



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Автотранспортные, строительные и дорожные  
средства»

## **Учебное пособие** по дисциплине

# **«Материаловедение»**

Авторы  
Смирнов И.И.,  
Смирнов И.И.,  
Кротова К.В.

Ростов-на-Дону, 2018

## Аннотация

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», специализации «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование» и 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технических машин и комплексов» профиль «Автомобильный сервис». Соответствует действующим образовательным стандартам. В пособии изложена методика разбора диаграмм состояния сплавов, методика выбора материала для изготовления различных деталей. Предназначено для преподавателей и студентов, изучающих дисциплины «Материаловедение» и «Технология металлов».

## Авторы

к.т.н., доцент кафедры «АСиДС»  
Смирнов И.И.,  
инженер кафедры «АСиДС»  
Смирнов И.И.,  
аспирант кафедры «АСиДС»  
Кротова К.В.



## Оглавление

<b>Предисловие .....</b>	<b>4</b>
<b>1 ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ .....</b>	<b>10</b>
1.1 Основные сведения о сплавах и их строении .....	10
1.2 Диаграммы состояния сплавов.....	12
1.3 Методика разбора диаграмм состояния сплавов .....	14
1.4 Диаграммы состояния двойных сплавов.....	22
1.5 Связь между типом диаграмм состояния и свойствами сплавов .....	34
1.6 Механические свойства металлических материалов .....	36
<b>2. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ И УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ.....</b>	<b>50</b>
2.1. Факторы, определяющие вид разрушения материалов .....	50
2.2 Схема выбора материала .....	64
2.3 Выбор стали для изготовления деталей.....	65
2.4 Методика выполнения домашнего задания .....	79
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>83</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В деле обеспечения качественного совершенства, а также безотказного и эффективного применения техники важную роль играют используемые в ней материалы и способы их обработки.

Материаловедение, представляет собой науку, в которой изучаются закономерности, определяющие строение и свойства материалов в зависимости от их состава и условий обработки. С учетом профессиональных запросов обучаемых основной упор при изучении дисциплины «Материаловедение» должен быть сделан на взаимосвязи состава и структуры материалов с их свойствами в условиях производства (а также ремонта и восстановления) и эксплуатации (включая хранение) техники. Выпускники вузов должны обладать достаточными знаниями для правильного выбора материала, метода его упрочнения и снижения металлоемкости изделия при одновременном достижении наиболее высокой технико-экономической эффективности.

Выбор материала для изготовления той или другой детали машин и метода его упрочнения определяется уровнем требуемой конструкционной прочности, технологичностью механической, термической и химико-термической обработки, объемом производства, дефицитностью, стоимостью материала и себестоимостью упрочняющей обработки. Работа по выбору материала и упрочняющей обработки проектируемой детали складывается из решения ряда задач:

1. Материал должен обеспечить прочность, надежность и оптимальную долговечность работы детали (конструкционную прочность). Для выполнения этих требований конструктор должен учитывать жесткость нагружения в процессе работы детали и условия, в каких работает конструкция (в помещении, в полевых условиях, на севере). В случае работы в агрессивных средах необходим учет влияния среды.

2. Выбранный материал должен быть технологичным, чтобы изготовление детали из него было наиболее экономично. Особенно важно учитывать технологичность материала при серийном и массовом производстве.

Необходимо запомнить, что способ изготовления изделия не только задача технолога. Это первоочередная задача конструктора, так как сама конструкция и материал детали в первую очередь определяют, как изготовить деталь. Поэтому, выбирая мате-

риал, конструктор должен учесть не только его физико-механические, но и технологические свойства, оборудование и способы изготовления из него детали.

3. Выбранный материал должен быть по возможности недефицитным и дешевым. На себестоимость детали помимо стоимости материала большое влияние оказывают технология производства, амортизация используемого оборудования.

Таким образом, материал должен удовлетворять условиям работы в машине, т.е. обеспечивать заданную конструкционную прочность, что вначале определяется расчетными данными. Деталей, работающих при статическом нагружении, в технике сравнительно мало. Это детали с большим начальным натягом, детали котлов и сосудов высокого давления, диски компрессоров и турбин, а также некоторые детали с малым числом плавных нагружений (иногда проводится расчет на малоцикловую усталость). Многие детали машин и агрегатов работают в условиях, когда возникают напряжения, переменные во времени. Расчеты сопротивления усталости этих деталей при стационарном нагружении ведут по пределу выносливости с учетом конструктивных и технологических факторов. По критерию жесткости ( $E$ -модуль упругости) рассчитывают станины, корпусные детали машин, станков, валы коробок передач, шпиндели станков и т.д. Однако какими бы точными не были расчеты, только по ним нельзя судить о надежности работы детали. Необходимы натурные испытания, т.е. испытания самих деталей, как на специальных стендах, так и непосредственно в эксплуатации. Имея информацию о стойкости деталей, можно установить комплекс прочностных и других параметров, которые находятся в наибольшей корреляции с эксплуатационными свойствами деталей машин. При установлении этих параметров кроме стандартных механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\phi$ , КСЧ) с учетом прокаливаемости металлических материалов (в случае их применения) должны учитываться работа распространения трещины КСТ, трещиностойкость  $K_{Ic}$ , предел выносливости  $\sigma_{-1}$ ,  $\sigma_{-1k}$ , сопротивление контактной усталости, сопротивление износу и т.д.

Элементы машин и агрегатов могут работать в экстремальных условиях, при низких или высоких температурах, испытывать воздействие агрессивных сред и т.д., приводящих к выходу из строя деталей машин. При перегрузках в деталях из пластичных материалов возможна пластическая деформация (изгиб оси и вала, растяжение болтов, слияние посадочных поверхностей в крепежных деталях и т.д.) или вязкое разрушение. При длительной эксплуатации при высоких температурах за счет ползучести нередко

наблюдаются недопустимые деформации. Ползучесть материала лопаток и дисков турбин и других деталей нередко ограничивают их срок службы.

В соответствии со статистическими данными деформация и вязкое разрушение являются причиной 15...20 % всех отказов. Образование хрупких трещин чаще происходит при низких температурах эксплуатации, наличии исходных дефектов типа трещин, повышенных остаточных напряжениях, возникновении статических и динамических перегрузок, а также при увеличении размеров начальных дефектов под действием циклических эксплуатационных нагрузок и коррозии. Хрупкое разрушение грузоподъемного оборудования обычно начинается в зонах концентрации напряжений и происходит после некоторой наработки. Это говорит о роли накопления эксплуатационных повреждений и увеличения вероятности одновременного сочетания факторов, способствующих снижению сопротивления хрупкому разрушению.

Исследованиями Н.С. Курнакова и А.А. Бочвара установлена связь между диаграммами состояния сплавов, физическими и технологическими свойствами сплавов. Поэтому для правильного решения материаловедческих задач специалисту необходимо уметь анализировать имеющиеся диаграммы сплавов.

В ходе анализа диаграмм состояния сплавов и при выборе материала для изготовления деталей студентам приходится сталкиваться с основными понятиями, широко используемыми в материаловедении и приводимыми ниже.

*Система* – совокупность фаз, находящихся в состоянии равновесия.

*Фаза* – однородные (гомогенные) составные части системы, имеющие одинаковый состав, кристаллическое строение и свойства, одно и то же агрегатное состояние и отделенные от составных частей поверхностями раздела.

*Структура* – форма, размеры и характер взаимного расположения соответствующих фаз в металлах и сплавах.

*Структурные составляющие* – обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями.

*Макроструктура* – строение металла или сплава, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении в 30...40 раз.

*Микроструктура* – строение металла или сплава, наблюдаемое с помощью микроскопа при больших увеличениях.

*Фрактография* – метод визуального изучения изломов, а также с помощью светового микроскопа при небольших увеличениях.

*Микрофрактография* – исследование особенностей тонкой структуры изломов под электронным или растровым микроскопом.

*Кристаллическая решетка* – воображаемая пространственная сетка, в узлах которой располагаются частицы, образующие твердое (кристаллическое) тело.

*Элементарная ячейка* – наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме.

*Кубическая объемно-центрированная решетка (ОЦК)* – решетка, в которой атомы расположены в вершинах куба и один атом в центре куба.

*Кубическая гранецентрированная решетка (ГЦК)* – решетка, в которой атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани.

*Гексагональная решетка* – решетка, в которой атомы расположены в вершинах и в центре шестигранных оснований призмы, а три атома – в средней плоскости призмы.

*Период решетки* – расстояние между центрами двух соседних частиц (атомов, ионов) в элементарной ячейке решетки.

*Координационное число  $K$*  – число атомов, находящихся на наиболее близком и равном расстоянии от любого выбранного атома в решетке.

*Базис решетки* – количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки.

*Коэффициент компактности решетки  $\eta$*  – отношение объема, занимаемого атомами, ко всему объему решетки.

*Кристаллографические плоскости* – плоскости, проведенные в кристаллической решетке через узлы (атомы).

*Кристаллографические направления* – прямые, проведенные через узлы решетки.

*Кристаллизация* – переход металла из жидкого состояния в твердое (кристаллическое).

*Степень переохлаждения* – разность между теоретической температурой и реальной температурой кристаллизации, при которой протекает кристаллизация.

*Дендрит* – кристалл, образующийся в процессе затвердевания и имеющий разветвленную (древовидную) форму.

*Модифицирование* – использование специально вводимых в жидкий металл примесей (модификаторов) для получения мелкого зерна.

*Металлический сплав* – вещество, полученное сплавлением двух или более исходных веществ, преимущественно металлических.

*Твердый раствор* – фазы, в которых один из компонентов сплава сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы других (или другого) компонентов располагаются в решетке первого компонента (растворителя), изменяя ее размеры (периоды).

*Твердый раствор замещения* – раствор, в котором атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя в его кристаллической решетке.

*Механическая смесь* – сплав, в котором атомы компонентов не вступают в химическую реакцию и не образуют твердых растворов.

*Твердый раствор внедрения* – раствор, в котором атомы растворенного компонента располагаются в междоузлиях (пустотах) кристаллической решетки растворителя.

*Диаграмма состояния* – графическое изображение зависимости температур фазовых превращений в сплавах от их состава.

*Феррит (Ф)* – твердый раствор углерода и других примесей в  $\alpha$ -железе.

*Аустенит (А)* – твердый раствор углерода и других примесей в  $\gamma$ -железе.

*Цементит (Ц)* – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа  $Fe_3C$ .

*Перлит (П)* – эвтектоидная смесь феррита и цементита, имеющая довольно грубую структуру с толстыми пластинками.

*Сорбит (С)* – эвтектоидная смесь феррита с цементитом, имеющая более мелкозернистую структуру.

*Троостит (Т)* – эвтектоидная смесь феррита и цементита, имеющая еще более мелкозернистую структуру.

*Ледебурит (Л)* – эвтектика, содержащая смесь крупных кристаллов аустенита и первичного цементита.

*Нормализация* – вид термической обработки, заключающийся в нагреве сплава до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении на спокойном воздухе.

*Закалка* – вид термической обработки, заключающейся в нагреве сплава до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении со скоростью, равной или выше критической, необходимой для получения неравновесной структуры – мартенсита закалки.



*Мартенсит (М)* – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ - железе.

*Цементация* – процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом.

*Отпуск* – вид термической обработки, заключающийся в нагреве закаленных сплавов до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении с произвольной скоростью.

*Отжиг* – вид термической обработки, заключающийся в нагреве сплава до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующем медленном охлаждении вместе с печью.

*Азотирование* – процесс насыщения поверхностного слоя стали азотом.

*Алитирование* – насыщение поверхностного слоя стали алюминием.

*Цианирование* – совместное насыщение поверхностного слоя стали углеродом и азотом.

*Деформация* – изменение размеров и формы тела под воздействием приложенных сил.

*Упругая деформация* – деформация, влияние которой на форму, структуру и свойства тела устраняется после прекращения действия внешних сил.

*Пластическая деформация* – деформация, остающаяся в теле после снятия нагрузки.

*Двойникование* – переориентация части кристалла в положение, симметричное по отношению к первой части, относительно плоскости двойникования.

*Текстура* – закономерная ориентация кристаллитов относительно внешних деформационных сил (текстура деформации).

*Наклеп* – повышение свойств металла, характеризующих сопротивление деформации ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ , НВ и др.) при увеличении степени холодной деформации.

*Возврат* – повышение структурного совершенства наклепанного металла в результате уменьшения плотности дефектов строения, однако без заметных изменений структуры, видимой в световом микроскопе, по сравнению с деформированным состоянием.

## 1 ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ

### 1.1 Основные сведения о сплавах и их строении

Сплавом называется вещество, полученное сплавлением двух или более элементов. Сплавы, полученные другими способами (спеканием, электролизом и т.п.), называют псевдосплавами. Сплавы, полученные преимущественно из металлических элементов и обладающие металлическими свойствами, называются металлическими сплавами.

Компонентами называют вещества, образующие сплав. Компонентами могут быть элементы (металлы и неметаллы) или устойчивые химические соединения.

Сплав состоит из одной или нескольких фаз. Фаза – это часть сплава, имеющая одинаковый состав и агрегатное состояние и отделенная от остальных частей сплава поверхностью раздела. Фазами могут быть металлы и неметаллы, жидкие и твердые растворы, химические соединения.

Системой называют совокупность фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях (температуре, давлении).

Строение сплава зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, составляющие сплав. В твердом виде сплавы способны образовывать твердые растворы, химические соединения, механические смеси. Кроме этого, возможно образование твердых фаз, которые не могут быть полностью отнесены к перечисленным и являются как бы промежуточными.

*Твердые растворы.* Твердым раствором называется такой сплав, у которого атомы растворимого элемента размещены в кристаллической решетке растворителя, причем пропорции растворимого и растворителя могут меняться без нарушения однородности.

По расположению атомов в кристаллической решетке различают растворы замещения и растворы внедрения. В твердом растворе замещения атомы растворенного элемента занимают узлы атомов элемента растворителя в его кристаллической решетке.

В твердом растворе внедрения атомы растворенного элемента располагаются внутри кристаллической решетки элемента растворителя – между атомами металла-растворителя. Следовательно, при образовании твердых растворов сохраняется кристаллическая решетка компонента-растворителя. Однако атомы растворенного вещества искажают и изменяют средние размеры элементарной ячейки растворителя.

Твердые растворы замещения могут быть как с ограниченной, так и с неограниченной растворимостью компонентов. При неограниченной растворимости с увеличением концентрации растворенного компонента как бы плавно совершается переход от компонента-растворителя к растворенному компоненту. Это возможно лишь при условии, что оба компонента имеют одинаковую кристаллическую решетку, т.е. являются изоморфными компонентами. Кроме этого, образование неограниченных твердых растворов возможно лишь при малом различии атомных размеров компонентов.

Замечено, что неограниченная растворимость наблюдается преимущественно у элементов, близко расположенных в таблице Д.И.Менделеева, т.е. близких друг к другу по строению валентной оболочки атомов, по физической природе.

Твердые растворы внедрения могут быть только с ограниченной растворимостью и наблюдаются тогда, когда диаметр атома растворенного элемента невелик. Так, металлы образуют твердые растворы внедрения с элементами I и II периодов, имеющими малые атомные размеры (H, N, C, B).

При образовании растворов внедрения и замещения атомы растворенного компонента распределяются в решетке растворителя беспорядочно. Однако в некоторых случаях наблюдается упорядоченные твердые растворы, в которых атомы занимают определенные места в узлах решетки. Процесс упорядочения является диффузионным процессом, поэтому при медленном охлаждении сплава меди и золота атомы меди и золота занимают определенные места в решетке.

Упорядоченные твердые растворы имеют признаки как химического соединения (так как у них имеется определенное соотношение атомов, которое можно выразить соответствующей формулой), так и твердого раствора (так как у них сохранилась решетка металла-растворителя). Поэтому при полной упорядоченности твердые растворы являются промежуточными фазами между химическими соединениями и твердыми растворами.

*Химические соединения.* Характерным для химических соединений является стехиометрическое соотношение чисел атомов элементов, что выражается простой формулой (в общем виде  $A_nB_m$ , где A и B – элементы, n и m – простые целые числа). В химическом соединении кристаллическая решетка отлична от кристаллических решеток элементов, составляющих это химическое соединение.

В отличие от обычных химических соединений многие металлические соединения имеют переменный состав, который может

изменяться в широких пределах. Это обусловлено характером металлической связи, которая не является жесткой. Поэтому стехиометрическое соотношение химических соединений, образованных металлическими элементами, не всегда выполняется. По этой же причине образование химических соединений не подчиняется закону валентности.

Химические соединения имеют постоянную температуру плавления (диссоциации), свойства соединения резко отличаются от свойств образующих его элементов.

*Механические смеси.* Если компоненты, входящие в сплав, не растворяются друг в друге в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединения, то кристаллы каждого компонента образуют механическую смесь. При образовании механической смеси, когда каждый компонент кристаллизуется самостоятельно, свойства сплава получаются средними между свойствами компонентов, которые его образуют.

Если в сплаве концентрация элементов превышает их предельную растворимость, то возникает механическая смесь двух пересыщенных растворов. При наличии в сплаве химического соединения образуется смесь из зерен твердого раствора и химического соединения и т.д.

## 1.2 Диаграммы состояния сплавов

Диаграмма состояния показывает графически, как с изменением химического состава и температуры изменяются структура, количество и состав фаз, находящихся в равновесии. Однако равновесные превращения, т. е. превращения в отсутствие переохлаждения или перенагрева, совершаться не могут. Поэтому диаграмма состояния на практике используется для рассмотрения превращений при малых скоростях нагрева или охлаждения.

Построение диаграмм состояния осуществляется следующим образом:

1. Готовят ряд сплавов с различным соотношением, входящих в него компонентов.
2. Расплавляют сплавы и производят их медленное охлаждение, фиксируя изменение температуры во времени.
3. Строят кривые охлаждения каждого сплава:  $T = f(\tau)$ , где  $T$  – температура охлаждения сплава в момент времени  $\tau$ .
4. Находят по кривым охлаждения критические температуры для каждого сплава (точки перегибов и постоянства на кривых охлаждения), определяющие начало и конец фазовых превраще-

ний в сплавах, и переносят их на диаграмму состояния, осями координат которой являются «температура – концентрация (состав)».

5. Соединяя точки, имеющие одинаковую физическую сущность, получают диаграмму состояния данных сплавов. Линия, соединяющая на диаграмме состояния точки, соответствующие температурам начала кристаллизации сплавов, называется *ликвидус*, а линия, соединяющая точки, соответствующие температурам окончания кристаллизации сплавов – *солидус*.

Диаграмма состояния позволяет представить полную картину образования сплава, его переход из жидкого состояния в твердое, процессы перекристаллизации в твердом состоянии. По ней можно определить, какую термическую обработку будет воспринимать данный сплав и какие температурные режимы будут для него наиболее рациональны.

При построении диаграмм состояния кроме термического метода часто используются микроструктурные, рентгеновские, химические и другие методы. При контроле правильности построения диаграмм используют правило фаз (или законом Гиббса).

Правило фаз, установленное Дж. У. Гиббсом в 1876 г., выражает зависимость между числом степеней свободы ( $S$ ), числом компонентов ( $K$ ) и числом фаз системы ( $\Phi$ ), находящихся в равновесии.

Математически закон Гиббса записывается в следующем виде:

$$S = K - \Phi + P,$$

где  $P$  – число внешних переменных факторов равновесия (температура и давление).

Число степеней свободы (или вариантность) системы – это число независимых переменных, которые можно изменять в определенных пределах, без изменения числа фаз, находящихся в равновесии.

Все превращения в металлах и сплавах обычно происходят при постоянном атмосферном давлении, поэтому правило фаз записывается в упрощенном виде:

$$S = K - \Phi + 1.$$

Вариантность любой системы всегда положительна или равна нулю. При  $S = 0$  система называется *инвариантной*. Это

значит, что все независимые переменные, определяющие состояние системы, имеют строго определенные (единственные) значения и их нельзя изменить, чтобы не нарушилось фазовое равновесие. При  $C = 1$  система называется моновариантной, т.е. если изменить внешний фактор – температуру, изменится концентрация фаз без нарушения равновесия. При  $C = 2$  система называется бивариантной, т.е. существует область на диаграмме, в которой можно изменять температуру и концентрацию сплава, не нарушая равновесия.

