, осуществляется в вакууме или водородных средах. Жидкофазное (безэлектролизное) борирование применяют только в случае обработки деталей сложной конфигурации. Углерод в процессе борирования оттесняется от поверхности стали и в насыщаемой зоне образуется зона сплошных боридов, химический состав форма и структура которых напрямую зависит от химического состава стали. Углерод и легирующие элементы уменьшают глубину насыщаемого слоя, чем выше их содержание, тем меньше глубина борирования.

### ***5.8 Силицирование***

Силицирование – поверхностное или объёмное насыщение материала кремнием. Силицирование производится обработкой материала в парах кремния, образующихся при высокой температуре над кремниевой засыпкой, или в газовой среде, содержащей хлорсиланы, восстанавливающиеся водородом по реакции:  $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 = \text{Si} + 4\text{HCl}$ .

Температура процесса насыщения 1100-1200° С. Глубина слоя достигает 0,8 мм, но продолжительность около суток. При насыщении из газовой фазы используют газ  $\text{SiH}_4$  – моносилан. Силицирование чаще проводят одновременно с насыщением детали Al, этот процесс называют алюмосилицированием. В результате на поверхности образуется FeAl интерметаллидная фаза и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Силицирование применяют для деталей, работающих при повышенных температурах. Внедрение Si в поверхность позволяет повысить жаростойкость, т.е. сопротивление поверхности

окислению при высоких температурах. После силицирования на поверхности образуется окислы кремния, либо двойные окислы - шпинели  $\text{FeSi}_2\text{O}_4$ ,  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ .

### ***5.9 Диффузионное насыщение металлами***

Насыщение поверхности стали металлами в ходе их высокотемпературной химико-термической обработки в соответствующих насыщающих средах называется диффузионной металлизацией. Целью такого вида химико-термической обработки является изменение состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали путем введения в него таких металлов, как хром, алюминий, титан, цинк, вольфрам, ванадий, ниобий. Диффузионная металлизация, в зависимости от насыщающего элемента, может проводиться в диапазоне температур от 400 до 1700 °С. Техническое исполнение этого вида химико-термической обработки может быть выполнено рядом способов, например, погружением обрабатываемой детали в ванну с расплавленным металлом. Такой метод применим в том случае, когда температура плавления насыщающего металла оказывается значительно ниже температуры плавления стали. В случае необходимости насыщения поверхности стальной детали тугоплавкими металлами возможно использование погружения детали в расплавы солей насыщающего металла, насыщения поверхности детали из газовой фазы, состоящей галогенидов диффундирующего металла, диффузии насыщающего металла путем его испарения из сублимированной фазы, метода циркуляционного газового насыщения и т. п.

Подобная химико-термическая обработка может включать в себя как насыщение только одним элементом, например, насыщение поверхности детали хромом – хромирование, насыщение алюминием – алитирование, так и насыщение группой металлов – хромоалитирование (одновременное насыщение хромом и алюминием), одновременное насыщение поверхности детали металлами и неметаллами – карбохромирование (насыщение поверхности углеродом и хромом). Совместное насыщение поверхности детали рядом элементов может проводиться как одновременно, так и последовательно.

В результате диффузионной металлизации в поверхности стали возникают слои высоколегированных твердых растворов диффундирующих элементов в желе-

зе, создавая принципиально иные физико-химические свойства поверхностных, защитных слоев изделия. Изделие, поверхность которого обогащена этими элементами, приобретает ценные свойства, к числу которых относятся высокая жаростойкость, коррозионная стойкость, повышенная износостойкость и твердость.

**Алитирование** – насыщение поверхности стали алюминием. В результате алитирования сталь приобретает высокую окислительную стойкость (до 850-900 °С), так как в процессе нагрева на поверхности алитированных изделий образуется плотная пленка окиси алюминия  $Al_2O_3$ , предохраняющая металл от окисления.

Алитирование проводят в порошкообразных смесях (50% Al или ферроалюминия, 49%  $Al_2O_3$  и 1%  $NH_4Cl$  или 99% ферроалюминия и 1%  $NH_4Cl$ ) при температуре 1000°С и выдержке в течение 8ч. В результате образуется слой в 0,4-0,5 мм, насыщенный алюминием. Алитирование выполняется также металлизацией в расплаве алюминия (с 6-8% железа) при 700-800°С с последующей выдержкой и др. методами.

Структура алитированного слоя представляет собой твердый раствор алюминия в  $\alpha$ -железе. Твердость алитированного слоя (на поверхности) до 500 HV, износостойкость низкая. Алитирование поверхности стальных и др. металлических деталей проводится с целью повышения окислительной стойкости до температуры 1100 °С и сопротивления атмосферной коррозии. Чаще всего алитируются детали из малоуглеродистых аустенитных сталей. Алитирование применяют также при изготовлении клапанов автомобильных двигателей, лопаток и сопел газовых турбин, деталей аппаратуры для крекинга нефти и газа, труб пароперегревателей, печной арматуры и т. п. Алитирование в расплавленном алюминии широко пользуются вместо горячего цинкования (листы, проволока, трубы, строит, детали).

**Хромирование** – способ химико-термической обработки, состоящий в высокотемпературном (900-1300 °С) диффузионном насыщении поверхности обрабатываемой детали хромом в насыщающих средах с целью придания ей жаростойкости (до 800 °С), коррозионной стойкости в пресной и морской воде, растворах солей и кислот, эрозионной стойкости. Диффузионное насыщение поверхности стали хромом, также уменьшает скорость ползучести материала, повышает его сопротивление

термическим ударам. Хромирование также повышает предел выносливости стали при комнатных и повышенных температурах, что связано с возникновением в слое сжимающих напряжений.

Хромирование сталей, содержащих свыше 0,3-0,4 % С, повышает также твердость и износостойкость. Диффузионный слой, получаемый при хромировании технического железа, состоит из твердого раствора хрома в  $\alpha$ -железе. Карбидный слой обладает высокой твердостью. Твердость слоя, полученного хромированием железа, 250-300 НV, а хромированием стали – 1200 - 1300 НV.

Хромированию подвергаются стали различных классов – ферритных, перлитных и аустенитных, сталей различного назначения.

Структура хромированного слоя напрямую зависит от содержания в стали углерода. Если в малоуглеродистых сталях этот слой обычно состоит из твердого раствора замещения хрома в  $\alpha$ -железе, то в случае высокоуглеродистых материалов может образовываться слой карбидов, состоящий, например, для сталей с 0,8-1,0 % углерода из карбидов  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , расположенных в верхних слоях насыщенной хромом поверхности и карбида  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  лежащего ниже. Под карбидными слоями располагается эвтектоидный слой, состоящий из троостита и карбида  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ . Кроме углерода на параметры хромированного слоя влияет легирующий комплекс стали.

Наиболее широко применяется метод диффузионного хромирования в порошках, содержащих хром или феррохром и активные добавки в виде галогенидов аммония (контактный метод). При этом подвергающиеся химико-термической обработке детали укладываются в специальные контейнеры (ящики) с двойными крышками для повышения герметичности и подвергаются высокотемпературным нагревам в соответствующих смесях в течение 6-12 ч. Особо широкое применение этого метода объясняется простотой применяемого оборудования, отсутствием необходимости создания специальных производств и участков.

Кроме однокомпонентного насыщения поверхности стали хромом достаточно широкое применение нашли процессы совместного насыщения: углеродом и хромом – карбохромирование, хромом и кремнием – хромосилицирование, хромом и алюминием – хромоалитирование.

**Карбохромирование** – это процесс последовательного насыщения поверхности детали углеродом, а затем хромом, способствующий повышению твердости, износостойкости, жаропрочности, коррозионной стойкости материала. Режимы и способы данной химико-термической обработки соответствуют режимам и способам цементации и хромирования изделий.

**Хромосилицирование** – это одновременное насыщение поверхности детали хромом и кремнием. Температура хромосилицирования составляет, в зависимости от состава обрабатываемого материала и способа хромосилицирования, 900-1200 °С. Детали, подвергшиеся хромосилицированию, по сравнению с хромированными деталями, обладают повышенной окислительной стойкостью и кислотостойкостью, повышенным сопротивлением эрозии в области высоких температур.

**Хромоалитирование** – это совместное или последовательное насыщение поверхности детали хромом и алюминием. Температура процесса находится в пределах 900–1200 °С. Хромоалитирование проводится для создания в поверхности детали слоев с повышенной, по отношению к хромированным деталям, жаростойкостью, достигающей 900 °С, и эрозионной стойкостью. В зависимости от требований, предъявляемых к обрабатываемому изделию, возможно получение хромоалитированных слоев с различными соотношениями в концентрациях диффундирующих элементов.

**Титанирование** – процесс диффузионного насыщения поверхности сталей титаном. Насыщение осуществляется при температурах порядка 1100 °С, глубина насыщения обычно не превышает 0,3 мм. С помощью титанирования стальным деталям придается исключительно высокая коррозионная стойкость, характерная для титана главным образом в средах различных кислот. Титанирование может проводиться в твердых (порошкообразных), жидких и газообразных насыщающих средах. Процесс по технологическим и химическим особенностям близок к хромированию – так же, как при хромировании, в поверхностных слоях малоуглеродистых сталей в процессе насыщения их титаном создается а-твердый раствор титана в железе, который содержит до 30 % титана. Также возможно образование в поверхностном слое сталей интерметаллидного соединения  $TiFe_2$ . В сталях с высоким содержанием

углерода в поверхностных слоях дополнительно образуются карбидные соединения, резко повышающие твердость насыщенного слоя.

**Цинкование** – процесс диффузионного насыщения поверхности детали цинком. Химико-термические методы цинкования включают в себя горячее цинкование или цинкование погружением, цинкование в порошке цинка – шерардизация, цинкование в парах цинка. Кроме этих методов используется электролитическое цинкование, металлизация напылением и нанесение цинкосодержащих красок. Цинкование – процесс, способствующий резкому повышению коррозионной стойкости. Повышение коррозионной стойкости при цинковании стальных деталей достигается за счет двух химических процессов: цинк, по отношению к железу являясь электроположительным металлом, тормозит коррозию поверхности детали.

## **ТЕМА 6. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ**

### ***6.1 Влияние легирующих элементов на структуру и свойства легированных сталей***

*Легированными* называют стали, в которые кроме железа и углерода вводят легирующие добавки для обеспечения требуемой структуры и придания сталям специальных свойств. Основными легирующими элементами являются Mn, Si, Cr, Ni, W, Mo, Co, Ti, V, Zr, Nb и др. Большинство легирующих элементов распределяется между ферритом, аустенитом и карбидной фазой.

Твердые растворы легирующих элементов в  $\alpha$ -Fe (ОЦК решетка) называются *легированным ферритом*, а в  $\gamma$ -Fe (ГЦК решетка) – *легированным аустенитом*. Наибольшей растворимостью в феррите и аустените обладают элементы, имеющие близкие к железу размеры атомов и изоморфные кристаллические решетки. При различии в размерах атомов компонентов до 8 % образуется непрерывный ряд твердых растворов замещения, а при различии до 15...17 % наблюдается их ограниченная растворимость в твердом растворе.

Легированный феррит является основой структуры некоторых нержавеющей сталей и может быть самостоятельной фазой или (и) входить в строение перлита.

Легированный аустенит является основной структурной составляющей многих нержавеющей, жаропрочных и немагнитных сталей.

Элементы с очень малым атомным диаметром (Н, В, С, N) образуют с железом твердые растворы внедрения малой концентрации.

**Интерметаллиды** образуются только в высоколегированных сталях и сплавах со специальными свойствами, в которых они играют роль упрочнителей, однако при этом снижаются пластичность и сопротивление разрушению. В обычных массовых промышленных сталях интерметаллические соединения легирующих элементов не встречаются.

**Карбидная фаза.** По отношению к углероду легирующие элементы делятся на две группы: карбидообразующие (т. е. образующие соединения железа с углеродом) и некарбидообразующие (графитизирующие).

Легирующие элементы, расположенные в периодической системе Д. И. Менделеева справа от железа (Co, Ni, Cu, Al, Si), не образуют в стали карбидов. Эти элементы, растворяясь в феррите и аустените, образуют твердые растворы замещения. Некарбидообразующие элементы (Si, Al, Cu) понижают устойчивость цемента и других карбидов.

Карбидообразующие элементы имеют высокую степень химического сродства к углероду и образуют более прочные и устойчивые при нагревании карбиды, чем карбид железа (цементит).

К карбидообразующим относятся элементы, расположенные в периодической системе слева от железа. По степени способности к карбидообразованию эти элементы располагаются в такой последовательности: Ti, Zr, Nb, V, W, Mo, Cr, Mn. Чем дальше от железа находится легирующий элемент, тем более устойчивые карбиды он образует. Устойчивость карбидов от марганца к цирконии возрастает, а растворимость в феррите, аустените и цементите уменьшается. При небольшом содержании Mn, Cr, Mo, W они растворяются в феррите и цементите, образуя легированный феррит и легированный цементит. В *легированном цементите* –  $(Fe, Mn)_3C$ ,  $(Fe, Cr)_3C$  и др. – атомы этих элементов частично замещают атомы железа, не изменяя его структуру. При повышении содержания этих элементов (Cr, W, Mo) образуют-



ся *сложные карбиды* следующих типов –  $(Cr, Fe)_7C_3$ ,  $(Cr, Fe)_{23}C_6$ ,  $Fe_3W_3C$ ,  $Fe_3Mo_3C$  и др. Легированный цементит и сложные карбиды указанного типа при нагревании сравнительно легко растворяются в аустените.

К сильным карбидообразователям относятся Nb, V, Zr, Ti, которые практически не растворяются ни в феррите, ни в цементите. Они образуют *собственные специальные карбиды* типа NbC, VC, ZrC, TiC. Даже при очень высокой температуре эти карбиды не полностью растворяются в аустените из-за их высокой энергии межатомной связи, которую в известной степени характеризует их температура плавления ( $WC - 2900\text{ }^\circ C$ ,  $VC - 3100\text{ }^\circ C$ ,  $TiC - 3450\text{ }^\circ C$ ,  $ZrC - 3800\text{ }^\circ C$ ). Карбиды в сталях являются упрочняющей фазой из-за их высокой твердости и высокого сопротивления сдвигу. Наличие карбидообразующих элементов в стали оказывает также значительное влияние на величину зерна (уменьшая их рост при нагреве) и на процессы, происходящие при термообработке (при нагреве и при охлаждении в процессе отжига и, особенно, при закалке и отпуске). Недостатком карбидов является их хрупкость.

Легирующие элементы по-разному влияют на свойства стали.

*Марганец* повышает прочность, износостойкость, а также глубину прокаливаемости стали при термической обработке.

*Кремний* способствует получению более однородной структуры, положительно сказывается на упругих характеристиках стали. Кремний способствует магнитным превращениям, а при содержании его в количестве 15...20 % придает стали кислотоупорность.

*Хром* повышает твердость, прочность, а при термической обработке увеличивает глубину прокаливаемости, положительно сказывается на жаропрочности, жаростойкости, повышает коррозионную стойкость.

*Никель* действует так же, как и марганец. Кроме того, он повышает электросопротивление и снижает значение коэффициента линейного расширения.

*Вольфрам* уменьшает величину зерна, повышает твердость и прочность, улучшает режущие свойства при повышенной температуре.

*Молибден* действует аналогично вольфраму, а также повышает коррозионную стойкость.

Концентрация некоторых легирующих элементов может быть очень малой. В количестве до 0,1 % вводят Nb, Ti, а содержание бора обычно не превышает 0,005 %. Легирование стали, когда концентрация элемента составляет около 0,1 % и менее называют микролегированием.

Установлено, что в основном легирующие элементы повышают твердость феррита. Наиболее сильно повышают твердость сталей Mn и Si Cr и особенно Ni почти не уменьшают вязкость стали, никель наиболее резко снижает порог хрупкости. Кроме того, Ni, Cr, Mn и некоторые другие элементы, хорошо (растворимые в аустените, повышают его устойчивость при охлаждении, увеличивая прокаливаемость стали.

Особенно повышается прокаливаемость при одновременном легировании стали Cr и Ni. Поэтому возможность достижения высокой прочности, пластичности, вязкости, прокаливаемости делает Ni и Cr важнейшими легирующими элементами в конструкционных сталях.

