

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ БЮДЖЕТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Воронежский государственный технический университет  
(ВГТУ)

Конспект лекций  
по дисциплине

**«Технологическая механика авиационных материалов»**

**Воронеж, 2022 г.**

## Содержание

Введение.....	5
Тема 1. Особенности атомно-кристаллического строения металлов.....	5
1.1. Кристаллическое строение металлов и сплавов.....	5
1.2. Понятие об изотропии и анизотропии.....	7
1.3. Влияние типа связи на структуру и свойства кристаллов.....	7
1.4. Кристаллизация металлов и сплавов.....	9
1.5. Дефекты кристаллического строения.....	10
Тема 2. Механические свойства материалов и методы их оценки.....	13
2.1. Упругая и пластическая деформация.....	13
2.2. Понятие об основных механических свойствах металлов и сплавов.....	17
2.3. Испытание на прочность. Построение диаграмм растяжения.....	19
2.4. Методы определения твердости.....	20
2.5. Испытания на ударную вязкость.....	22
2.6. Испытания на усталость.....	24
2.7. Испытания на ползучесть материала.....	25
Тема 3. Термическая обработка металлов и сплавов.....	26
3.1. Общие сведения.....	26
3.2. Классификация видов термической обработки металлов и сплавов.....	26
3.3. Оборудование для термической обработки.....	28
3.4. Выбор режимов термической обработки.....	29
3.5. Отжиг I и II рода.....	29
3.6. Нормализация.....	31
3.7. Закалка с полиморфным и без полиморфного превращения.....	32
Тема 4. Химико-термическая и термомеханическая обработка сплавов.....	32
4.1. Химико – термическая обработка сплавов.....	32

4.2. Термомеханическая обработка металлов и сплавов.....	36
Тема 5. Термическая обработка сталей.....	37
5.1. Критические точки на диаграмме состояния «железо-цементит»	37
5.2. Превращение в сталях при нагреве и охлаждении.....	38
Тема 6. Классификация конструкционных материалов.....	40
6.1. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам.....	41
6.2. Конструкционные стали.....	42
6.3. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей.....	43
6.4. Маркировка конструкционных сталей.....	47
6.5. Материалы с особыми технологическими свойствами.....	51
6.6. Материалы с высокой твердостью поверхности.....	54
Тема 7. Конструкционные материалы с особыми свойствами.....	56
7.1. Материалы с малой плотностью.....	56
7.2. Материалы с высокими упругими свойствами.....	59
7.3. Материалы с высокой удельной прочностью.....	60
Тема 8. Композиционные материалы.....	63
Тема 9. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды.....	68
9.1. Коррозионно-стойкие материалы.....	69
9.2. Коррозионно-стойкие покрытия.....	70
9.3. Жаростойкие материалы.....	73
9.4. Жаропрочные материалы.....	75
Тема 10. Материалы для режущих, измерительных и деформирующих инструментов.....	77
10.1. Материалы для режущих и измерительных инструментов.....	77
10.2. Углеродистые стали.....	78
10.3. Быстрорежущие стали.....	80
10.4. Спеченные твердые сплавы.....	81
10.5. Сверхтвердые материалы.....	83

10.6. Стали для измерительных инструментов.....	83
10.7. Стали для инструментов холодной обработки давлением.....	84
10.8. Стали для инструментов горячей обработки давлением.....	85
Библиографический список.....	88

## Введение

**Технологическая механика**-наука о процессах, происходящих в материалах и конструкциях при работе под нагрузкой или при переходе из одного состояния (геометрического, функционального, структурного) в другое.

### Тема 1. Особенности атомно-кристаллического строения металлов.

#### 1.1. Кристаллическое строение металлов и сплавов.

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

- высокой тепло- и электропроводностью;
- положительным коэффициентом электросопротивления (с повышением температуры электросопротивление растет);
- термоэлектронной эмиссией (испусканием электронов при нагреве);
- хорошей отражательной способностью (блеском);
- способностью к пластической деформации;
- полиморфизмом.

Наличие перечисленных свойств обусловлено металлическим состоянием вещества, главным из которых является наличие *легкоподвижных коллективизированных электронов проводимости*.

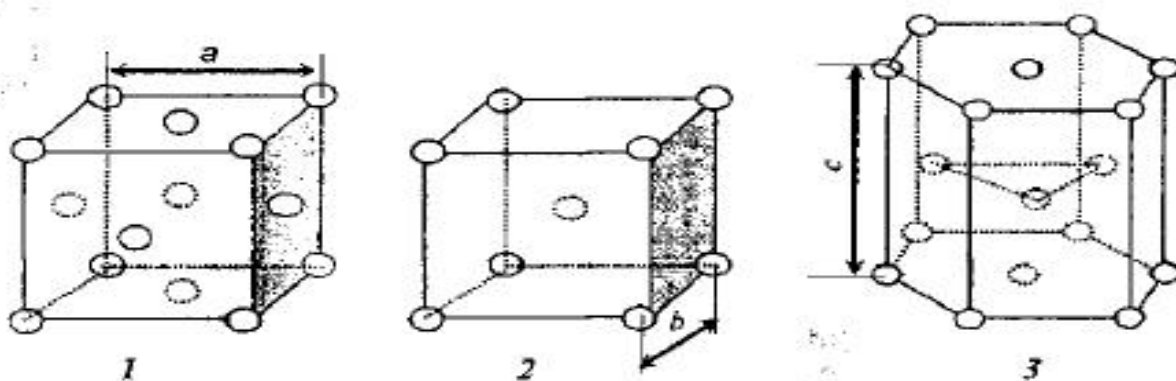
Под **атомно-кристаллической структурой** понимают взаимное расположение атомов в кристалле. Кристалл состоит из атомов (ионов), расположенных в определенном порядке, который периодически повторяется в трех измерениях. Наименьший комплекс атомов, который при многократном повторении в пространстве позволяет воспроизвести пространственную кристаллическую решетку, называют **элементарной ячейкой**. Элементарная ячейка характеризует особенности строения кристалла. Основными параметрами кристалла являются:

- размеры ребер элементарной ячейки.  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – периоды решетки – расстояния между центрами ближайших атомов. В одном направлении выдерживаются строго определенными.
- углы между осями ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ).
- координационное число ( $K$ ) указывает на число атомов, расположенных на ближайшем одинаковом расстоянии от любого атома в решетке (рис.1.1).
- базис решетки количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку решетки.

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

Классификация возможных видов кристаллических решеток была проведена французским ученым О. Браве, соответственно они получили название «решетки Браве». Всего для кристаллических тел существует четырнадцать видов решеток.

ис.  
1.1  
Сх  
ем  
а  
оп  
ред

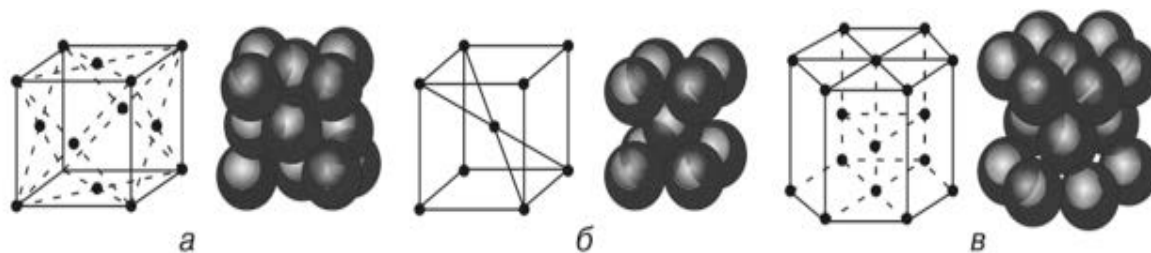


еления координационного числа кристаллической решетки: 1-ГЦК; 2-ОЦК; 3-ГПУ.