Правило фаз позволяет контролировать правильность построения диаграмм состояния и кривых охлаждения.

### 1.3 Методика разбора диаграмм состояния сплавов

Целью изучения диаграмм состояния является:

- научиться по имеющейся диаграмме состояния мысленно представить механизм процессов фазовых превращений при изменении температуры сплава;
- становление характера равновесных фаз и структуры в сплавах при различных температурах;
- основываясь на знаниях факторов, влияющих на процессы кристаллизации и перекристаллизации, научиться предсказывать, какие изменения в строении сплавов могут иметь место при неравновесных условиях кристаллизации и охлаждения;
- научиться понимать, чем обусловлены важнейшие механические и технологические свойства сплавов в соответствующем фазовом и структурном состоянии.

Материал, связанный с изучением диаграмм состояния сплавов, является одним из наиболее трудных для усвоения обучающимися. Это происходит по той причине, что очень часто студенты пытаются усвоить материал методом механического заучивания графических построений, каковыми являются диаграммы состояния сплавов. При этом остается неясен механизм происходящих фазовых превращений при охлаждении или нагреве сплава. Так как имеются тысячи диаграмм состояния, то заучивание нескольких типов, приведенных в учебнике, ничего не дает для понимания диаграмм состояния реальных сплавов, на основе которых выявляются фазы и образующиеся структуры сплавов, которые определяют механические свойства.

Специалист должен уметь мысленно представить те процессы, которые происходят в сплавах и образуют их структуру и

свойства. Умея представлять это, специалист в состоянии оптимально воздействовать на технологический процесс производства и ремонта техники.

Для этого необходимо:

- 1) ясное понимание особенностей строения основных фаз в сплавах, которыми являются твердые растворы, химические соединения, чистые компоненты;
- 2) знание обозначений фаз;
- 3) знание признаков фаз;
- 4) умение по диаграмме состояния определить состав и количество фаз;
- 5) умение логически мыслить.

Для определения равновесного состава фаз в двухфазной области диаграммы состояния в заданной точке, называемой фигуративной, необходимо через эту точку провести горизонтальную линию (коноду) до пересечения с линиями ликвидус и солидус диаграммы состояния. Проекция точки пересечения коноды с линией ликвидус на концентрационную ось определяет состав жидкой фазы, а проекция точки пересечения коноды с линией солидус – состав твердой фазы.

Для определения массового или объемного количества фазы в заданной точке двухфазной области нужно провести через эту точку коноду и разделить длину отрезка коноды, противоположного составу данной фазы, на общую длину коноды.

При анализе диаграмм состояния необходимо помнить о том, что определяет форму кривых охлаждения, если ее воспроизводят по диаграмме состояния. Когда происходит охлаждение сплава в однофазном состоянии, температура сплава понижается плавно, так как окружающая среда имеет более низкую температуру и сплав охлаждается. Если происходят фазовые превращения, то наряду с охлаждением сплава происходит выделение скрытой теплоты превращения и скорость охлаждения понижается вплоть до того, что в течение некоторого времени сплав может сохранить постоянную температуру. Как протекает охлаждение в конкретном случае, подсказывает правило фаз Гиббса.

Так, при образовании одной новой фазы  $C = 2 - 2 + 1 = 1$  на кривой охлаждения возникает перегиб. Когда при превращении участвуют три фазы  $C = 0$ , температура превращения постоянна (на кривой охлаждения образуется горизонтальная площадка).

Как показывает практика обучения, наиболее эффективно можно осуществить разбор сплавов по диаграмме состояния, следуя оптимальной методике разбора процессов, происходящих при

охлаждении заданных сплавов по имеющейся диаграмме состояния. Анализ диаграмм состояния сплавов целесообразно производить в соответствии со следующей методикой [1]:

1. Изучить линию ликвидус диаграммы на наличие на ней максимума. Если ликвидус имеет максимум, то это указывает, что компоненты образуют химическое соединение, состав которого соответствует проекции максимума на ось абсцисс.

2. При наличии максимума спроецировать его на ось абсцисс и отметить

полученную точку символом химического соединения.

3. Химическое соединение следует рассматривать как самостоятельный компонент. Тогда исходная диаграмма может рассматриваться как состоящая из двух диаграмм, например компонент А плюс химическое соединение и химическое соединение плюс компонент В. Такое разделение упрощает разбор исходной сложной диаграммы состояния.

4. Исследовать оси координат, по которым выявляются критические температуры фазовых превращений компонентов системы. Если на оси имеется одна тройная точка (точка пересечения линий ликвидус и солидус с ординатой), то данный компонент не имеет фазовых превращений в твердом состоянии. Если кроме этой точки имеются при более низких температурах точки пересечения наклонных линий диаграммы с ординатой, то эти точки характеризуют температуры полиморфных превращений компонента в твердом состоянии.

Наличие полиморфных модификаций у компонента делают диаграмму состояния многоэтажной: каждая полиморфная фаза может по-разному взаимодействовать с другим компонентом сплава. Это сильно усложняет вид диаграммы, но методика разбора диаграмм от этого не изменяется.

5. Отметить на диаграмме типовые сплавы проведением соответствующих вертикалей. Если на диаграмме отмечены фазы в областях ее, то достаточно провести вертикаль от оси состава для изучаемого сплава.

6. Разбор превращений при охлаждении рационально начать проводить с тех типовых сплавов, которые примыкают к чистым компонентам. Это выявляет однофазные области на диаграмме и упрощает разбор промежуточных типовых сплавов.

7. Отметить цифрами 1, 2, ..., 5 критические температуры для изучаемого сплава. Таковыми являются точки пересечения ординаты с линиями диаграммы.



8. Провести разбор процессов, которые претерпевает сплав при охлаждении из жидкого состояния. Для этого необходимо начать строить кривую охлаждения сплава из области жидкого состояния. По мере понижения температуры против каждого участка кривой охлаждения следует изображать схематично фазы (структуры), которые в данном интервале температур существуют, отмечая также их символы.

9. При установлении природы фаз следует иметь в виду, что важнейшими фазами в сплавах могут быть чистые компоненты, химические соединения, твердые растворы.

Выявить природу фазы можно по характеру изменения состава фазы с изменением температуры. Состав твердого раствора с изменением температуры изменяется, состав химического соединения и чистого компонента, очевидно, постоянен. При обозначении фаз чистые компоненты сплава обозначаются их символами (А, В), химическое соединение – символами типа  $A_mB_n$ , твердые растворы – малыми буквами греческого алфавита.

Чтобы установить природу фаз в двухфазных областях, необходимо уметь определять состав фаз. Если окажется, что интересующая фаза при разных температурах имеет переменный состав, то по своей природе это твердый раствор. Если состав постоянный, то фаза – либо химическое соединение, либо чистый компонент. Какая фаза в конкретном случае образуется, покажет определенный состав. Если состав будет соответствовать точкам А или В на концентрационной оси, то по природе эта фаза – соответствующий компонент сплава. Если состав фазы окажется равным составу химического соединения, то образующейся фазой является химическое соединение. Таким образом, при переходе из одного фазового поля в другое будет выявляться природа фаз в этих полях.

10. Если ордината сплава пересечет горизонтальные линии диаграммы, то это значит, что при соответствующих температурах сосуществуют три фазы и может происходить эвтектическое, эвтектоидное или перитектическое превращение, число степеней свободы при которых равно нулю.

Внешним признаком эвтектического и эвтектоидного превращений является сход наклонных линий на диаграмме состояния в тройную точку сверху. При перитектическом превращении эти линии сходятся в точку снизу.

11. Для установления природы превращения необходимо, прежде всего, опережая процесс охлаждения, посмотреть, какие фазы устойчивы ниже температуры, на которой остановились при анализе (п. 9).

Установив качество фаз, сравните, какие фазы сплав имел выше температуры превращения. Очевидно, превращаться будет та фаза, которой не оказалось ниже температуры исследуемого превращения. Та фаза, которая была выше и осталась ниже рассматриваемой температуры, участия в превращении не принимает (исключением может быть перитектическое превращение).

Установив характер превращающейся фазы (фаз), следует установить, каков его (их) состав, и сравнить его с составами других фаз, которые находятся в равновесии при данной температуре.

Если окажется, что ниже температуры превращения не обнаруживается одной фазы, которая существовала выше температуры превращения, то имеет место эвтектическое или эвтектоидное превращение.

Если в процессе превращения обе бывшие фазы заменились новой, то имеет место перитектическое превращение. Учитывая, что при этом превращении количество одной из превращающихся фаз может быть в избытке, то после превращения наряду с новой будет и остаток этой превращающейся фазы. Это покажет характер фаз в новом фазовом поле.

После того как процесс превращения будет разобран, необходимо изобразить против нового участка кривой охлаждения новое фазовое состояние (структуру) сплава и продолжить изучение процесса дальше. На уровне нормальной температуры надо вывести структуру исследуемого сплава и установить фазы в ряде областей диаграммы состояния. Параллельно с выполнением разбора необходимо вести словесное (письменное) объяснение происходящих процессов.

Для установления природы фаз в оставшихся фазовых полях следует изучать превращения у типовых сплавов, которые пересекают эти фазовые поля. При выработанном навыке можно мысленно проследить процессы превращения при охлаждении этих сплавов и установить характер фаз в требуемых областях. Когда такой навык еще не выработался, следует провести разбор этих сплавов с изображением кривых охлаждения по методике, подобной рассмотренной. Разбор сплава требует предельного внимания, четкого умения оперирования правилом отрезков для определения состава и количества фаз и логического мышления. В качестве примера приводится разбор диаграммы состояния для сплавов, когда компоненты ограниченно растворяются в твердом состоянии и имеют эвтектическое превращение (рис. 1).

Чтобы изучение диаграмм состояния было максимально продуктивным, необходимо перерисовать на лист бумаги слева диаграмму состояния, подобную приведенной ниже, не нанося на нее символов. Они будут появляться по мере разбора диаграммы. Справа от диаграммы нарисуйте систему координат «температура – время» для изображения кривых охлаждения сплавов. Сами кривые будут появляться по мере разбора диаграммы.

Разбор этой диаграммы проведем в соответствии с приведенной методикой. Действия по п.п.1...3 показывают, что компоненты этой системы не образуют химических соединений и не имеют полиморфных превращений в твердом состоянии. Согласно п. 5, отметим типовые сплавы I...VI. Разбор процесса охлаждения сплава I показывает, что в интервале температур 1...2 образуются кристаллы твердого раствора  $\alpha$ , так как состав твердой фазы изменяется по линии cf. При температуре точки 2 кристаллизация закончилась и ниже охлаждается сплав, состоящий из кристаллов твердого раствора  $\alpha$ . Разбором сплава I оказалась установлена природа фаз в областях диаграммы cef ( $\alpha$ +Ж) и cfKA( $\alpha$ ).

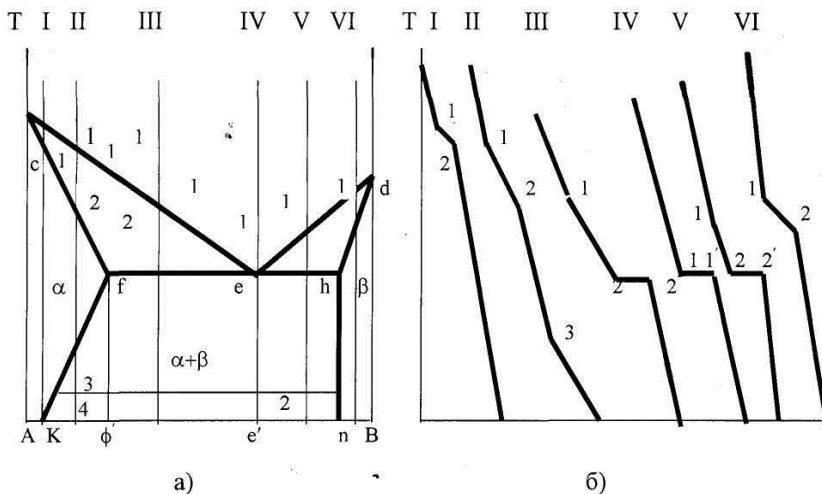


Рисунок 1 – Диаграмма состояния

Кристаллизация сплава VI в интервале температур 1...2 сопровождается образованием твердого раствора  $\beta$ , состав которого изменяется по dh. Ниже температуры 2 охлаждается твердый раствор  $\beta$ .

Как видно, у сплава IV одна критическая точка 1. Значит, процесс кристаллизации протекает при постоянной температуре, что возможно только при равновесии трех фаз, состав которых также должен быть постоянным. Одной фазой является кристаллизующаяся жидкость состава  $e'$ . Другими фазами, устойчивыми при этой температуре, являются  $\alpha$ -состав точки  $f'$  и  $\beta$ -состав точки  $h$ . Значит, суть превращения сплава IV при кристаллизации такова:  $Ж_e \rightarrow \Xi(\alpha_f + \beta_h)$ . Это эвтектическое, в результате которого образуется эвтектическая смесь кристаллов  $\Xi(\alpha + \beta)$ . Это подтверждает также установление состава фаз ниже температуры точки 1. Проведя коноды, видим, что состав одной фазы в области  $kfehn$  изменяется по линии  $fk$ . Это кристаллы твердого раствора  $\alpha$ . Другой устойчивой фазой является твердый раствор  $\beta$ , состав которого определяет линия  $hn$ . Так как при температуре 1 кристаллизуется весь сплав, то на кривой охлаждения образуется площадка 1...1'. В результате кристаллизации сплав IV имеет эвтектическую структуру  $\Xi(\alpha + \beta)$ , средний состав  $e'$ , но в жидком состоянии из-за большой подвижности атомов в отдельных участках объема могут быть значительные отклонения от среднего состава (концентрационные флуктуации).

Допустим, что в некотором микрообъеме (при достижении сплавом температуры точки 1) состав сплава равен значению  $f$ . Благодаря этому создается возможность образования зародыша  $\alpha$ -кристалла. При росте  $\beta$ -кристалла, богатого компонентом A, вызывает обеднение окружающего расплава компонентом B, и при достижении ею состава, соответствующего точке  $h$ , создаются условия образования зародыша  $\beta$ -кристалла. Рост кристалла  $\beta$  вызывает обеднение окружающего расплава компонентом B, и при достижении состава  $f$  вновь возникают зародыши  $\alpha$ -кристаллов и т.д. Таким образом, идет процесс превращения жидкой фазы состава  $e'$  в смесь двух твердых фаз  $\alpha$  и  $\beta$  до тех пор, пока не будет израсходована вся жидкая фаза.

Кристаллизация сплава II происходит в интервале температур 1...2 с образованием кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора, состав которого изменяется по линии  $cf$ . От температуры точки 2 до температуры точки 3 сплав в состоянии  $\alpha$  охлаждается. При температуре точки 3 начинается какое-то изменение у сплава. Чтобы понять его, проведем ниже точки 3 коноду и определим состав фаз при температуре точки 4. Видно, что ниже точки 3 устойчивыми фазами являются твердые растворы  $\alpha$  и  $\beta$ . Видно также, что при этой температуре в  $\alpha$ -твердом растворе может раствориться меньше компонента B, чем количество его в рассматриваемом

сплаве. Отсюда ясен и смысл процессов, происходящих в сплаве II ниже точки 3: из твердого раствора  $\alpha$  выделяются кристаллы твердого раствора  $\beta$ , которые поглощают избыток компонента B в  $\alpha$ -твердом растворе сплава. Кристаллы  $\beta$ , образующиеся из твердой фазы, называются вторичными и обозначаются  $\beta_{II}$ .

Кристаллизация сплава III происходит в интервале температур точек 1...2 с образованием из жидкости кристаллов  $\alpha$ -твердого раствора. При температуре конца кристаллизации (точка 2) механизм процесса существенно отличается от сплавов I и II. Причина в том, что в сплаве III при достижении температуры точки 2 имеется большое количество жидкой фазы, что определяется по правилу отрезков. Так как при температуре точки 2 конодой служит отрезок  $fe$ , то количество жидкости определяется отношением отрезков  $f2/fe$ , или в данном случае около 30 % от общего количества сплава. А так как  $feh$  – линия солидус, то эта жидкость должна при температуре точки 2 полностью кристаллизоваться. Чтобы ответить на вопрос, что образуется при кристаллизации, следует установить состав жидкой фазы при температуре точки 2 сплава III. Он соответствует проекции точки  $e$ , т.е. имеет такой же состав, что и сплав IV. Поэтому при температуре точки 2 жидкая фаза сплава III кристаллизуется по схеме  $Ж_e \rightarrow \alpha + \beta$ , образуя эвтектику. Поэтому после конца кристаллизации в структуре сплава III будут кристаллы  $\alpha$ , образовавшиеся в интервале температур точек 1...2 и эвтектика  $\alpha + \beta$ . При этом состав кристаллов  $\alpha$  соответствует точке  $f$ . Так как при охлаждении сплава III растворимость компонента B в  $\alpha$ -твердом растворе понижается по линии  $fk$ , то при охлаждении от температуры точки 2 из  $\alpha$ -кристаллов будут выделяться вторичные кристаллы  $\beta_{II}$  и окончательная структура сплава III будет  $\alpha + \alpha + \beta + \beta_{II}$ .

При охлаждении сплава V в интервале температур точек 1...2 образуются кристаллы твердого раствора  $\beta$ , состав которых изменяется по линии  $dh$ . Состав жидкой фазы изменяется по линии  $de$  и при температуре точки 2 имеет состав, соответствующий проекции точки  $e$ . Количество жидкой фазы при температуре точки 2 будет определяться отношением отрезков  $2h / he$ , и она превращается в эвтектику  $Ж_e \rightarrow \alpha + \beta_h$ . Поэтому после окончания кристаллизации структура сплава V будет состоять из кристаллов  $\beta + \alpha + \beta$ . Так как растворимость компонента A в  $\beta$ -твердом растворе в данном случае при понижении температуры не изменяется, то окончательная структура сплава будет состоять из  $\beta + \alpha + \beta$ .

Таким образом, разобрана вся диаграмма состояния: установлены фазы во всех областях диаграммы, а также структуры типовых сплавов, которыми являются для сплавов состава от точки А до точки k кристаллы  $\alpha$ ; для сплава состава от k до  $f' - \alpha + \beta_{II}$ ; для сплавов состава от  $f'$  до  $e' - \alpha + \Xi(\alpha + \beta) + \beta_{II}$ ; для сплава состава  $e' - \Xi(\alpha + \beta)$ ; для сплавов состава от e до  $n - \beta + \Xi(\alpha + \beta)$ ; для сплавов состава от n до В – кристаллы  $\beta$ .

Напомним, что сплавы состава от точки  $f'$  до точки  $e'$  условно называют доэвтектическими, сплавы состава от точки  $e'$  до n – заэвтектическими. На примере разбора этой диаграммы видно, какая обширная информация закодирована в диаграммах состояния и каким образом эта информация переводится на обычный язык.

## 1.4 Диаграммы состояния двойных сплавов

### 1.4.1 Диаграмма состояния сплавов с нерастворимостью компонентов в твердом состоянии

Эта диаграмма относится к сплавам, компоненты которых в жидком состоянии неограниченно растворимы, а в твердом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений. По такой диаграмме кристаллизуется, например, сплавы свинца и сурьмы. На практике такой тип диаграмм встречается редко, так как почти все элементы имеют некоторую растворимость в твердом состоянии.

В двухкомпонентной системе такого типа имеются: компоненты-вещества А и В ( $K=2$ ); фазы – жидкость L, кристаллы А и кристаллы В (максимальное значение  $\Phi = 3$ ). Общий вид диаграммы состояния показан на рис.2. Линия АСВ является линией ликвидуса – геометрическое место точек начала кристаллизации при охлаждении и конца плавления при нагревании.

Линия ДСЕ – солидус – геометрическое место точек конца кристаллизации при охлаждении и начала плавления при нагревании. Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии. При постоянной температуре, отвечающей линии ДСЕ, жидкая фаза концентрации точки С кристаллизуется в эвтектику.

Эвтектикой называется механическая смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно кристаллизовавшихся из жидкости. Для диаграммы, представленной на рис. 2, это превращение записывается следующим образом;  $L_0 \rightarrow (A + B)_{эвт}$ . Сплавы, имеющие концентрацию компонентов левее точки С называются доэвтектическими, в точке С – эвтектическими, правее точки С – заэвтектическими.