## ***6.2 Инструментальные, конструкционные, легированные стали и стали с особыми свойствами (нержавеющие, жаропрочные, износостойкие).***

По назначению легированные стали разделяются на конструкционные, инструментальные и стали с особыми физическими свойствами (коррозионностойкие, жаропрочные, жаростойкие и др.).

**Конструкционные стали по структуре** преимущественно относятся к перлитному или мартенситному классу. По свойствам и структуре в отожженном состоянии легированные стали мало отличаются от углеродистых. Наиболее высокий комплекс механических свойств легированных сталей достигается при применении к ним термообработки. В отличие от углеродистых, легированные стали имеют более высокую прокаливаемость.

Различают следующие виды конструкционных сталей: строительные (ГОСТ 19281-89), цементуемые и улучшаемые (ГОСТ 4543-71), рессорно-пружинные (ГОСТ 14959-79).

**Строительные стали** используются для изготовления различных металлических конструкций (ферм, емкостей для хранения газообразных и жидких продуктов и т.д.). Эти стали содержат углерод в небольшом количестве (0,12-0,22%) и легирующие элементы, наиболее эффективно упрочняющие феррит (Si, Mn, Ni, Cr). Применяются они преимущественно в состоянии поставки (после горячей прокатки без термообработки).

Благодаря низкому содержанию углерода строительные стали обладают высокой пластичностью, обеспечивающей их технологичность при выполнении операций холодной гибки, а также хорошей свариваемостью. Широкое практическое применение получили стали: **09Г2, 10Г2С1, 10ХСНД** и др.

**Цементуемые легированные стали** применяются для изготовления деталей, работающих в условиях поверхностного износа и значительных механических нагрузок. Содержание углерода в этих сталях колеблется в пределах 0,10-0,25%. Термическая обработка после цементации проводится по режимам, принятым для цементуемых изделий. Легирующие элементы и низкое содержание углерода в цементуемых сталях обеспечивают после закалки и низкотемпературного отпуска высокую прочность сердцевины изделий в сочетании с достаточно высокой пластичностью. Цементуемые легированные стали: **15Х, 20Х, 20ХН, 18ХГТ, 12ХН3А, 12Х2Н4А** и др.

**Улучшаемые легированные стали** содержат от 0,2 до 0,5% углерода и до 7-8% легирующих элементов. Наиболее распространенными являются хромистые, хромокремнемарганцевые, хромоникелевые, хромоникелемолибденовые, хромоникелевомолибденованадиевые и др. Термическая обработка этих сталей состоит из закалки и высокого отпуска (550-650 °С). Структура стали после такой обработки (улучшения) – сорбит. Широкое применение получили улучшаемые стали: **40Х, 40ХНМ, 38ХН3МФА** и др.). Выбор конкретных сталей для определенного назначения производится, исходя из их прочности и прокаливаемости.

**Рессорно-пружинные легированные стали**, используемые для изготовления пружин, рессор и других подобных деталей, должны обладать высоким пределом упругости и пределом выносливости в сочетании с удовлетворительной пластично-

стью. Сочетание перечисленных свойств этих сталей достигается повышенным содержанием в них углерода (0,45-0,75%), введением в состав легирующих элементов и применением после закалки среднетемпературного отпуска (350-520 °С) для получения структуры троостита. Рессорно-пружинные легированные стали: **65Г, 60С2А, 50ХФ, 60С2Н2Ф** и др.

**Инструментальные стали** разделяются на **стали для режущего и измерительного инструмента, штамповые стали** для холодного и горячего инструмента.

**Стали для режущего инструмента** разделяются на две группы. В первую группу входят стали, не обладающие, подобно углеродистым инструментальным сталям, теплостойкостью (красностойкостью). Инструменты из таких сталей могут работать только при относительно низких скоростях резания, обуславливающих разогрев режущей кромки до температур не выше 200-250 °С. Основное назначение легирующих элементов состоит в увеличении прокаливаемости и уменьшением чувствительности к перегреву при закалке. По структуре в отожженном состоянии большинство сталей этой группы относится к эвтектоидным. Термообработка инструмента состоит из закалки и последующего низкого отпуска (140-180 °С). Твердость после термообработки должна быть не ниже 62HRC. К этой группе принадлежат стали: **Х, 9ХС, ХВГ**, и др. Стали этой группы используют также для изготовления измерительного инструмента.

**Ко второй группе относятся быстрорежущие стали**, обладающие высокой теплостойкостью (красностойкостью). Они применяются для изготовления режущих инструментов, работающих при высоких скоростях резания. Основными легирующими элементами в быстрорежущих сталях являются: вольфрам (5,5-18,5%), хром (3,8- 4,5%), ванадий (1,0-2,6%). Отдельные марки содержат повышенное количество ванадия (до 5,1%), кобальт (5-10,5%) и молибден.

Обозначение марок быстрорежущей стали состоит из букв и цифр. Первая буква «Р» означает, что сталь относится к группе быстрорежущих, цифра за буквой «Р» указывает среднее содержание вольфрама в процентах. Среднее содержание в стали элемента в процентах обозначается цифрой, следующей за буквой: например,

ванадия цифрой после буквы «Ф», кобальта – цифрой после буквы «К», молибдена – цифрой, следующей за буквой «М».

Быстрорежущие стали по структуре принадлежат к ледебуритному (карбидному классу). Термообработка инструмента из этих сталей состоит из закалки в масле с высоких температур, значительно превышающих критические точки (для более полного растворения вторичных карбидов в аустените) и последующего трехкратного отпуска при температурах, обеспечивающих высокую твердость и теплостойкость (550-570 °С).

В отдельных случаях инструменты из быстрорежущей стали после закалки подвергают обработке холодом для уменьшения количества остаточного аустенита. Твердость инструмента после термообработки составляет 63-65 HRC. Применяемые стали: **P9, P18, P12, P9Ф6, P6M5** и др.).

Для скоростной обработки металлов применяют инструмент, оснащенный **твердыми сплавами** (ГОСТ 3882-74) . По сравнению с быстрорежущими сталями рабочая температура резания инструмента из твердых сплавов может быть увеличена до 800-1000 °С.

Основой всех твёрдых сплавов являются прочные карбиды металлов, не разлагающиеся и не растворяющиеся при высоких температурах. Особенно важны для твёрдых сплавов карбиды вольфрама, титана, тантала, хрома, частично марганца. Карбиды металлов слишком хрупки и часто тугоплавки, поэтому для образования твёрдого сплава зёрна карбидов связываются подходящим металлом; в качестве связки используют кобальт (иногда никель или молибден).

Изделия из твёрдых сплавов получают методами порошковой металлургии (спеканием при температуре 1500-2000 °С). После чего они поддаются только обработке шлифованием или физико-химическим методам обработки (лазер, ультразвук, травление в кислотах и др). Порошковые твердые сплавы закрепляются на оснащаемом инструменте методами пайки или механическим закреплением.

Твердосплавные инструменты пригодны для обработки закаленных сталей и таких неметаллических материалов, как стекло, фарфор и т. п.

Наиболее распространенными твердыми сплавами являются ВК6, ВК8, Т15К6, ТТ7К12. В маркировке цифры после букв К и Т указывают количество кобальта и карбидов титана ( тантала) соответственно, остальное- карбид вольфрама.

**Штамповые стали**, используемые для изготовления штампов, предназначенных для холодного деформирования, должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и прочностью в сочетании с достаточно удовлетворительной пластичностью. Для штампов сложной формы, пуансонов и другого инструмента, испытывающего ударные нагрузки, используют доэвтектоидные стали (4XB2C, 5XB2C и др.). Термическая обработка штампов состоит из закалки и отпуска при температуре 250-430 °С. Твердость после обработки составляет 48-56HRC.

Для штампов, работающих в условиях сильного износа, используются стали ледебуритного класса (X12M, X12Ф1). Твердость штампов после закалки и низкого отпуска лежит в пределах 60-63HRC.

Стали для штампов, предназначенных для горячего деформирования, должны обладать высокой прочностью при высоких температурах (жаропрочностью), способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования трещин (сопротивлением термической усталости), износостойкостью и достаточно высокой теплопроводностью. Стали этой группы по структуре в отожженном состоянии относятся к доэвтектоидным, и содержат в своем составе легирующие элементы, повышающие прокаливаемость и прочность стали при высоких температурах (Cr, W, Mo, V и др.). Для обеспечения достаточной вязкости отпуск штампов после закалки производят при более высоких температурах, чем отпуск штампов для холодного деформирования. Применяемые стали: **5XHM, XGM, 4X2B5FM, 3X2B8F** и др.

**Коррозионностойкие стали.** К коррозионностойким (нержавеющим) сталям относятся стали и сплавы, обладающие высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в различных электролитах (водных растворах солей, щелочей, кислот ) и других агрессивных средах. Нержавеющие стали содержат в своем составе не менее 12% хрома. Высокая коррозионная стойкость подобных сталей обусловлена образованием на поверхности защитной пленки из оксидов хрома, препятствующей контакту между сталью и внешней агрессивной средой.

**Нержавеющие стали** разделяются на две основные подгруппы. К первой группе относятся хромистые нержавеющие стали со средним содержанием хрома 12, 17 и 25%, принадлежащие по структуре к мартенситному, мартенсито-ферритному и ферритному классам. С увеличением содержания хрома повышается коррозионная стойкость стали. Широкое применение нашли **12X13** (мартенсито-ферритного класса) и сталь **20X13** (мартенситного класса), используемые для изготовления лопаточного аппарата паровых турбин и компрессоров. Для работы в более агрессивных средах применяются стали: **20X17H2, 08X17T, 15X25T** и др.

Ко второй подгруппе относятся хромоникелевые нержавеющие стали. По структуре в зависимости от состава эти стали принадлежат аустенитному, аустенито-ферритному и аустенито-мартенситному классам. Широкое применение нашли стали этой группы: **08X18H9T, 08X18H10T, 12X18H9T** и др.

Для работы в сильных агрессивных средах применяются хромоникелевые стали с более высоким содержанием хрома и никеля, дополнительно легированные медью и молибденом (**10X17H13M2T, 06X23H8M3DT** и др.).

**Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы.** Для материалов, используемых при высоких температурах, основными характеристиками являются жаростойкость (окалиностойкость) и жаропрочность. Стали, обладающие высокой сопротивляемостью окислению (газовой коррозии) при высоких температурах называются жаростойкими.

К жаропрочным относятся стали, обладающие необходимой прочностью при высоких температурах. Жаропрочность достигается введением в состав стали легирующих элементов, повышающих прочность межатомных связей основного твердого раствора (феррита и аустенита), а также образующих вторичные упрочняющие фазы (карбиды, интерметаллиды), обладающие высокой термической стойкостью (устойчивостью против коагуляции при длительном воздействии высоких температур).

Жаропрочные стали и сплавы в зависимости от состава и температурной области применения разделяются на 4 основные группы.

К первой группе относятся перлитные жаропрочные стали, используемые для деталей с рабочей температурой до 570 °С.

Основными легирующими элементами этой группы являются хром, молибден, вольфрам, ванадий и в отдельных случаях титан, ниобий и бор в незначительных количествах. Термическая обработка сталей состоит в нормализации или закалки в масле с последующим высоким отпуском. Широкое практическое применение нашли стали: 12ХМФ, 15Х1М1Ф (корпусные элементы турбин), 34ХМ1А, 25Х2М1ФА, 20Х3МВФА (цельнокованные роторы), 25Х1МФ (крепежные детали) и др.

Вторую группу составляют **хромистые жаропрочные стали мартенситного класса**, содержащие 12% Cr и другие легирующие элементы (Mo, W, V, Nb, B) в сравнительно небольших количествах. Стали этой группы применяются для деталей, работающих при температурах до 560-600 °С. Термическая обработка – улучшение. Хромистые жаропрочные стали используются для изготовления лопаточного аппарата паровых и газовых турбин. Применяемые стали: 15Х11МФ, 18Х11МФ5, 20Х12ВНМФ и др.

Третью группу составляют **хромоникелевые стали аустенитного класса**, дополнительно легированные молибденом, вольфрамом, ниобием, титаном и др. Они используются для деталей турбин, работающих при температурах до 700 °С (стали 08Х16Н13М2Б, ХН35ВТ и др.). Термическая обработка жаропрочных аустенитных сталей состоит из нагрева до высоких температур (1050-1150 °С) с последующим быстрым охлаждением (аустенизации) и одноступенчатого или двухступенчатого отпуска (старения) в интервале температур 700-850 °С. В процессе отпуска из аустенита выделяются дисперсные частицы упрочняющих фаз (карбидов, интерметаллидов).

К четвертой группе относятся жаропрочные сплавы на никелевой основе, предназначенные для работы при температуре до 750-850 °С. Сплавы на никелевой основе принадлежат к сложнoleгированным сплавам, отличительными особенностями которых является сравнительно высокое содержание хрома (10-20%), а также наличие в составе алюминия и титана в умеренных количествах (1-6%). Алю-



миний и титан образуют интерметаллическое соединение  $Ni_3(AlTi)$ , являющееся основной упрочняющей фазой в подобных сплавах. Это соединение получило название  $\gamma'$ -фазы. Выделение высокодисперсных частиц этой фазы из твердого раствора происходит в процессе отпуска закаленных сплавов. В наиболее жаропрочных сплавах объемная доля упрочняющих фаз достигает 60% (расстояние между частицами составляет 200-400 Å). Дополнительное повышение жаропрочности достигается введением в состав сплава молибдена (3-4%), вольфрама (4-9%), ниобия (1-1,5%), кобальта (5-16%), а также бора и церия в незначительных количествах. Термообработка сплавов состоит из закалки в воде с температур 1150-1180 °С и последующего длительного одноступенчатого отпуска (старения) при 750-800 °С или многоступенчатого старения. Основным достоинством сплавов является высокая жаропрочность, по показателям которой они превосходят жаропрочные стали всех рассмотренных групп. Применяемые сплавы ХН65ВМТ, ХН55ВМТК и др.

### **6.3. Механические свойства**

Механическими свойствами называется совокупность свойств, характеризующих способность металлических материалов сопротивляться воздействию внешних усилий (нагрузок).

Механические испытания делят на

- статические, при которых нагрузка, действующая на образец, остаётся постоянной или возрастает крайне медленно;
- динамические (ударные);
- испытания при повторных или знакопеременных нагрузках.

К механическим свойствам можно отнести:

#### **6.3.1 Твёрдость**

**Твёрдость** - физический показатель, свойство материала сопротивляться пластической деформации, вызванной местным контактным воздействием (обычно сводящегося к внедрению в материал более твёрдого тела - [индентора](#)). Обозначения: для метода Роквелла (ГОСТ 9013-75) HRA, HRB, HRC; для метода Бринелля (ГОСТ 9012-75) HB, метод Викерса (ГОСТ 2999-75) HV.

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.

Наибольшее распространение получили методы Бринелля, Роквелла, Виккерса и микротвердости. В испытаниях на **твердомере Бринелля** в качестве индентора используется стальной закаленный шарик диаметром  $D$  2,5; 5; 10 мм, в зависимости от толщины изделия. Нагрузка  $P$ , в зависимости от диаметра шарика и измеряемой твердости: для термически обработанной стали и чугуна –  $P=30D^2$ , литой бронзы и латуни –  $P=10D^2$ , алюминия и других очень мягких металлов –  $P=2,5D^2$ .

Продолжительность выдержки  $\tau$ : для стали и чугуна – 10 с, для латуни и бронзы – 30 с. Полученный отпечаток измеряется в двух направлениях при помощи лупы Бринелля.

Твердость определяется как отношение приложенной нагрузки  $P$  к сферической поверхности отпечатка  $F$ .

**Метод Роквелла** основан на вдавливании в поверхность наконечника под определенной нагрузкой. Индентор для мягких материалов (до НВ 230) – стальной шарик диаметром  $1/16''$  ( $d=1,6$  мм), для более твердых материалов – конус алмазный.

Нагружение осуществляется в два этапа. Сначала прикладывается предварительная нагрузка  $P_0$  (10 кгс) для плотного соприкосновения наконечника с образцом. Затем прикладывается основная нагрузка  $P_1$ , в течение некоторого времени действует общая рабочая нагрузка  $P$ . После снятия основной нагрузки определяют значение твердости по глубине остаточного вдавливания наконечника  $h$  под нагрузкой.