Простейшим типом кристаллической ячейки является *кубическая решетка*. В простой кубической решетке атомы расположены (упакованы) недостаточно плотно. Стремление атомов металла занять места, наиболее близкие друг к другу, приводит к образованию решеток других типов (рис. 1.2):

- объемноцентрированной кубической решетки (ОЦК) (рис. 1.2, б) с параметром:  $a = 0,28 - 0,6\text{мм} = 2,8 - 6,0 \text{ \AA}$ ;
- гранецентрированной кубической решетки (ГЦК) (рис. 1.2, а) с параметром:  $a = 0,25\text{мм}$ ;
- гексагональной плотно - упакованной решетки (ГПУ) (рис. 1.2, в) с параметром:  $c / a = 1,633$ .

ис.  
1.2.  
Тип



ы кристаллических решеток  
а-ГЦК; б-ОЦК; в-ГПУ

## 1.2. Понятие об изотропии и анизотропии

Свойства тела зависят от природы атомов, из которых оно состоит, и от силы взаимодействия между этими атомами. Силы взаимодействия между атомами в значительной степени определяются расстояниями между ними. В аморфных телах с хаотическим расположением атомов в пространстве расстояния между атомами в различных направлениях равны, следовательно, свойства будут одинаковыми, то есть аморфные тела *изотропны*. Узлы (положения атомов), направления в плоскости и в пространстве обозначаются с помощью, так называемых индексов Миллера (рис.1.3). Индексы узла записываются –  $(mnp)$ , индексы направления –  $[mnp]$ , индекс плоскости –  $(hkl)$ .

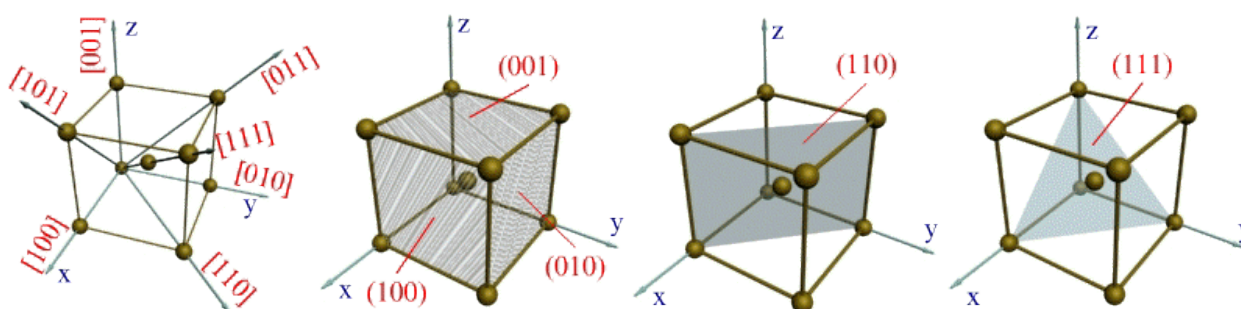


Рис. 1.3. Символы некоторых важнейших узлов, направлений и плоскостей в кубической решетке

Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства отдельно взятого кристалла (химические, физические, механические) по данному направлению отличаются от свойств в другом направлении и, естественно, зависят от того, сколько атомов встречается в этом направлении. Различие свойств в зависимости от направления испытания носит название *анизотропии*.

Анизотропия – особенность любого кристалла, характерная для кристаллического строения. Технические металлы являются поликристаллами, т.е. состоят из совокупности кристаллитов с различной ориентацией. При этом свойства во всех направлениях усредняются.

## 1.3. Влияние типа связи на структуру и свойства кристаллов

Тип связи возникающий между элементарными частицами в кристалле, определяется электронным строением атомов, вступающих во взаимодействие. Силы притяжения возникают благодаря взаимодействию электронов с положительно заряженным ядром собственного атома, а также с положительно

заряженными ядрами соседних атомов. Силы отталкивания возникают в результате взаимодействия положительно заряженных ядер соседних атомов при их сближении. Уравновешивание сил происходит при сближении атомов на определенное расстояние с максимумом энергии связи  $E_{св.}$ , что делает кристалл термодинамически стабильным.  $E_{св.}$  определяет: температуру плавления, испарения, модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения.

Все кристаллы по характеру преобладающей связи подразделяют:

- Молекулярные.
- Ковалентные.
- Металлические.
- Ионные.

**Молекулярные кристаллы** в инертных газах имеют единственную связь Ван-дер-Ваальса  $a$ , следовательно, она определяет структуру и свойства кристаллов. Возникновение сил притяжения между атомами объясняют мгновенной поляризацией атомов при сближении. Силы Ван-дер-Ваальса не имеют направленного характера, так как мгновенный диполь образуется с каждым из соседних атомов. В результате атомы, стремясь увеличить число соседей в кристаллической решетке, укладываются наиболее компактным образом.

**Ковалентные кристаллы** образуют атомы углерода, кремния, германия, сурьмы, висмута и др. К ковалентным кристаллам относятся и многие сложные кристаллические вещества, состоящие из разнородных атомов, например, карбид кремния, нитрид алюминия и др. Ковалентная связь характеризуется направленностью, так как каждый атом вступает в обменное взаимодействие с определенным числом соседних атомов. Вследствие большой энергии связи ковалентные кристаллы характеризуются высокими температурами плавления и испарения.

В **металлическом кристалле** при взаимодействии с элементами других групп атомы легко отдают свои валентные электроны и превращаются в положительные ионы. Металлическая связь ненаправленная, так как каждый атом стремится притянуть к себе как можно больше соседних атомов. Среди металлов и некоторых неметаллов распространено явление *полиморфизма* – способность в твердом состоянии при различных температурах (или давлении) иметь различные типы кристаллических структур. Эти кристаллические структуры называют аллотропическими формами или модификациями. Низкотемпературную модификацию называют  $\alpha$ , а высокотемпературные  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и т.д. Температурным полиморфизмом обладают около тридцати металлов. Быстрое охлаждение может сохранить высокотемпературную модификацию в течение длительного времени при  $T = 20-25^{\circ}\text{C}$ , так как низкая диффузионная подвижность атомов при таких



температурах не способна вызвать перестройку решетки. Кроме того, известен полиморфизм под влиянием температуры и давления (графит – алмаз).

В сложных **ионных кристаллах**, состоящих из элементов различной валентности, возможно образование ионного типа связи. Представитель этой группы – кристалл оксида FeO, решетка которого состоит из отрицательно заряженных ионов кислорода и положительно заряженных ионов железа. Перераспределение валентных электронов при ионной связи происходит между атомами одной молекулы (одним атомом железа и одним атомом кислорода).

#### 1.4. Кристаллизация металлов и сплавов

В зависимости от температуры любое вещество (система) может быть в твердом, жидком или в газообразном состоянии. В физической химии **системой** называют совокупность индивидуальных веществ (химические элементы, независимые химические соединения), между которыми или частями которых обеспечена возможность обмена энергией, а также процессов диффузии. В природе все самопроизвольно протекающие превращения, а следовательно, кристаллизация и плавление обусловлены тем, что новое состояние в новых условиях является энергетически более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии. Энергетическое состояние системы, имеющей огромное число охваченных тепловым движением частиц (атомов, молекул), характеризуется особой термодинамической функцией (F), называемой **свободной энергией**, которая определяется:

$$F = U - TS,$$

где U – внутренняя энергия системы; T - абсолютная температура; S – энтропия.

Можно сказать, что чем больше свободная энергия системы, тем система менее устойчива, и если имеется возможность, то система переходит в состояние, где свободная энергия меньше.

С изменением внешних условий например температуры, свободная энергия системы изменяется по сложному закону, но различно для жидкого и твердого состояний (рис. 1.4).