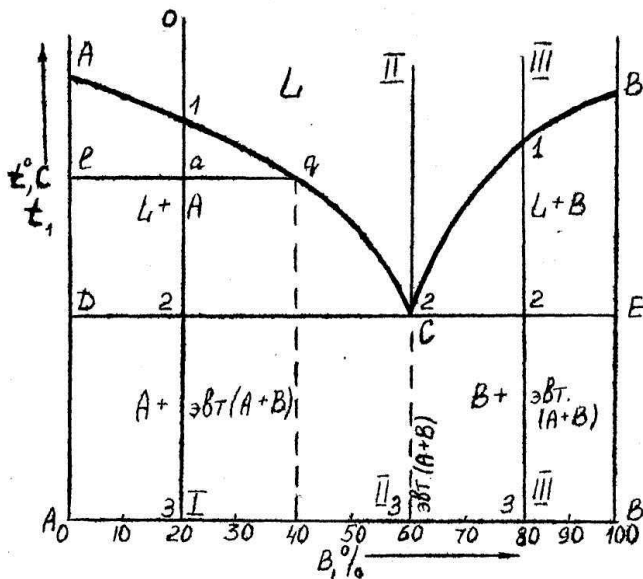


Рисунок 2 – Диаграмма состояния

Преобразования в сплавах анализируют по кривым охлаждения или нагревания, которые строят в координатах температура-время.

В процессе кристаллизации изменяются и концентрация фаз (например, из жидкости выделяются кристаллы одного из компонентов и поэтому состав жидкости изменяется) и количество каждой фазы (при кристаллизации количество твердой фазы увеличивается, а жидкой уменьшается). В любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы, их состав и количественное соотношение определяют по правилу отрезков (правилу рычага).

*Правило отрезков (правило рычага).* Для определения состава фаз (концентрации компонентов в фазах) через заданную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонталь (коноду) до пересечения с линиями, ограничивающими данную область: проекции точек пересечения на ось концентраций показывают составы фаз.

*Пример.* Для определения состава фаз сплава I-I при температуре  $t_1$  проводим соответствующую этой температуре горизонталь до пересечения с линиями, ограничивающими область ASC. Получим точки пересечения 1 и q. Проекция точки q на ось концентраций определяет состав жидкой фазы –

40 %В и 60 %А. Проекция точки / показывает, что твердая фаза состоит из компонента А.

Для того чтобы определить количественное соотношение фаз, необходимо через данную точку провести горизонталь до пересечения с ближайшими линиями состояния. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками пересечения, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз. Например, для сплава I отношение количества твердой фазы к количеству жидкой фазы при температуре  $t_1$  определяется следующим образом:

$$\frac{\text{количество твердой фазы}}{\text{количество жидкой фазы}} = \frac{a\bar{q}}{\bar{a}l}$$

Правило отрезков в двойных диаграммах состояния можно применять только в двухфазных областях. В однофазной области имеется лишь одна фаза, и любая точка внутри этой области характеризует ее концентрацию.

Рассмотрим превращения в доэвтектическом сплаве I-I, кривая охлаждения для него показана на рис.3, а. Участок 0-1 на этой кривой соответствует охлаждению жидкого сплава. При дальнейшем охлаждении и интервале температур 1-2 происходит выделение кристаллов А, при этом состав жидкой фазы меняется по линии I-C (см. рис. 2). На горизонтальном участке 2-2 происходит простое охлаждение твердого сплава без превращений.

На кривой охлаждения эвтектического сплава (рис.3, б) отрезок 0-2 соответствует охлаждению жидкого сплава, отрезок 2-2 – кристаллизации эвтектики и 2-3 – охлаждению закристаллизованного сплава.

Кристаллизация заэвтектического сплава протекает аналогично доэвтектическому. В интервале 0-1 – охлаждение жидкого сплава. В интервале 1-2 – кристаллизация жидкого сплава с выделением кристаллов В, при этом состав жидкой фазы изменяется по линии I-C (см. рис. 2). По правилу фаз в этом интервале температур:  $K=2$ ;  $\Phi = 2$ ;  $C=K-\Phi+1=2-2+1=1$ , т.е. при данных условиях можно изменять температуру, но каждой температуре будет соответствовать определенная концентрация фаз. Отрезок кривой 2-2 соответствует эвтектическому превращению при одновременном сосуществовании трех фаз: жидкой, кристаллы А и кристаллы В, т.е.  $\Phi = 3$  и  $C = 0$ . Таким образом, в данных условиях в системе нет ни одной степени свободы, т.е. нельзя изменять ни температуру,



ни состав фаз (горизонтальный участок на кривой охлаждения). В интервале 2-3 – охлаждение твердого сплава:  $K=2$ ,  $\Phi=2$  и  $C=1$  (наклонный участок на кривой охлаждения – рис. 4).

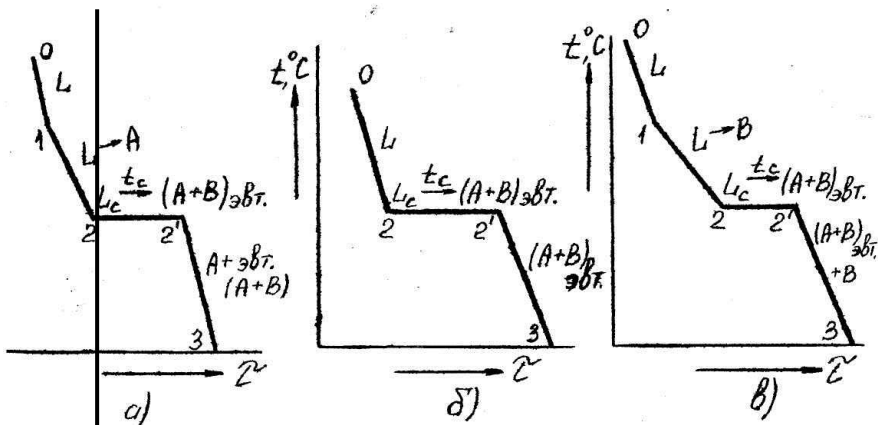


Рисунок 3- Кривые охлаждения сплавов:  
 а) доэвтектический; б) эвтектический; в) заэвтектический

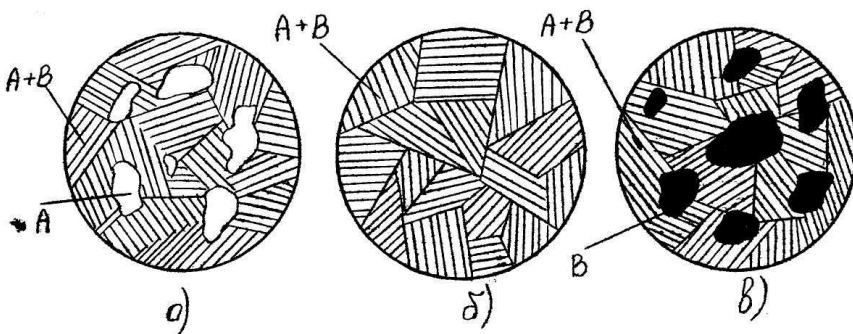


Рисунок 4- Схема структур сплавов после охлаждения:  
 а) доэвтектический; б) эвтектический; в) заэвтектический.

### 1.4.2 Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

Оба компонента таких сплавов неограниченно растворимы в жидком и твердом состояниях и не образуют химических соединений, т.е. возможно существование только двух фаз – жидкого раствора  $L$  и твердого раствора  $\alpha$ . Поэтому трех фаз быть не может, кристаллизация при постоянной температуре не наблюдается и горизонтальной линии на диаграмме нет (рис. 5). По этому типу диаграммы кристаллизуются сплавы  $Cu$  и  $Ni$ ,  $Au$  и  $Ag$  и некоторые другие.

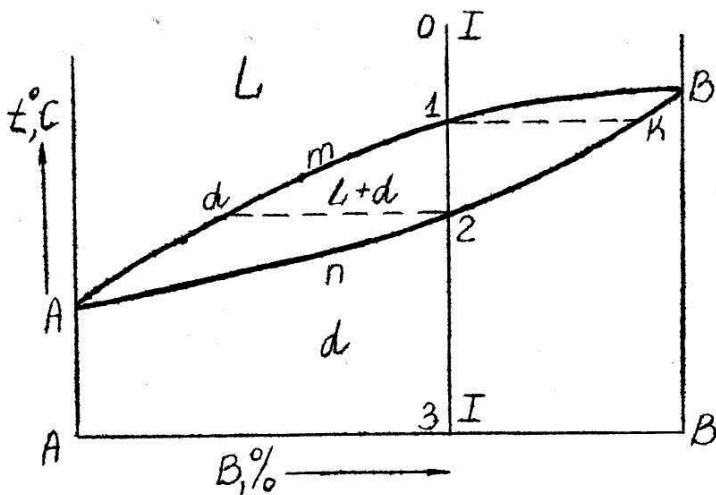


Рисунок 5 – Диаграмма состояния

На диаграмме  $A_mB$  – линия ликвидус,  $A_nB$  – линия солидус. Кристаллизация всех сплавов по диаграмме этого типа протекает аналогично сплаву 1-1, в котором происходят следующие превращения: жидкий сплав охлаждается до температуры точки 1 (рис. 6), при которой начинается процесс кристаллизации.

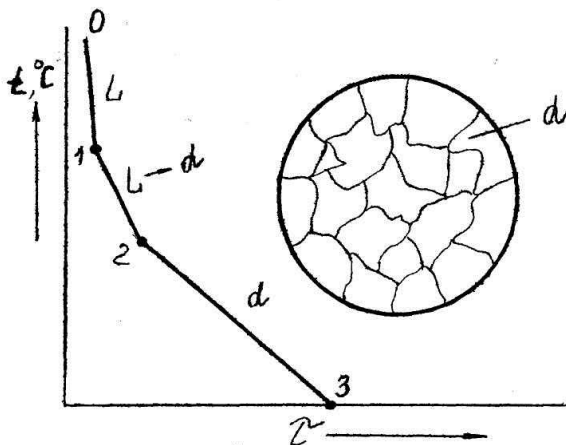


Рисунок 6 – Кривая охлаждения и схема структуры сплава

В интервале 1-2 из жидкого сплава кристаллизуется  $\alpha$ -твердый раствор, состав которого меняется по линии солидус (участок K-2), состав жидкой L фазы меняется по линии ликвидус I –  $\alpha$ . Таким образом, на участке кристаллизации 1-2 вначале образуются кристаллы  $\alpha$ -твердого раствора, более богатые тугоплавким элементом B, чем исходный сплав I-I. Это приводит к неоднородности химического состава в пределах одного зерна (дендрита), явление это называется дендритной ликвацией и в реальных условиях охлаждения сохраняется в твердых растворах. Однако при очень медленном охлаждении (равновесном) состав сплава успевает выравняться за счет диффузии и структура твердого раствора получается однородной.

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

При образовании ограниченных твердых растворов различают два типа диаграмм состояния: с эвтектическим и с перитектическим превращением.

*Диаграмма состояния с эвтектическим превращением* показана на рис. 7, 8. В этой системе не образуются фазы, представляющие собой чистые компоненты. Из жидкости могут выделяться только твердые растворы  $\alpha$  (компоненты B в A) или  $\beta$  (компоненты A в B). Предельная растворимость компонента B в A определяется линией FD, а предельная растворимость A в B – линией CG.

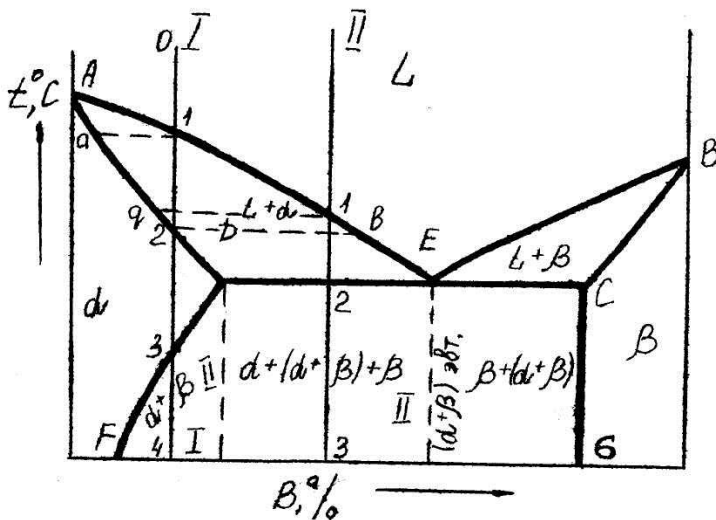


Рисунок 7 – Диаграмма состояния с эвтектикой

Линия АЕВ – ликвидус, АДЕСВ – солидус, ДЕС – линия эвтектического превращения.

Рассмотрим превращения в сплаве I-I при охлаждении.

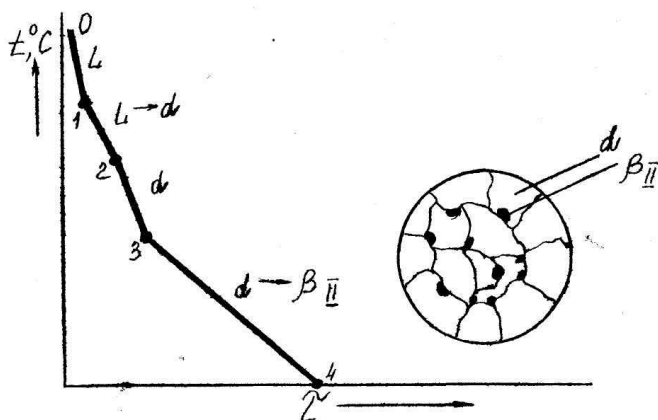


Рисунок 8 – Кривая охлаждения сплава I-I и схема структуры после охлаждения

Выше точки 1 сплав находится в жидком состоянии. В точке 1 начинается процесс кристаллизации. Выделяются кристаллы твердого раствора  $\alpha$ , концентрация которого меняется по кривой а-2, а состав жидкости меняется по кривой I-в. В точке 2 этот процесс заканчивается и полученные кристаллы  $\alpha$ -твердого раствора в условиях равновесной кристаллизации имеют состав исходного сплава I-I, так как при очень медленном охлаждении происходит выравнивание состава зерен за счет диффузии. Эти кристаллы не претерпевают изменений до точки 3, лежащей на линии предельной растворимости. Ниже этой точки твердый раствор  $\alpha$  является перенасыщенным и выделяет избыточные кристаллы  $\beta$ -твердого раствора. Эти кристаллы  $\beta_{II}$ , выделяющиеся из твердого раствора, называются вторичными кристаллами в отличие от первичных  $\beta$ -кристаллов ( $\beta_I$ ), выделяющихся из жидкости.

Состав твердого раствора  $\alpha$  при охлаждении в интервале 3-4 меняется по кривой 3-F, вследствие выделения кристаллов  $\beta_{II}$  концентрации G. Выделение фазы  $\beta_{II}$  может происходить как по границам, так и внутри зерен  $\alpha$  – твердого раствора. Сплав, концентрация которого лежит левее точки , не будет иметь вторичных выделений  $\beta$ -кристаллов.

Кристаллизация доэвтектического сплава II-II в отличие от предыдущего, при достижении горизонтали ДЕС наступает инвариантная эвтектическая реакция – из жидкости выделяются кристаллы обоих твердых растворов (рис.9):

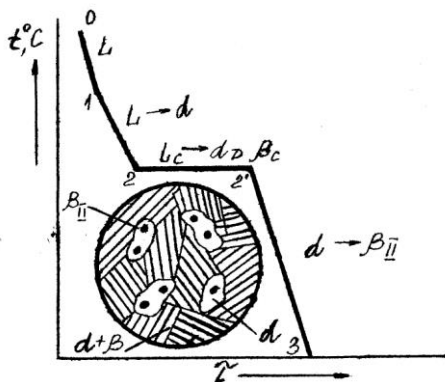
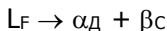


Рисунок 9 – Кривая охлаждения сплава I-I и схема структуры после охлаждения

Все три фазы, участвующие в реакции, имеют определенные составы (проекции точек E, D и C), и температура их превращения постоянна. Таким образом, в результате кристаллизации сплава II, кроме первичных (выделившихся при охлаждении от точки I до точки 2) кристаллов  $\alpha$ , образуется еще эвтектика  $\alpha+\beta$ . При дальнейшем охлаждении, вследствие изменения растворимости,  $\alpha$ -кристаллы выделяют вторичные кристаллы  $\beta_{II}$  и при нормальной температуре  $\alpha$ -кристаллы, как первичные, так и входящие в эвтектику, будут иметь состав точки P.

Выделение вторичных кристаллов из эвтектических составляющих при микроскопическом исследовании обычно не обнаруживается, так как вторичные выделения объединяются с такой же фазой эвтектики.

*Диаграмма состояния с перитектическим превращением.* Перитектическим называется превращение, при котором жидкая фаза реагирует с ранее выделившейся твердой фазой и образуется новая твердая фаза.

В двухкомпонентной системе перитектическая реакция является невариантной, протекает при строго определенных составах фаз и постоянной температуре. Такое превращение имеет место при кристаллизации сплавов: Cu и Zn; Cu и Al и др. Общий вид диаграммы состояния показан на рис. 10,11.

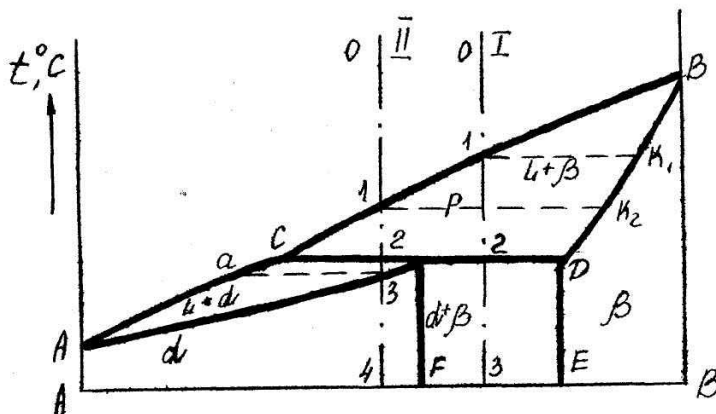


Рисунок 10 – Диаграмма состояния с перитектикой

В данной системе компоненты: вещества A и B ( $K=2$ ). Фазы: L,  $\alpha$ ,  $\beta$  ( $\Phi=3$ ). Линия ACB – ликвидус, АДВ – солидус, СРД – линия

перитектического превращения, F – линия предельной растворимости компонента В в А, линия ДЕ – предельной растворимости компонента А в В.

Кристаллизация сплава I-I до температуры I – охлаждение жидкого сплава. Начало кристаллизации начинается в точке I, когда из жидкости выпадают кристаллы  $\beta$ -твердого раствора состава точки  $K_1$ . По мере снижения температуры жидкость меняет свою концентрацию по линии ликвидус от точки I до точки C, а кристаллы  $\beta$  – по пинии солидус от точки  $K_1$  до точки D. При достижении перитектической горизонтали CPD жидкость состава точки C реагирует с кристаллами состава точки D по перитектической реакции:  $L_c + \beta_d \rightarrow \alpha_p$  с образованием третьей фазы  $\alpha$  состава точки P.

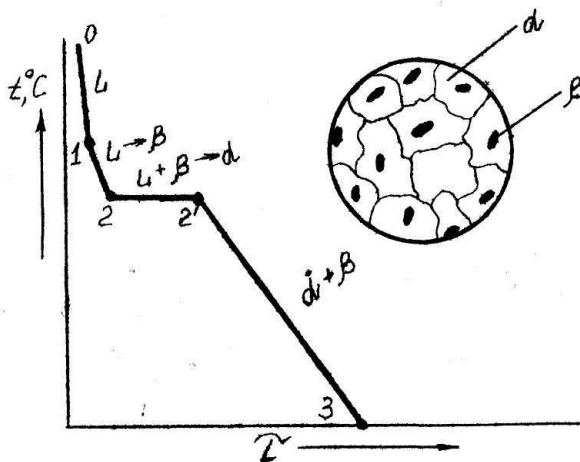


Рисунок 11 – Кривая охлаждения сплава I-I и схема структуры

Количественное соотношение фаз при перитектической реакции, необходимое для образования  $\alpha$ -фазы, определяется по правилу отрезков соотношением

$$\frac{\text{количество } \beta}{\text{количество } \alpha} = \frac{CP}{PD}$$

В рассматриваемом сплаве I-I количество участвующих в перитектической реакции фаз определяется соотношением

$$\frac{\text{количество } \beta}{\text{количество } \alpha} = 2D,$$

т.е. в данном сплаве имеется избыток  $\beta$ -фазы по сравнению с тем количеством, которое необходимо для образования кристаллов. Поэтому после окончания реакции в избытке остаются  $\beta$ -кристаллы. Следовательно, в структуре будут продукты перитектического превращения, т.е.  $\alpha$ -кристаллы и оставшиеся избыточные первичные  $\beta$ -кристаллы. Чем ближе точка 2 лежит к точке P, тем меньше в реакции остается избыточных  $\beta$ -кристаллов.