В методе Виккерса твердость определяется по величине отпечатка. В качестве индентора используется алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине  $136^\circ$ .

Твердость рассчитывается как отношение приложенной нагрузки  $P$  к площади поверхности отпечатка  $F$ .

Нагрузка Р составляет 5...100 кгс. Диагональ отпечатка d измеряется при помощи микроскопа, установленного на приборе. Преимущество данного способа в том, что можно измерять твердость любых материалов, тонкие изделия, поверхностные слои. Высокая точность и чувствительность метода.

Способ микротвердости – для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплава, очень тонких поверхностных слоев (сотые доли миллиметра). Аналогичен способу Виккерса.

В **методе царапания** алмазным конусом, пирамидой или шариком наносится царапина, которая является мерой. При нанесении царапин на другие материалы и сравнении их с мерой судят о твердости материала.

Можно нанести царапину шириной 10 мм под действием определенной нагрузки. Наблюдают за величиной нагрузки, которая дает эту ширину.

В **методе Шора** измеряется глубина вдавливания в материал определенного индентора под действием силы в заданных условиях. Твердость при вдавливании обратно пропорциональна глубине вдавливания и зависит от модуля упругости и вязкоэластичных свойств материала.

### 6.3.2 Пластичность

**Пластичность** - свойство металлов деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять измененную форму после снятия этих сил. Пластичность - одно из важных механических свойств металла, которое в сочетании с высокой прочностью делает его основным конструкционным материалом. Ее характеристиками являются *относительное удлинение* перед разрывом  $\delta$  и *относительное сужение* перед разрывом  $\Psi$ . Эти характеристики определяют при испытании металлов на растяжение, а их численные значения вычисляют по формулам (в процентах):

$$\delta_P = \frac{l_P - l_0}{l_0} \cdot 100, \quad (6.5)$$

$$\Psi_P = \frac{F_0 - F_P}{F_0} \times 100, \quad (6.6)$$

где  $l_0$  и  $l_P$  - длина образца до и после разрушения соответственно;

$F_0$  и  $F_p$  - площадь поперечного сечения образца до и после разрушения.

### 6.3.3 Прочность

**Прочность** - способность металлов оказывать сопротивление деформации или разрушению статическим, динамическим или знакопеременным нагрузкам. Прочность металлов при статических нагрузках испытывают на растяжение, сжатие, изгиб и кручение. Испытание на разрыв является обязательным. Прочность при динамических нагрузках оценивают удельной ударной вязкостью, а при знакопеременных нагрузках - усталостной прочностью.

Прочность при испытании на растяжение оценивают следующими характеристиками (рис.6.3).

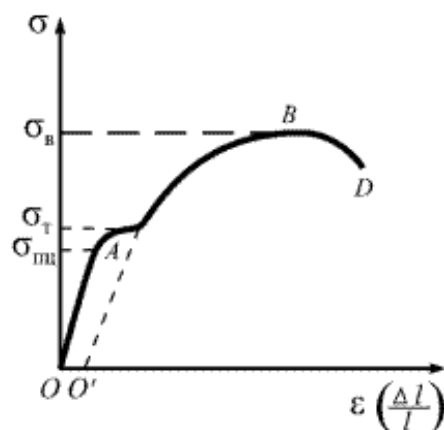


Рис.6.3. Диаграмма испытаний на растяжение.

*Предел прочности на разрыв* (предел прочности или временное сопротивление разрыву)  $\sigma_B$  - это напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке  $P_{max}$ , предшествующей разрушению образца:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0} \quad (6.7)$$

Эта характеристика является обязательной для металлов.

*Предел пропорциональности*  $\sigma_{пц}$  - это условное напряжение  $P_{пц}$ , при котором начинается отклонение от пропорциональной зависимости между деформацией и нагрузкой:

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0} \quad (6.8)$$

*Предел текучести*  $\sigma_T$  - это наименьшее напряжение  $P_T$ , при котором образец деформируется (течет) без заметного увеличения нагрузки:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} \quad (6.9)$$

*Условный предел текучести*  $\sigma_{0,2}$  - напряжение, после снятия которого остаточная деформация достигает величины 0,2 %.

#### **6.4.4 Ударная вязкость**

**Ударная вязкость** – способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения под действием ударной нагрузки.

Основным отличием ударных нагрузок от испытаний на растяжение-сжатие или изгиб является гораздо более высокая скорость выделения энергии. Таким образом, ударная вязкость характеризует способность материала к быстрому поглощению энергии.

Обычно оценивается работа до разрушения или разрыва испытываемого образца при ударной нагрузке, отнесённой к площади его сечения в месте приложения нагрузки. Выражается в Дж/см<sup>2</sup> или в кДж/м<sup>2</sup>. Ударную вязкость обозначают КСV, КСУ, КСТ. КС – символ ударной вязкости, третий символ показывает вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U), трещина (T).

**Порог хладоломкости** - температурный интервал изменения характера разрушения, является важным параметром конструкционной прочности. Чем ниже порог хладоломкости, тем менее чувствителен металл к концентраторам напряжений (резкие переходы, отверстия, риски), к скорости деформации.

**Трещиностойкость** - свойство материалов сопротивляться развитию трещин при механических и других воздействиях. Количественной характеристикой трещиностойкости материала является критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плоской деформации в вершине трещины  $K_{Ic}$ . Для оценки склонности материала к хрупкому разрушению применяют испытания на ударный изгиб образцов с надрезом, в результате которых определяют ударную вязкость.

#### **6.3.5 Усталость**

**Усталость** - процесс постепенного накопления повреждений в материале при действии циклических нагрузок, приводящий к образованию трещин и разрушению.

Термин «усталость» часто заменяют термином «выносливость», который показывает сколько перемен нагрузок может выдержать металл или сплав без разрушения. Предел выносливости обозначают как  $\sigma_R$ , где коэффициент R принимается равным коэффициенту асимметрии цикла. Таким образом, **предел выносливости** материала в случае симметричных циклов нагружения обозначают как  $\sigma_{-1}$ , а в случае пульсационных как  $\sigma_0$ . Число циклов условно принято для сталей равным  $10^7$ , для цветных металлов -  $10^8$ .

Явление усталости наблюдается при изгибе, кручении, растяжении-сжатии и при других способах нагружения.

#### **6.4 Технологические и эксплуатационные свойства**

**Ограниченный предел выносливости** – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за определенное число циклов нагружения или время.

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

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

**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.

**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.

**Свариваемость** - это способность материала образовывать неразъемные соединения требуемого качества. Оценивается по качеству сварного шва.

**Способность к обработке резанием** - характеризует способность материала поддаваться обработке различным режущим инструментом. Оценивается по стойкости инструмента и по качеству поверхностного слоя.

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** – способность металлов и сплавов длительно сопротивляться началу и развитию пластической деформации и разрушению под действием постоянных нагрузок 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.

## ***6.5 Методы исследования структуры металлов и сплавов***

### ***6.5.1 Макроскопический анализ***

Различают макроструктуру, микроструктуру и тонкую структуру.

Строение металлов и сплавов, видимое невооружённым глазом или при небольших увеличениях с помощью лупы (до 30 раз), называется макроструктурой. Макроструктура изучается путём макроанализа.

Так как металлы -- вещества непрозрачные, то их строение изучают в изломе или специально приготовленных образцах -- макрошлифах. Образец вырезают из определённого места, в определённой плоскости в зависимости от того, что подвергают исследованию -- литьё, поковку, штамповку, прокат, сварную или термически обработанную деталь -- и что требуется выявить и изучить - первичную кристаллизацию, дефекты, нарушающие сплошность металла, неоднородность структуры. Поэтому образцы вырезают из одного или нескольких мест слитка, заготовки или детали как в продольном, так и в поперечном направлениях. Поверхность образца (темплета) выравнивают на наждачном круге, затем шлифуют. После шлифования темплет травят в специальных реактивах, которые по-разному растворяют структурные составляющие и растравливают дефекты.

**Макроанализ шлифов** выявляет различные пороки в слитках и отливках (усадочные раковины, газовые пузыри, трещины...); вид излома (вязкий, хрупкий); величину, форму и расположение зерен и дендритов литого металла; дефекты, нарушающие сплошность металла (усадочную пористость, газовые пузыри, раковины, трещины); химическую неоднородность металла, вызванную процессами кристаллизации или созданную термической и химико-термической обработкой; расположение волокон в кованных и штампованных заготовках; трещины, возникающие при обработке давлением или термической обработке, дефекты в сварных швах.

### ***6.5.2 Микроскопический анализ***

Более тонким методом исследования структуры и пороков металлов является микроанализ, т. е. изучение структуры металлов при больших увеличениях



с помощью металлографического микроскопа. Микроструктурный анализ – изучение поверхности при помощи световых микроскопов. Увеличение – 50...2000 раз. Позволяет обнаружить элементы структуры размером до 0,2 мкм.

**Металлографический микроскоп** рассматривает металл в отражённом свете, чем и отличается от биологического микроскопа, где предмет рассматривается в проходящем свете. Значительно большее увеличение можно получить при помощи электронного микроскопа, в котором лучи света заменены потоком электронов (увеличение достигается при этом до 100 000 раз).

В **просвечивающем микроскопе** поток электронов проходит через изучаемый объект. Изображение является результатом неодинакового рассеяния электронов на объекте. Различают косвенные и прямые методы исследования. При косвенном методе изучают не сам объект, а его отпечаток – кварцевый или угольный слепок (реплику), отображающую рельеф микрошлифа, для предупреждения вторичного излучения, искажающего картину. При прямом методе изучают тонкие металлические фольги, толщиной до 300 нм, на просвет. Фольги получают непосредственно из изучаемого металла.

В **растровом микроскопе** изображение создается за счет вторичной эмиссии электронов, излучаемых поверхностью, на которую падает непрерывно перемещающийся по этой поверхности поток первичных электронов. Изучается непосредственно поверхность металла. Разрешающая способность несколько ниже, чем у просвечивающих микроскопов.

Для изучения микроструктуры также приготавливаются шлифы -- микрошлифы, но после шлифования дополнительно производится полирование до зеркального блеска, затем производят травление шлифа.

Микроанализ позволяет выявить:

- величину, форму и расположение зёрен,
- отдельные структурные составляющие сплава, на основании которых можно определить химический состав отожженных углеродистых сталей,
- качество тепловой обработки, например, глубину проникновения закалки,

- такие дефекты, как пережог, обезуглероживание, наличие неметаллических включений.

### ***6.5.3. Рентгеноструктурный анализ и рентгеновская дефектоскопия***

**Рентгеноструктурный анализ** основан на способности атомов в кристаллической решётке отражать рентгеновские лучи. Отражённые лучи оставляют на фотопластинке (рентгенограмме) группу пятен или колец. По характеру расположения этих колец (пятен) определяют тип кристаллической решётки, а также расстояние между атомами (положительными ионами) в решётке.

Рентгеновское просвечивание основано на способности рентгеновских лучей проникать в глубь тела. Благодаря этому можно, не разрезая металлических изделий, увидеть на рентгеновском снимке различные внутренние дефекты металла: трещины, усадочные раковины, пороки сварки.

Методы регистрации пороков в материале основаны на том, что рентгеновские лучи, проходя через металл, частично поглощаются. При этом менее плотные части металлического изделия (участки с пороками) поглощают лучи слабее, чем плотные (сплошной металл). Это приводит к тому, что на рентгеновском снимке участки с пороками будут иметь тёмные или светлые пятна на фоне сплошного металла.

Современные рентгеновские аппараты позволяют просвечивать стальные изделия на глубину до 60 – 100 мм.

Для выявления дефектов в металлических изделиях большой толщины начали применять гамма-лучи. Природа гамма-лучей аналогична рентгеновским, но длина волны их меньше. Благодаря большой проникающей способности гамма-лучей ими можно просвечивать стальные детали толщиной до 300 мм.

### ***6.7 Механизмы разрушения материалов***

Процессы повреждения и разрушения определяются материалом, напряженно-деформированным состоянием и средой. Необходимо идентифицировать микромеханизмы, способные вызвать разрушение, и определить области температур и напряжений, в которых эти механизмы действуют.

В макроскопических теориях прочности различают два вида разрушения: 1) отрыв в результате действия растягивающих напряжений и 2) срез под действием касательных напряжений. В таблице представлены соответствующие схемы для ряда испытаний.

Разрушение материала происходит в результате зарождения и роста (или увеличения числа) дефектов типа дислокации, пор и трещин. Эти дефекты могут приводить к хрупкому или вязкому разрушению, усталости, разрушению в процессе ползучести, причем в одних случаях разрушение носит межзеренный, а в других – внутризеренный характер. Поэтому весьма важно уметь выделить доминирующий механизм.

Следует отметить, что чистота материала, вариации легирования, процесс изготовления, размер зерна, текстура лишь незначительно влияют на границы областей разрушения, показанные на прилагаемых картах механизмов. Конструкторы должны, помимо прочего, иметь в виду, что при прогнозировании долговечности и поведения реальных деталей на основе результатов лабораторных испытаний особое внимание следует уделять информации о режимах, так как, например, при высоких напряжениях и температурах активны одни механизмы, а при низких – другие. Также необходимо учитывать возможность независимого накопления двух видов повреждений в случае суперпозиции процессов, зависящих от времени и циклического нагружения.

## **ТЕМА 7. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ**

### ***7.1 Характеристика цветной металлургии***

Цветная металлургия – отрасль металлургии, которая включает добычу, обогащение руд цветных металлов и выплавку цветных металлов и их сплавов. Все цветные металлы разделяются на несколько групп:

- тяжелые цветные металлы - Cu, Pb, Zn, Ni, Sn;
- легкие металлы - Al, Mg, Ti и др.;
- малые цветные металлы - Co, Sb, Bi, Hg, Cd;
- благородные металлы - Au, Ag, Pt и др.;

- редкие металлы - Li, Be, Zr, Nb, Ga, In;
- редкоземельные элементы (Y, La, Ce и др.).

Используют цветные металлы как в виде чистых металлов, так и в виде сплавов, в виде легирующих добавок, как покрытия для защиты изделий из коррозии, а также в виде порошков - в машиностроении, судостроении, авиации и ракетной технике, электро- и радиотехнике, электронике, в приборостроении и атомной технике и др. Масштабы производства цветных металлов различаются очень сильно – от превышающих десятки млн. тонн в год для Al или Cu до нескольких тонн (Re) и менее (для радиоактивных металлов).

### **7.2 Медные сплавы**

Медь обладает высокой электропроводностью и теплопроводностью, прочностью вязкостью и коррозионной стойкостью. Структура решетки – кубическая гранцентрированная.  $T_{\text{плав.}} = 1083 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{кип.}} = 2360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Средний предел прочности зависит от вида обработки и составляет от 220 до 420 МПа, относительное удлинение – 4-60 %, твердость – 35-130 НВ, плотность – 8,94 г/см<sup>3</sup>.

Обладая замечательными свойствами, медь в то же время как конструкционный материал не удовлетворяет требованиям машиностроения, поэтому ее легируют, т. е. вводят в сплавы такие металлы, как цинк, олово, алюминий, никель и другие, за счет чего улучшаются ее механические и технологические свойства.

В чистом виде медь применяется ограниченно, более широко – ее сплавы. По химическому составу медные сплавы подразделяют на латуни, бронзы и медноникелевые, по технологическому назначению – на деформируемые, используемые для производства полуфабрикатов (проволоки, листа, полос, профиля), и литейные, применяемые для литья деталей.

В настоящее время медные сплавы широко используется в электромашиностроении, при строительстве линий электропередач, для изготовления оборудования телеграфной и телефонной связи, радио- и телевизионной аппаратуры. Из меди изготавливают провода, кабели, шины и другие токопроводящие изделия.