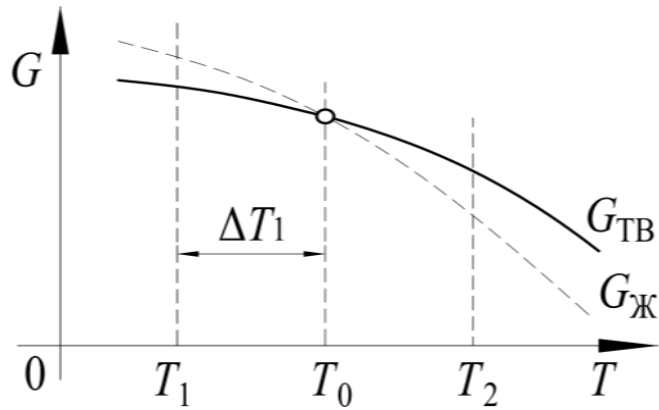


Рис 1.4. Изменение свободной энергии жидкого и кристаллического состояний в зависимости от температуры

Выше температуры  $T_0$  меньшей свободной энергией обладает вещество в жидком состоянии, ниже  $T_0$  – вещество в твердом состоянии.

Следовательно, выше  $T_0$  вещество должно находиться в жидком состоянии, а ниже  $T_0$  – в твердом, кристаллическом. Очевидно, что при температуре, равной  $T_0$  свободные энергии жидкого и твердого состояний равны, металл в обоих состояниях находится в равновесии. Эта температура  $T_0$  и есть **равновесная** или **теоретическая температура кристаллизации**. Для начала кристаллизации необходимо, чтобы процесс был термо-динамически выгоден системе и сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Их кривых (рис.1.4) видно, что это возможно только тогда, когда жидкость будет охлаждена ниже точки  $T_0$ . Температура, при которой практически начинается кристаллизация, может быть названа **фактической температурой кристаллизации**. Охлаждение жидкости ниже температуры кристаллизации называется переохлаждением. Обратное превращение из кристаллического состояния в жидкое может произойти только выше температуры  $T_0$ , это явление называется **перенагреванием**. Величиной или степенью переохлаждения называют разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации:  $T = T_0 - T_{\phi}$ . Охлаждение металла в жидком состоянии сопровождается плавным понижением температуры и может быть названо простым охлаждением, так как при этом нет качественного изменения состояния.

### 1.5. Дефекты кристаллического строения

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

Различают следующие структурные несовершенства:

- точечные – малые во всех трех измерениях;

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

**Точечные дефекты:** Одним из распространенных несовершенств кристаллического строения является наличие точечных дефектов: вакансий, дислоцированных атомов и примесей (рис.1.5).

**Вакансия** – отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки, «дырки», которые образовались в результате различных причин.

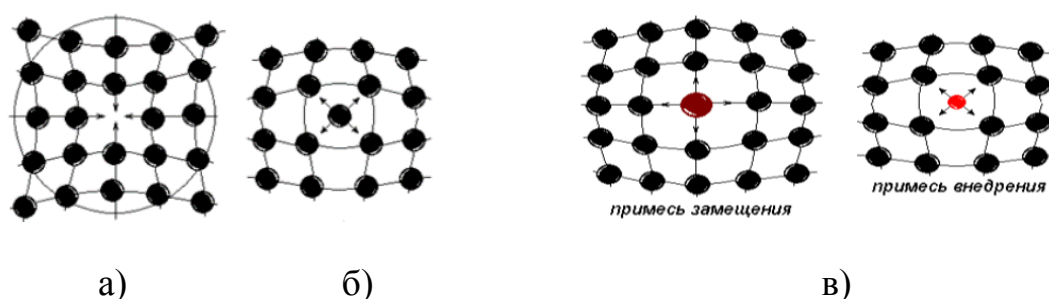


Рис.1.5. Точечные дефекты

**Дислоцированный атом** – это атом, вышедший из узла решетки и занявший место в междоузлии. Концентрация дислоцированных атомов значительно меньше, чем вакансий, так как для их образования требуются существенные затраты энергии. При этом на месте переместившегося атома образуется вакансия. Примесные атомы всегда присутствуют в металле, так как практически невозможно выплавить химически чистый металл. Они могут иметь размеры больше или меньше размеров основных атомов и располагаются в узлах решетки или междоузлиях. Точечные дефекты вызывают незначительные искажения решетки, что может привести к изменению свойств тела (электропроводность, магнитные свойства), их наличие способствует процессам диффузии и протеканию фазовых превращений в твердом состоянии. При перемещении по материалу дефекты могут взаимодействовать.

**Линейные дефекты:** линейными дефектами являются дислокации. Априорное представление о дислокациях впервые использовано в 1934 году Орованами и Тейлером при исследовании пластической деформации кристаллических материалов, для объяснения большой разницы между практической и теоретической прочностью металла.

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

**Краевая дислокация** представляет собой линию, вдоль которой обрывается внутри кристалла край — лишней — полуплоскости (рис.1.6.)

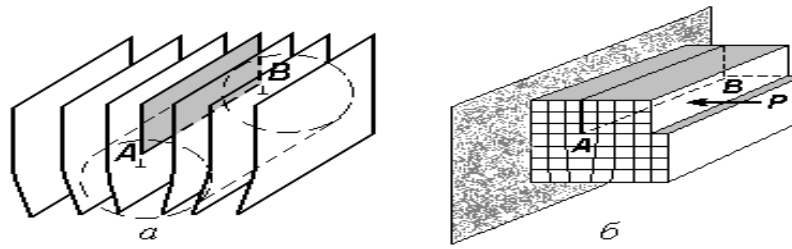
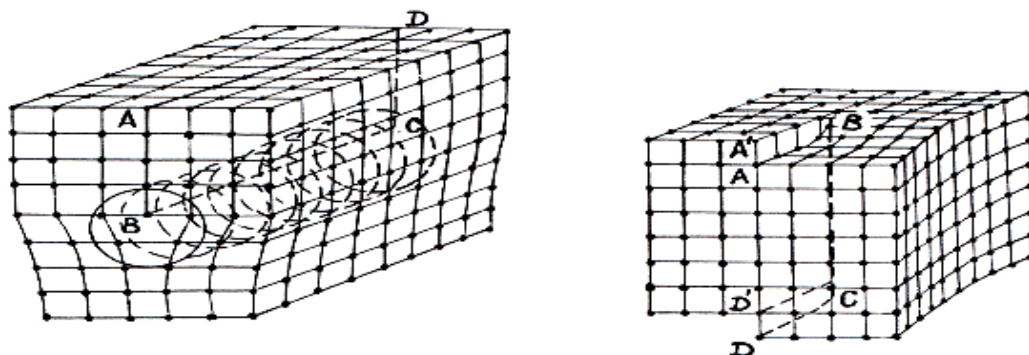


Рис.1.6. Схема дислокаций: а - краевая дислокация; б – механизм образования дислокации

Большинство дислокаций образуются путем сдвигового механизма. Неполная плоскость называется *экстраплоскостью*. Наибольшие искажения в расположении атомов в кристалле имеют место вблизи нижнего края экстраплоскости. Вправо и влево от края экстраплоскости эти искажения малы (несколько периодов решетки), а вдоль края экстраплоскости искажения простираются через весь кристалл и могут быть очень велики (тысячи периодов решетки).

Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то краевая дислокация – положительная (



Если переход от верхних горизонтов к нижним осуществляется поворотом по часовой стрелке, то дислокация *правая*, а если поворотом против часовой стрелки – *левая*. Винтовая дислокация не связана с какой-либо плоскостью скольжения, она может перемещаться по любой плоскости, проходящей через линию дислокации. Вакансии и дислоцированные атомы к винтовой дислокации не стекают.