Для сплава концентрации точки P соотношение реагирующих при перитектической реакции жидкости и  $\beta$ -кристаллов таково, что в результате реакции образуются только  $\alpha$ -кристаллы без избытка какой-либо из реагирующих фаз.

Кристаллизация сплава II (рис.12) отличается от кристаллизации сплава I тем, что при перитектической температуре имеется избыток жидкой фазы по сравнению с тем количеством, которое необходимо для образования  $\alpha$ -кристаллов концентрации P.

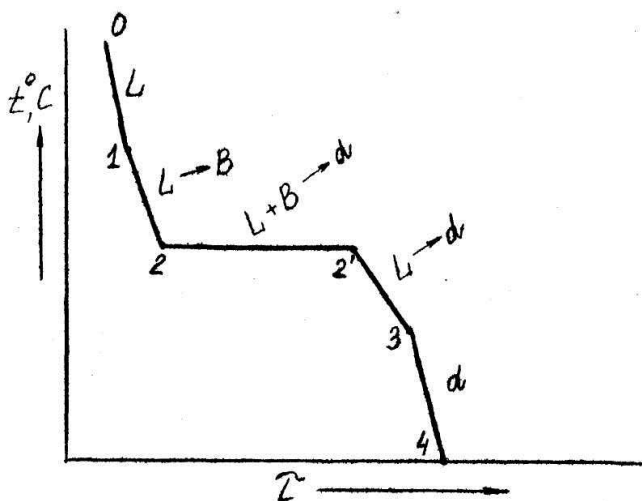


Рисунок 12 – Кривая охлаждения сплава II

Поэтому перитектическое превращение заканчивается исчерпанием  $\beta$ -твердого раствора, а оставшаяся жидкость в интер-



вале между точками 2-3 кристаллизуется в  $\alpha$ -фазу. При этом концентрация жидкости меняется по кривой СА, а концентрация образующихся  $\alpha$ -кристаллов – по кривой РЗ.

#### 1.4.4 Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химическое соединение

Устойчивым химическим соединением называется соединение, которое не диссоциирует на составные части до температуры плавления. На рис. 13 представлена диаграмма для случая, когда химическое соединение и чистые компоненты неограниченно растворимы в жидком состоянии, а в твердом состоянии нерастворимы.

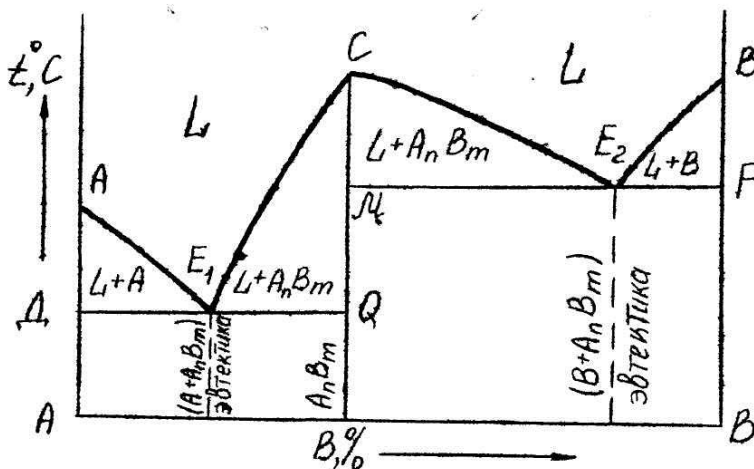


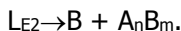
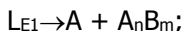
Рисунок 13 – Диаграмма состояния с устойчивым химическим соединением

Этот случай является частным, так как устойчивое химическое соединение может образовывать ограниченные и неограниченные твердые растворы, и диаграммы состояния тогда будут иными.

Компоненты: вещества A и B ( $K=2$ ); фазы: L, кристаллы A,  $A_nB_m$  и B. Из четырех возможных в этой системе фаз могут сосуществовать три: L, A и  $A_nB_m$ , или L, B,  $A_nB_m$  ( $\Phi=3$ ).

Химическое соединение характеризуется определенным соотношением компонентов, что отражается на диаграмме вертикальной линией, проходящей на оси абсцисс через точку, отвечающую соотношению химических элементов при образовании соединения.

На диаграмме имеются две эвтектические точки  $E_1$  и  $E_2$ . Соответствующими реакциями образования эвтектических смесей являются:



Кристаллизация сплавов по этой диаграмме происходит совершенно аналогично кристаллизации сплавов, образующих механическую смесь кристаллов чистых компонентов. Отличие только в том, что, кроме выделения кристаллов чистых компонентов А и В, происходит еще образование кристаллов химического соединения. Устойчивое химическое соединение может условно рассматриваться как компонент, тогда диаграмма этого типа состоит из двух приставленных друг к другу диаграмм:  $A-A_nB_m$  и  $A_nB_m-B$ , компоненты которых в твердом состоянии нерастворимы друг в друге. Кристаллизацию сплавов в таких системах мы рассматривали ранее (см.рис.2).

### 1.5 Связь между типом диаграмм состояния и свойствами сплавов

Физические свойства сплавов зависят от фазового состояния сплавов. Исследованиями Н.С. Курнакова и А.А. Бочвара установлена связь между диаграммами состояния сплавов, физическими и технологическими свойствами сплавов.

Установлены закономерности изменения свойств у сплавов в зависимости от их состава, которые заключаются в следующем:

1. Если при сплавлении компонентов образуется механическая смесь фаз, то свойства сплавов с изменением состава изменяются по закону прямой линии (аддитивно).

2. Если компоненты при взаимодействии образуют неограниченные твердые растворы, то свойства изменяются по криволинейному закону с максимумом или минимумом.

3. Если при взаимодействии компонентов образуются ограниченные твердые растворы, то в той части, где имеют место однофазные области твердых растворов, свойства изменяются по кривой. В двухфазных областях свойства изменяются аддитивно.

4. Если компоненты образуют химическое соединение, то составу химического соединения соответствует максимум или минимум на кривой изменения свойств. Эта точка перелома, соответствующая составу химического соединения, называется сингулярной точкой.

Знание этих закономерностей содействует более целенаправленному использованию существующих металлов и их сплавов.

### **1.5.1 Связь между диаграммами состояния и технологическими свойствами сплавов**

Диаграммы состояния позволяют теоретически прогнозировать, какие сплавы наиболее пригодны для изготовления деталей методом литья, обработки давлением и др. Известно, что наиболее пластичными являются чистые компоненты и однофазные твердые растворы. Пластичность резко понижается при появлении двухфазных смесей. Известны законы изменения жидкотекучести и усадочных явлений в сплавах в зависимости от состава.

### **1.5.2 Связь между диаграммами состояния и конструкционной прочностью материала**

Как и в чистых металлах, проблема конструкционной прочности определяется подвижностью и торможением дислокаций. Основной фазой в технических сплавах являются твердые растворы. Атомы растворенного компонента неоднородно распределяются в зернах металла растворителя.

На расположение растворенных атомов в кристаллической решетке растворителя оказывают влияние взаимодействие упругих полей напряжений дислокаций и примесных атомов. Атомы элемента, растворенного по способу внедрения, притягиваются к области растяжения под краем экстраплоскости краевой дислокации. Там же преимущественно располагаются атомы, растворенные по способу замещения, если размеры этих атомов больше размеров атомов основного металла. Если растворенные атомы имеют размеры меньше размеров атомов растворителя, то они притягиваются к области гидростатического сжатия дислокации и располагаются над краем экстраплоскости. Энергия связи с краевой дислокацией внедренных атомов примерно 0,2...0,5 эВ; для атомов замещения эта энергия составляет 0,05...0,1 эВ. Цепочки инородных

атомов вдоль края экстраплоскости называют *атмосферой Коттрелла*. С повышением температуры эти атмосферы рассасываются диффузией.

Помимо атмосфер Коттрелла установлены и другие виды размещения растворенных атомов как около краевых, так и винтовых дислокаций (атмосферы Сузуки), которые вмещают большее количество растворенных атомов, чем атмосферы Коттрелла.

Образующиеся атмосферы блокируют дислокации и затрудняют их движение. При нормальных условиях дислокации могут отрываться от атмосфер, для чего, однако, требуются более высокие напряжения.

Упрочнение при образовании твердых растворов можно определить по формуле, полученной Моттом и Набарро:

$$\sigma_T = G\varepsilon^2 C,$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести;

$G$  – модуль сдвига;

$\varepsilon$  – параметр, зависящий от различия размеров атомов растворенного компонента  $r$  и растворителя  $r_0$  [ $\varepsilon = (r - r_0) / r_0$ ];

$C$  – атомная концентрация растворенного компонента.

Упрочнением при образовании твердого раствора достигаются значения

$$\sigma_T \cong 10^{-3} G.$$

Наибольшее упрочнение достигается созданием двух- или многофазных сплавов, состоящих из твердых растворов и включений других фаз, преимущественно в виде химических соединений, которые тормозят движение дислокаций и повышают предел текучести материала.

## 1.6 Механические свойства металлических материалов

Металлические материалы на сегодняшний день являются основными конструкционными материалами. К наиболее важным свойствам, характеризующим поведение конструкционных материалов при нагружении, относятся упругость, пластичность, прочность, твердость и трещиностойкость. Механические свойства могут быть определены на лабораторных образцах и применены для оценки поведения реальных конструкций. Тем самым в значительной мере снижается потребность в натурных испытаниях полнораз-

мерных изделий. Кроме того, деформации материалов могут сопровождаться изменением их структуры, что используется для управления свойствами элементов конструкций при их изготовлении. Таким образом, знание закономерностей деформации и разрушения необходимо для научно обоснованного решения практических задач выбора конструкционных материалов, проектирования конструкций, разработки технологии их производства и ремонта (в особенности обработки давлением и термической), выбора эффективных методов контроля качества и оценки технического состояния конструкций, находящихся в эксплуатации, а также для создания новых материалов.

Механические свойства металлов определяют поведение материала при деформации и разрушении от действия внешних нагрузок.

В зависимости от условий нагружения механические свойства могут определяться при:

- 1) *статическом нагружении*, когда нагрузка на образец возрастает медленно и плавно;
- 2) *динамическом нагружении*, когда нагрузка возрастает с большой скоростью – имеет ударный характер;
- 3) *повторно-переменном нагружении*, когда нагрузка в процессе испытания многократно изменяется по величине или по величине и направлению. Для получения сопоставимых результатов образцы и методика проведения механических испытаний регламентированы ГОСТами.

При любом способе нагружения в материале возникают нормальные и касательные напряжения. Рост касательных напряжений приводит к пластической деформации материала и к последующему вязкому разрушению. Нормальные напряжения приводят к упругой деформации и к хрупкому разрушению.

Отношение максимальных касательных к максимальным нормальным напряжениям ( $\tau_{\max}/\sigma_{\max}$ ), действующим в детали, зависит от способа нагружения и называется *коэффициентом жесткости нагружения*  $\alpha$  :

$$\alpha = \tau_{\max} / \sigma_{\max} .$$

Чем меньше коэффициент жесткости нагружения  $\alpha$ , т.е. чем выше нормальные напряжения, тем более жестким является данный способ нагружения. Основную информацию о механических свойствах материалов инженер получает из справочников и ему

кажется, что данные, приводимые в справочнике, позволяют оптимально решать все проблемы, связанные с выбором материала проектируемых деталей. Однако это далеко не так потому, что условия испытаний материалов сильно отличаются от условий работы материала в реальных деталях. Для грамотного использования информации из справочников прежде всего необходимо понимать, каким образом получены характеристики, приводимые в справочниках и каков их физический смысл.

### 1.6.1 Испытание на растяжение

Для определения механических свойств при статических испытаниях наиболее часто в справочниках приводят свойства, полученные при испытании на растяжение.

В лабораториях испытание на растяжение проводится на специальных машинах, которые записывают диаграмму растяжения (зависимость удлинения образца  $\Delta l$  (мм) от действующей нагрузки  $P$ , т.е.  $\Delta l = f(P)$ ). Однако для получения данных по механическим свойствам, приводимым в справочнике, на основе диаграммы растяжения строят другую диаграмму: зависимость относительного удлинения  $\delta$  (%) от напряжения  $\sigma$ .

На рис. 14 приведена типичная диаграмма растяжения. Её вид сильно зависит от пластичности испытываемого материала.

Участок ОА на диаграмме растяжения соответствует упругой деформации материала, когда соблюдается закон Гука  $\sigma = E \cdot \delta$ , где  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга).

При одноосном растяжении происходят упругое удлинение  $\delta_x$  в направлении растяжения  $X$  и упругое сужение  $\delta_y$  и  $\delta_z$  образца в направлениях  $Y$  и  $Z$ . Отношение упругого изменения размеров в поперечном направлении  $\delta_y, \delta_z$  к упругому изменению размера в направлении деформирования  $\delta_x$  называется *коэффициентом Пуассона*  $\mu$ , т.е.  $\mu = \delta_y / \delta_x = \delta_z / \delta_x$ ; следовательно,  $\delta_y = \delta_z = -\mu \delta_x$ . Для большинства металлов  $\mu = 0,33 \dots 0,4$ . При упругом сдвиге связь между сдвигом  $\gamma$  и касательным напряжением  $\tau$  выражается через модуль сдвига  $G$  зависимостью  $\tau = G\gamma$ . Между константами упругости  $E, G$  и  $\mu$  упругоизотропного тела имеется зависимость  $E = 2G / (1 + \mu)$ .

Напряжение, соответствующее предельной упругой деформации в точке А, называют *пределом пропорциональности*:

$$\sigma_{пц} = P_{пц} / A_0 ,$$

где  $P_{пц}$  – нагрузка;  $A_0$  – площадь поперечного сечения образца.

При напряжениях выше предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пл}}$  происходит равномерная пластическая деформация (удлинение  $\delta$  и сужение  $\phi$  поперечного сечения образца). Каждому напряжению  $\sigma$  соответствует остаточное удлинение  $\delta$ , которое (на диаграмме) получим, проведя из соответствующей точки диаграммы растяжения линию, параллельную участку ОА диаграммы растяжения. Можно решить и обратную задачу – установить, какое напряжение должно быть приложено к образцу, чтобы вызвать заданную степень деформации.

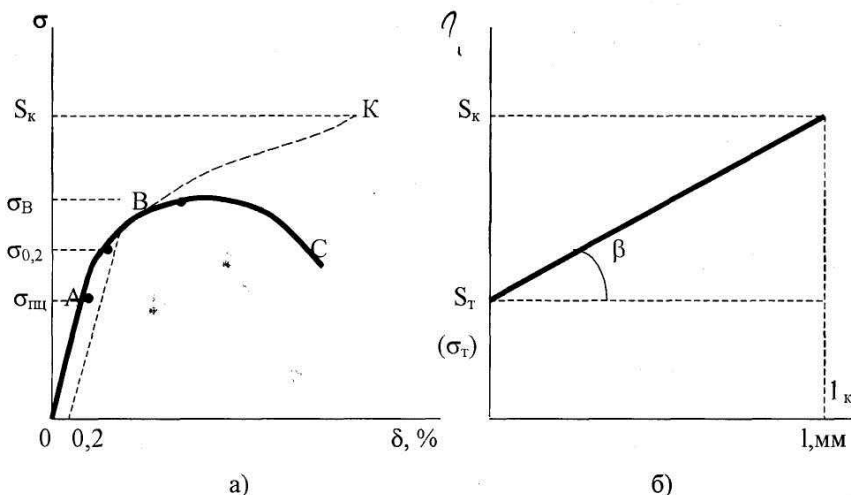


Рисунок 14 – Диаграмма растяжения

Так как практически установить точку перехода в неупругое состояние невозможно, то устанавливают условный предел упругости.

*Пределом упругости* считают напряжение, при котором остаточная деформация очень мала (например, 0,05 % или меньше). В зависимости от допускаемой деформации предел упругости записывается  $\sigma_{0,05}$ , что означает напряжение, которое вызвало остаточную деформацию 0,05 %. Предел упругости является важной характеристикой свойств материалов, используемых для изготовления деталей типа пружин.

Напряжение  $\sigma_{0,2}$ , вызывающее остаточную деформацию  $\delta = 0,2 \%$ , принято называть *условным пределом текучести*:

$$\sigma_{0,2} = R_{0,2} / A_0,$$

где  $P_{0,2}$  – сила, действующая на образец;

$A_0$  – исходная площадь поперечного сечения образца.

У ряда материалов с кристаллической решеткой ОЦК (малоуглеродистые стали) при напряжении несколько выше предела пропорциональности на диаграмме растяжения возникает площадка и материал деформируется без увеличения нагрузки (напряжения). Напряжение, соответствующее этому состоянию материала, называют *пределом текучести* и обозначают  $\sigma_T$ . По физической природе предел текучести  $\sigma_T$  или условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  характеризует сопротивление материала малым пластическим деформациям.

Истинный или условный предел текучести – важная расчетная характеристика материала. Действующие в детали напряжения должны быть ниже предела текучести.

Равномерная пластическая деформация продолжается при росте напряжения до значения  $\sigma_B$  (см. рис. 14). При напряжении выше  $\sigma_B$  наблюдается принципиальное изменение деформации образца. Она сосредотачивается на малом участке длины образца. В этом участке возникает сильное местное утонение образца, именуемое *шейкой*.

Напряжение  $\sigma_B$ , соответствующее началу большой местной пластической деформации, называется *пределом прочности*:

$$\sigma_B = P_B / A_0 ,$$

где  $P_B$  – нагрузка, соответствующая пределу прочности;

$A_0$  – исходная площадь поперечного сечения образца.

Образование шейки характерно для пластичных материалов, которые имеют диаграмму растяжения с максимумом.

Для полухрупких материалов диаграмма растяжения представляется участком ОАВ.

Предельное напряжение  $\sigma_B$ , которое выдержал хрупкий материал при разрушении, является *истинным пределом прочности* материала.

Как видим, физический смысл предела прочности пластичного полухрупкого и хрупкого материала принципиально различный. Это связано с разной пластической деформацией этих материалов до разрушения. Значения предела текучести  $\sigma_T$  и предела прочности  $\sigma_B$  приводятся в справочниках и являются прочностными характеристиками материала.



По диаграмме растяжения определяют и показатели пластичности  $\delta$ ,  $\phi$ . Характеристиками пластичности материала являются относительное удлинение и относительное сужение.

*Относительное удлинение*  $\delta$  представляет отношение прироста длины образца после растяжения к первоначальной длине (%):

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100 \%,$$

где  $l_0$  и  $l_1$  – длины образца до и после пластической деформации соответственно.

Относительное сужение  $\phi$  представляет отношение уменьшения площади поперечного сечения образца к первоначальной площади поперечного сечения (%):

$$\phi = \frac{A_1 - A_0}{A_0} 100 \%,$$

где  $A_0$  и  $A_1$  – площади поперечного сечения образца до и после растяжения соответственно.

Относительное сужение  $\phi$  является более надежной характеристикой пластичности металла, чем относительное удлинение  $\delta$ .

Показатели пластичности в известной степени позволяют судить о склонности материала пластически деформироваться, что представляет интерес с двух точек зрения:

- 1) технологической, характеризующая способность материала к тому или иному способу обработки давлением;
- 2) конструкционной – как необходимое свойство материала деталей конструкций, способствующее перераспределению напряжений при перегрузках.

Пластичные материалы более надежны в работе – для них меньше вероятность опасного хрупкого разрушения.