**Латуни** – сплавы меди с цинком и другими компонентами. Латуни, содержащие, кроме цинка, другие легирующие элементы, называются сложными, или спе-

циальными, и именуются по вводимым, кроме цинка, легирующим компонентам. Например: Л90 – это латунь, содержащая 90 % Cu, остальное – Zn; латунь алюминиевая ЛА77-2 – содержит 77 % Cu, 2 % Al, остальное – Zn и т. д. По сравнению с медью латуни обладают большой прочностью, коррозионной стойкостью и упругостью. Они обрабатываются литьем, давлением и резанием. Из них изготавливают полуфабрикаты (листы, ленты, полосы, трубы конденсаторов и теплообменников, проволоку, штамповки, запорную арматуру – краны, вентили, медали и значки, художественные изделия, музыкальные инструменты, сальфоны, подшипники).

**Бронзы** – сплавы на основе меди, в которых в качестве добавок используются олово (Sn), алюминий (Al), бериллий (Be), кремний (Si), свинец (Pb), хром (Cr) и другие элементы.

Бронзы подразделяются на безоловянные (БрА9Мц2Л и др.), оловянные (БрОЗц12С5 и др.), алюминиевые (БрА5, БрА7 и др.), кремниевые (БрКН1–3, БрКМц3–1), марганцевые (БрМц5), бериллиевые бронзы (БрБ2, БрБНТ1,7 и др.).

Бронзы используются для производства запорной арматуры (краны, вентили), различных деталей, работающих в воде, масле, паре, слабоагрессивных средах, морской воде.

Абиссинское золото – медный сплав, имитирующий золото по цвету; содержит 88 % меди, 11,5 % цинка и 0,5 % золота.

Французское золото – имитирующий драгметаллы бронзовый сплав, идущий на выделку художественных, галантерейных и отчасти ювелирных изделий; состоит из 58,3 % красной меди, 16,7 % олова и 25 % цинка и действительно имеет подобные золотому цвет и блеск.

Северное золото – медно-алюминиевый сплав золотистого цвета, также известный как жёлтый нордик. Состав: медь – 89 %, алюминий – 5 %, цинк – 5 %, олово – 1 %.

### ***7.3 Алюминиевые сплавы***

По распространенности в природе алюминий занимает третье место после кислорода и кремния и первое место среди металлов. По использованию в технике он занимает второе место после железа. В свободном виде алюминий не встречается.

ся, его получают из минералов – бокситов, нефелинов и алунитов, при этом сначала производят глинозем, а затем из глинозема путем электролиза получают алюминий. Механические свойства алюминия невысоки: сопротивление на разрыв – 50-90 МПа (5–9 кгс/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение – 25-45 %, твердость – 13-28 НВ. В чистом виде алюминий применяется редко, в основном широко используются его сплавы с медью, магнием, кремнием, железом и т. д.

Алюминий первичный – получают путем обогащения глинозема. В природе металл в чистом виде не встречается ввиду его высокой химической активности. Соединяясь с другими элементами, он образует бокситы, нефелины и алуниты. Впоследствии из этих руд получают глинозем, а из него с помощью сложных химико-физических процессов - чистый алюминий: А0- А9, А95-А99.

Алюминий технический – называют материал с процентным содержанием инородных примесей менее 1%. Технические марки алюминия по ГОСТу 4784-97 характеризуются очень низкой прочностью, но высокой антикоррозионной стойкостью. Благодаря отсутствию в составе легирующих частиц на поверхности металла быстро образуется защитная оксидная пленка, которая отличается устойчивостью: АД, АД0, АДоч,.....

К деформируемому алюминию относят материал, который подвергают горячей и холодной обработке давлением: прокатке, прессованию, волочению и другим видам. В результате пластических деформаций из него получают полуфабрикаты различного продольного сечения: алюминиевый пруток, лист, ленту, плиту, профили и другие:

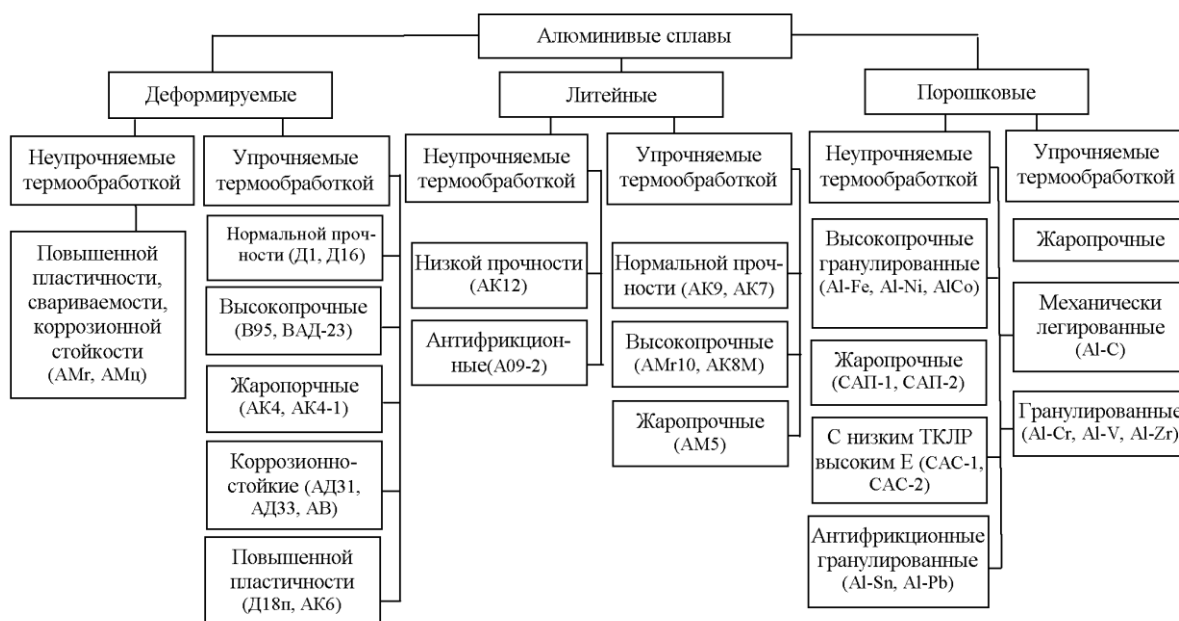
АК12 содержит 12 % кремния, остальное – алюминий; АК7М2П – 7 % кремния, 2 % меди, остальное – алюминий.

Литейные марки алюминия используются для производства фасонных изделий. Их главной особенностью является сочетание высокой удельной прочности и низкой плотности, что позволяет отливать изделия сложных форм без образования трещин: АМг5, АК8М, АЛ1,...

На качество изготавливаемых изделий оказывает влияние и то, какие имеет алюминий физические свойства. И применение низкосортных сортов материала не

ограничивается созданием полуфабрикатов. Очень часто он используется для раскисления стали – удаления из расплавленного железа кислорода, который растворен в нем и повышает тем самым механические свойства металла. Для проведения данного процесса чаще всего применяются марки : АВ86, АВ88, АВ92,....

Наиболее широко применяется в различных отраслях промышленности сплав алюминия с кремнием – силумин, который изготавливается четырех марок – СИЛ–00, СИЛ–0, СИЛ–1 и СИЛ–2. Кроме алюминия (основа) и кремния (10–13 %), в этот сплав входят: железо – 0,2–0,7 %, марганец – 0,05-0,5 %, кальций – 0,7-0,2 %, титан – 0,05-0,2 %, медь – 0,03 % и цинк – 0,08 %. Из силуминов изготавливают различные детали для автомобилей, тракторов, пассажирских вагонов. Алюминиевые деформируемые сплавы в чушках, предназначенные для обработки давлением и при получении других алюминиевых сплавов, нормируются определенными стандартами.



Сплавы для обработки давлением состоят из алюминия (основа), легирующих элементов (медь – 5 %, магний – 0,1–2,8 %, марганец – 0,1-0,7 %, кремний – 0,8-2,2 %, цинк – 2-6,5 % и небольшого количества других примесей). Марки этих сплавов: ВД1, АВД1, АВД1-1, АКМ, из алюминиевых сплавов изготавливают полуфабрикаты – листы, ленты, полосы, плиты, слитки, слябы.

Алюминиевые лигатуры - вспомогательный сплав, применяемый для введения в жидкий металл легирующих элементов: А1В3, А1Сo10, А1Sr5, А1Ni10,....

Кроме того, цветная металлургия производит алюминиевые антифрикционные сплавы, применяемые для изготовления монометаллических и биметаллических подшипников методом литья. В зависимости от химического состава стандартом предусмотрены следующие марки этих сплавов: АОЗ-7, АО9-2, АО6-1, АО9-1, АО20-1, АМСТ. Стандартом также определены условия работы изделий, изготовленных из этих сплавов: нагрузка от 19,5 до 39,2 МН/м<sup>2</sup> (200–400 кгс/см<sup>2</sup>), температура от 100 до 120 °С, твердость – от 200 до 320 НВ.

#### **7.4 Титановые сплавы**

Титан имеет малую плотность 4,5 г/см<sup>3</sup>, тугоплавок (температура плавления 1665 °С), весьма прочен и пластичен. На поверхности его образуется стойкая окисная пленка, за счет которой он хорошо сопротивляется коррозии в пресной и морской воде, а также в некоторых кислотах. При температурах до 882 °С он имеет гексагональную плотно упакованную решетку, при более высоких температурах – объемно – центрированный куб. Механические свойства листового титана зависят от химического состава и способа термической обработки. Предел прочности его – 300-1200 МПа (30-120 КГС/мм<sup>2</sup>), относительное удлинение – 4-10 %. Вредными примесями титана являются азот, углерод, кислород и водород. Они снижают его пластичность и свариваемость, повышают твердость и прочность, ухудшают сопротивление коррозии.

При температуре свыше 500 °С титан и его сплавы легко окисляются, поглощая водород, который вызывает охрупчивание. При нагревании выше 800 °С титан энергично поглощает кислород, азот и водород, эта его способность используется в металлургии для раскисления стали. Он служит легирующим элементом для других цветных металлов и для стали.

Имеет широкое применение в авиа-, ракето- и судостроении. Из титана и его сплавов изготавливают полуфабрикаты: листы, трубы, прутки и проволоку. Основными промышленными материалами для получения титана являются ильменит, рутил, перовскит и сфен (титанит). Технология получения: сначала вырабатывают титановую губку, а затем путем переплавки в вакуумных печах из нее производят ковкий титан.



В зависимости от химического состава и механических свойств стандартом установлены следующие марки губчатого титана: ТГ–90, ТГ–100, ТГ–110, ТГ–120, ТГ–130. В обозначении марок буквы «ТГ» означают – титан губчатый, «Тв» – твердый, цифры означают твердость по Бринеллю. В губчатый титан входят примеси: железо – до 0,2 %, кремний – до 0,04 %, никель – до 0,05 %, углерод – до 0,05 %, хлор – до 0,12 %, азот – до 0,04 %, кислород – до 0,1 %. Для изготовления различных полуфабрикатов (листы, трубы, прутки, проволока) предназначены титан и титановые сплавы, обрабатываемые давлением.

В зависимости от химического состава стандарт предусматривает следующие их марки: ВТ1–00, ВТ1–0, ОТ4–0, ОТ4–1, ОТ4, ВТ5, ВТ5–1, ВТ6, ВТ20, ВТ22, ПТ–7М, ПТ–7В, ПТ–1 м. Основные компоненты: алюминий – 0,2–0,7 %, марганец – 0,2–2 %, молибден – 0,5–5,5 %, ванадий – 0,8–5,5 %, цирконий – 0,8–3 %, хром – 0,5–2,3 %, олово – 2–3 %, кремний – 0,15–0,40 %, железо – 0,2–1,5 %. Железо, кремний и цирконий в зависимости от марки сплава могут быть основными компонентами или примесями.

### **7.5. Цинковые сплавы**

Цинк кристаллизуется в гексагональной системе и обладает различной способностью к деформациям, что зависит от ориентации отдельных кристаллов по отношению к деформирующим силам. Цинк хорошо поддается обработке давлением и отличается хорошей коррозионной стойкостью, он имеет и относительно удовлетворительные механические свойства, но низкий предел ползучести. Большой недостаток цинка и цинковых сплавов – склонность к изменению своих размеров и свойств со временем. Кроме этого, цинковые сплавы обладают очень низкой коррозионной стойкостью.

Стандарт устанавливает также марки цинка и области их применения: ЦВ00 (содержание цинка – 99,997 %) – для научных целей, получения химических реактивов, изготовления изделий для электротехнической промышленности; ЦВ0 (цинк – 99,995 %) – для полиграфической и автомобильной промышленности; ЦВ1, ЦВ (цинк – 99,99 %) – для производства отливок под давлением, предназначенных для изготовления деталей особо ответственного назначения, для получения окиси цинка,

цинкового порошка и чистых реактивов; ЦОА (цинка 99,98 %), ЦО (цинка 99,975 %) – для изготовления цинковых листов, цинковых сплавов, обрабатываемых давлением, белил, лигатуры, для горячего и гальванического цинкования; Ц1С, Ц1, Ц2С, Ц2, Ц3С, Ц3 – для различных целей.

В промышленности широко применяются цинковые сплавы: латуни, цинковые бронзы, сплавы для покрытия различных стальных изделий, изготовления гальванических элементов, типографские и др. Цинковые сплавы в чушках для литья нормируются стандартом. Эти сплавы используются в автомобиле и приборостроении, а также в других отраслях промышленности. Стандартом установлены марки сплавов, их химический состав, определены изготавливаемые из них изделия:

- 1) ЦАМ4–10 – особо ответственные детали;
- 2) ЦАМ4–1 – ответственные детали;
- 3) ЦАМ4–1В – неответственные детали;
- 4) ЦА4О – ответственные детали с устойчивыми размерами;
- 5) ЦА4 – неответственные детали с устойчивыми размерами.

Цинковые антифрикционные сплавы, предназначенные для производства монOMETаллических и биметаллических изделий и полуфабрикатов методами литья. Марки сплавов: ЦЛМ 9-1,5Л; ЦАМ 10-5Л. Первая цифра означает среднее содержание Al, вторая Cu. Содержание Mg 0,03-0,06 %. Механические свойства: прочность в обеих марках не менее 245 МПа; относительное удлинение не менее 1 % для ЦАМ 9-1,5Л и 0,4% для ЦАМ 10-5Л; НВ соответственно не менее 95 и 100. Сплавы марок ЦАМ 9-1,5Л и ЦАМ 10-5 ч, предназначенные для изготовления цинковых антифрикционных сплавов, изготавливают в виде чушек. Содержание примесей в чушках меньше, чем в сплавах.

### ***7.6 Магниевые сплавы***

Магниевые сплавы – сплавы на основе магния; разделяются на литейные и деформируемые. Из литейных магниевых сплавов изготавливают литые детали, из деформируемых – прессованные и катаные полуфабрикаты, поковки и штамповки. Литейные и деформируемые магниевые сплавы пригодны для работы при криоген-

ных, нормальных и повышенных температурах, наиболее жаропрочные из них – до 350-400 °С.

Магниевые сплавы являются самым легким конструкционным металлическим материалом. Удельный вес их в зависимости от состава находится в пределах 1,76-2,0 г/см<sup>3</sup>, примерно в 4 раза меньше стали и в 1,5 раза меньше алюминия и его сплавов. Использование магниевых сплавов позволяет уменьшить вес и значительно повысить жесткость конструкций. Относит, жесткость при изгибе двутавровых балок равного веса и одинаковой ширины для стали равна 1, для алюминия – 8,9, а для магния – 18,9.

Магниевые сплавы отлично обрабатываются режущим инструментом, вдвое быстрее, чем алюминий и в десять раз быстрее, чем углеродистые стали. Однако при работе с магниевыми сплавами необходимо соблюдать правила противопожарной безопасности. Недостаток магниевых сплавов – пониженная коррозионная стойкость по сравнению с алюминиевыми сплавами, а также высокий коэффициент линейного расширения, который на 10-15% выше, чем у алюминиевых сплавов.

Магниевые сплавы легируют алюминием, цинком, марганцем, цирконием, редкоземельными элементами, торием и др. металлами. Большая группа сплавов разработана на основе системы Mg-Al-Zn с добавками марганца. К ней относятся широко применяемые высокопрочные сплавы: литейный сплав МЛ15 ( $\sigma_B = 23-26$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\delta = 5-10$  %); деформируемые сплавы МА2-1 для листов и плит ( $\sigma_B = 25-28$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\delta = 8-16$  %), МА5 для прессованных изделий ( $\sigma_B = 28-32$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\delta = 4-12$  %).