В процессе кристаллизации атомы вещества, выпадающие из пара или раствора, легко присоединяются к ступеньке, что приводит к спиральному механизму роста кристалла. Линии дислокаций не могут обрываться внутри кристалла, они должны либо быть замкнутыми, образуя петлю, либо разветвляться на несколько дислокаций, либо выходить на поверхность кристалла. Дислокационная структура материала характеризуется **плотностью дислокаций**. Плотность дислокаций в кристалле определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью  $1 \text{ м}^2$ , или как суммарная длина линий дислокаций в объеме  $1 \text{ м}^3$

$$\rho =$$

и изделия изготавливают из металлов. Для металлов характерна металлическая связь, когда в узлах кристаллической решетки расположены положительно заряженные ионы, окруженные электронным газом. Наличие металлической связи придает материалу (металлу) способность к пластической деформации и к самоупрочнению в результате пластической деформации. Способность металла сопротивляться воздействию внешних сил характеризуется механическими свойствами. Поэтому при выборе материала для изготовления деталей машин необходимо, прежде всего, учитывать его механические свойства: прочность, упругость, пластичность, ударную вязкость, твердость и выносливость. Эти свойства определяют по результатам механических испытаний, при которых металлы подвергают воздействию внешних сил (нагрузок). Внешние силы могут быть статическими, динамическими или циклическими (повторно-переменными). Нагрузка вызывает в твердом теле напряжение и деформацию.

**Напряжение** – величина нагрузки, отнесенная к единице площади поперечного сечения испытываемого образца.

**Деформация** – изменение формы и размеров твердого тела под влиянием приложенных внешних сил. Деформация может быть **упругой**, исчезающей после снятия нагрузки, и **пластической**, остающейся после снятия нагрузки.

**Упругой деформацией** называется обратимая деформация, полностью исчезающая после снятия вызывающих ее напряжений.

При упругом деформировании изменяются расстояния между атомами металла в кристаллической решетке. Снятие нагрузки устраняет причину, вызвавшую изменение межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места, и деформация исчезает. Упругая деформация на диаграмме деформации характеризуется линией ОА (рис.2.1.).

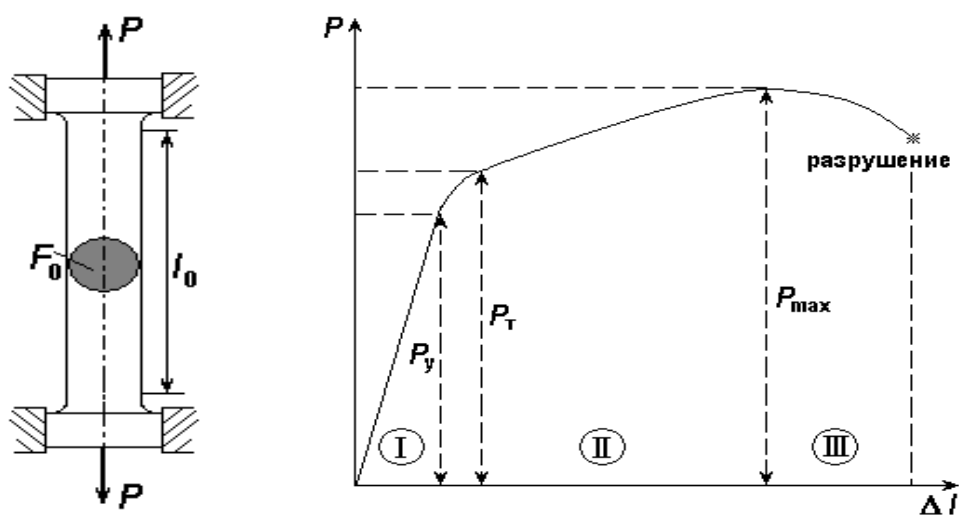


Рис.2.1. Диаграмма растяжения пластичного материала

**Пластичность** – свойство твердых тел, не разрушаясь, необратимо изменять свои внешние формы (пластически течь) под действием внешних сил или внутренних напряжений. Пластические изменения формы металлического тела называют **пластической деформацией**. Пластическая деформация может осуществляться скольжением и двойникованием, обычно при участии дислокационных дефектов (рис. 2.2.).

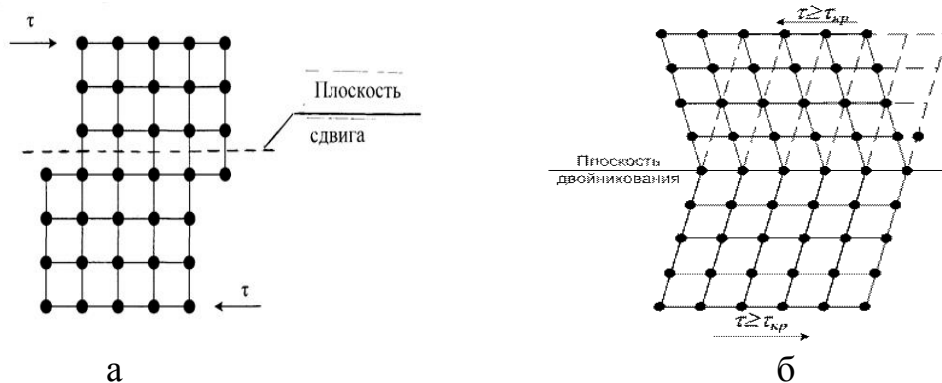


Рис. 2.2. Схема процесса деформации: а – скольжением; б – двойникованием

**Скольжение** – последовательное перемещение одной части кристалла по отношению к другой в результате перемещения уже имеющихся в кристалле дислокаций или только возникающих, т.е. смещение происходит по плоскостям (рис.2.3.).

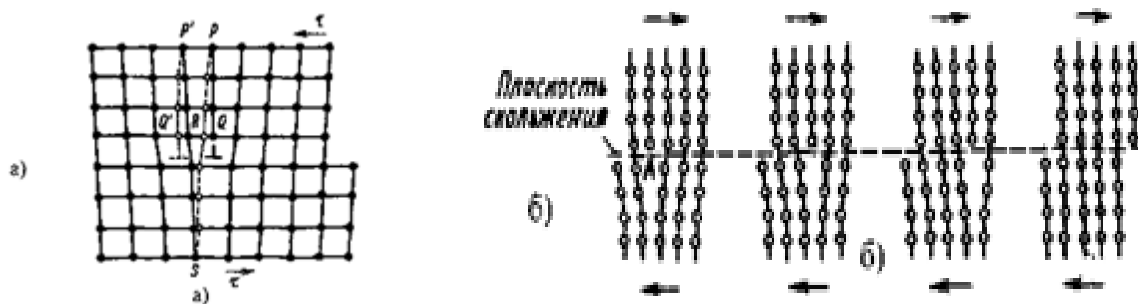


Рис.2.3. Схема дислокационного механизма пластической деформации: а – перемещение атомов при движении краевой дислокации на одно межатомное расстояние; б – перемещение дислокации через весь кристалл

**Двойникование** – поворот одной части кристалла в положение симметричное другой его части. Плоскостью симметрии является плоскость

двойникования. Двойникование чаще возникает при пластической деформации кристаллов с объемно-центрированной и гексагональной решеткой, причем с повышением скорости деформации и понижением температуры склонность к двойникованию возрастает. Двойникование может возникать не только в результате действия внешних сил, но и в результате отжига пластически деформированного тела. Двойникованием можно достичь незначительной степени деформации.

В результате смещения кристаллографических плоскостей происходит увеличение плотности дислокаций, которые приводят к упрочнению металла или сплава. Деформационное упрочнение кристаллических тел называется **наклепом** (**нагартовкой**). Чем больше степень деформации, тем заметнее изменения в микроструктуре: все больше зерен приобретают неравноосную форму. При степени деформации 70-80 % все зерна вытягиваются в направлении действующих напряжений (рис. 2.4.).