Так как в процессе нагружения при растяжении поперечное сечение образца не остается постоянным, а уменьшается, то показатели  $\delta_T$  и особенно  $\sigma_B$ , полученные на основе диаграмм растяжения, не отражают истинных напряжений, действующих в поперечном сечении образца. Истинные напряжения тем значительнее отличаются от установленных по выше описанной методике в сторону их увеличения, чем пластичней испытываемый материал. Для хрупких материалов значение  $\sigma_B$  может рассматриваться как характеристика прочности материала (так как уменьшение значения  $A_0$

в процессе деформации очень мало). Для пластичных материалов предел прочности  $\sigma_B$  правильной рассматривать как меру сопротивления материала значительным пластическим деформациям, в то время как предел текучести  $\sigma_T$  характеризует сопротивление материала малым пластическим деформациям.

Для нахождения действительных соотношений между напряжениями и деформациями строят истинные диаграммы растяжения, для которых истинные напряжения получают отношением деформирующей силы к действительной площади сечения образца в каждый момент деформации.

Истинные деформации  $\epsilon$  определяются отношением изменения длины (или сечения образца) к длине (или сечению образца) в данный момент.

Общее истинное удлинение равно

$$\epsilon_k = \int_{l_0}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_k}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A_k} = \ln \left( \frac{1}{1 - \phi} \right),$$

где  $l_k$  и  $l_0$  – конечная и начальная длины образца;  
 $A_k$  и  $A_0$  – конечное и начальное сечения образца;  
 $\phi$  – сужение поперечного сечения.

Истинная диаграмма показана на рис. 14 пунктирной линией. Так как упругая деформация весьма мала по сравнению с пластической, то принимается, что истинный предел текучести  $S_T \sim \sigma_T$ . На диаграмме  $S_T$  – истинный предел текучести, а  $\epsilon_k$  – максимальное истинное удлинение. Тангенс угла наклона линии  $S_T S_k$  называется *модулем упрочнения*  $D$ , который характеризует упрочнение материала при пластической деформации:

$$D = (S_k - \sigma_T) / \epsilon_k, \quad \epsilon_k = (S_k - \sigma_T) / D.$$

По диаграмме можно установить вязкость материала  $a$ , которая характеризуется величиной работы деформации и разрушения и соответствует площади диаграммы в координатах  $S_k - \epsilon_k$ :

$$a = \epsilon_k (S_k - S_T) / 2.$$

С учетом того, что  $S_T \approx \sigma_T$ , получим

$$a = (S_k - \sigma_T)^2 / 2D.$$

Из формулы следует, что высокая работоспособность материала обеспечивается высокими значениями истинного предела прочности  $S_k$  и максимальной истинной пластичностью  $\epsilon_k$ .

### 1.6.2 Испытание на твердость

Широкое распространение испытаний материалов на твердость объясняется тем, что при этих испытаниях не требуются специальные образцы. Методика испытаний весьма проста и может осуществляться непосредственно на готовой детали без разрушения её. В большинстве случаев при испытании на твердость производят вдавливание в испытуемый материал более твердого, чем испытуемый материал, тела (индентора). О твердости материала судят либо по глубине проникновения индентора (твердость по Роквеллу – HRC, HRB, HRA), либо по величине отпечатка от вдавливания индентора при соответствующей нагрузке (твердость по Бринеллю – HB, Виккерсу – HV, микротвердость H). Во всех перечисленных случаях при вдавливании индентора происходит пластическая деформация испытуемого материала. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем на меньшую глубину проникает индентор и тем выше твердость.

Таким образом, твердость при испытаниях методами вдавливания характеризует сопротивление материала пластическим деформациям, т.е. – те же механические свойства материала, которые определяются при испытаниях на растяжение, но в иных условиях напряженного состояния.

Наиболее широко практикуются испытания твердости по Бринеллю и по Роквеллу. При определении *твердости по Бринеллю* индентор в виде стального шарика определенного диаметра  $D$  вдавливается при определенной нагрузке  $P$  в испытуемый материал. Твердость определяется по диаметру отпечатка  $d$  по формуле

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

По Бринеллю определяют твердость относительно мягких материалов (чугунов, отожженной стали, цветных металлов и их сплавов).

При определении *твердости по Роквеллу* в испытуемое тело вдавливается алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  (при

испытании твердости очень твердых металлов) или стальной шарик диаметром 1,588 мм (при испытании мягких материалов). Конус или шарик вдавливаются при приложении двух последовательных нагрузок: предварительной ( $P = 10$  кгс) и основной. Суммарная нагрузка для шкалы В составляет 100 кгс, для шкалы С – 150 кгс, для шкалы А – 60 кгс. Шкала А применяется при испытании очень твердых материалов.

Твердость по Роквеллу устанавливается в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм.

*Твердость по Виккерсу HV* как и микротвердость  $H$ , определяется вдавливанием индентора в виде алмазной пирамиды. Метод используется для испытания твердости деталей малой толщины или тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость.

Методом микротвердости обычно пользуются для измерения твердости отдельных зерен или очень тонких слоев. Нагрузку  $P$  можно изменять в пределах от 1 до 500 г.

В результате проведенных исследований установлена для многих пластичных материалов эмпирическая зависимость между пределом прочности  $\sigma_B$  и твердостью по Бринеллю HB:

$$\sigma_B = k \cdot HB,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности (для сталей  $k = 0,33 \dots 0,36$ ).

Для хрупких материалов (чугун, силумин) надежной корреляции между твердостью и пределом прочности получить не удается.

Недостатком измерения твердости является то, что по показателям твердости не удастся установить достаточно достоверно характеристики пластичного материала.

### 1.6.3 Испытания при динамическом нагружении

Основным видом этих испытаний является испытание на ударный изгиб специальных образцов с надрезом. Испытания проводятся на маятниковых копрах, позволяющих определить работу, затраченную на разрушение образца. В зависимости от формы надреза (концентратора напряжения) на образце ударную вязкость обозначают символами KCU, KCV, KCT.

Буквы KC – символ ударной вязкости, буквы U, V, T обозначают вид концентратора напряжения; U – радиус концентратора ( $1 \pm 0,07$ ) мм; V – радиус ( $0,25 \pm 0,025$ ) мм; T – трещина.

Ударной вязкостью называется удельная работа разрушения:

$$KCU = Q / A ,$$

где KCU – ударная вязкость образца при концентраторе типа U, Дж / м<sup>2</sup>;

Q – работа разрушения, Дж;

A – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

При испытаниях образцов с концентраторами типа U и V энергия маятника при ударе расходуется на пластическую деформацию, в процессе чего зарождается трещина и на распространение трещины (разрушение).

В случае использования образца с концентратором типа T вся энергия расходуется на разрушение. Несмотря на то, что испытание образцов с трещиной дает более точную характеристику надежности материала, изготовление таких образцов крайне сложно. Поэтому на практике наиболее часто определяют ударную вязкость KCU или KCV.

#### 1.6.4 Испытание на усталость

Большинство деталей машин и конструкций, работающих при циклически действующей нагрузке, разрушаются после определенного числа циклов нагружения, когда действующие напряжения даже ниже предела текучести. Это явление называется *усталостью*.

В качестве характеристики материала, работающего в условиях циклического нагружения, используется предел выносливости.

*Пределом выносливости* называется максимальное напряжение, при действии которого не происходит усталостного разрушения после произвольно большого числа циклов нагружения. Наиболее часто испытание на усталость осуществляется на испытательных машинах с вращающимся образцом, на который действует изгибающая нагрузка.

Проводя испытания при разных нагрузках, которые вызывают в образце соответствующие напряжения, определяют число циклов до разрушения и строят график «напряжение  $\sigma$  – число циклов нагружения N» (рис. 15). Для удобства на оси абсцисс чаще откладывают  $\ln N$ . На рис. 15 сплошная линия показывает форму кривой усталости, типичную для сталей. Видно, что при напряжениях выше значения  $\sigma_{-1}$  образец разрушается после определенного числа циклов, при напряжении ниже значения  $\sigma_{-1}$  образцы не

разрушаются при любом числе циклов нагружения. Поэтому  $\sigma_{-1}$  есть предел выносливости. Если предел выносливости определяется при симметричных циклах, то он записывается  $\sigma_{-1}$ . Если испытание проводится при асимметричных циклах, предел выносливости обозначается  $\sigma_R$  (коэффициент асимметрии  $R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ ).

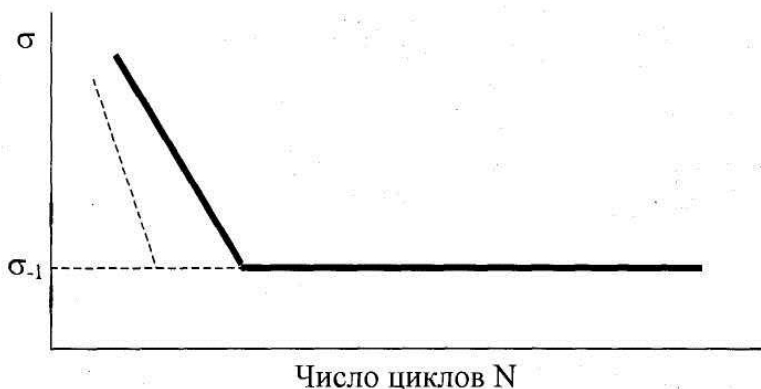


Рисунок 15 – Кривая усталости

Так как база для определения предела выносливости большая (для стали не ниже  $10^7$  циклов, для цветных металлов –  $10^8$ ), то испытания на усталость очень длительные.

Часто от детали не требуется, чтобы она выдерживала миллионы циклов нагружения. В этих условиях задают напряжения выше  $\sigma_{-1}$ , вызывающие разрушение после заданного числа циклов нагружения, или, так называемую, «ограниченную выносливость» (время работы до разрушения). В этом случае деталь по истечении установленного времени работы заменяют новой. В таких условиях работают, например, железнодорожные рельсы. Естественно, что такой подход позволяет экономить металл, так как допускаемые напряжения выше предела выносливости и сечение детали и её масса меньше по сравнению с тем, если расчетные напряжения принимались ниже предела выносливости.

При испытаниях на усталость выявляют также дополнительные характеристики, прежде всего число циклов (время работы) до появления усталостной трещины и число циклов после образования трещины, которые приводят к усталостному разрушению. На рис. 15 пунктирной линией показано число циклов нагружения до образования усталостной трещины в зависимости от значения действующего напряжения. Разность между числом циклов до полного

разрушения и числом циклов до появления усталостной трещины называется *живучестью металла*. Живучесть – важная характеристика конструкционной прочности материала.

Введение этого понятия означает, что деталь может работать при наличии усталостной трещины. Зачастую деталь не разрушается в условиях, когда усталостная трещина охватывает большую часть сечения детали.

Признаком *усталостного разрушения* является вид излома. Он состоит из двух зон: относительно гладкой (притертой) усталостной зоны, которая развивается постепенно, и зоны окончательного разрушения (долома), которая приводит к полному разрушению детали.

Усталостные испытания относятся к числу длительных и дорогостоящих. Поэтому было проведено много исследований по выявлению связей между пределом выносливости и другими прочностными характеристиками, установление которых менее трудоемко. Было выведено много эмпирических формул. Однако эти формулы действительны только для гладких образцов (без надреза), изготовленных из однотипных металлов, имеющих сопоставимые структурные состояния. Следует отметить, что это положение имеет силу и для различных других эмпирических зависимостей. Поэтому при пользовании любыми эмпирическими формулами необходим учет структурного соответствия между материалом, для которого зависимость была установлена, и исследуемым материалом.

### 1.6.5 Испытание на ползучесть

Многие детали, работающие при высоких температурах (лопатки газовых и паровых турбин) и находящиеся длительное время под нагрузкой, деформируются с определенной скоростью в течение всего времени действия температуры и нагрузки вплоть до разрушения. Это явление называется *ползучестью*. На рис. 16 приведена типичная кривая ползучести. Участок  $0a$  соответствует упругой и пластической деформации, вызванной мгновенным приложением нагрузки; на участке  $ab$  металл деформируется с уменьшающейся скоростью; участок  $bc$  характеризует установившуюся скорость ползучести; участок  $cd$  соответствует ускоренной ползучести, которая заканчивается разрушением в точке  $d$ . Испытания металла при высоких температурах производят кратковременные и длительные. При кратковременных испытаниях при соответствующей температуре устанавливаются те же характеристики материала ( $E$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta_B$ ,  $\delta$ ,  $\phi$  и т.д.), что и при испытаниях при нормальной

температуре. Однако необходимо учитывать, что если при нормальной температуре предел прочности металла практически не зависит от длительности действия нагрузки, то при повышенных температурах такая зависимость становится весьма существенной. Увеличение длительности воздействия напряжения приводит к снижению прочности. Механическими характеристиками металла, предусмотренного для работы при высоких температурах, являются предел длительной прочности  $\sigma_d$  и предел ползучести  $\sigma_n$ .

*Предел длительной прочности*  $\sigma_d$  характеризует напряжение, вызывающее разрушение металла при заданной температуре за данный отрезок времени, например,  $\sigma^{850}_{1000} = 200$  МПа. Такая запись означает, что при напряжении 200 МПа деталь, работая при 850 °С, разрушится через 1000 ч работы.

Обычно предел длительной прочности  $\sigma_d$  для металлов задается серией линий для разных температур.

Другой характеристикой сопротивления ползучести является *предел ползучести*  $\sigma_n$ , который характеризует напряжение, вызывающее при данной температуре заданную деформацию (например, 0,5 %) при нагружении в течение определенного времени (обычно не менее 500 ч).

Так, например, запись  $\sigma_{0,5/1000}^{700} = 150$  МПа означает, что напряжение 150 МПа при 700 °С вызывает в данном металле пластическую деформацию, равную 0,5 % за 1000 ч. Знание пределов ползучести  $\sigma_n$  и пределов длительной прочности  $\sigma_d$  позволяет своевременно заменить детали, не доводя машину до остановки (аварии).



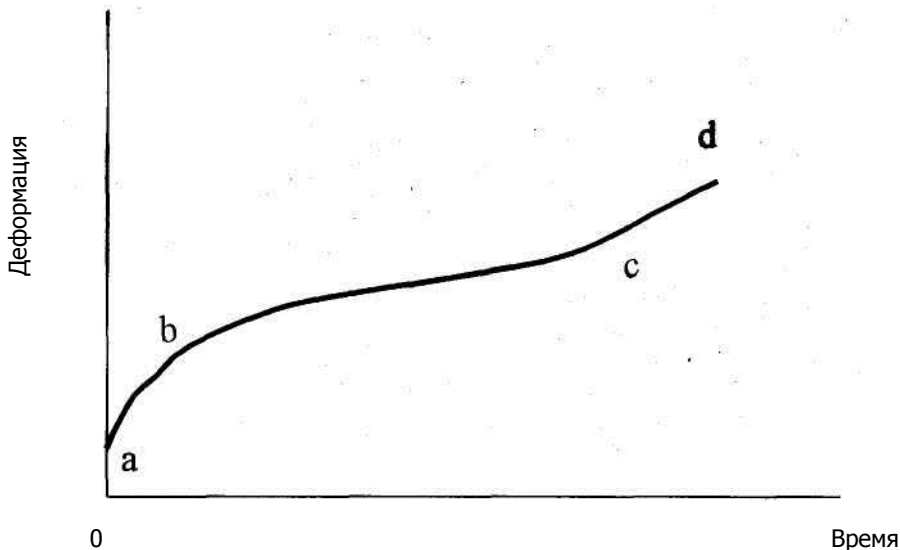


Рисунок 16 – Кривая ползучести

Естественно, что условия эксплуатации определяют тот комплекс свойств, которым должен обладать материал реальной детали, чтобы обеспечить как необходимую надежность, так и долговечность работы изделия, т.е. конструкционную прочность. При установлении критерия прочности материала важно, чтобы степень жесткости испытаний соответствовала характеру напряжения материала в изделии, и она должна быть различной для материалов с разной прочностью.

Так как при стандартных испытаниях трудно воспроизвести полностью условия работы детали в конструкции, то в дополнение к этим испытаниям часто производят испытания готовых изделий на стендах или в процессе эксплуатации. Это не экономично, но позволяет принимать более обоснованные окончательные решения при выборе материала и способов упрочнения применительно к конкретным напряженным деталям.

## 2. ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ И УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ

### 2.1. Факторы, определяющие вид разрушения материалов

Разрушение конструкций, которому предшествует значительная пластическая деформация материала, сравнительно редко является причиной отказов техники, так как пластичное разрушение можно успешно прогнозировать, зная предел текучести материала, и предотвращать. Большинство случаев внезапного разрушения конструкций во время эксплуатации происходит при напряжениях ниже предела текучести, т.е. носит хрупкий характер. Внезапность хрупкого разрушения обычно связана с действием внешних и внутренних факторов (применительно к материалу), влияние которых не было должным образом учтено при проектировании и обработке конструкций.

К внутренним факторам, определяющим сопротивление материалов хрупкому и пластичному разрушению, относятся химический состав, микро- и макроструктура, а также различные несовершенства этой структуры. Внутренними факторами управляют, придавая материалу заданные свойства в ходе технологических операций термической обработки, обработки давлением и других. В большинстве случаев обработка, повышающая предел текучести, вызывает снижение трещиностойкости материала (при прочих равных условиях), т.е. увеличивает вероятность хрупкого разрушения (рис. 17).

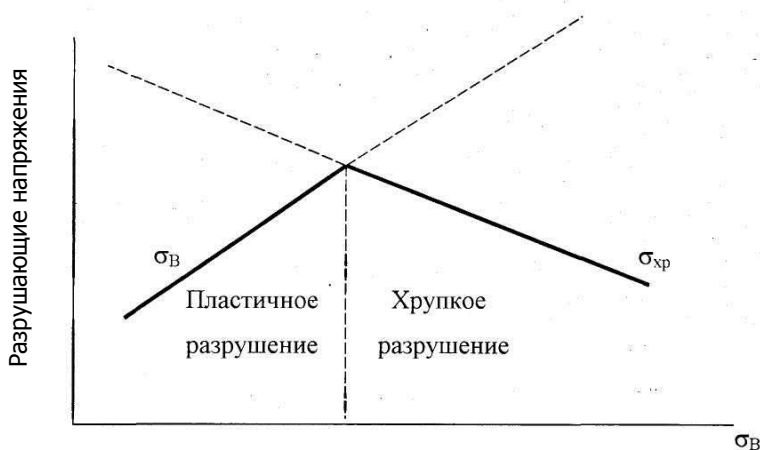


Рисунок 17 – Изменение характера разрушения в зависимости от прочности материала

Поэтому наряду с показателями  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  для объективной оценки прочности материала необходимо иметь информацию о его трещиностойкости. Обычно в этих целях используют критерии  $\delta$ ,  $\phi$ , КСУ, Кс.

Вместе с тем в некоторых случаях необходимая трещиностойкость обеспечивается ограничением максимальных величин  $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_B$  или твердости, которые должен иметь материал после окончательной обработки в изделии. При оценке влияния внешних факторов, определяющих вид разрушения конструкций, различают эксплуатационные (температура, напряжения, вид напряженного состояния, цикличность напряжения, состав окружающей среды и т. д.) и конструкционные (форма и размеры изделия, его элементов, форма и размеры концентраторов напряжения и т.д.).

### 2.1.1 Влияние температуры

При понижении температуры может наблюдаться явление хладноломкости, т.е. переход от пластичного к хрупкому разрушению элементов конструкций (рис. 18). Этот переход обусловлен тем, что предел текучести материала с понижением температуры, как правило, увеличивается, а трещиностойкость падает.