Высокопрочные сплавы на основе системы Mg-Zn-Zr марок МЛ12 и МЛ15 предназначаются для литья ( $\sigma_B = 22$  и  $21$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\delta = 5$  и  $3$  % соответственно), а ВМ65-1 – для прессован, полуфабрикатов и штамповок ( $\sigma_B = 30-32$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\delta = 8-12$  %). Отливки из сплавов с цирконием имеют более равномерные механические свойства, чем из сплавов с алюминием, близкие к свойствам отдельно отлитых образцов (сплавы МЛ9, МЛ 10, МЛН, МЛ12, МЛ14, ВМЛ1, ВМЛ2, МЛ 15). Редкоземельные металлы и торий значительно повышают прочность магниевых сплавов при повышенных температурах. Магниевые сплавы литейные с неодимом при комнатной температуре имеют механические свойства на уровне высокопрочных магниевых

сплавов. Сплавы с добавками смеси редкоземельных металлов (МЛН – для литья, ВМ17 – для деформируемых полуфабрикатов) и неодима (МЛ9, МЛ10 – для литья и МАИ – для деформируемых полуфабрикатов) пригодны для длительной (100-часовой) работы при температурах до 250° и кратковременной (5 час.) до 350°.

На основе системы Mg-Th разработаны жаропрочные магниевые сплавы – литейные МЛ14, ВМЛ1 и деформируемые МА13 (для листов, пресован, и штампован, полуфабрикатов) и ВМД1 (пресован, изделия, штамповки), которые могут применяться длительно при 300-370° и кратковременно при 400-450°С.

К наиболее вредным примесям, попадающим в магниевые сплавы из шихты и в процессе плавления, относятся никель, железо, кремний и медь, снижающие коррозионную стойкость. В исключительных случаях в присутствии неодима и марганца небольшая добавка никеля (до 0,25%) вводится для повышения жаропрочности (сплав МАИ).

Бериллий и кальций обычно содержатся в магнии в ничтожных количествах ( $Be < 0,0001\%$ ,  $Ca \sim 0,0015\%$ ). В качестве легирующих добавок кальций (до 0,5%) вводится в нек-рые сплавы (МЛ 7-1, МА9) для повышения жаропрочности, а бериллий (до 0,05%) в сплавы, идущие на оболочки ядерного топлива с целью повышения сопротивления окисляемости. Их также используют в качестве технологических добавок для снижения окисляемости сплавов в расплавленном состоянии, в этом случае содержание ограничивается. Бериллий укрупняет зерно и может поэтому вызывать снижение механических и технологических свойств при содержании в литейных сплавах более 0,002%, а в деформирован, более 0,02%. В сплавы типа МЛ5 иногда вводится до 0,1% Са для уменьшения микрорыхлоты, т. к. Са повышает растворимость водорода в твердом магнии.

Магниевые сплавы широко применяются в автомобильной, тракторной промышленности, из них изготавливаются картеры двигателей, маслосборники, коробки передач, диски колес и другие детали; в электротехнике и радиотехнике для корпусов приборов, телевизоров, деталей электродвигателей; в оптической промышленности для корпусов биноклей, фотоаппаратов; в текстильной промышленности для изготовления бобин, шпулек, катушек и др.; в полиграфической – для матриц, кли-

ше, валиков и др. деталей; в судостроении (для протекторов), в авиационной и ракетной технике и во мн. др. областях народного хозяйства.

## ТЕМА 8. СТАЛИ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

### *8.1 Магнитные стали и сплавы*

Ферромагнетизмом (способностью в значительной степени сгущать магнитные силовые линии) обладают желе-зо, кобальт и никель. Эта способность характеризуется магнитной проницаемостью. У ферромагнитных материалов относительная магнитная проницаемость достигает десятков и сотен тысяч единиц, для других материалов она близка к единице. Магнитные свойства материала характеризуются остаточной индукцией и коэрцитивной силой.

**Магнитно-твердые стали и сплавы** применяют для изготовления постоянных магнитов. Они имеют большую коэрцитивную силу. Это высокоуглеродистые и легированные стали, специальные сплавы. Углеродистые стали (У 10-У 12) после закалки имеют достаточную коэрцитивную силу ( $H_c=5175$  А/м); но, так как они прокаливаются на небольшую глубину, их применяют для изготовления небольших магнитов. Хромистые стали по сравнению с углеродистыми прокаливаются значительно глубже, поэтому из них изготавливают более крупные магниты. Магнитные свойства этих сталей такие же, как и углеродистых. Хромокобальтовые стали (например, марки ЕХ5К5) имеют более высокую коэрцитивную силу –  $H_c=7166$  А/м. Магнитные сплавы, например ЮНДК24 (9% А1; 13,5% Ni; 3% Си, 24% Со; остальное железо), имеют очень высокую коэрцитивную силу –  $H_c = 39810$  А/м, поэтому из них изготавливают магниты небольшого размера, но большой мощности.

**Магнитно-мягкие стали и сплавы.** Магнитно-мягкие стали и сплавы имеют малую коэрцитивную силу и большую магнитную проницаемость. К ним относят электротехническое железо и сталь, железоникелевые сплавы (пермаллой).

*Электротехническое железо* (марки Э, ЭА, ЭАА) содержит менее 0,04% С, имеет высокую магнитную проницаемость  $M_a=(2,78-3,58) \cdot 10^9$  Гн/м и применяется для сердечников, полюсных наконечников электромагнитов и др. *Электротехническая сталь* содержит менее 0,05% С и кремний, сильно увеличивающий магнитную

проницаемость. Электротехническую сталь по содержанию кремния делят на четыре группы: с 1% Si- марки Э11, Э12, Э13; с 2% Si- Э21, Э22; с 3% Si- Э31, Э32; с 4% Si - Э41-Э48. Вторая цифра (1-8) характеризует уровень электротехнических свойств.

*Железоникелевые сплавы* (пермаллои) содержат 45-80% Ni их дополнительно легируют Cr, Si, Mo. Магнитная проницаемость этих сплавов очень высокая. Например, у пермаллоя марки 79НМ (79% Ni; 4% Mo)  $\mu_a = 175,15 \cdot 10^9$  Гн/м. Применяют пермаллои в аппаратуре, работающей в слабых электромагнитных полях (телефон, радио).

Ферриты - магнитно-мягкие материалы, получаемые спеканием смеси порошков ферромагнитной окиси железа и окислов двухвалентных металлов (ZnO, NiO, MgO и др.). В отличие от других магнитно-мягких материалов у ферритов очень высокое удельное электросопротивление, что определяет их применение в устройствах, работающих в области высоких и сверхвысоких частот.

## **8.2 Сплавы с высоким электрическим сопротивлением**

Их применяют для изготовления электронагревателей и элементов сопротивлений (резисторов) и реостатов. Сплавы для электронагревателей обладают высокой жаростойкостью, высоким электрическим сопротивлением, удовлетворительной пластичностью в холодном состоянии.

Указанным требованиям отвечают *железохромоалюминиевые сплавы*, например марок Х13Ю4 (0,15 % С; 12-15% Cr; 3,5-5,5% Al), ОХ23Ю5 (<0,05% С; 21,5-23,5% Cr; 4,6-5,3% Al), *никелевые сплавы*, например марок Х15Н60 - ферро-нихром, содержащий 25% Fe, Х20Н80- нихром. Стойкость нагревателей из железохромоалюминиевых сплавов выше, чем у нихромов. Сплавы выпускают в виде проволоки и ленты, применяют для бытовых приборов (сплавы Х13Ю4, Х15Н60, Х20Н80), а также для промышленных и лабораторных печей (ОХ23Ю5).

**Сплавы с заданным коэффициентом теплового расширения.** Они содержат большое количество никеля. Сплав 36Н, называемый инваром (<0,05% Cu 35-37% Ni), почти не расширяется при температурах от -60 до +100°C. Его применяют для изготовления деталей приборов, требующих постоянных размеров в интервале климатических изменений температур (детали геодезических приборов и др.).

Сплав 29НК, называемый *коваром* (<0,03% С; 28,5-29,5% Ni;17-18% Со), имеет низкий коэффициент теплового расширения в интервале температур от -70° до +420°С. Его применяют для изготовления деталей, впаиваемых в стекло при создании вакуумно-плотных спаев.

### **8.3 Сплавы с заданными упругими свойствами**

В ряде случаев требуется металл с постоянным, не изменяющимся с температурой, модулем упругости (Гука – Е, Юнга – G). Такие сплавы применяются для пружин различных точных приборов, для камертонов и т.п. Их называют элинварами. Их состав на основе никеля, хрома и железа.

К таким сплавам относят сплав 40КХНМ (0,07-0,12% С; 15-17% Ni;19-21%Cr;6,4-7,4% Мо;39-41%Со). Это высокопрочный с высокими упругими свойствами, немагнитный, коррозионостойкий в агрессивных средах сплав. Применяют его для изготовления заводных пружин часовых механизмов, витых цилиндрических пружин, работающих при температурах до 400°С. Элинвар марки Н35ХМВ (1,2 % углерода, никеля 35 %, хрома 9 %, молибдена 2 %, вольфрама 3 %) обеспечивает температурную погрешность хода часов порядка 0,5 с в сутки на 1°С. Сплав марки 42НХТЮ (0,05 % углерода, никеля 42 %, хрома 5,5 %) высокопрочный, и применяется для упругих элементов, работающих до температур 100°С.

## **ТЕМА 9. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

Неметаллические материалы – это органические, и неорганические полимерные материалы: различные виды пластических масс, композиционные материалы на неметаллической основе, каучуки и резины, клеи, герметики, лакокрасочные покрытия, а также графит, стекло, керамика. В качестве конструкционных материалов они служат важным дополнением к металлам, в некоторых случаях с успехом заменяют их, а иногда сами являются незаменимыми. Достоинством неметаллических материалов являются такие их свойства, как достаточная прочность, жесткость и эластичность при малой плотности, светопрозрачность, химическая стойкость, диэлектрические свойства, делают эти материалы часто незаменимыми. Также следует отметить их технологичность и эффективность при использовании. Трудоемкость

при изготовлении изделий из неметаллических материалов в 5-6 раз ниже, они в 4-5 раз дешевле по сравнению с металлическими. В связи с этим непрерывно возрастает использование неметаллических материалов в машиностроении, авиационной и бытовой технике и др.

### 9.1 Керамика

Керамика – это многокомпонентный, гетерогенный материал, получаемый спеканием высокодисперсных минеральных частиц (оксидов, карбидов, нитридов и др.). Керамика обычно представляет собой сложную многофазную систему. В ее составе различают кристаллическую, стекловидную и газовую фазы (как правило, в виде закрытых пор).

Кристаллическая фаза представляет собой определенные химические соединения или твердые растворы (рис.9.1.). Эта фаза составляет основу керамики и определяет значения механической прочности, термостойкости и других ее основных свойств. Стекловидная фаза находится в керамике в виде прослоек стекла, связывающих кристаллическую фазу. Обычно керамика содержит 1-10% стекло фазы, которая снижает механическую прочность и ухудшает тепловые показатели. Однако стеклообразующие компоненты облегчают технологию изготовления изделий. Газовая фаза представляет собой газы, находящиеся в порах керамики; по этой фазе керамику подразделяют на плотную, без открытых пор и пористую. Наличие даже закрытых пор нежелательно, так как снижается механическая прочность материала.

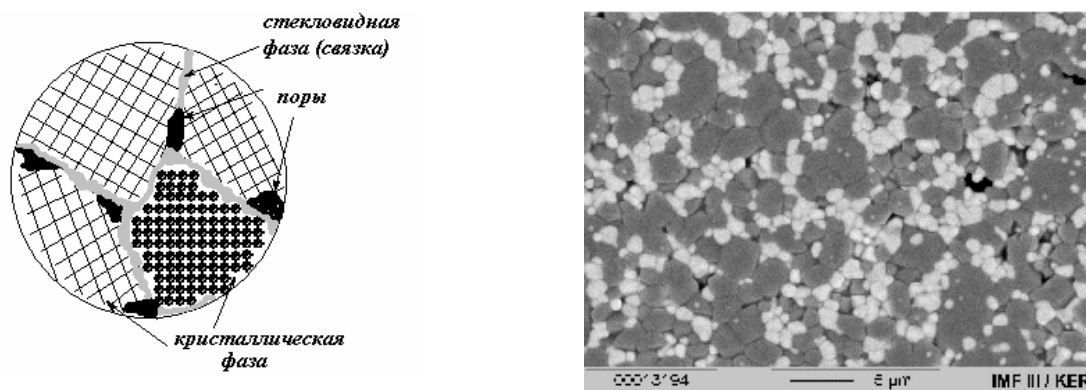


Рис.9.1. Структура керамики.

Технологическая схема керамического производства в качестве обязательных включает в себя следующие операции:

- тонкое измельчение и тщательное смешивание исходных компонентов;



- пластификация массы и образование формовочного полуфабриката;
- формование заготовок из пластифицированной массы;
- спекание изделий (высокотемпературный обжиг).

По дисперсности частиц (поликристаллов) с учетом пористости, газо- и водопроницаемости керамика образует следующую классификацию:

- плотная керамика, со спекшимися поликристаллами (с водопоглощением меньше 5 %), имеющим блестящий раковистый излом и не пропускающим воду; сюда относятся: фарфор, плитка, многие виды технической керамики;

- пористая керамика, с большим межзеренным пространством (с водопоглощением больше 5 %), имеющим тусклый землистый излом, и при отсутствии глазури пропускающим газ и воду; сюда относятся: фаянсовые изделия, кирпич, керамические блоки, облицовочная плитка и др.

В зависимости от зернистости керамика делятся на:

- тонкую керамику - это фаянс, майолика, фарфор, техническая керамика и др.
- грубую керамику - это кирпич, канализационные трубы и др.

Эти виды керамики также могут быть глазурованные и неглазурованные.

По производственно-отраслевому признаку и областям применения выделяют следующие виды керамики:

- строительная керамика - предназначенная для кладки зданий, сооружений; которая в свою очередь делится на: стеновую (кирпич, блоки, керамические камни); облицовочную - плитка для наружной и внутренней облицовке стен и полов; санитарно-техническую (раковины, унитазы, канализационные трубы);

- огнеупорные материалы, огнеупоры ( $t=1580\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) - изделия, применяемые для кладки промышленных печей, топков, аппаратов, работающих при высоких температурах, в том числе фарфоровой и фаянсовой посуды;

- химически стойкая керамика - предназначенная для применения в агрессивных средах, стойкая к кислотам, щелочам, расплавам;

- тонкая керамика - хозяйственная и лабораторная фарфоровая и фаянсовая посуда, художественная, декоративная и другие разновидности изделий;

- техническая и специальная керамика - применяемая в энергетике, авиационной, ракетно-космической, атомной и электронно-вычислительной технике, радиоэлектронике и автомобилестроение;

По практическому назначению техническая керамика делится на:

- конструкционную; сюда относят материалы для самолето-, ракетостроения, для двигателей внутреннего сгорания и др. целей;
- функциональную - это сверхпроводящая керамика; полупроводниковая, лазерная, керамическое ядерное горючее ( $U_2O_3$ ) и др.

## 9.2 Стекло

Стекло – твердый гомогенный (однородный) застывший сплав различных оксидов, не имеющий кристаллической структуры, аморфное изотропное тело, механические свойства которого постоянны во всех направлениях. Свойства стекла зависят от сочетания входящих в его состав компонентов.

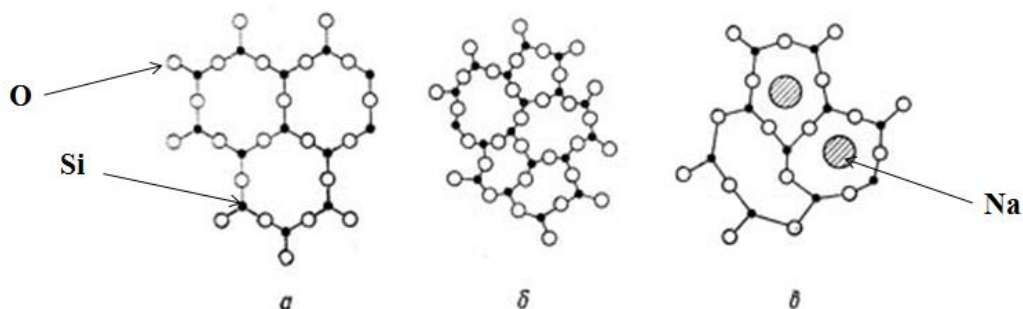


Рис.9.2. Кристаллическая структура  $SiO_2$  (а), аморфная структура  $SiO_2$  (б).