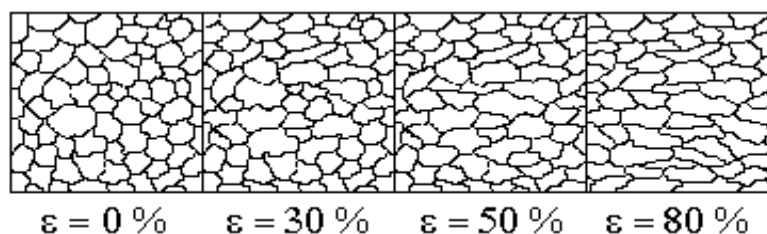


Рис.2.4. Изменение микроструктуры металла при наклепе

**Упрочняемость** металла зависит от количества дислокаций, участвующих в процессе пластической деформации, и характера их движения.

Изменение формы зерна в структуре материала, приводит к увеличению прочности и уменьшению пластичности материала (рис.2.5.).

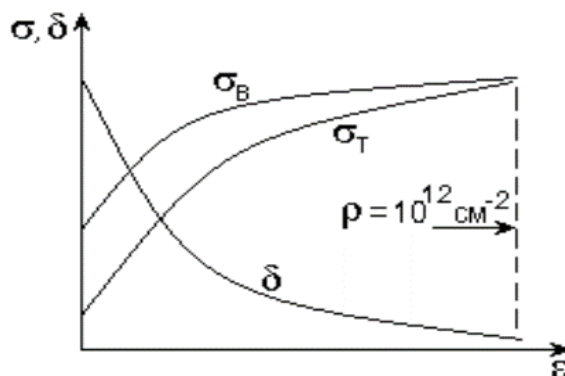


Рис.2.5. Изменение механических свойств металла при наклепе

На начальной стадии процесса деформации наблюдается скольжение единичных дислокаций (ламинарное движение), торможение которых (упрочнение) осуществляется только границами субзерен и поэтому невелико.



Далее начинается турбулентное скольжение большого числа дислокаций. Упрочнение происходит за счет малоподвижных порогов и барьеров. Скорость упрочнения максимальная. Далее скольжение идет преимущественно за счет поперечного скольжения винтовых дислокаций. Упрочнение при пластической деформации обусловлено образованием малоподвижных порогов и барьеров при пересечении дислокаций, увеличением плотности дислокаций, измельчением зерна.

Формоизменение поликристаллического тела при обработке давлением – более сложный процесс. Пластическая деформация происходит в каждом из зерен, которые различно ориентированы по отношению друг к другу и к деформирующей нагрузке, различны по форме и размерам и обладают неодинаковыми физико-механическими свойствами. Кроме того, при пластической деформации поликристаллов большую роль играют межкристаллитные прослойки – границы зерен.

Деформация начинается в зернах, плоскости скольжения которых составляют угол  $45^{\circ}$  с направлением усилия. При большой деформации в результате процессов скольжения зерна меняют свою форму, вытягиваются в направлении главной деформации и образуют волокнистую или слоистую структуру. Такую структуру называют *текстурой*, приводящей к анизотропии свойств металла.

## **2.2. Понятие об основных механических свойствах металлов и Сплавов**

Основными механическими свойствами являются прочность, упругость, вязкость, твердость. Зная механические свойства, конструктор обоснованно выбирает соответствующий материал, обеспечивающий надежность и долговечность конструкций при их минимальной массе. Механические свойства определяют поведение материала при деформации и разрушении от действия внешних нагрузок. В зависимости от условий нагружения механические свойства могут определяться при:

1. статическом нагружении – нагрузка на образец возрастает медленно и плавно.
2. динамическом нагружении – нагрузка возрастает с большой скоростью, имеет ударный характер.
3. повторно, переменном или циклическим нагружении – 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.

Испытания на определение прочностных и пластических свойств металлов и сплавов проводят деформацией растяжением, кручением, изгибом (рис.2.6.).

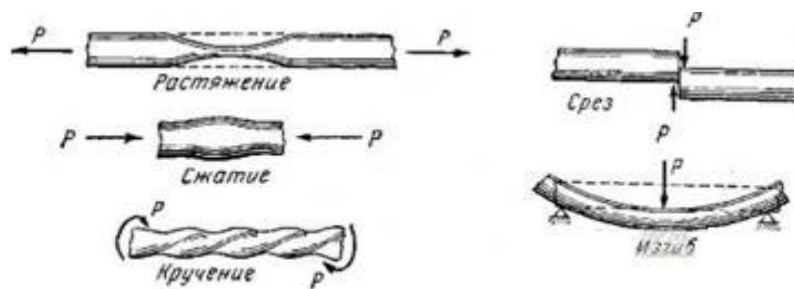


Рис.2.6. Виды нагрузок, вызывающих изменение формы металла или сплава

**Прочность** - это способность металла или сплава противостоять деформации и разрушению под действием приложенных нагрузок - растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих и срезающих (рис. 2.5.). Нагрузки бывают внешними (вес, давление и др.) и внутренними (изменение размеров тела от нагревания и охлаждения, изменение структуры металла и т.д.), а также статическими, т.е. постоянными по величине и направлению действия, или динамическими, т.е. переменными по величине, направлению и продолжительности действия. Методы определения прочности рассмотрены отдельно.

**Твердостью** называется способность металла или сплава оказывать сопротивление проникновению в него другого, более твердого тела. Применяют следующие способы испытания твердости металлов и сплавов вдавливанием в поверхность образца: а) стального закаленного шарика диаметром 2,5; 5 или 10 мм - определение твердости по Бринеллю; б) стального закаленного шарика диаметром 1,588 мм или алмазного конуса с углом  $120^\circ$  - определение твердости по Роквеллу; в) правильной четырехгранной алмазной пирамиды - определение твердости по Виккерсу.

**Упругостью** называется способность металла или сплава восстанавливать первоначальную форму после прекращения действия внешней нагрузки (рис.2.7.).

**Пластичностью** называется способность металла или сплава, не разрушаясь, изменять форму под действием нагрузки и сохранять эту форму после ее снятия.



Рис.2.7. Деформация, характеризующая упругость (после снятия нагрузки образец возвращается в исходное положение)

**Ударной вязкостью** называется способность металла или сплава сопротивляться действию ударных нагрузок. Ударная вязкость измеряется в  $\text{кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$  ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ).

**Ползучестью** называется свойство металла или сплава медленно и непрерывно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки (особенно при повышенных температурах).

**Усталостью** называется постепенное разрушение металла или сплава при большом числе повторно-переменных нагрузок; свойство выдерживать эти нагрузки называется выносливостью.

### 2.3. Испытание на прочность. Построение диаграмм растяжения

Представленная на рис.2.8. зависимость между приложенным извне напряжением и вызванной им относительной деформацией характеризует механические свойства металлов:

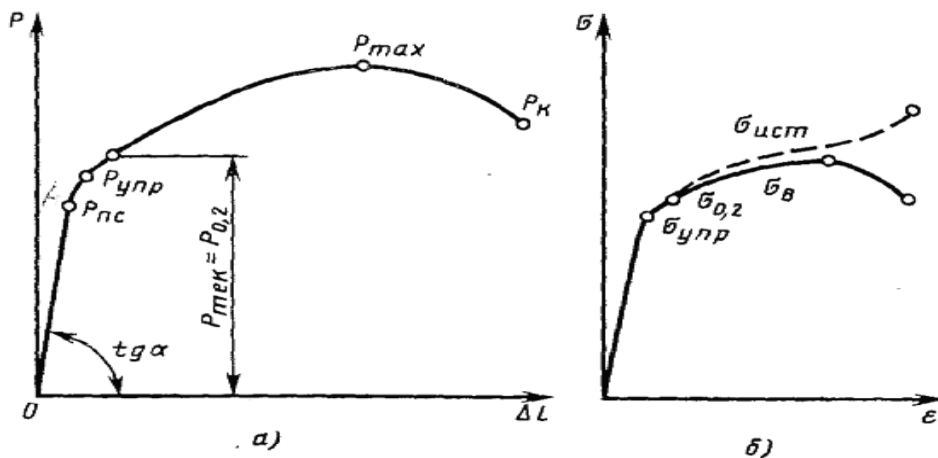


Рис.2.8. Изменение деформации в зависимости от напряжения: а – диаграмма растяжения пластичного материала; б – диаграмма условных напряжений пластичного материала