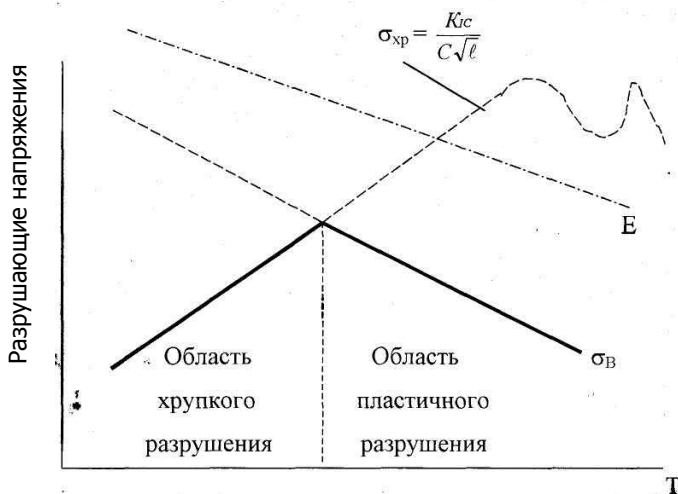


Рисунок 18 – Зависимость характеристик прочности и модуля упругости металлических материалов от температуры

Температуру, при которой происходит переход к хрупкому разрушению, принято называть порогом хладноломкости. Например, для углеродистых сталей порог хладноломкости  $\approx 250$  К. Он зависит не только от свойств материала, но и от вида нагружения и размеров детали, однако приблизительно его оценивают, определяя ударную вязкость КСЧ стандартных образцов при постоянном снижении температуры. При повышении температуры может также наблюдаться переход к хрупкому разрушению (синеломкость, краснеломкость) и замедленному разрушению.

Обычно эти виды разрушения связаны с диффузионными процессами, которые интенсивнее развиваются при повышении температуры и приводят к местным изменениям структуры материалов (чаще по границам зерен).

### 2.1.2 Влияние скорости деформирования

Переход от статического к динамическому нагружению вызывает повышение сопротивления материала пластической деформации, т.е. приводит к увеличению предела текучести. Вместе с тем трещиностойкость материалов может существенно уменьшаться, что способствует переходу от пластичного к хрупкому разрушению конструкций (рис. 19).

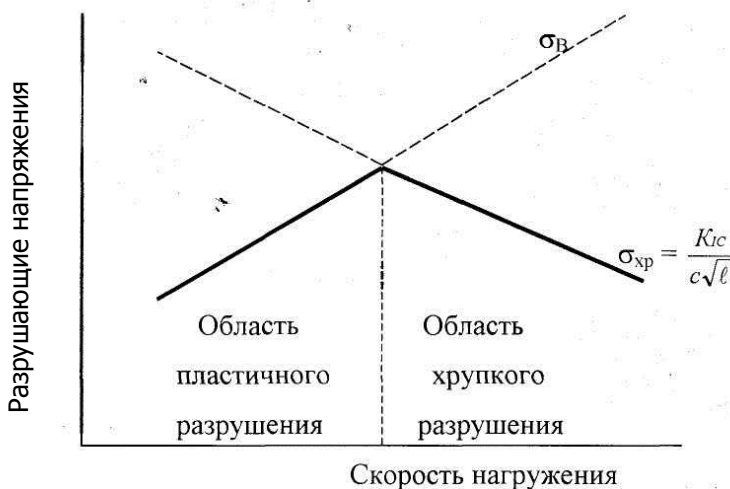


Рисунок 19 – Влияние скорости нагружения на характер разрушения материалов

В большинстве случаев для металлов снижение температуры вызывает большее охрупчивание, чем повышение скоростей деформирования.

### 2.1.3 Влияние вида напряженного состояния

Способ нагружения, определяющий вид напряженного состояния, оказывает существенное влияние на поведение материалов в конструкциях и сооружениях. Так, бетон, обладая низкой прочностью при растяжении, хорошо работает в условиях сжатия. Серый чугун на ферритной основе при растяжении разрушается хрупко и имеет временное сопротивление разрыву около 150 МПа. Влияние способа нагружения на хрупкое и пластичное разрушение

весьма наглядно может быть представлено на диаграмме механического состояния Я.Б.Фридмана (рис. 20). По оси абсцисс откладываются значения максимальных истинных растягивающих напряжений  $S_{\max}$ , а по оси ординат – значения максимальных касательных напряжений  $\tau_{\max}$ . Любой способ нагружения характеризуется величиной отношения  $\tau_{\max} / S_{\max}$ . Например, в случае одноосного растяжения касательные напряжения связаны с нормальными растягивающими напряжениями простым соотношением  $\tau_{\max} = S_{\max} / 2$ , т.е. отношение  $\tau_{\max} / S_{\max}$  равно 0,5.

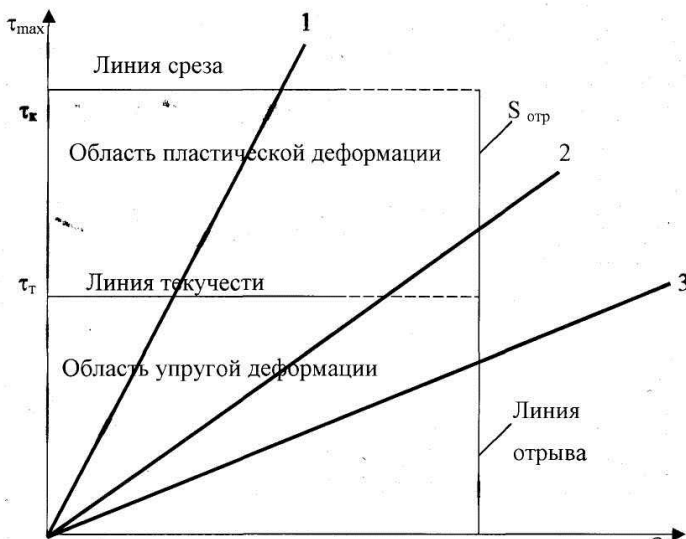


Рисунок 20 – Схематическое изображение диаграммы механических состояний материалов

Используя зависимости, связывающие между собой касательные и истинные нормальные растягивающие напряжения, представляется возможным дать численные величины отношения  $\tau_{\max} / S_{\max}$  для различных способов нагружения и представить их на диаграмме в виде лучей, выходящих из начала координат (табл. 1 и см. рис. 20). Кроме того, на диаграмму наносятся уровни (линии), определяющие следующие характеристики механических свойств рассматриваемого материала: предел текучести  $\tau_T = S_T / 2$  и сопротивление срезу  $\tau_K = S_K / 2$ , выраженные в значениях касательных напряжений, а также сопротивление отрыву  $S_{отр}$ . Анализ диаграммы, представленной на рис. 20, показывает, что при осевом

сжатии (луч 1) разрушение материала происходит путем среза с предшествующей пластической деформацией (вязкое разрушение), так как луч 1 пересекает линии среза и текучести.

Таблица 1 – Характеристики основных способов нагружения

Способ нагружения	$\tau_{\max} / S_{\max}$	Направление луча на диаграмме
Всестороннее сжатие	$\infty$	Ось ординат
Осевое сжатие	2	Луч 1
Кручение	0, 8	Луч 2
Осевое растяжение	0, 5	Луч 3
Всестороннее растяжение	0	Ось абсцисс

При растяжении (луч 3) наблюдается типичное хрупкое разрушение путем отрыва. Промежуточное положение занимает кручение (луч 2), при котором разрушению путем отрыва предшествует некоторая пластическая деформация.

Таким образом, опасность хрупкого разрушения материала усиливается при применении более жесткого способа нагружения, т.е. такого способа, при котором меньше величина отношения касательных напряжений к нормальным растягивающим напряжениям.

Диаграмма механического состояния дает лишь качественное представление о влиянии способа нагружения на хрупкое или пластическое разрушение материалов. Это связано главным образом с тем, что отсутствуют как расчетные, так и экспериментальные методы оценки величины сопротивления отрыву.

### 2.1.4 Влияние циклических нагрузок

Циклические нагрузки могут вызывать усталостное разрушение материалов – постепенное накопление повреждений, замедленное развитие трещин до критических размеров и быстрое их распространение на завершающем этапе разрушения.

Усталостное разрушение является причиной почти 90 % поломок деталей машин, работающих в условиях циклического нагружения, которые вызваны усталостью их конструкционных материалов. Сущность усталости по современным представлениям сводится к следующему. При нагружении металлических материалов в отдельных зернах, имеющих неблагоприятную ориентацию, микропластические деформации развиваются по достижении

напряжений, которые ниже предела текучести. Микропластическая деформация сопровождается увеличением количества дефектов в металле (точечных, линейных и других). Этому способствует многократное повторение напряжений вследствие повторно-переменного характера нагружения. В процессе пластической деформации дефекты скапливаются у границ зерен, включений, мест пересечения плоскостей скольжения и двойникования и т.п. Вследствие этого образуются микротрещины. В большинстве реальных конструкций исходные трещины уже имеются до начала эксплуатации. Поэтому этап зарождения трещин имеет, как правило, только теоретическое значение.

В процессе работы металла количество и размеры микротрещин растут за счет концентрации в их вершинах напряжений и выхода на них новых порций дефектов. При этом рабочее сечение детали постепенно уменьшается. Когда оно уменьшается настолько, что не может противостоять внешним нагрузкам, происходит очень быстрое разрушение (доламывание) оставшейся части детали. В результате этого излом при усталостном разрушении имеет сглаженный вид. Циклические нагрузки обычно характеризуются рядом параметров (период  $T$ , среднее напряжение цикла  $\sigma_m$ , амплитуда цикла  $\sigma_a$ , коэффициент асимметрии цикла  $R$ ), рассчитываемых по формулам:

$$\sigma_m = 0,5 (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}); \quad \sigma_a = 0,5 (\sigma_{\max} - \sigma_{\min});$$

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max},$$

где  $\sigma_{\max}$ ,  $\sigma_{\min}$  – максимальное и минимальное нормальные напряжения.

Основной характеристикой сопротивления усталости служит предел выносливости  $\sigma_R$  – наибольшее значение максимального напряжения циклов, при действии которых не происходит усталостного разрушения образца. Число циклов  $N$  может быть произвольно большим (обычно не менее  $10^7$ ) или заданным. В последнем случае определяется предел ограниченной выносливости  $\sigma_R^N$  (рис. 21). При проведении испытаний обычно используется симметричный цикл нагружения ( $R=-1$ ) и соответственно определяется  $\sigma_{-1}$ . Кривая выносливости строится по результатам испытаний стандартных образцов (гладких или с концентратором напряжений).



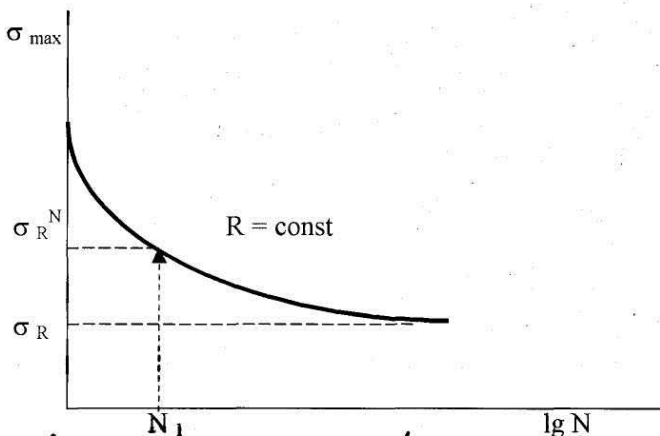


Рисунок 21 – Кривая усталости

Вместе с тем усталостная прочность конструкций может существенно отличаться от  $\sigma_{-1}$ . Более точно конструкционная прочность материалов при циклическом нагружении может быть оценена по критериям трещиностойкости. При испытаниях образцов с трещинами определяется зависимость скорости распространения трещин  $d/d\tau$  от циклического изменения коэффициентов интенсивности напряжения  $\Delta K$  (рис. 22). По этой скорости может оцениваться долговечность как образцов, так и конструкций.

### 2.1.5 Влияние состава окружающей среды

Контакт с окружающей средой в ходе эксплуатации, производственных или ремонтных операций может привести к изменению характера разрушения. Известны два основных вида воздействия среды на механические свойства материалов: пластифицирующее (эффект Иоффе) и охрупчивающее (эффект Ребиндера, водородная хрупкость, коррозионное растрескивание и т.д.).

Наибольшее практическое значение имеет охрупчивание – снижение трещиностойкости материалов в результате физико-химического воздействия внешних сред.

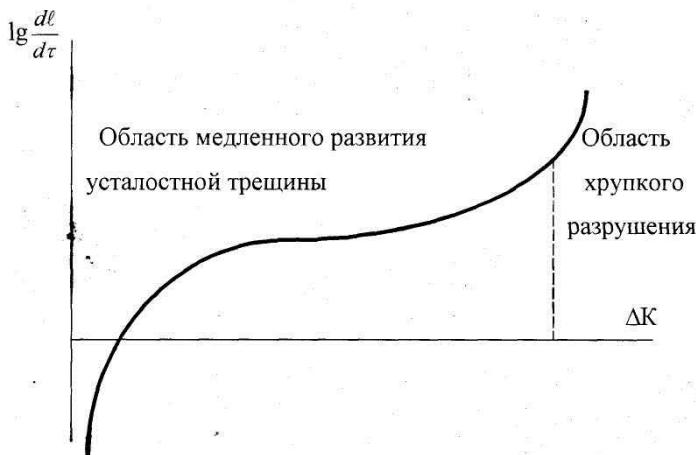


Рисунок 22 – Зависимость скорости развития трещины от амплитуды коэффициента интенсивности напряжения при усталостном разрушении

Особенно опасно медленное скрытое развитие трещин, которое может привести к разрушению после того, как изделие прошло контрольные испытания или эксплуатировалось в течение определенного времени. Например, появление незначительного количества паров аммиака в атмосфере, содержащей кислород и водяные пары, может привести к замедленному растрескиванию латуни. При этом наблюдались случаи, когда длительно действующие постоянные нагрузки, которые могли выдерживать латунные детали без аммиака, уменьшались в 20 и более раз при его наличии. Особенно сильно повышают склонность конструкционных сплавов к хрупкому разрушению металлы, находящиеся в расплавленном состоянии (ртуть, галлий, припой и т.д.).

Снижение трещиностойкости способны вызвать и те вещества, которые не проявляют заметной химической активности при взаимодействии с конструкционными материалами, т.е. поверхность деталей может оставаться не поврежденной (чистой). Особая роль в этом плане принадлежит водороду. Попадая в металлы в виде ионов  $H^+$  из внешней среды, водород относительно свободно в них перемещается и накапливается в местах, где кристаллическая решетка искажена. Скопление ионов водорода выше определенного предела приводит к росту трещин и хрупкому или замед-

ленному разрушению конструкций. Повышенная вероятность водородного охрупчивания часто возникает в ходе технологических операций сварки, нанесения гальванических защитных покрытий и других.

Вместе с тем, выбрав соответствующий внешним условиям производства и эксплуатации материал, можно предотвратить различные виды растрескивания. Для этого определяют критическое значение коэффициента интенсивности напряжения  $K_{кр}$  в заданной среде. Если среда не вызывает снижения трещиностойкости (т.е. выполняется условие  $K_c \approx K_{кр}$ ), то возможна длительная безопасная эксплуатация металлоконструкций (в ходе испытаний материала следует также учитывать возможность воздействия не только среды, но и других факторов).

### **2.1.6 Влияние размеров образца или изделия (масштабный фактор)**

Опасность хрупкого разрушения возрастает в том случае, когда увеличиваются размеры образцов или изделий, находящихся в напряженном состоянии. Объяснение этого явления основывается на статистической теории прочности, согласно которой сопротивление хрупкому разрушению определяется максимальным растягивающим напряжением, совпадающим с наиболее слабым местом металла. Таким слабым местом являются различного рода дефекты, которые статистически распределены по всему объему тела. С увеличением размеров образца или изделия возрастает вероятность существования наиболее опасного крупного дефекта, инициирующего процесс разрушения материала.

Определенную роль в проявлении масштабного фактора играет также запас упругой энергии. При заданном уровне напряжения с увеличением размеров напряженного тела запас упругой энергии увеличивается, что способствует развитию дефектов (трещин). Увеличение толщины стенок конструкций также часто сопровождается снижением трещиностойкости материала, сопротивление хрупкому разрушению (рис. 23).

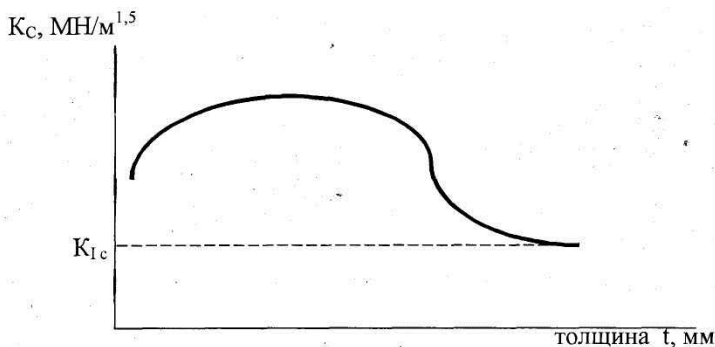


Рисунок 23 – Зависимость трещиностойкости материала от толщины образца

### 2.1.7 Влияние концентраторов напряжений

Очагом хрупких разрушений конструкций являются места, где имеются различного рода концентраторы напряжений (надрезы). Они связаны как с внешней геометрией детали (выточки, отверстия, переходы и др.), так и с внутренними дефектами (трещины, включения и т.п.) деформированного тела. Влияние надрезов на характер разрушения материалов определяется концентрацией напряжений в основании надреза и возникновением объемно-напряженного состояния. На рис. 24 показана схема распределения осевых напряжений при испытании образца с надрезом на растяжение. На участке образца, удаленном от надреза, напряжения распределяются равномерно, а по сечению надреза в его основании возникает концентрация напряжения.

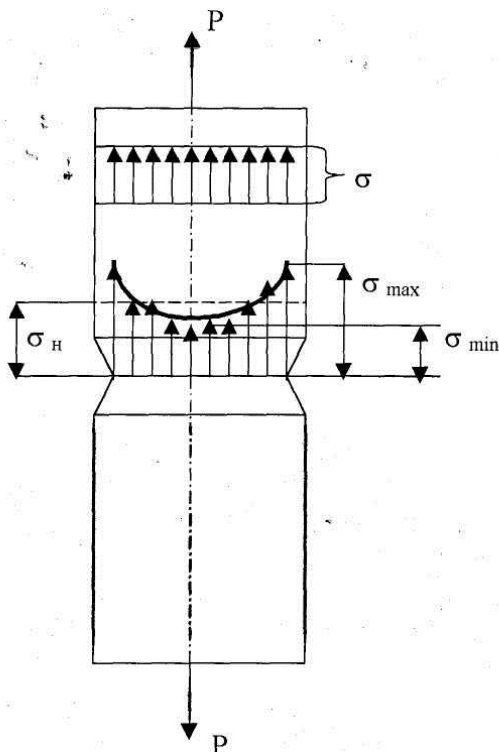


Рисунок 24 – Схема распределения осевых напряжений в образце с надрезом при испытании на растяжение

В этом сечении среднее или номинальное напряжение  $\sigma_H$ , т.е. напряжение без учета концентрации, равно, МПа:

$$\sigma_H = P / A_H ,$$

где  $A_H$  – площадь сечения образца в месте надреза.

Коэффициент концентрации напряжения  $k$  представляет собой отношение наибольшего напряжения  $\sigma_{max}$  к номинальному напряжению  $\sigma_H$

$$k = \sigma_{max} / \sigma_H > 1.$$

Чем острее и глубже надрез, тем больше значение коэффициента концентрации напряжения.

Поведение материала при наличии надреза определяется уровнем концентрации напряжения и способностью к местной (локальной) пластической деформации. В пластичных металлах максимальные напряжения быстро достигают значения предела текучести, в зоне концентрации напряжения начинается пластическая деформация. Это приводит к некоторому уменьшению остроты надреза и соответственно напряжений. Опыт показывает, что при этом даже в условиях достаточно резко выраженной начальной концентрации напряжения пластичные металлы и сплавы могут обеспечить надежную работу конструкции.

В сплавах, не склонных к пластической деформации, максимальные напряжения при определенных значениях, соответствующих хрупкой прочности, вызывают возникновение трещины в основании надреза. Надрез становится более глубоким и острым. В результате увеличивается концентрация напряжения, что, в свою очередь, способствует дальнейшему развитию трещины до момента окончательного разрушения.

При оценке влияния надреза на хрупкое и пластичное разрушение следует также учитывать возникновение объемно-напряженного состояния. Известно, что пластическая деформация вызывается действием касательных напряжений. В случае осевого растяжения гладкого образца максимальные касательные напряжения

$$\tau = 0,5 \sigma_{\max} .$$

При испытании на растяжение цилиндрического образца с надрезом, в сечении надреза помимо осевых напряжений  $\sigma_l$  возникают тангенциальные  $\sigma_t$  и радиальные  $\sigma_r$  нормальные напряжения. Чем глубже и острее надрез, тем сильнее выражено объемно-напряженное состояние, т.е. при одинаковой величине осевых напряжений возрастают значения тангенциальных и радиальных напряжений.