Аморфная  $SiO_2$  отличается от кристаллической структуры кварца  $SiO_2$  пространственной беспорядочной сетки, каркас которой образуют  $[SiO_4]$  - структурные элементы. В этот каркас входят прочие составные части стекла (рис.9.2.в.) (модификаторы сетки, такие как щелочи, щелочноземельные металлы и т. д.).

По виду стеклообразующего вещества неорганические стекла делятся на силикатные ( $SiO_2$ ), алюмосиликатные ( $Al_2O_3-SiO_2$ ), боросиликатные ( $B_2O_3-SiO_2$ ), алюмоборосиликатные ( $Al_2O_3-B_2O_5-SiO_2$ ), алюмофосфатные ( $Al_2O_3-P_2O_5$ ), халькогенидные (например,  $As_{31}Ge_{30}Se_{21}Te_{180}$ ), галогенидные и другие стекла.

По виду модификаторов различают щелочные, бесщелочные и кварцевые неорганические стекла. Прочность щелочных стекол под действием влаги уменьшается вдвое, так как вода выщелачивает стекло. При этом, образуются щелочные растворы, которые расклинивают стекло, вызывая появление микротрещин в поверхностном слое.

По технологии изготовления неорганическое стекло может быть получено выдуванием, литьем, штамповкой, вытягиванием в листы, трубки, волокна и др. Стекло выпускается промышленностью в виде готовых изделий, заготовок и отдельных деталей.

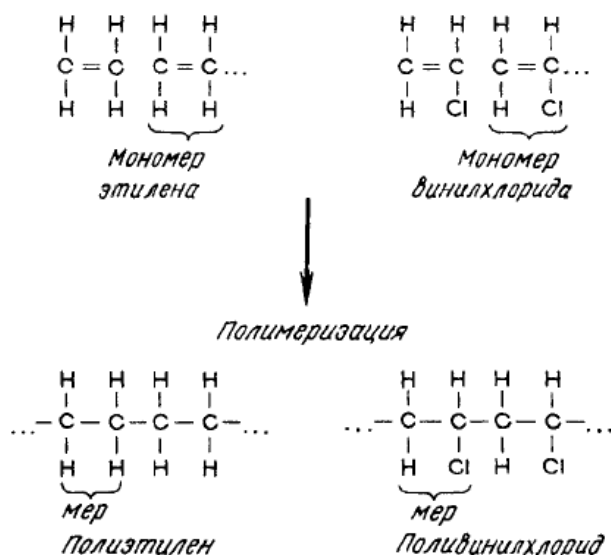
По назначению неорганические стекла делятся на техническое, строительное и бытовое (стеклотара, посудное, бытовое и др.).

Техническое стекло по области применения делится на электротехническое, транспортное; оптическое, светотехническое, термостойкое, тугоплавкое, легкоплавкое, химико-лабораторное и др.

### 9.3 Пластмассы

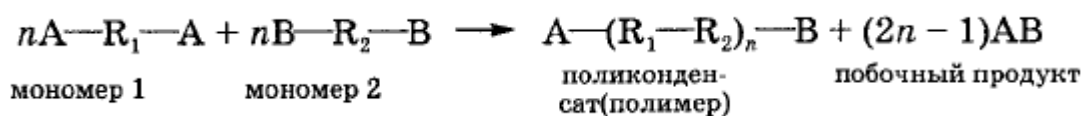
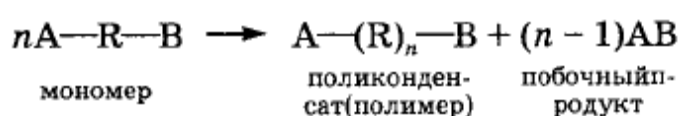
Пластмассы – это синтетические материалы, получаемые на основе органических и элементоорганических полимеров. Свойства пластмасс определяются свойствами полимеров, составляющих их основу.

Полимерами называются высокомолекулярные химические соединения, состоящие из многочисленных мало молекулярных звеньев (мономеров) одинакового строения.

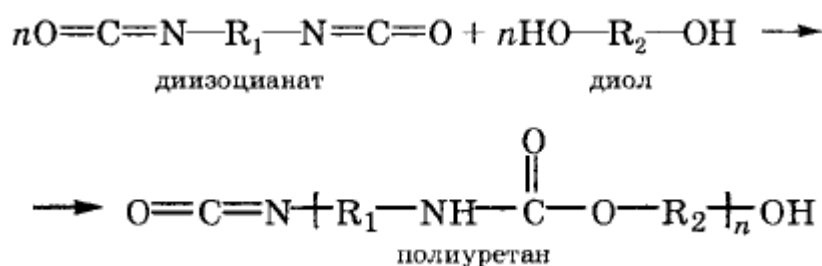


Различают природные и синтетические полимеры. К полимерам, встречающимся в природе, относятся натуральный каучук, целлюлоза, шерсть и т. д. Однако ведущее место занимают синтетические полимеры, получаемые в процессе соединения маломолекулярных соединений в высокомолекулярные с образованием длинных цепей - полимеризацией. В зависимости от способа образования высокомолекулярных синтетических соединений различают полимеры, получаемые либо в процессе поликонденсации, либо в результате реакции присоединения.

Поликонденсация - это ступенчатая реакция, заключающаяся в соединении большого количества одинаковых мономеров или двух различных групп мономеров в макромолекулы (поликонденсаты) с одновременным образованием побочных продуктов (вода, аммиак, хлороводород, диоксид углерода, метиловый спирт и др.). С помощью реакции поликонденсации получают полиамиды, полиэстеры, фенопласты, аминопласты, поликарбонаты, полисульфоны, силиконы и другие полимеры.



Полиприсоединение - процесс образования полимера в результате реакции множественного присоединения иономеров, содержащих предельные реакционные группы к мономерам, содержащим непредельные группы (двойные связи или активные циклы). В отличие от поликонденсации полиприсоединение протекает без выделения побочных продуктов.



По составу полимеры, используемые в пластмассах, делятся на органические и элементоорганические.

Органические полимеры, составляющие наиболее обширную группу соединений, состоят из атомов углерода, водорода, кислорода, азота, серы и галогенов.

Элементоорганические соединения содержат в составе основной цепи, кроме перечисленных, атомы кремния, титана, алюминия и других элементов, сочетающихся с органическими радикалами. В природе таких соединений нет. Это чисто синтетические полимеры. Их характерными представителями являются кремнийорганические соединения, основная цепь которых построена из атомов кремния и кислорода.

Своеобразие свойств полимеров обусловлено их структурой. Различают следующие типы полимерных структур: линейную, линейно-разветвленную, лестничную и пространственную с большими молекулярными группами и специфическими геометрическими построениями.

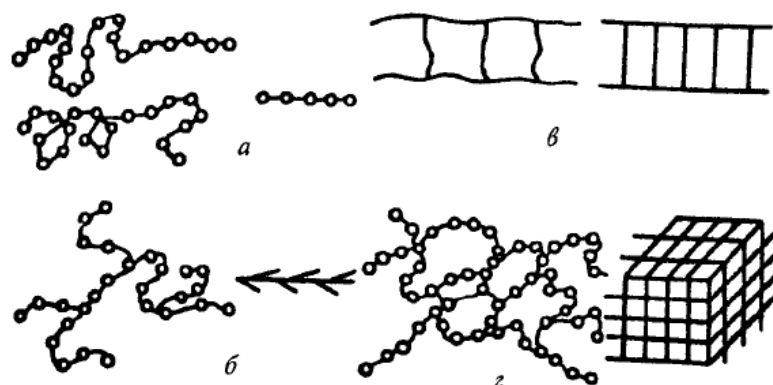
Для макромолекул полимеров с линейной (а) структурой характерна высокая гибкость. Полимеры с линейно-разветвленной (б) структурой помимо основной цепи имеют боковые ответвления. К типичным полимерам с линейной структурой относится полиэтилен, с линейно-разветвленной - полиизобутилен и полипропилен.

Молекула полимера с лестничной структурой (в) состоит из двух цепей, соединенных химическими связями. Полимеры с лестничной структурой, к которым относятся, например, кремнийорганические полимеры, характеризуются повышенной термостойкостью, жесткостью, они нерастворимы в органических растворителях.

Полимеры с пространственной структурой (г) образуют при соединении макромолекул между собой в поперечном направлении. В результате такого соединения макромолекул образуется сетчатая структура с различной плотностью сетки или пространственная сетчатая структура. Полимеры с пространственной структурой обладают большей жесткостью и термостойкостью, чем полимеры с линейной структурой, которые являются основой конструктивных неметаллических материалов.

По фазовому составу полимеры представляют собой системы, состоящие из кристаллических и аморфных областей. Кристаллическая форма полимеров способствует повышению их твердости, прочности, модуля упругости и других механиче-

ских характеристик, одновременно снижая гибкость молекул. Аморфная фаза уменьшает жесткость, делает полимер более эластичным, т. е. способным к большим обратимым деформациям.



*Рис.9.3.* Различные типы структур полимеров: а - линейная; б - линейно-разветвленная; в - лестничная; г – пространственная сетчатая.

Пластмассы состоят из нескольких компонентов: связующего вещества, наполнителя, пластификатора, стабилизатора, отвердителя. Обязательным компонентом является связующее вещество.

Наполнителями служат твердые материалы органического и неорганического происхождения. Они придают пластмассам прочность, твердость, теплостойкость, а также некоторые специальные свойства, например антифрикционные или, наоборот, фрикционные. Кроме того, наполнители снимают усадку при прессовании.

Пластификаторы представляют собой нелетучие жидкости с низкой температурой замерзания. Растворяясь в полимере, пластификаторы повышают его способность к пластической деформации. Их вводят для расширения температурной области высокоэластического состояния, снижения жесткости пластмасс и температуры хрупкости.

Стабилизаторы вводят в пластмассы для повышения долговечности. Светостабилизаторы предотвращают фотоокисление, а антиокислители - термоокислительные реакции.

Отвердители изменяют структуру полимеров, влияя на свойства пластмасс. Чаще используют отвердители, ускоряющие полимеризацию. К ним относятся оксиды некоторых металлов, уротропин и др.

Для пластмасс характерны следующие свойства:

- низкая плотность;
- не подвержены электрохимической коррозии;
- большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении;
- высокие диэлектрические свойства;
- хорошая окрашиваемость в любые цвета;
- механические свойства широкого диапазона;
- антифрикционные свойства;
- высокие теплоизоляционные свойства;
- высокие адгезионные свойства;
- хорошие технологические свойства. Изделия из пластмасс изготавливают способами безотходной технологии (без снятия стружки) - литьем, прессованием, формованием с применением невысоких давлений или в вакууме.

Недостатком большинства пластмасс является:

- невысокая теплостойкость (до 100-120 °С);
- низкая твердость;
- склонность к старению;
- ползучесть;
- нестойкость к большим статическим и динамическим нагрузкам.

По характеру связующего вещества пластмассы подразделяются на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные пластмассы изготавливают на основе термопластичных полимеров, которые при нагреве размягчаются и плавятся, а при охлаждении затвердевают. При этом материал не претерпевает химических превращений, что делает процесс плавления-затвердевания полностью обратимым. Термопластичные полимеры имеют линейную или линейно-разветвленную структуру макромолекул. Между молекулами действуют слабые силы и нет химических связей. Изделия из термо-

пластичных полимеров изготавливают литьем под давлением в водоохлаждаемые формы, прессованием, экструзией, выдуванием и другими способами.

Таблица 9.1

Типы термопластичных пластмасс и их области применения

Тип пластмассы	Интервал рабочих тем-р, °С	Область применения
Полиэтилен [-CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -] <sub>n</sub>	-70...+70	Упаковка, ненагруженные детали машин и оборудования, футляры, покрытия, фольги
Полистирол [-CH <sub>2</sub> -CH(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> )-] <sub>n</sub>	-40...+65	Оборудование радиотехники и фотографии, электроизоляция, теплоизоляционные материалы (пенополистирол)
Полипропилен [-CH <sub>2</sub> -CH(CH <sub>3</sub> )-] <sub>n</sub>	-20...+130	Трубы, детали автомобилей, элементы холодильников, емкости, упаковка
Поливинилхлорид [-CH <sub>2</sub> -CHCl-] <sub>n</sub>	-40...+70	Химическое оборудование, трубы, профили, детали машин, элементы насосов и вентиляторов, упаковка, покрытие полов, искусственная кожа, оконные рамы и т. п.
Политетрафторэтилен (тефлон) [-CF <sub>2</sub> -CF <sub>2</sub> -] <sub>n</sub>	-265...+260	Химическая, электротехническая, машиностроительная (подшипники) промышленность

Термореактивные пластмассы изготавливают на основе термореактивных полимеров, которые до нагрева имеют линейную структуру, а при нагреве размягчаются, затем в результате протекания химических реакций приобретают пространственную структуру и превращаются в твердое вещество, сохраняя и в дальнейшем высокую твердость. Последующий нагрев не размягчает. Готовый термореактивный полимер не плавится и не растворяется, поэтому в отличие от термопластичного не может подвергаться повторной переработке.

Основу всякого реактопласта составляет химически затвердевающая термореактивная смола - связующее вещество. Кроме того, в состав реактопластов входят наполнители, пластификаторы, отвердители, ускорители или замедлители и растворители. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые



материалы. В качестве порошковых наполнителей используют молотый кварц, тальк, графит, древесную муку, целлюлозу.

Таблица 9.2

Типы термореактивных пластмасс и их области применения

Тип пластмассы	Прочность при растяжении, МПа	Интервал рабочих тем-р, °С	Область применения
Фенопласт (фенол-формальдегид)	30	-60...+140	Мало нагруженные детали, корпуса приборов, панели, электроизоляционные детали
Аминопласт (карбамидо-формальдегид или меламино-формальдегид)	80	-60...+130	Детали осветительной аппаратуры, электротехнические и электроизоляционные детали, изделия бытового назначения
Волокнит (смола + волокна хлопка)	50	-60...+200	Шкивы, маховики, втулки, диски, кожухи, детали с повышенными антифрикционными свойствами
Асболокнит (смола+волокна асбеста)	60	-60...+200	Теплоизоляция
Стекловолокнит (смола+стекловолокно)	80-500	-60...+200	Электротехнические детали, корпуса приборов, кузова машин
Текстолит (смола+хлопчатобумажная ткань)	95	-40...+160	Шестерни, втулки, подшипники скольжения, конструкционные и электроизоляционные детали

#### 9.4 Резины

Резинотехнические изделия получают при специальной термической обработке (вулканизации) прессованных деталей из сырой резины, являющейся смесью каучука с серой и другими добавками.

Резина (от лат. *resina* «смола») состоит из смеси каучука  $(C_5H_8)_n$  (основа), наполнителя (сажа, оксид кремния, оксид титана, мел, барит, тальк), размягчителя (канифоль, вазелин), противостарителя (парафин, воск) и агентов вулканизации (сера, оксид цинка).

С увеличением содержания вулканизатора (серы) сетчатая структура резины становится более частой и менее эластичной. При максимальном насыщении серой (до 30-50 %) получают твердую резину (эбонит).

Резина имеет высокие эластические свойства, высокую упругость и сопротивляемость разрыву. Кроме того, резина обладает малой плотностью, высокой стойкостью против истирания, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами.

В резину используют следующие типы каучуков: натуральный (НК), бутадиеновый синтетический (СКБ), изопреновый синтетический (СКИ), бутадиеннитрильный (СКИ), силоксановый (СКТ), фторкаучук (СКФ), бутадиен метилстирольный (СКМС), бутадиенстирольный (СКС).