- наклон прямой ОА (рис.2.8, а) показывает **жесткость металла** или характеристику того, как нагрузка, приложенная извне, изменяет межатомные расстояния, что в первом приближении характеризует силы межатомного притяжения; тангенс угла наклона прямой ОА пропорционален **модулю упругости** (E), который численно равен частному от деления напряжения на относительную упругую деформацию ( $E = \sigma / \epsilon$ );

- напряжение  $\sigma_{\text{пц}}$  (рис.2.8, б), которое называется **пределом пропорциональности**, соответствует моменту появления пластической деформации. Чем точнее метод измерения деформации, тем ниже лежит точка А;
- напряжение  $\sigma_{\text{упр.}}$  (рис.2.8, б), которое называется **пределом упругости**, и при котором пластическая деформация достигает заданной малой величины, установленной условиями. Часто используют значения остаточной деформации 0,001; 0,005; 0,02 и 0,05%. Соответствующие пределы упругости обозначают  $\sigma_{0,005}$ ,  $\sigma_{0,02}$  и т.д. Предел упругости – важная характеристика пружинных материалов, которые используют для упругих элементов приборов и машин;
- напряжение  $\sigma_{0,2}$ , которое называется **условным пределом текучести** и которому соответствует пластическая деформация 0,2 %. Физический предел текучести  $\sigma_T$  определяется по диаграмме растяжения, когда на ней имеется площадка текучести. Однако при испытаниях на растяжение большинства сплавов площадки текучести на диаграммах нет. Выбранная пластическая деформация 0,2 % достаточно точно характеризует переход от упругих деформаций к пластическим, а напряжение  $\sigma_{0,2}$  несложно определяется при испытаниях независимо от того, имеется или нет площадка текучести на диаграмме растяжения. Допустимое напряжение, которое используют в расчетах, выбирают обычно меньше  $\sigma_{0,2}$  в 1,5 раза;
- максимальное напряжение  $\sigma_B$ , которое называется **временным сопротивлением**, характеризует максимальную несущую способность материала, его прочность, предшествующую разрушению, и определяется по формуле:  

$$\sigma_B = P_{\text{max}} / F_0$$
Допустимое напряжение, которое используют в расчетах, выбирают меньше  $\sigma_B$  в 2,4 раза.

**Пластичность** материала характеризуется относительным удлинением  $\delta$  и относительным сужением  $\psi$ :  $\delta = [(l_k - l_0) / l_0] \times 100$ ,  $\psi = [(F_0 - F_k) / F_0] \times 100$ , где:

$l_0$  и  $F_0$  – начальные длина и площадь поперечного сечения образца;

$l_k$  – конечная длина образца;

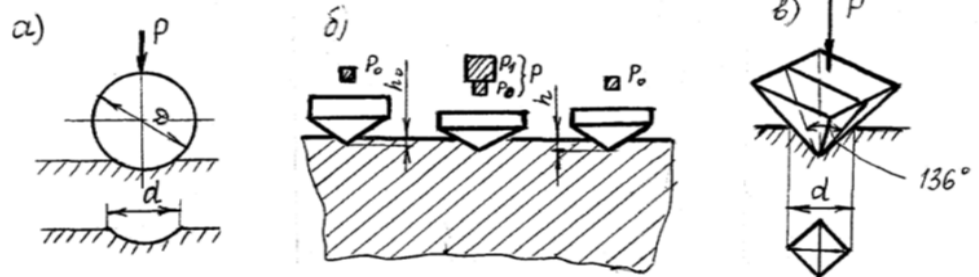
$F_k$  – площадь поперечного сечения в месте разрыва.

## 2.4. Методы определения твердости

Величину твердости определяют путем внедрения в исследуемое тело более твердого тела, которое называется **индентором**. Это неразрушающий метод контроля. Основной метод оценки качества термической обработке изделия. О твердости судят либо по глубине проникновения индентора (метод Роквелла), либо по величине отпечатка от вдавливания (методы Бринелля, Виккерса, микротвердости).

**Твердость по Бринеллю** определяется как отношение нагрузки при вдавливании стального шарика в испытуемый материал к площади поверхности

полученного сферического отпечатка (рис.2.9, а).  $HB = 2P / \pi D$  ( $D$  -



качество готовой детали. Недостатком метода является отсутствие размерности величины твердости, поэтому данная твердость не имеет точного физического смысла, а также для замера твердости требуется тщательная подготовка поверхности образца.

**Твердость по Виккерсу** измеряют для деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, полученных химико-термической обработкой. твердость как мягких, так и очень твердых металлов. Для проведения таких испытаний используется сложный прибор, который приводит к повышенной трудоемкости замеров твердости. Эта твердость определяется как отношение нагрузки при вдавливании в испытуемый материал алмазной четырехгранной пирамиды с углом между гранями  $136^{\circ}$  к площади поверхности полученного пирамидального отпечатка (рис.2.9, в):  $HV = 2P \times \sin \alpha/2 / d^2 = 1,854 P/d^2$ ,

где:  $P$  – нагрузка, кгс;  $\alpha = 136^{\circ}$  – угол между гранями;  $d$  – среднее арифметическое длин обеих диагоналей, мм. Величину  $HV$  находят по известному  $d$  согласно формуле или по расчетным таблицам согласно ГОСТ 2999-75. Для проведения таких испытаний используется сложный прибор, который приводит к повышенной трудоемкости замеров твердости.

**Твердость по Шору** является основным методом определения твердости поверхности прокатных валков при их изготовлении, поставке на металлургическое предприятие, а также в процессе эксплуатации валков на прокатных станах. Число твердости по Шору обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, со стоящим после них символом *HSD*, например *95 HSD*. Число твердости указывается с округлением до целого числа. Величина твердости по Шору не имеет точного перевода на другие величины твердостей или на прочностные свойства, получаемые при механических испытаниях.

**Микротвердость**, учитывая структурную неоднородность металла, применяют для измерения малых площадей образца. При этом вдавливают пирамиду как при определении твердости по Виккерсу, при нагрузке  $P = 5-500 H$ , а среднее арифметическое длин обеих диагоналей ( $d$ ) измеряется в мкм.

Для измерения микротвердости используется металлографический микроскоп.

## 2.5. Испытания на ударную вязкость

Сопротивление материала разрушению при динамических нагрузках характеризует **ударная вязкость**. Её определяют (ГОСТ 9454-78) как удельную работу разрушения призматического образца с концентратором (надрезом) посередине одним ударом маятникового копра (рис.2.10.):

$$K_C = K / S_0,$$

где:

$K$  – работа разрушения;

$S_0$  – площадь поперечного сечения образца в месте концентратора).

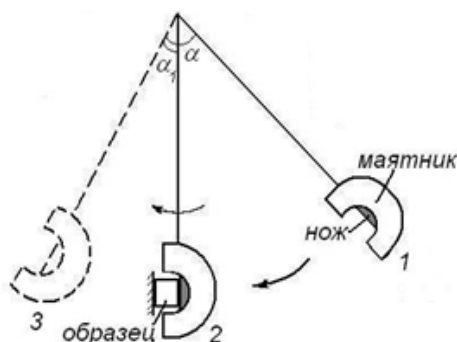


Рис.2.10. Схема испытаний на ударную вязкость

Существующие лабораторные методы определения ударной вязкости отличаются по:

- способу закрепления образца на испытательном стенде;
- способу приложения нагрузки — падающая гиря;
- маятнику, молот;
- наличию или отсутствию надреза в месте приложения удара.