При объемном характере действия нормальных напряжений величина касательных напряжений определяется по формуле

$$\tau = 0,5 (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) .$$

Отсюда следует, что надрез приводит к уменьшению максимальных касательных напряжений и повышает сопротивление пластической деформации, усиливает опасность хрупкого разрушения. В предельном случае (при одинаковых значениях нормальных рас-

тягивающих напряжений) касательные напряжения, определяющие пластическую деформацию, равны нулю, и любой материал при таком нагружении должен разрушаться хрупко.

С практической точки зрения для надежной работы изделия следует, во-первых, по возможности не создавать в конструкции резких концентраторов напряжений и, во-вторых, использовать материалы, обладающие достаточной способностью к местной пластической деформации. Большое значение играют также форма, расположение и размеры дефектов (трещин). По форме все многообразие трещин можно свести к двум основным разновидностям – сквозным (проходят через всю толщину стенки конструкции) и поверхностным или внутренним. Поверхностные и внутренние трещины в большинстве случаев имеют эллиптическую или полуэллиптическую форму. Их влияние на прочность зависит от соотношения полуосей эллипса. Сквозные трещины (при равных максимальных размерах с несквозными трещинами) вызывают большее снижение прочности. Кроме того, сквозные трещины служат одной из главных причин нарушения герметичности конструкций. Размеры трещин по-разному влияют на сопротивление хрупкому и пластичному разрушению (рис. 25).



Рисунок 25 – Влияние размера трещины на характер разрушения

Напряжения, вызывающие хрупкое разрушение, снижаются, а предел текучести остается неизменным или даже возрастает.

Расположение трещин особенно неблагоприятно, когда их плоскость перпендикулярна действию максимальных растягивающих напряжений. Трещины, расположенные на поверхности или на краю детали, более опасны, чем расположенные внутри.

## 2.2 Схема выбора материала

Несмотря на обилие различных материалов (только металлических материалов более 250000) установившихся правил выбора их до сих пор пока нет. Однако существует следующий порядок выбора материалов:

1. На основе тактико-технических требований, предъявляемых к изделию разрабатывается общее проектное задание, в котором формулируются основные расчетные факторы для изделия и его элементов (нагрузки, деформации, температурно-влажностные условия эксплуатации и агрессивность среды).

2. Исходя из расчетных факторов, формулируются требования к материалам по прочности, жаропрочности, сопротивлению усталости, пластичности, вязкости, сопротивлению хрупкому разрушению и др.

3. На основании этих требований задаются характеристики материалов ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma/\gamma$ ,  $\sigma_t^t$ ,  $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma^N_R$ ,  $\delta$ ,  $\phi$ ,  $a_H$ ,  $a_{TY}$ ,  $K$ ,  $K_{1C}$ ,  $K_{1R}$ ).

Другими словами, на основе общего проектного задания проводится анализ условий работы деталей и возможных причин отказа их в работе. При анализе особое внимание обращается на характер нагрузок, действующих на проектируемую деталь.

Из этого вытекают требования к материалу детали и основные направления выполнения этих требований (предположительная технология изготовления детали). На этом этапе из изученных основных классов машиностроительных материалов возникает представление о тех материалах, которые, вероятно, могут обеспечить выполнение требований, предъявляемых к детали. Далее определяются по справочнику марки материалов, их упрочняющей обработки, которые обеспечивают получение у детали требуемых механических свойств. Так как требуемые свойства могут обеспечить разные материалы, то данные о них из справочника следует представить в таблице, что сделает последующий выбор материала более наглядным. При анализе каждого варианта необходимо учитывать технологические свойства и стоимость, как материала, так и технологии изготовления детали.



Требования к материалу нередко противоречивы. Так, например, более прочные материалы менее технологичны, труднее обрабатываются при резании, холодной объемной штамповке, сварке и т.д. Решение при выборе материала обычно компромиссно между всеми требованиями. В массовом производстве предпочитают упрощение технологии и снижение трудоемкости в процессе изготовления детали, некоторой потере свойств или увеличению массы детали. В специальных отраслях машиностроения, где проблема прочности (или проблема удельной прочности) играет решающую роль, выбор материала и последующая технология термической обработки должны рассматриваться из условия достижения только максимальных эксплуатационных свойств. Вместе с тем не следует стремиться к излишне высокой долговечности деталей по отношению к долговечности самой машины.

### 2.3 Выбор стали для изготовления деталей

При решении вопроса о выборе материала для получения требуемых механических свойств и других характеристик также важно установить оптимальный вид упрочняющей обработки.

Вопросы выбора материала и технологии упрочняющей обработки следует рассматривать к конкретным производственным или ремонтным условиям. На экономичность технологических процессов влияют объем выпуска продукции, использование энерго-ресурсов, возможность создания или применения оборудования и другие организационно-экономические условия проведения операций (рис. 26).

Причиной потери работоспособности деталей (отказа их в работе) является качество материала, из которого изготовлена деталь. Разновидностями отказов являются деформация деталей, разные виды разрушений. Кроме того, детали могут выйти из строя вследствие износа, коррозии, которые изменяют качество материала в поверхностных слоях детали и содействуют также их полному разрушению.



Рисунок 26 – Типовая схема выбора материала

Примеры различных видов отказов (внезапных, постепенных, конструктивных, эксплуатационных) некоторых деталей машин и агрегатов, а также пути их устранения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Виды и причины разрушения стальных деталей машин в процессе эксплуатации

Виды разрушения металла	Примеры деталей, склонных к данному разрушению	Причина разрушения	Пути предупреждения дефекта
<p><b>Деформация:</b> искажение геометрической формы детали (изгиб, удлинение и т.д.),</p>	<p>Напряженные болты, тяги, рычаги, штанги, подшипники скольжения, поверхности катания бандажей, рельсов и др.</p>	<p>Длительное действие переменных контактных, растягивающих или сжимающих напряжений, повышение температуры</p>	<p>Использование материалов с высокими значениями <math>\sigma_T</math> и HRC</p>
<p>ползучесть</p>	<p>Лопатки, диски паровых и газовых турбин, трубы пароводов, крепежные детали и др.</p>	<p>Напряжения выше предела ползучести при данной температуре и продолжительности работы</p>	<p>Снижение температуры (нагрузки). Применение более жаропрочной стали</p>
<p><b>Разрушение:</b> вязкое</p>	<p>Несущие элементы мостовых ферм и других пространственных конструкций, анкерные болты, валы, шатуны и др.</p>	<p>Значительные перегрузки вследствие нарушения условий эксплуатации</p>	<p>Соблюдение правил эксплуатации</p>
<p>хрупкое</p>	<p>Детали строительных и дорожных агрегатов, кранов, сварных конструкций и др.</p>	<p>Эксплуатация при низких температурах, наличие исходных дефектов, высокий порог хладноломкости стали, наличие концентраторов напряжений, статическая и динамическая перегрузки</p>	<p>Применение сталей с низким порогом хладноломкости, высоким КСТ и <math>K_{1c}</math>, устранение концентраторов напряжений, соблюдение правил эксплуатации</p>
<p>усталостное</p>	<p>Валы, коленчатые валы, листовые рессоры, пружины, зубчатые колеса, шатуны и др.</p>	<p>Циклические напряжения свыше <math>\sigma_{-1}</math>, наличие концентраторов напряжений, плохая обработка поверхности, работа в коррозионной среде, наличие на поверхности растягивающих напряжений</p>	<p>Улучшение конструкции детали, повышение качества поверхности, упрочнение поверхности химико-термической обработкой, закалкой, замена стали</p>

Продолжение табл. 2

Виды разрушения металла	Примеры деталей, склонных к данному разрушению	Причина разрушения	Пути предупреждения дефекта
<b>Изнашивание:</b> абразивное	Гусеницы тягачей, открытые зубчатые передачи, детали подшипников и др.	Взаимодействие трущихся поверхностей с абразивными частицами	Наплавка износостойкими порошковыми сплавами: ПР-Н80Х13С2Р, ПР-Н77Х18С3Р2, ПР-Н70Х17С4Р4 и др.
эрозия	Детали гидронасосов, трубопроводы, плунжерные пары, сопла и лопатки реактивных двигателей, обшивки летательных аппаратов и т.д.	Воздействие потоков газов, жидкости, твердых частиц, космических потоков раскаленных газов на поверхность изделия	Замена стали
окислительное	Подшипники скольжения, валы и оси, направляющие, кулисы, поршневые кольца и втулки	Длительное трение сопряженных поверхностей	Упрочнение поверхности, применение смазочного материала с износостойкими присадками, оптимизация температурного режима
при фреттинг-коррозии	Болтовые и заклепочные соединения, посадочные поверхности подшипников качения, листовые рессоры, шестерни, му-фты, детали, находящиеся в подвижном контакте	Непрерывное разрушение защитной оксидной пленки в точках подвижного контакта	Увеличение жесткости соединения в площади контакта, использование материалов с высокой адгезией оксидных пленок, упрочнение улучшением, цементацией (нитроцементацией), азотированием, цианированием
усталостное	Зубчатые передачи, подшипники качения, рельсы, бандажи и др.	Пониженная контактная прочность материала, высокие контактные напряжения	Упрочнение поверхности химико-термической обработкой, закалкой, повышение чистоты поверхности, уменьшение контактных напряжений, применение смазочного материала

Отказ детали зачастую зависит от многих факторов, действующих одновременно, и высокое качество детали может быть достигнуто при возможно полном учете тех особенностей, которые имеют место в процессе работы детали и определяют конструкционную прочность.

*Конструкционной прочностью* материалов называют комплекс прочностных свойств, которые находятся в наибольшей корреляции со служебными свойствами данного изделия. Конструкционная прочность деталей зависит от качества материала, выбранного конструктором, конструктивных особенностей детали, технологии изготовления и условий эксплуатации.

При решении вопроса о выборе стали обычно рассматривается возможность применения нескольких марок и способов упрочнения. Это позволяет выбрать наиболее рациональный вариант, обеспечивающий наряду с высокими эксплуатационными свойствами детали хорошую технологичность при выполнении механической и термической обработки.

В зависимости от условий работы деталей машин, их упрочнение достигается закалкой и отпуском, поверхностной закалкой или химико-термической обработкой, чаще цементацией или нитроцементацией с последующей закалкой и низким отпуском и реже азотированием.

*Объемная закалка и отпуск.* Объемную закалку с последующим низким или высоким отпуском для получения требуемых механических свойств широко применяют в машиностроении. Например, в машиностроении 35...40 % упрочняемых деталей подвергается объемной закалке и отпуску.

Получить высокую прочность у обычных машиностроительных сталей (до 0,5...0,6 % С) можно путем объемной закалки и низкого отпуска. Однако повышение прочности ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ) сопровождается уменьшением сопротивления хрупкому разрушению, о чем свидетельствует КСЧ, КСТ,  $K_{1c}$  и порога хладноломкости. Чем выше содержание углерода в стали, тем ниже вязкость разрушения  $K_{1c}$  сталей со структурой отпущенного мартенсита.

Низкому отпуску (180...200 °С) подвергают детали машин (табл. 3), требующие по условиям работы высокой твердости (58...62 HRC), сопротивления износу и контактным нагрузкам в условиях статического или циклического их действия. В этом случае для изготовления деталей используют высокоуглеродистые легированные стали. Низкому отпуску подвергают и некоторые детали из конструкционных сталей, содержащих 0,35...0,45 % С и требующих высокой твердости 40...56 HRC (табл. 3).

Для изготовления нагруженных болтов, баллонов высокого давления, некоторых деталей шасси находят широкое применение высокопрочные стали 35 ХГС, 40 ХГСНЗВА, 35 Х2АФ ( $\sigma_{\text{в}} = 1800 \dots 2000$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1500 \dots 1700$  МПа,  $\delta = 10 \dots 12$  %,  $\phi = 45 \dots 50$ ), подвергающиеся объемной закалке и отпуску при температуре  $200 \dots 250$  °С. Высокопрочные низкоотпущенные стали чувствительны к концентраторам напряжений, водородной хрупкости анизотропии механических свойств. Для низкоотпущенных конструкционных сталей большое значение имеет отсутствие в них неметаллических включений, газов и вредных примесей. Чем чище сталь, тем выше предел выносливости  $\sigma_{-1}$  и пластичность стали.

Таблица 3 – Типовые детали машин, упрочняемые объемной закалкой и низким отпуском

Детали		Рекомендуемая сталь	Твердость HRC
Условия работы	Наименование		
Высокое сопротивление износу и контактным напряжениям	Детали подшипников: шарики, кольца, накладные направляющие качения лифтового и транспортно-установочного оборудования.	ШХ 15, ШХ 15СГ ШХ 15, 7ХГ2ВМ,	62...66 58...60
Стабильность формы и размеров при эксплуатации (температура отпуска $150 \dots 175$ °С)	Ролики толкателей, ходовые винты пар качения и др.	ХВГ, 7ХГ2ВМ, ШХ 15	58...60
Высокое сопротивление износу при трении скольжения.	Детали насосов: статоры, роторы, лопасти, клапаны, золотники, плунжеры и др.	ШХ 15, 30Х13, 40Х13, 30Х13Н7С2	58...60
Стабильность формы и размеров при эксплуатации (температура отпуска $150 \dots 180$ °С)	Детали кузнечно-прессового оборудования, детали кулачковых механизмов, кулачковые ролики, копиры, плунжеры, цанги, делительные диски, опоры и др.	У8А, У10А, ШХ 15, 9ХС, ХВГ	58...60
	Детали оборудования: направляющие втулки, накладные направляющие скольжения, втулки, упоры, кулачки и др., винты передач скольжения	ШХ 15, ХВГ, 9ХС, ХВСГ, ХВГ	58...60 54...58
Повышенное сопротивление износу, статическим и динамическим циклическим нагрузкам (температура отпуска $180 \dots 240$ °С)	Крепежные детали: болты, шпильки, гайки и др. Детали технологического оборудования: валы, цилиндры, штоки, оси, вилки, червячные и кулачковые муфты, направляющие, эксцентрики и др., шпиндели, гильзы, валы, оси, червяки, и др.	35, 45, 40Х, 35ХМ, 40ХФА, 30ХГСА, 50ХН, 40ХН, 40ХН2МФ, 38Х2Н2МА, 40ХН2МА45, 40Х, 50Х, 40ХН, 50ХН, 40ХГРТ	45...53 40...56

Низкому отпуску подвергают и низкоуглеродистые цементуемые (нитроцементуемые) стали, которые обеспечивают высокую конструкционную прочность, особенно если они мелкозернистые. Объемной закалке с последующим отпуском при 420...500 °С подвергают упругие элементы машин и агрегатов (табл. 4), изготавливаемые из сталей 60, 60Г, 55С2, 65С2ВА, 50ХГФА и др.

Максимальные упругие свойства достигаются при сквозной прокаливаемости. Поэтому марку стали подбирают по критическому диаметру прокаливаемости.

Для стали 50С2 он составляет 12...16 мм, а для сталей 60С2, 60С2ХА и 60С2ХФА при закалке в масле – 20, 45, 80 мм соответственно. Подавляющее число деталей машин из среднеуглеродистых (0,3..0,5 % С) конструкционных сталей подвергают закалке и высокому отпуску при 550...650<sup>0</sup> С, который обеспечивает хорошую конструкционную прочность (высокие значения работы распространения трещины КСТ и вязкости разрушения  $K_{Ic}$  ) при низком пороге хладноломкости (сталь 40ХМФ).

Таблица 4 – Стали и термическая обработка упругих элементов агрегатов

Детали	Рекомендуемая сталь	Требуемая твердость HRC
Пружинные шайбы, скобы, зажимы, тарельчатые пружины, стопорные кольца и др.	50, 55, 65, 65Г, 50С2	40...50
Пружины буксирных устройств, насосов, карбюраторов, кузовов, прицепов, клапанов и др.	60, 65Г, 70Г, 55С2	38...48
Ответственные пружины на транспортном оборудовании (пружины сцепления, демпферов, рулевых тяг), навиваемые в холодном состоянии	60С2ВА, 50ГФА	42...48
Рессорные листы легковых автомобилей, реактивные штанги	50ХГФА (толщина полосы до 9 мм)	40...46
Рессорные листы грузовых автомобилей	50С2, 60С2, 60ХГС, 50ХГА, 60С2,	38...46
Торсионные валы, кольца амортизаторов, диски сцепления	60С2ВА, 45ХН2МФА	42...49

После улучшения стали обладают высокой живучестью (низкой скоростью роста трещины усталости), несмотря на раннее по времени образование трещины усталости. После закалки и высокого отпуска предел выносливости  $\sigma_{-1}$  повышается на 30...40 %, долговечность – от 2 до 5 раз, предел контактной выносливости – на 20...50 %, сопротивление фреттинг-коррозии – в 2...5 раз и значительно возрастает вязкость разрушения  $K_{Ic}$ . Однако после улучшения сталь чувствительна к концентраторам напряжений. В табл. 5 приведены типовые детали машин и агрегатов, упрочняемые закалкой и высоким отпуском, а также рекомендуемые стали. Для улучшаемых деталей твердость и прочность колеблются в широких пределах в зависимости от температуры отпуска и состава стали (207...350 НВ и  $\sigma_B = 700...1400$  МПа).

Стали с различным содержанием углерода и легирующих элементов после одинакового режима обработки отличаются друг от друга по механическим свойствам. Однако, если различные стали обработать на одинаковую прочность  $\sigma_B$  (твердость НВ), значения  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\phi$  и КСЧ оказываются близкими (табл. 6). Это положение справедливо для вязкого разрушения. Если после улучшения  $\sigma_B \leq 1200...1300$  МПа, предел текучести может быть использован для расчетов деталей машин без опасения возникновения хрупкого разрушения. При  $\sigma_B \geq 1500$  МПа не удастся получить полностью вязкое разрушение, и расчеты следует вести по КСТ и  $K_{Ic}$ .

Таблица 5 – Типовые детали машин, упрочняемые объемной закалкой и высоким отпуском

Детали	Рекомендуемая сталь	Твердость НВ
Разные крепежные детали: пробки, гайки, болты, винты, штифты, втулки, вилки и др.	35, 45	207...242
Валы карданные, шатуны, цапфы, фланцы, тяги, ступицы и др.	45, 40X	207...241; 255...302
Оси, валы, шестерни, плунжеры, штоки, шестерни, шатуны в тяжелом машиностроении.	45X	223...265; 212...248; 174...217
Оси, валики водяной помпы, шестерни распределительные, полумуфты, кулаки поворотные, сошки, валы, тяги поперечные, шатуны, ступицы и другие детали автомобиля.	45, 35X, 45X, 40XH, 40XH2MA, 20XГТР	241...286
Валы, роторы и диски компрессоров, зубчатые колеса, оси, болты и другие особо ответственные тяжело нагруженные детали	38XH3MФА, 36X2H2MФА, 34XH3M	293...331 277...321 293...331



Таблица 6 – Механические свойства улучшенных сталей в зависимости от временного сопротивления

$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\phi$ , %
700	500...600	20...30	65...75
900	700...800	18...22	62...73
1100	900...1000	15...18	55...62
1200	950...1100	13...16	50...57
1400	1050...1300	11...15	48...55

Оптимальное сочетание прочности и пластичности после улучшения достигается, если сечение изделия соответствует критическому диаметру (95 % мартенсита) для данной стали.

Механические свойства и закаливаемость стали, в первую очередь, определяются содержанием в ней углерода. Прокаливаемость определяется присутствием легирующих элементов. В условиях полной прокаливаемости механические свойства мало зависят от природы и степени легированности. Исключение составляют никель и молибден, повышающие сопротивление хрупкому разрушению. Однако не стоит стремиться к применению сталей с излишне высокой прокаливаемостью, поскольку необходимое для этого высокое содержание легирующих элементов способствует росту склонности к хрупкому разрушению и ухудшает технологические свойства.

Глубокопрокаливающиеся легированные стали применяют для крупных деталей с большой толщиной стенки или большим диаметром. Если изделия работают на изгиб (кручение), напряжения по сечению распределяются неравномерно: на поверхности они максимальны, а в середине или в центре равны нулю. Для такого рода сквозная прокаливаемость не нужна. Например, сквозная прокаливаемость деталей станков необходима лишь в отдельных случаях. Для надежного обеспечения прочности ответственных деталей, работающих при эксплуатации в основном на изгиб и кручение, закаленный слой со структурой 95 % мартенсита должен располагаться на глубине не менее  $1/2$  радиуса от поверхности.