Таблица 9.3

Типы резин и их области применения

Наименование группы резин	Состав (каучуки и ингредиенты)	Назначение, характеристика	Область применения
Общего назначения	НК, СКИ, СКД, СКС и др.	Для эксплуатации при т-рах от -50 до 160° С в отсутствие масел, топлив и агрессивных сред	Шины, РТИ, транспортные ленты, приводные ремни, амортизаторы, резиновая обувь и др.
Теплостойкие	СКТ, СКФ, БК, СКЭП, СКЭП, АК	Для длительной эксплуатации при температурах 150-200° С и выше	Теплостойкие РТИ
Морозостойкие	СКС, НК, СКИ, СКС в комбинации с СКД, СКТ и др.	Для эксплуатации при температурах до -60° С и ниже	Морозостойкие РТИ
Стойкие к действию химических агрессивных сред	СКС, СКЭП, СКЭПТ, БК, ХК, СКН, ХСПЭ, СКФ, СКТ и др.	Для длительной эксплуатации в контакте с кислотами, щелочами, окислителями, паром и т. п.	Гуммирование химической аппаратуры, уплотнители, шланги и др. РТИ

Диэлектрические	Диэлектрические марки СКИ, СКД, СКС, СКЭП(Т), БК, СКТ с использованием минеральных наполнителей и неполярных пластификаторов	Для работы в условиях высоких напряжений; обладаю малыми диэлектрическими потерями	Изоляция проводов и кабелей, специальные перчатки, обувь, ковры и др.
Электропроводящие	НК, СКС, СКН, ХК и др. с использованием ацетиленовой сажи и графита	Для токопроводящих покрытий, нагревательных элементов, печатных схем	Антистатические РТИ, обувь, покрытия, защитная одежда, мед. изделия, кабели дальней связи и др.
Радиационностойкие	СКУ, СКС, СКИ, СКН, ХК и др. с использованием антирадов	Для работы под действием рентгеновских лучей и ионизирующих излучений	Детали рентгеновской аппаратуры, защитная одежда и др.

### ***9. 5 Композиционные материалы***

Композиционный материал – неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов, среди которых можно выделить армирующие элементы, обеспечивающие необходимые механические характеристики материала, и матрицу (или связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.

Матрица связывает композицию в монолит, придает ей форму и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают КМ с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной – полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической – керамические композиционные материалы (ККМ).

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, часто называемые упрочнителями. Они имеют высокую прочность, твердость, и модуль упругости. По

типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяют на дисперсноупрочненные, волокнистые и слоистые (рис. 9.4).

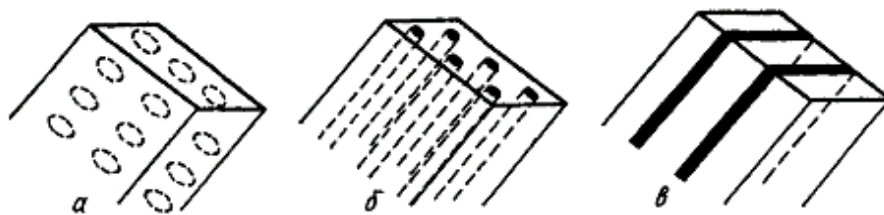


Рис.9.4. Типы упрочняющих наполнителей КМ.

Механическое поведение композиции определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Эффективность и работоспособность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, призванной обеспечить прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик.

В результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композиции, не только отражающий исходные характеристики его компонентов, но и включающий свойства, которыми изолированные компоненты не обладают. В частности, наличие границ раздела между армирующими элементами и матрицей существенно повышает трещиностойкость материала, и в композициях, в отличие от однородных металлов, повышение статической прочности приводит не к снижению, а, как правило, к повышению характеристик вязкости разрушения.

### **9.5.1 Волокнистые композиционные материалы**

Часто композиционный материал представляет собой слоистую структуру, в которой каждый слой армирован большим числом параллельных непрерывных волокон. Каждый слой можно армировать также непрерывными волокнами, сотканными в ткань, которая представляет собой исходную форму, по ширине и длине соответствующую конечному материалу. Нередко волокна сплетают в трехмерные структуры.

Прочность композиционных (волокнистых) материалов определяется свойствами волокон; матрица в основном должна перераспределять напряжения между армирующими элементами. Поэтому прочность и модуль упругости волокон должны

быть значительно больше, чем прочность и модуль упругости матрицы. Жесткие армирующие волокна воспринимают напряжения, возникающие в композиции при нагружении, придают ей прочность и жесткость в направлении ориентации волокон.

Композиционные материалы на металлической основе обладают высокой прочностью и жаропрочностью, в то же время они малопластичны. Однако волокна в композиционных материалах уменьшают скорость распространения трещин, зарождающихся в матрице, и практически полностью исчезает внезапное хрупкое разрушение. Отличительной особенностью волокнистых одноосных композиционных материалов являются анизотропия механических свойств вдоль и поперек волокон и малая чувствительность к концентраторам напряжения.

Основным недостатком композиционных материалов с одно и двумерным армированием является низкое сопротивление межслойному сдвигу и поперечному обрыву. Этому лишены материалы с объемным армированием.

#### ***9.5.2 Дисперсно-упрочненные композиционные материалы***

В отличие от волокнистых композиционных материалов в дисперсно-упрочненных композиционных материалах матрица является основным элементом, несущим нагрузку, а дисперсные частицы тормозят движение в ней дислокаций. Высокая прочность достигается при размере частиц 10-500 нм при среднем расстоянии между ними 100-500 нм и равномерном распределении их в матрице. Прочность и жаропрочность в зависимости от объемного содержания упрочняющих фаз не подчиняются закону аддитивности. Оптимальное содержание второй фазы для различных металлов неодинаково, но обычно не превышает 5-10 об. %.

Наиболее широко используют сплавы на основе алюминия – САП (спеченный алюминиевый порошок).

Плотность этих материалов равна плотности алюминия, они не уступают ему по коррозионной стойкости и даже могут заменять титан и коррозионно-стойкие стали при работе в интервале температур 250-500 °С. По длительной прочности они превосходят деформируемые алюминиевые сплавы. Длительная прочность для сплавов САП-1 и САП-2 при 500 °С составляет 45-55 МПа.

Большие перспективы у никелевых дисперсно-упрочненных материалов. Наиболее высокую жаропрочность имеют сплавы на основе никеля с 2-3 об. % двуоксида тория или двуоксида гафния. Матрица этих сплавов обычно твердый раствор Ni + 20 % Cr, Ni + 15 % Mo, Ni + 20 % Cr и Mo. Широкое применение получили сплавы ВДУ-1 (никель, упрочненный двуокисью тория), ВДУ-2 (никель, упрочненный двуокисью гафния) и ВД-3 (матрица Ni +20 % Cr, упрочненная окисью тория). Эти сплавы обладают высокой жаропрочностью. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы, так же как волокнистые, стойки к разупрочнению с повышением температуры и длительности выдержки при данной температуре.

### ***9.5.3 Стекловолокниты***

Стекловолокниты – это композиция, состоящая из синтетической смолы, являющейся связующим, и стекловолокнистого наполнителя. В качестве наполнителя применяют непрерывное или короткое стекловолокно. Прочность стекловолокна резко возрастает с уменьшением его диаметра (в следствие влияния неоднородностей и трещин, возникающих в толстых сечениях). Свойства стекловолокна зависят также от содержания в его составе щелочи; лучшие показатели у бесщелочных стекол алюмоборосиликатного состава.

Неориентированные стекловолокниты содержат в качестве наполнителя короткое волокно. Это позволяет прессовать детали сложной формы, металлической арматурой. Материал получается с изотопными прочностными характеристиками, намного более высокими, чем у пресс-порошков и даже волокнитов. Представителями такого материала являются стекловолокниты АГ-4В, а также ДСВ (дозирующиеся стекловолокниты), которые применяют для изготовления силовых электротехнических деталей, деталей машиностроения (золотники, уплотнения насосов и т. д.). При использовании в качестве связующего непредельных полиэфиров получают премиксы ПСК (пастообразные) и препреги АП и ППМ (на основе стеклянного мата). Препреги можно применять для крупногабаритных изделий простых форм (кузова автомашин, лодки, корпуса приборов и т. п.).

### ***9.5.4 Карбоволокниты***

Карбоволокниты (углепласты) представляют собой композиции, состоящие из полимерного связующего (матрицы) и упрочнителей в виде углеродных волокон (карбоволокон).

Высокая энергия связи С-С углеродных волокон позволяет им сохранить прочность при очень высоких температурах (в нейтральной и восстановительной средах до 2200 °С), а также при низких температурах. От окисления поверхности волокна предохраняют защитными покрытиями (пиролитическими). В отличие от стеклянных волокон карбоволокна плохо смачиваются связующим (низкая поверхностная энергия), поэтому их подвергают травлению. При этом увеличивается степень активирования углеродных волокон по содержанию карбоксильной группы на их поверхности. Межслойная прочность при сдвиге углепластиков увеличивается в 1,6-2,5 раза. Применяется вискеризация нитевидных кристаллов  $TiO_2$ ,  $Al_4N_3$ , что дает увеличение межслойной жесткости в 2 раза и прочности в 2,8 раза. Применяются пространственно армированные структуры.

Связующими служат синтетические полимеры (полимерные карбоволокниты); синтетические полимеры, подвергнутые пиролизу (коксованные карбоволокниты); пиролитический углерод (пироуглеродные карбоволокниты).

#### ***9.5.5 Карбоволокниты с углеродной матрицей***

Коксованные материалы получают из обычных полимерных карбоволокнитов, подвергнутых пиролизу в инертной или восстановительной атмосфере. При температуре 800-1500 °С образуются карбонизированные, при 2500-3000 °С графитированные карбоволокниты. Для получения пироуглеродных материалов упрочнитель выкладывается по форме изделия и помещается в печь, в которую пропускается газообразный углеводород (метан). При определенном режиме (температуре 1100 °С и остаточном давлении 2660 Па) метан разлагается и образующийся пиролитический углерод осаждается на волокнах упрочнителя, связывая их.

Карбоволокнит с углеродной матрицей типа КУП-ВМ по значениям прочности и ударной вязкости в 5-10 раз превосходит специальные графиты; при нагреве в инертной атмосфере и вакууме он сохраняет прочность до 2200 °С, на воздухе окисляется при 450 °С и требует защитного покрытия.

Коэффициент трения одного карбоволокнита с углеродной матрицей по другому высок (0,35-0,45), а износ мал (0,7-1 мкм на тормажение).

### **9.5.6 Бороволокниты**

Бороволокниты представляют собой композиции из полимерного связующего и упрочнителя – борных волокон.

Бороволокниты отличаются высокой прочностью при сжатии, сдвиге и срезе, низкой ползучестью, высокими твердостью и модулем упругости, теплопроводностью и электропроводимостью. Ячеистая микроструктура борных волокон обеспечивает высокую прочность при сдвиге на границе раздела с матрицей.

В качестве матриц для получения бороволокнитов используют модифицированные эпоксидные и полиимидные связующие. Бороволокниты КМБ-1 и КМБ-1к предназначены для длительной работы при температуре 200 °С; КМБ-3 и КМБ-3к не требуют высокого давления при переработке и могут работать при температуре не выше 100 °С; КМБ-2к работоспособен при 300 °С.

Бороволокниты обладают высокими сопротивлениями усталости, они стойки к воздействию радиации, воды, органических растворителей и горюче-смазочных материалов.

### **9.5.7 Органоволокниты**

Органоволокниты представляют собой композиционные материалы, состоящие из полимерного связующего и упрочнителей (наполнителей) в виде синтетических волокон. Такие материалы обладают малой массой, сравнительно высокими удельной прочностью и жесткостью, стабильны при действии знакопеременных нагрузок и резкой смене температуры. Для синтетических волокон потери прочности при текстильной переработке небольшие; они малочувствительны к повреждениям.

К органоволокнителям значения модуля упругости и температурных коэффициентов линейного расширения упрочнителя и связующего близки. Происходит диффузия компонентов связующего в волокно и химическое взаимодействие между ними. Органоволокниты устойчивы в агрессивных средах и во влажном тропическом климате; диэлектрические свойства высокие, а теплопровод-



ность низкая. Большинство органоволокнитов может длительно работать при температуре 100-150 °С, а на основе полиимидного связующего и полиоксадиазольных волокон – при температуре 200-300 °С.

В комбинированных материалах наряду с синтетическими волокнами применяют минеральные (стеклянные, карбоволокна и бороволокна). Такие материалы обладают большей прочностью и жесткостью.

### ***9.6 Лакокрасочные материалы***

Лакокрасочные материалы представляют собой многокомпонентные составы, в жидком состоянии наносимые на поверхность изделий и высыхающие с образованием пленок, удерживаемых силами адгезии. Высохшие пленки называют лакокрасочными покрытиями.

Назначение лакокрасочных покрытий - защита металлов от коррозии, дерева и тканей - от гниения и набухания. Кроме того, они служат декоративным целям, придавая изделиям желаемый внешний вид.

Основными требованиями, предъявляемыми к лакокрасочным покрытиям, являются высокая адгезия к защищаемым поверхностям; близкие значения температурных коэффициентов линейного расширения покрытия и металла; высокая плотность, беспористость, водо- и газонепроницаемость; высокая эластичность пленки при достаточной твердости и механической прочности; теплостойкость, химическая стойкость и светостойкость.

Основные компоненты лакокрасочных материалов - пленкообразователи, растворители и пигменты.

Пленкообразователи сообщают лакокрасочным материалам способность к образованию пленки и определяют ее основные свойства. Пленкообразующими веществами могут быть высыхающие растительные масла, синтетические смолы и эфиры целлюлозы. Различают неотверждаемые термопластичные и отверждаемые термореактивные пленкообразователи.

Растворителями лакокрасочных материалов служат скипидар, уайт-спирит, ацетон, спирты. Растворители подбирают в зависимости от пленкообразующего вещества: для масел используют скипидар и уайт-спирит; для смол - спирты, ацетон и

## 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Лабораторный практикум выполняется по индивидуальному графику бригадами, состоящими из 3 студентов. График выполнения лабораторных работ формируется преподавателем в начале каждого семестра и представляется студентам на первом аудиторном занятии лабораторного практикума. Выполнение лабораторных работ предполагает значительную самостоятельную работу как на этапе предварительной подготовки к работе, так и при выполнении работы, оформлении отчета и подготовки к «защите» работы.

### ***2.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы***

Подготовка к лабораторной работе осуществляется студентом *до аудиторных занятий*, в часы, отведенные на самостоятельную работу (см. пункт 3.3).

*Студент обязан приходить на занятие подготовленным. Наличие «заготовки» к лабораторной работе является обязательным условием допуска студента к выполнению лабораторной работы.*

*Студенты, не имеющие подготовки, к выполнению лабораторной работы не допускаются.*

### ***2.2 Выполнение лабораторной работы в лаборатории***

На выполнение каждой лабораторной работы отводится 2 часа аудиторного времени, в это время включается: получение допуска к работе, выполнение необходимых измерений и «защита» работы выполненной на предыдущем занятии.

Перед выполнением работы преподаватель проверяет степень подготовленности каждого студента. Для этого студент должен предоставить «заготовку» отчета в индивидуальном лабораторном журнале ответить на следующие вопросы:

- Какова цель экспериментальной задачи? Каковы основы теории изучаемого явления, основные понятия и формулы?
- Каков принцип работы экспериментальной установки? Перечислите основные этапы эксперимента.

Получив допуск к выполнению лабораторной работы, студент должен ознакомиться с измерительными приборами, используемыми в процессе выполнения работы, получить у лаборанта необходимое дополнительное оборудование, подготовить оборудование к проведению эксперимента согласно методическому руководству. После чего предъявить подготовленное к работе оборудование для проверки лаборанту или преподавателю. Только после получения разрешения от преподавателя или лаборанта можно приступать к выполнению измерений.

*При выполнении работы следует соблюдать правила техники безопасности, обращаться с приборами и оборудованием следует бережно и аккуратно, применять приборы только в соответствии с их назначением.*

Выполнив все измерения, выключить установку, предъявить преподавателю результаты измерений для проверки. Если при записи результатов или в ходе эксперимента была допущена ошибка, опыт повторяется вновь. Если результаты удовлетворительны, преподавателем делается отметка о выполнении студентом лабораторной работы (ставится подпись и дата в отчете студента).