Для данных испытаний чаще всего используются образцы с наличием надрезов определенной формы с концентраторами напряжений: с U-образным надрезом, с V-образным надрезом, T-образным надрезом. Следовательно, величина ударной вязкости обозначается  $KCU$ ,  $KCV$ ,  $KCT$ . Удар наносят посередине образца маятником весом  $P$  и длиной  $L$  со стороны, противоположной надрезу (рис.2.11.).

За окончательный результат испытания принимают работу удара или ударную вязкость для образцов с концентраторами видов U и V и ударную вязкость для образцов с концентратором вида T (усталостная трещина, получаемая в вершине начального надреза при циклическом изгибе образца в одной плоскости). Работу ( $KU$ ,  $KV$  или  $KT$ ) разрушения образца определяют обычно по специальной шкале маятникового копра. После определения работы разрушения образца вычисляют по формуле ударную вязкость  $KCU$  ( $KCV$ ,  $KCT$ ):

$$KC = A_n / F_0,$$

где:  $F_0$  – площадь поперечного сечения образца в месте надреза,  $см^2$ ;

$A_n$  – работа, затраченная на изгиб и разрушение.

$A_n = A_{запас.раб.} - A_{после.уд.}$ ,  $A_{запас.раб.} = PH_0$ ,  $A_{после.уд.} = Ph$ ,  $A_n = P \times l_1 (\cos \alpha_1 - \cos \alpha)$ , где  $P$  - масса маятника, кг;  $l_1$  – расстояние от оси маятника до его центра тяжести;  $\alpha_1$  - угол после удара;  $\alpha$  - угол до удара. Размерность ударной вязкости -  $Кн \times м / см^2$  или  $Дж / см^2$ .

Ударная вязкость из всех характеристик механических свойств наиболее чувствительна к снижению температуры. Поэтому испытания на ударную

вязкость при пониженных температурах используют для определения порога хладноломкости – температуры или интервала температур, в котором происходит снижение ударной вязкости.

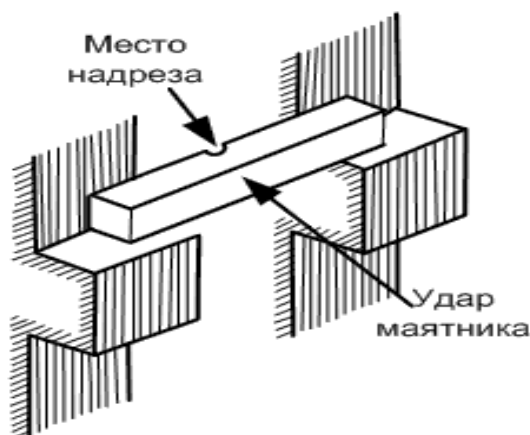


Рис.2.11. Схема положения образца при испытании на ударную вязкость

В частности, метод применяют для выяснения способности к отпускной хрупкости и определения пластичности металла в процессах горячей ОМД.

## 2.6. Испытания на усталость

Испытание на усталость позволяет выявить срок службы многих ответственных металлических деталей (шатун, коленчатых валов двигателей, полуосей и др.), которые подвергаются в процессе работы действию повторных и знакопеременных нагрузок. Свойство металлов выдерживать большое число циклов переменных нагрузок называется выносливостью.

Единицей измерения при испытании на усталость является предел выносливости, т.е. величина допустимого напряжения, которое выдерживает металл без разрушения при заданном числе циклов нагрузки.

Усталостное разрушение металлов происходит в условиях повторяющихся знакопеременных напряжений, значения которых меньше предела прочности. Этот процесс постепенного разрушения. Усталость металлов заключается в том, что под действием большого числа циклов переменных нагрузок в наиболее нагруженном или ослабленном месте в металле зарождается, а затем растет трещина, следовательно, площадь сплошного металла постепенно уменьшается, а напряжения возрастают, что в конечном итоге приведет к разрушению.

Такие испытания проводят в зависимости от назначения детали на разных машинах, нагрузка на которых прикладывается изгибом при вращении, попеременным растяжением — сжатием, кручением. Результатом испытания является кривая усталости (рис.2.12.), отражающая зависимость напряжения от числа циклов, причем минимальная величина напряжения, выдерживаемая металлом в конце испытания, и будет характеризовать

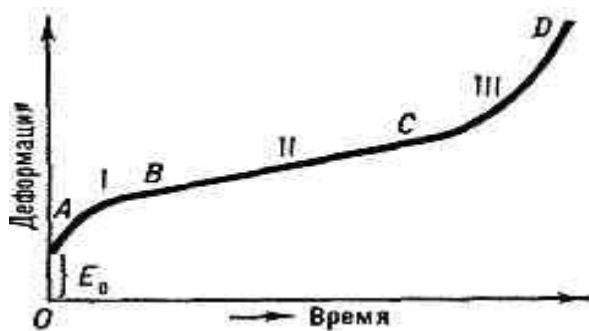


предел выносливости ( $\sigma_{-1}$ ).



Рис.2.12. Кривая усталости (кривая Веллера)

Для сталей, примерно,  $\sigma_{-1} = (0,4$



Испытания на ползучесть выполняют на специальных установках при постоянной нагрузке. Образец устанавливают в захваты испытательной машины и помещают в печь. При этом автоматически производят измерение и запись длины образца, т.е. записывается кривая ползучести (рис.2.13.). На этой кривой участок *OA* соответствует деформации, возникшей в момент приложения нагрузки; *AB* — участок неустановившейся ползучести; *BC* — участок установившейся ползучести, когда металл деформируется с постоянной скоростью, которая характеризуется тангенсом угла наклона кривой; на участке *CD* процесс ползучести идет не просто с постоянной скоростью, а ускоряется, этот этап заканчивается разрушением в точке *D*.

В испытаниях на ползучесть определяют предел ползучести и длительную прочность. Предел ползучести — напряжение, вызывающее заданную деформацию при заданной температуре, т.е. регламентирующее величину остаточной деформации за определенное время (участок *BC*).

### **Тема 3. Термическая обработка металлов и сплавов**

#### **3.1. Общие сведения**

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а, следовательно, и свойства является термическая обработка.

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

Термическую обработку металлических изделий проводят в тех случаях. Когда необходимо либо повысить прочность, твердость, износостойчивость или упругость детали или инструмента, либо, наоборот, сделать металл или сплав более мягким, легче поддающимся механической обработке. Кроме того, некоторые виды термической обработки проводят с целью устранения структурных неравновесных состояний, возникших в металле в результате литья, сварки или деформации.

#### **3.2. Классификация видов термической обработки металлов и сплавов**

Термическая обработка представляет собой большой спектр различных видов тепловых обработок с последующим охлаждением в различных средах или сочетания высоких температур с воздействием химических элементов, либо с

применением деформации. Таким образом, термическая обработка подразделяется на 3 больших группы:

- Термическая обработка металлов и сплавов;
- Химико – термическая обработка сплавов;
- Термо – механическая обработка металлов и сплавов.

Наиболее значимой группой температурной обработки для большинства металлов и сплавов является термическая обработка.

Различают следующие виды термической обработки:

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

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

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

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

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

**5. Старение** – термическая обработка, при которой главным процессом является распад пересыщенного твердого раствора. В результате старения происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска, после

старения увеличиваются прочность и твердость, и уменьшается пластичность. Старение сплавов связано с переменной растворимостью избыточной фазы, а упрочнение при старении происходит в результате дисперсионных выделений при распаде пересыщенного твердого раствора и возникающих при этом внутренних напряжений.

Термическую обработку подразделяют на *предварительную*, *промежуточную* и *окончательную*.

**Предварительная ТО** – применяется для подготовки структуры и свойств материала для последующих технологических операций (для обработки давлением, улучшения обрабатываемости резанием). **Промежуточная ТО** – применяется в процессе холодной пластической деформации материала для восстановления исходных пластических свойств. Данный вид ТО часто применяют для алюминиевых сплавов в процессе прокатки полос.