Для деталей, работающих на растяжение, а также для рессор и пружин нужно обеспечить полную прокаливаемость по всему сечению (95 % мартенсита в центре заготовки), т.е. равнопрочность по сечению.

Для большинства ответственных деталей машин из улучшаемых сталей твердость после закалки на расстоянии  $1/2$  радиуса от

поверхности должна быть не менее 45 HRC. Для изделий, работающих на растяжение, оптимальная твердость должна быть в сердцевине. Детали сложной конфигурации для уменьшения их деформации в процессе закалки также следует изготавливать из легированных сталей, закаливаемых в масле или даже на воздухе.

При выборе стали следует учитывать, что легирующие элементы повышают устойчивость аустенита против отпуска, поэтому для получения требуемой прочности и твердости легированные стали при улучшении подвергают отпуску при более высокой температуре. Это позволяет не только более полно снять закалочные напряжения, но и получить в стали лучшее сочетание прочности и вязкости.

В тяжелом и энергетическом машиностроении масса деталей (поковок) достигает десятков и сотен тонн (роторы турбин, рамы транспортных агрегатов и т.д.), что осложняет термическую устанковку. Термическая обработка таких деталей, как правило, состоит из двух этапов: предварительного и окончательного.

Предварительную термическую обработку проводят непосредственно послековки с целью измельчения зерна аустенита (отжиг), предотвращения появления флокенов, снижения твердости для облегчения последующей механической обработки, уменьшения остаточных напряжений и подготовки структуры под окончательную термическую обработку.

Небольшие поковки из сталей типа 45, 45Х, 50Г, малочувствительные к флокенам, отжигают по специальному режиму (рис. 27).

При охлаждении до 300...350 °С аустенит углеродистых сталей распадается с образованием ферритно-цементитной структуры, а аустенит легированных сталей – с образованием бейнита. В процессе изотермической выдержки при 640...660 °С и последующего медленного охлаждения происходит удаление растворенного водорода с поверхностных слоев и перераспределение его в центре поковки. При этом уменьшается количество активного растворенного водорода, что приводит к уменьшению флокеночувствительности стали.

Окончательная термическая обработка поковок сводится к закалке (или двойной закалке) в воде, реже в масле и отпуску. Иногда вместо закалки применяют нормализацию. Продолжительность этих операций 100...400 часов.

Для деталей, испытывающих при работе изгиб, кручение и контактные напряжения, применяют поверхностную закалку. Индукционная поверхностная и объемно-поверхностная закалка

стали по оптимальным режимам и правильный выбор стали значительно повышают предел выносливости, предел контактной выносливости, долговечность и сопротивление фреттинг-коррозии.

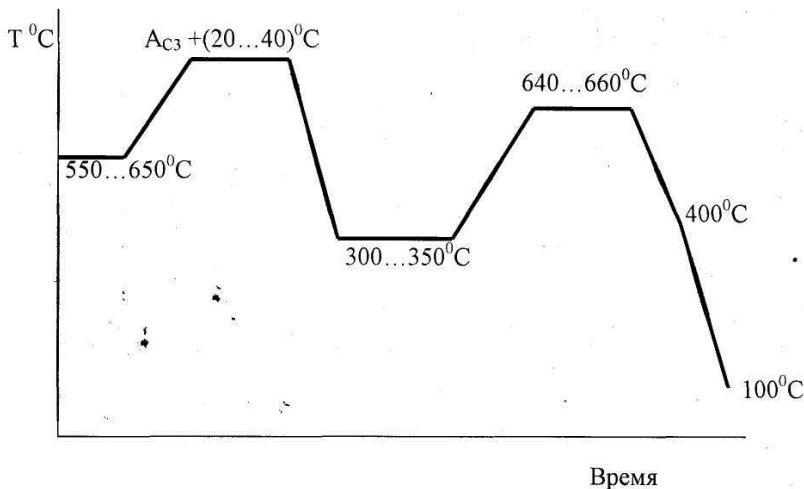


Рисунок 27 – Режим отжига поковки из углеродистых низколегированных сталей

Разработка методов поверхностной закалки при глубинном индукционном нагреве позволила использовать его как комплексный способ упрочнения, одновременно повышающий сопротивление статическим и усталостным нагрузкам при изгибе при высоком уровне контактной усталости и сопротивления износу.

Поверхностная закалка при индукционном нагреве по сравнению с химико-термической обработкой менее трудоемка и во многих случаях по качеству деталей не уступает цементации (нитроцементации).

Недостатком этого метода упрочнения является трудность его унификации. Для каждой детали конструкции индуктора, охлаждающих устройств и установок в целом разрабатываются отдельно. Поэтому применение для поверхностной закалки индукционного нагрева при единичном и мелкосерийном производстве должно быть технически и экономически обосновано с учетом как затрат непосредственно на термическую обработку, так и эффекта от повышения работоспособности изделий.

## Материаловедение

В таблице 7 приведены примеры использования поверхностной закалилки при индукционном нагреве для упрочнения деталей металлорежущих станков и транспортных агрегатов.

Таблица 7 – Типовые детали машин, упрочняемые закалилкой при индукционном нагреве

Детали	Рекомендуемая сталь	Толщина закаленного слоя, мм	Твердость, HRC	Примечание
Коленчатый вал двигателей: бензиновых дизельных	45 50Г	2,6...6,5 3...4	52...62 52...62	Предварительная нормализация
особонагруженных дизельных	50ХФА	3...4	52...56	Шатунные и коренные шейки
Распределительный вал грузового автомобиля	45	2...3	58...62 46...56 56...62	Кулачки Шестерня Опорные шейки
Червяки рулевого управления, втулка шатунов, ось коромысла клапана, колодки тормоза	45	1...2,5	56...60	
Тонкие оси (штоки амортизаторов)	45	4	56...58	Закалка в вертикальном положении
Зубчатые муфты и венцы Крестовина карданного вала автомобиля	50ХМ 58	1,5 1,7...3,7	56...62 58...62 60...66	Закалка зубьев
Цилиндрические ведомые шестерни	58	1...2,5	58...63	Закалка зубчатого венца

Некоторые шестерни заднего моста транспортных агрегатов изготавливают из стали 55ПП и упрочняют поверхностной закалилкой при глубинном индукционном нагреве. В зависимости от модуля колеса  $m$  рекомендуется применять стали 55ПП с критическим диаметром по прокаливаемости, равным 6,5...9,0 мм для  $m=3,5...5$ ;

9...13 мм для  $m = 4,5...7$  и 13 мм и более для  $m \geq 7$ . После закалки твердость на поверхности зуба 58..62 HRC, а в сердцевине 30...40 HRC. Толщина упрочненного слоя 1...2 мм.

В машиностроении, если к зубчатым колесам не предъявляются высоких требований по износостойкости, их изготавливают из сталей 40, 45, 40X, 40XC и упрочняют закалкой с высоким отпуском и последующей поверхностной закалкой при индукционном нагреве на глубину 1,5...2,5 мм (твердость 54 HRC). Для изготовления коленчатых валов сложной формы с большими фланцами и отверстиями наряду со сталью применяют высокопрочные магниевые чугуны (ВЧ 50, ВЧ 60 и др.). Пониженная прочность чугунных валов в значительной степени компенсируется более конструктивными их формами, малой чувствительностью чугуна к концентраторам напряжений, в многоопорных валах меньшим смещением опор и снижением опасности резонансных колебаний благодаря повышенной демпфирующей способности. Чугунные валы весьма разнообразны, начиная от небольших до весьма крупных (массой до 700...1300 кг, длиной 2...3,5 м и диаметром 200...250 мм). Коленчатые валы отливают в оболочковые формы и шейки валов автомобильных двигателей упрочняют поверхностной закалкой при индукционном нагреве на твердость 47...52 HRC. После закалки валы подвергают низкому отпуску при 180...200 °С 2...3 ч. Перед поверхностной закалкой валы проходят нормализацию с последующей сфероидизацией. Толщина упрочненного слоя 2...3 мм.

Для деталей, которые должны сопротивляться износу при различных давлениях, обладать высокой прочностью при изгибе, а также высокими значениями сопротивления усталости при изгибе, контактных напряжениях, сопротивляться схватыванию и задирам в условиях трения без смазочного материала применяют химико-термическую обработку. Цементация и нитроцементация рекомендуются для наиболее напряженных деталей машин (зубчатые колеса, валы, шпиндели, вал-шестерни и др.).

Содержание легирующих элементов в стали, предназначенной для изготовления деталей, упрочняемых цементацией (нитроцементацией), так же как и улучшаемых, не должно быть слишком высоким, но должно обеспечивать требуемую прокаливаемость поверхностного слоя и сердцевины и тормозить рост зерна аустенита при нагреве. Легирование должно обеспечить возможность применения наиболее экономичного и технически выгодного метода термической обработки – непосредственной закалки из цементационной (нитроцементационной) печи.

Для высоконагруженных деталей, цементуемых на большую глубину (более 0,6...0,7 мм), рекомендуются стали, легированные никелем, молибденом с микродобавками Al, Ti, V и N (25ХГНМАЮ). Эти стали обеспечивают высокую прокаливаемость цементованного (нитроцемент-тованного) слоя и хороший комплекс механических свойств.

Цементация (на толщину 0,5...2,0 мм) или нитроцементация (на толщину 0,4...0,8 мм) и последующая закалка и низкий отпуск повышают предел выносливости на 50...80 %, предел контактной выносливости на 60...100 %, износостойкость в 3...10 раз, долговечность в 5...10 раз и сопротивление фреттинг-коррозии в 2...5 раз. Твердость сердцевины 28...40 HRC и слоя 58...62 HRC.

На конструкционную прочность деталей большое влияние оказывает толщина упрочненного слоя. Эффективная толщина слоя определяется оптимальным отношением толщины слоя к характерному размеру детали. Например, для цилиндрических деталей  $h/R$ , для зубчатых колес  $h/m$  ( $m$ -модуль). Для зубчатых колес эффективная толщина слоя  $h_{\text{э}}$  составляет 0,15...0,27  $m$ , при этом большие отношения относятся к мелко-модульным зубчатым колесам. Повышение толщины слоя более  $h/R = 0,05$  снижает  $\sigma_{-1}$  и  $K_{1c}$  и повышает критическую температуру хрупкости. Для повышения контактной прочности толщина слоя должна быть больше.

Наиболее часто цементации и нитроцементации подвергают зубчатые колеса, которые должны обладать высокой износостойкостью рабочих поверхностей и достаточной статической прочностью, сопротивлением усталости при изгибе и при контактном нагружении.

Твердость на поверхности зуба во избежание его хрупкого разрушения не должна превышать 63 HRC, а в сердцевине 30...45 HRC. С повышением твердости сердцевины, например при увеличении содержания углерода в стали, возрастает предел контактной выносливости зубчатых колес, но снижается  $\sigma_{-1}$  и увеличивается опасность хрупких разрушений.

Стали и методы упрочнения зубчатых колес, применяемые в машиностроении, можно классифицировать по степени нагруженности этих деталей:

1. Мало- и средненагруженные зубчатые колеса (шестерни ведущие и ведомые коробки передач, шестерни главной передачи ведомые и др.) изготавливают из безникелевых (18ХГТ, 25ХГТ) и малоникелевых (20 ХГНР, 20ХНР) сталей с упрочнением цементацией на толщину 1,2...1,8 мм или нитроцементацией на толщину 0,8...1,2

мм. Твердость на поверхности 56...65 HRC. Твердость сердцевины зубьев 25...40 HRC.

2. Тяжело нагруженные зубчатые колеса изготавливают из малони-келевых цементуемых (нитроцементуемых) сталей 20ХГНР, 20ХНР и хромоникелевой 20ХНЗА. При этом толщина упрочняемого слоя и нормы его твердости остаются такими же, как и для мало-нагруженных зубчатых колес. Однако твердость сердцевины несколько выше – 30...45 HRC.

Многие детали машин, прошедшие упрочнение термической или химико-термической обработкой, от работоспособности которых зависит долговечность машины в целом, добавочно упрочняют поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Этот метод упрочнения применяют для деталей машин, работающих в условиях знакопеременных нагрузок (торсионы, коленчатые валы, шатуны, шестерни и др.), высоких скоростей и давлений (распределители, поршни, поршневые кольца, золотники, плунжеры и др.), окислительного изнашивания, контактно-усталостных напряжений (цапфы шестерен, опорные шейки, поворотные кулачки и др.). В зависимости от формы, размеров, характера производства выбирают наиболее оптимальный метод поверхностного пластического деформирования. Для деталей сложной формы (пружины, рессоры, лопатки, шатуны и др.) применяется дробеструйная обработка.

Для упрочнения наружных и внутренних поверхностей цилиндрических изделий, сферических и профильных поверхностей, галтелей применяют накатывание роликовым (шариковым) инструментом.

Наклеп поверхности ППД (толщина упрочненного слоя 0,1...0,25 мм) повышает предел выносливости на 30...50 %, долговечность в 3...10 раз, сопротивление фреттинг-коррозии в 1,5...2 раза.

## 2.4 Методика выполнения домашнего задания

Первоначальное использование знаний по методике выбора материала и упрочняющей обработки деталей машин происходит на заключительном этапе изучения дисциплины материаловедения при выполнении курсантами соответствующего домашнего задания. Знания, приобретенные на старших курсах при курсовом и дипломном проектировании, позволяют выработать правильный подход при решении материаловедческих проблем. При выборе материала для проектируемой детали конструктор пользуется справочниками, где наряду с данными о механических свойствах, полученных при

испытании стандартных образцов, указывается также название типичных деталей, для которых данный материал используют. Однако трудность при выборе материала по справочнику заключается в том, что для изготовления детали одного и того же наименования справочник рекомендует весьма различные марки материала.

Поэтому при выполнении домашнего задания по выбору материала для конкретной детали необходимо пользоваться следующими рекомендациями:

1. Задание должно быть точно переписано.
2. Далее проводится анализ условий работы детали и возможных причин отказа детали в работе. Из этого вытекают требования к материалу детали и основные направления выполнения этих требований (предположительная технология изготовления детали). На этом этапе из изученных основных классов машиностроительных материалов возникает представление о тех материалах, которые, вероятно, могут обеспечить выполнение требований, предъявляемых к детали.

3. Определяются по справочнику марки материалов, их упрочняющей обработки, которые обеспечивают получение у детали требуемых механических свойств. Так как требуемые свойства могут обеспечить разные материалы, то данные о них из справочника следует представить в таблице, что сделает последующий выбор материала более наглядным. При выполнении конкретного задания анализу должно быть представлено не менее 4...5 разных вариантов возможного решения задачи.

4. Анализ каждого варианта возможного решения задачи следует привести письменно, давая характеристику каждого из возможных вариантов, учитывая при этом технологические свойства и сравнительную стоимость как материала, так и технологии изготовления детали.

5. На основе сравнения всех данных по каждому материалу следует сделать заключение, какой материал и по каким причинам в данном случае является оптимальным.

**Пример.** Подобрать материал для изготовления вала редуктора одного из агрегатов наземного оборудования диаметром 100 мм, предназначенного для работы в условиях Сибири и упрочняющую обработку. Требуемые значения  $\sigma_T \geq 700$  МПа, твердость шейки вала  $\geq 55$  HRC. Изготовление деталей серийное.



### Решение.

1. *Анализ условий работы детали.* Вал работает в условиях изгиба, т.е. при невысокой жесткости нагружения (коэффициент жесткости нагружения  $0,5 < \alpha < 0,8$ ). В условиях Сибири от детали требуется особо высокая надежность (сопротивление хрупкому разрушению). Это обеспечивается при использовании стали со сквозной прокаливаемостью, что необходимо учесть помимо удвоения требуемого значения  $\sigma_T$  и твердости шеек вала.

2. *Выбор материала и упрочняющей обработки валов.* При изучении механических свойств углеродистых сталей с содержанием углерода до 0,5 % выявляется, что требуемое значение  $\sigma_T$  после термической обработки можно обеспечить в сечениях до 20 мм. Поэтому из этих сталей изготовление детали не представляется возможным. Требуемые свойства можно обеспечить только использованием легированных сталей. Выполнение заданных требований могут обеспечить материалы, приведенные в таблице 8.

Таблица 8 – Перечень сталей для изготовления вала

Марка	Термообработка	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\phi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	D <sub>к</sub> , мм	
							50	95
18ХГТ	ц+з, 810 °С+ о, 200 °С	800	1000	9	50	80	40	30
20ХГР	ц+з, 880 °С+ о, 200 °С	1240	1520	11,5	55	81	90	60
30ХНЗА	з, 820 °С+ о, 530 °С	800	1000	10	50	80	95	>100
40ХНМА	з, 850 °С+ о, 620 °С +з, ТВЧ + о, 180 °С	1000	1100	12	50	80	120	90

3. *Анализ выбранных материалов.* В таблице приведены значения механических свойств легированных сталей, термическая обработка и значения критических диаметров.

Сталь 18ХГТ после закалки и низкого отпуска обеспечивает требуемое значение  $\sigma_T$ . Закалка и низкий отпуск после цементации обеспечат требуемую твердость шеек валов, но прокаливаемость низкая (значит, следует ожидать, что в крупном сечении эта сталь не обеспечит требуемую конструкционную прочность).

Сталь 20ХГР выбрана потому, что легирование бором повышает прокаливаемость. Однако и эта сталь имеет  $D_{95} = 60$  мм. Поэтому, несмотря на высокую статическую прочность, в малых сечениях, в надежности деталей диаметром 100 мм уверенности нет. Против стали 20ХГР говорит и наличие в составе стали марганца, который при длительном процессе цементации может вызвать рост зерна и охрупчивание материала по этой причине.

Как видно, основная трудность при выборе материала заключается в достижении требуемой прокаливаемости. Так как никель

сильно увеличивает прокаливаемость, то предлагается сталь 30ХН3А. После проведения необходимой (см. табл. 8) термообработки сталь приобретает требуемое значение  $\sigma_T$  и нужную прокаливаемость. Однако высокий отпуск не обеспечивает требуемой твердости шеек вала. Поэтому требуемые свойства эта сталь может обеспечить только после цементации, закалки и низкого отпуска. Но эта технология дорогостоящая. Кроме того, дорога и дефицитна сама сталь из-за повышенного содержания никеля.

Сталь 40ХНМА имеет больше углерода, чем сталь 30ХН3А, и меньше никеля. После закалки эта сталь может обеспечить требуемую твердость. Поэтому в таблице приводятся данные об этом материале. Улучшение обеспечивает требуемое значение  $\sigma_T$  при почти полной прокаливаемости. Положительно наличие молибдена в стали, так как нет опасности отпускной хрупкости второго рода после высокотемпературного отпуска. Для обеспечения требуемой твердости шеек вала после улучшения следует провести поверхностную закалку с нагревом ТВЧ и низкий самоотпуск. Поверхностная закалка шеек вала создает в поверхностных слоях шейки напряжения сжатия, что повышает сопротивление усталости. Так как в месте перехода шейки вала в утолщенную часть при закалке ТВЧ возникает участок, где действуют растягивающие напряжения, то во избежание этого галтель в месте перехода необходимо подвергнуть обжатию обкаткой роликами.

**Вывод.** Оптимальное решение задачи – выбор стали 40ХНМА. Эта сталь содержит минимальное количество никеля, поэтому дешевле стали 30ХН3А. Технология изготовления валов проще и дешевле.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов, Б.Н. *Материаловедение* / Б.Н. Арзамасов. – М.: Машиностроение, 2016. – 384 с.
2. Мозберг *Р.К.* *Материаловедение: Уч. пос.* 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1991.– 448 с.
3. Белов, В. В. *Краткий курс материаловедения и технологии конструкционных материалов для строительства* / В.В. Белов, В.Б. Петропавловская. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 208 с.
4. Заплетохин В.А. *Конструирование деталей механических устройств: Справочник.* Л.: Машиностроение. 1990.– 669 с.
5. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. *Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений.* 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
6. *Специальное материаловедение и технология материалов/* Под ред. М.М. Чернышова. МО СССР, 1992. – 478 с.