Отчеты без подписи преподавателя в дальнейшем к «защите» не принимаются.

После подписи результатов преподавателем, студенту необходимо привести лабораторную установку в исходное состояние, сдать лаборанту выданное дополнительное оборудование и привести в порядок рабочее место.

### **2.3 Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы**

Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы осуществляется студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу (см. пункт 2.3).

После оформления отчета студент готовится к «защите» лабораторной работы, изучая теоретические основы данной темы, ориентируясь на контрольные вопросы, приведенные в методических указаниях. Для получения зачета по лабораторной работе студент представляет преподавателю оформленный отчет со всеми необходимыми расчетами и «защищает» его в ходе последующего собеседования.

### **2.4 Наименование предлагаемых к выполнению лабораторных работ и методические указания к ним**

1. Изучение устройства металлографического микроскопа. Приготовление микрошлифов
2. Процесс кристаллизации
3. Изучение структурных составляющих двойных сплавов
4. Изучение структурных составляющих диаграммы железо-углерод
5. Изучение микроструктуры сталей в равновесном состоянии
6. Изучение микроструктуры чугунов
7. Определение твердости металлов по методу Бринелля
8. Определение твердости по методу Роквелла
9. Расшифровка марок сталей

Методические указания по выполнению выше перечисленных лабораторных работ представлены в пособии Материаловедение [Электронный ресурс]: практикум / В. В. Нецименко; АмГУ, ИФФ. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2017. - 85 с. . – Режим доступа : [https://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU\\_Edition/7708.pdf](https://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/7708.pdf)

В пособии каждая работа содержит теоретический материал, методику эксперимента, указания по выполнению эксперимента и обработке результатов измерений, контрольные вопросы, а также список рекомендуемой учебной литературы.

## **3 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ**

### ***3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы***

В высшей школе студент должен прежде всего сформировать потребность в знаниях и научиться учиться, приобрести навыки самостоятельной работы, необходимые для непрерывного самосовершенствования, развития профессиональных и интеллектуальных способностей.

Самостоятельная работа – это процесс активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия преподавателей.

Для успешной самостоятельной работы студент должен планировать свое время и за основу рекомендуется брать рабочую программу учебной дисциплины.

При организации самостоятельной работы следует взять за правило:

- учиться ежедневно, начиная с первого дня семестра, пропущенные дни будут потеряны безвозвратно;
- чтобы выполнить весь объем самостоятельной работы, необходимо заниматься по 3–5 часов ежедневно;
- начиная работу, надо выбрать что-нибудь среднее по трудности, затем перейти к более трудной работе, и напоследок оставить легкую часть, требующую не столько больших интеллектуальных усилий, сколько определенных моторных действий.

Виды заданий для внеаудиторной самостоятельной работы, их содержание и характер могут иметь вариативный и дифференциальный характер, учитывать специфику специальности, изучаемой дисциплины, индивидуальные особенности студента.

### ***3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением***

Важной составляющей самостоятельной внеаудиторной подготовки по всем типам занятий является работа с литературой. Умение работать с литературой озна-

чает научиться осмысленно пользоваться учебно-методическим и другим информационным обеспечением дисциплины.

Для изучения дисциплины вся рекомендуемая литература подразделяется на основную и дополнительную и приводится в п. 10 рабочей программы дисциплины.

К основной литературе относятся источники, необходимые для полного и твердого усвоения учебного материала (учебники и учебные пособия).

Поскольку в учебной литературе (учебниках) зачастую остаются неосвещенными современные проблемы, а также не находят отражения новые документы, события, явления, научные открытия последних лет, то рекомендуется для более углубленного изучения программного материала дополнительная литература.

Прежде чем приступить к чтению, необходимо запомнить или записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания, название интересующих глав.

Содержание (оглавление) дает представление о системе изложения ключевых положений всей публикации и помогает найти нужные сведения.

Предисловие или введение книги поможет установить, на кого рассчитана данная публикация, какие задачи ставил перед собой автор, содержится краткая информация о содержании глав работы. Иногда полезно после этого посмотреть послесловие или заключение. Это помогает составить представление о степени достоверности или научности данной книги.

Изучение научной учебной и иной литературы требует ведения рабочих записей. Форма записей может быть весьма разнообразной: простой или развернутый план, тезисы, цитаты, конспект. Такие записи удлиняют процесс проработки, изучения книги, но способствуют ее лучшему осмыслению и усвоению, выработке навыков кратко и точно излагать материал. При изучении литературы особое внимание следует обращать на новые термины и понятия. Записи позволяют восстановить в памяти ранее прочитанное без дополнительного обращения к самой книге.

Процесс изучения дисциплины предполагает также активное использование информационных технологий при организации своей познавательной деятельности.

Наличие огромного количества материалов в Сети и специализированных поисковых машин делает Интернет незаменимым средством при поиске информации в процессе обучения.

Однако при использовании интернет-ресурсов следует учитывать следующие рекомендации:

- необходимо критически относиться к информации;
- следует научиться обрабатывать большие объемы информации, представленные в источниках, уметь видеть сильные и слабые стороны, выделять из представленного материала наиболее существенную часть;
- необходимо избегать плагиата, поэтому, если текст источника остается без изменения, необходимо сделать ссылки на автора работы.

### ***3.3 Подготовка к лабораторным работам***

Подготовка к лабораторным работам осуществляется студентом во внеаудиторное время в часы, отведенные на самостоятельную работу. Подготовка требует немалого времени, поэтому целесообразно планировать ее заранее за несколько дней до занятия и целесообразно проводить в следующей последовательности.

1. Внимательно ознакомьтесь с описанием соответствующей лабораторной работы руководствуясь методическими указаниями к выполнению лабораторной работе, уясните цель и задачи эксперимента.

2. Используя конспект лекций и рекомендованную в описании лабораторной работы учебную литературу, изучите теоретические вопросы, относящиеся к лабораторному эксперименту. Выясните теоретические положения, знание которых необходимо для выполнения работы и понимания полученных результатов.

3. Изучите принципиальную схему лабораторной установки, приведенную в описании работы. Ознакомьтесь с применяемым оборудованием, контрольно-измерительными приборами, принципом их действия, правилами эксплуатации.

4. Ознакомьтесь с порядком выполнения работы, усвойте методику измерения физических величин в лабораторном эксперименте, последовательность операций и форму представления полученных результатов.

5. В индивидуальном лабораторном журнале подготовьте «заготовку отчета», который должен быть отражением работы по систематизации приобретенных знаний, опорным планом для проведения эксперимента.

«Заготовку отчета» рекомендуется выполнять по следующей схеме:

- номер, название и цель работы;
- оборудование, приборы и материалы, применяемые в процессе измерений;
- краткий конспект теоретических положений по теме исследования – анализ физических основ метода и описание методики эксперимента, который включает:
  - физическое явление, изучаемое в работе, связь между величинами, его описывающими;
  - объект исследования, его особенности;
  - физическое явление, положенное в основу метода измерений;
  - зависимость, которая может быть экспериментально проверена;
  - условия, позволяющие осуществить такую проверку;
  - и поясняющие теоретический материал рисунки;
- принципиальная схема установки;
- описание метода измерения;
- заготовки таблиц, в которых будут представлены результаты измерений и расчетов (примеры таблиц даются в методическом указании к работе).

6. Проверьте степень подготовленности к лабораторному занятию по контрольным вопросам, приводимым в описании работы.

Окончательное оформление работы, обработка результатов эксперимента и подготовка к защите по контрольным вопросам проводится студентом в часы, отведенные на самостоятельную работу.

К следующему (после выполнения очередной лабораторной работы) занятию каждый студент должен представить окончательный отчет о выполненной лабораторной работе, в который входит «заготовка отчета» дополненная следующими пунктами:

- результаты измерений и вычислений в виде таблиц (или ином виде, согласно методическим рекомендациям к данной лабораторной работе);



- расчетные формулы, по которым производились вычисления с примером вычисления по каждой формуле, что позволяет при необходимости быстро проверить правильность расчета;
- систематизированные результаты эксперимента – схемы, графики, диаграммы и т.п., в соответствии с заданием на лабораторную работу и требованиям, предъявляемым к их оформлению;
- оценка надежности и достоверности результатов (примеры вычислений величин, измеряемых косвенно, и погрешностей для прямых и косвенных измерений);
- основные выводы по результатам работы, вытекающие из экспериментальных данных или на основании сравнения полученных результатов с теоретическими данными, если это возможно с объяснением расхождения.

### ***3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем***

Для подготовки конспекта рекомендуется использовать основную и дополнительную литературу.

При написании конспекта придерживайтесь следующих рекомендаций.

1. Прежде чем приступить к чтению, необходимо записать выходные данные издания: автор, название, издательство, год издания.
2. Внимательно прочитайте текст.
3. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.
4. Выделите главное, составьте план.
5. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.
6. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана.

При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно. Грамотно записывайте цитаты, учитывайте лаконичность, значимость мысли. В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения.

### ***3.5 Подготовка к текущему и промежуточному контролю***

*Подготовка к тестированию.* В современном образовательном процессе тестирование как новая форма оценки знаний занимает важное место.

Цель тестирований в ходе учебного процесса студентов состоит не только в систематическом контроле знаний, но и способствует повышению эффективности обучения учащихся, позволяет выявить уровень усвоения теоретического материала, выявить уровень практических умений и аналитических способностей студентов. А на основе этого идет коррекция процесса обучения и планируются последующие этапы учебного процесса.

При подготовке к тесту следует, прежде всего, просмотреть конспект лекций и практических занятий и отметить в них имеющиеся темы и практические задания, относящиеся к тематике теста. Особо следует уделить внимание содержанию тем заданных на самостоятельное изучение, так как часть вопросов в тестах может относиться именно к этим темам. Если какие – то лекционные вопросы и практические задания на определенные темы не были разобраны на занятиях (или решения которых оказались не понятными), следует обратиться к учебной литературе, рекомендованной преподавателем. Полезно самостоятельно решить несколько типичных заданий по соответствующему разделу.

При подготовке к тесту не следует просто заучивать, необходимо понять логику изложенного материала. Этому немало способствует составление развернутого плана, таблиц, схем. Как и любая другая форма подготовки к контролю знаний, тестирование имеет ряд особенностей, знание которых помогает успешно выполнить тест.

Можно дать следующие методические рекомендации:

- прежде всего, следует внимательно изучить структуру теста, оценить объем времени, выделяемого на данный тест, увидеть, какого типа задания в нем содержатся, что поможет настроиться на работу;
- лучше начинать отвечать на те вопросы, в правильности решения которых нет сомнений, пока не останавливаясь на тех, которые могут вызвать долгие раздумья, что позволит успокоиться и сосредоточиться на выполнении более трудных вопросов;

- очень важно всегда внимательно читать задания до конца, не пытайтесь понять условия «по первым словам» или выполнив подобные задания в предыдущих тестированиях, так как такая спешка нередко приводит к досадным ошибкам в самых легких вопросах;

- если Вы не знаете ответа на вопрос или не уверены в правильности, следует пропустить его и отметить, чтобы потом к нему вернуться;

- думайте только о текущем задании, необходимо концентрироваться на данном вопросе и находить решения, подходящие именно к нему;

- многие задания можно быстрее решить, если не искать сразу правильный вариант ответа, а последовательно исключать те, которые явно не подходят, что позволяет в итоге сконцентрировать внимание на одном-двух вероятных вариантах;

- рассчитывать выполнение заданий нужно всегда так, чтобы осталось время на проверку и доработку (примерно 1/3-1/4 запланированного времени), что позволит свести к минимуму вероятность описок и сэкономить время, чтобы набрать максимум баллов на легких заданиях и сосредоточиться на решении более трудных, которые вначале пришлось пропустить;

- процесс угадывания правильных ответов желательно свести к минимуму, так как это чревато тем, что Вы забудете о главном: умении использовать имеющиеся накопленные в учебном процессе знания, и будете надеяться на удачу.

*Подготовка к промежуточной аттестации.* Формой промежуточной аттестации (контроля) является экзамен. Экзамен может проводиться в виде письменного опроса с последующим собеседованием или с применением тестирования.

Экзамен – форма проверки полученных теоретических и практических знаний, их прочность, развитие творческого мышления, приобретение навыков самостоятельной работы, умения синтезировать полученные знания.

Основная цель подготовки к экзамену – достичь понимания законов и явлений, а не только механически заучить материал.

Подготовка к устной сдаче экзамена включает в себя несколько основных этапов:

- просмотр программы учебного курса;

- определение необходимых для подготовки источников (учебников, дополнительной литературы и т.д.) и их изучение;
- использование конспектов лекций;
- консультирование у преподавателя.

Для успешной сдачи экзамена рекомендуется соблюдать несколько правил.

1. Подготовка к экзамену начинается с первого занятия по дисциплине, на котором студенты получают общую установку преподавателя и перечень основных требований к текущей и промежуточной аттестации. При этом важно с самого начала планомерно осваивать материал, руководствуясь, прежде всего перечнем вопросов к экзамену, конспектировать важные для решения учебных задач источники.

2. Интенсивная подготовка должна начаться не позднее, чем за месяц-полтора до экзамена. В течение этого времени нужно успеть повторить и систематизировать изученный материал.

3. За несколько дней перед экзаменом распределите вопросы равномерно на все дни подготовки, возможно, выделив последний день на краткий повтор всего курса.

4. Каждый вопрос следует проработать по конспекту лекций, по учебнику или учебному пособию.

5. После повтора каждого вопроса нужно, закрыв конспект и учебники, самостоятельно воспроизвести иллюстративный материал с последующей самопроверкой.

6. Все трудные и не полностью понятые вопросы следует выписывать на отдельный лист бумаги, с последующим уточнением ответов на них у преподавателя на консультации.

7. При ответе на вопросы билета студент должен продемонстрировать знание теоретического материала и умение применить при анализе качественных и количественных задач. Изложение материала должно быть четким, кратким и аргументированным.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Рекомендации по организации самостоятельной работы обучающихся [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Е.М. Емышева [и др.]. – Москва: Изд-во РГТУ, 2013. – 125 с. – Режим доступа:

<https://www.rsuh.ru/upload/iblock/c70/c70c10002f5932ab48798aae10f5a351.do>

2 Лызь, Н.А. Тенденции развития высшего образования [Электронный ресурс]: учебно-метод. пособие / Н.А Лызь, А.Е. Лызь. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – 48 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/2332317/>

3 Солнцев Ю.П. Материаловедение [Электронный ресурс] : учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : ХИМИЗДАТ, 2017. — 783 с. — 978-5-93808-294-6. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67345.html>

4 Солнцев Ю.П. Технология конструкционных материалов [Электронный ресурс] : учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Б.С. Ермаков, В.Ю. Пирайнен. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : ХИМИЗДАТ, 2017. — 504 с. — 978-5-93808-298-4. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67356.html>

5 Науменко В.С. Технология конструкционных материалов [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.С. Науменко, Т.В. Тришина, В.Г. Козлов. — Электрон. текстовые данные. — Воронеж: Воронежский Государственный Аграрный Университет им. Императора Петра Первого, 2017. — 308 с. — 978-5-7267-0958-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/72768.html>

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Краткий конспект лекций	4
1.1 Общие рекомендации по организации работы на лекции	4
1.2 Краткое содержание курса лекций	6
2 Методические рекомендации к лабораторным работам	130
2.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы	130
2.2 Выполнение лабораторной работы в лаборатории	130
2.3 Оформление отчета и подготовка к «защите» лабораторной работы	131
2.4 Наименование предлагаемых к выполнению лабораторных работ и методические указания к ним	131
3 Методические рекомендации к самостоятельной работе	133
3.1 Общие рекомендации по организации внеаудиторной самостоятельной работы	133
3.2 Работа с учебно-методическим и информационным обеспечением	133
3.3 Подготовка к лабораторным работам	135
3.4 Самостоятельное изучение и конспектирование отдельных тем	137
3.4 Подготовка к текущему и промежуточному контролю	137
Библиографический список	137

**Нещименко Виталий Владимирович,**  
*доцент кафедры Физики АмГУ, доктор физ.-мат. наук*