**Окончательная ТО** – формирует свойство готового изделия.

### 3.3. Оборудование для термической обработки

К основному оборудованию для проведения термической обработки металлов и сплавов относят печи, которые делятся по назначению, конструкции и температурным режимам.

Печи бывают камерными, с выкатным подом, шахтные, туннельные, индукционные электропечи, вакуумные печи, печи с газовыми или защитными атмосферами. Печи предназначены для отжига, закалки, отпуска, старения и химико – термической обработки. В зависимости от температуры печи подразделяют на низкотемпературные, среднетемпературные и высокотемпературные.

При закалке металлов и сплавов также используют закалочные ванны. Закалочные ванны предназначены для охлаждения стали под закалку в жидких полимерных, масляных средах или в воде. Закалка в полимерных жидких средах это новая, современная технология охлаждения сталей. Ванна представляет собой прямоугольную емкость (бак), сваренную из листовой стали. Для обеспечения эффективной циркуляции потока закалочной жидкости в ванне установлены мешалка и направляющие для эффективного перемешивания закалочной жидкости внутри ванны. Внутри ванны установлена сетчатая корзина, предназначенная для извлечения деталей при их высыпании непосредственно в бак или просыпанию из загрузочной корзины. Для предварительного подогрева и охлаждения закалочной жидкости ванна оснащена системой автоматического поддержания температуры закалочной среды. Предварительный нагрев закалочной жидкости производится нагревателями типа ТЭН.

После термической обработки металлы и сплавы отправляют в отдел технического контроля, где устанавливают соответствие структуры и свойств материала с требованиями. Для исследования структуры проводят

микроструктурный анализ на оптических или электронных микроскопах, определение соотношения фаз в структуре сплава ведут на дифрактометрах. В литейных цехах проводят спектральный анализ на специальных приборах – спектрометрах. Исследование механических свойств проводят методом растяжения, кручения или изгиба на растяжных машинах, твердость определяют на твердомерах по методам Бринелля, Роквелла или Виккерса. Ударную вязкость материалов определяют на образцах на маятниковых копрах.

### **3.4. Выбор режимов термической обработки**

Механические свойства стали определяются не только ее составом, но зависят и от ее строения (структуры). Поэтому целью термической обработки является получение необходимой структуры, обеспечивающей требуемый комплекс свойств сплава. Различают предварительную и окончательную термическую обработки. Предварительной термической обработке подвергают отливки, поковки, штамповки, сортовой прокат и другие полуфабрикаты. Она проводится для снятия остаточных напряжений, улучшения обрабатываемости резанием, исправления крупнозернистой структуры, подготовки структуры стали к окончательной термической обработке и т.п. Если предварительная термическая обработка обеспечивает требуемый уровень механических свойств, то окончательная термическая обработка может и не проводиться.

При выборе упрочняющей обработки, особенно в условиях массового производства, предпочтение следует отдавать наиболее экономичным и производительным технологическим процессам, например, поверхностной закалке при глубинном индукционном нагреве, газовой цементации, нитроцементации и т.д.

При разработке технологии термической обработки необходимо установить:

- режим нагрева детали или заготовки, в который входят температура нагрева, допустимые скорость и время нагрева;
- характер среды, где должен идти нагрев;
- условия охлаждения (выбор охлаждающей среды);
- производительность труда при термообработке;
- экономичность выбранного процесса.

Вид термической обработки зависит от требований, предъявляемым к металлической детали/изделия.

### **3.5. Отжиг I и II рода**

Отжиг, снижая твердость и повышая пластичность и вязкость за счет получения равновесной мелкозернистой структуры, позволяет:

- ✓ улучшить обрабатываемость заготовок давлением и резанием;

- ✓ исправить структуру сварных швов, перегретой при обработке давлением и литые стали;
- ✓ подготовить структуру к последующей термической обработке.

Характерно медленное охлаждение со скоростью  $30...100^{\circ}\text{C/ч}$ .

### **Отжиг первого рода:**

В зависимости от температуры обработки и ее цели, например, устранить остаточные напряжения, снять наклеп в металле или восстановить пластические свойства после деформации, отжиг I рода подразделяют на 3 подгруппы:

- Диффузионный (высокотемпературный) отжиг;
- Рекристаллизационный (среднетемпературный) отжиг;
- Отжиг на снятие внутренних напряжений (низкотемпературный).

1. **Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг:** применяется для устранения ликвации, выравнивания химического состава сплава. В его основе – диффузия. В результате нагрева выравнивается состав, растворяются избыточные карбиды. Применяется, в основном, для легированных сталей и цветных сплавов. Температура нагрева зависит от температуры плавления,  $T_n = 0,8 T_{пл.}, ^{\circ}\text{K}$ .

Продолжительность выдержки:  $\tau=8-20$  часов.

2. **Рекристаллизационный отжиг** проводится для снятия напряжений и устранения наклепа после холодной пластической деформации. Температура нагрева связана с температурой плавления:  $T_n = 0,4 T_{пл.}, ^{\circ}\text{K}$ .

Продолжительность зависит от габаритов изделия.

3. **Отжиг для снятия напряжений после горячей обработки** (литья, сварки, обработки резанием, когда требуется высокая точность размеров).

Температура нагрева выбирается в зависимости от назначения, находится в широком диапазоне:  $T_n = 160...700^{\circ}\text{C}$  для сталей и от  $100$  до  $500^{\circ}\text{C}$  для цветных сплавов.

Продолжительность зависит от габаритов изделия.

Детали прецизионных станков (ходовые винты, высоконагруженные зубчатые колеса, червяки) отжигают после основной механической обработки при температуре  $570...600^{\circ}\text{C}$  в течение  $2...3$  часов, а после окончательной механической обработки, для снятия шлифовочных напряжений – при температуре  $160...180^{\circ}\text{C}$  в течение  $2...2,5$  часов.

### **Отжиг второго рода:**

Данный отжиг предназначен для изменения фазового состава, поэтому может применяться только для сплавов с различными типами кристаллических решеток., например, для стали.

Температура нагрева и время выдержки обеспечивают нужные структурные превращения. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы успели произойти обратные диффузионные фазовые превращения.

Является подготовительной операцией, которой подвергают отливки, поковки, прокат. Отжиг снижает твердость и прочность, улучшает обрабатываемость резанием средне- и высокоуглеродистых сталей. Измельчая зерно, снижая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность способствует повышению пластичности и вязкости.

В зависимости от температуры нагрева различают отжиг:

- **полный**, с температурой нагрева на  $30...50^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_3$

$$T_n = A_3 + (30...50)^{\circ}\text{C}$$

Проводится для доэвтектоидных сталей для исправления структуры. При такой температуре нагрева аустенит получается мелкозернистый, и после охлаждения сталь имеет также мелкозернистую структуру.

- **неполный**, с температурой нагрева на  $30...50^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_1$

$$T_n = A_1 + (30...50)^{\circ}\text{C}$$

Применяется для заэвтектоидных сталей. При таком нагреве в структуре сохраняется цементит вторичный, в результате отжига цементит приобретает сферическую форму (сфероидизация). Получению зернистого цементита способствует предшествующая отжигу горячая пластическая деформация, при которой дробится цементитная сетка. Структура с зернистым цементитом лучше обрабатываются и имеют лучшую структуру после закалки. Неполный отжиг является обязательным для инструментальных сталей.

Иногда неполный отжиг применяют для доэвтектоидных сталей, если не требуется исправление структуры (сталь мелкозернистая), а необходимо только понизить твердость для улучшения обрабатываемости резанием.

### 3.6. Нормализация

**Нормализация** – вид термической обработки сплава, заключающийся в нагреве  $e \square$  выше верхней критической точки, выдержке при этой температуре и последующем охлаждении на спокойном воздухе с целью придания металлу однородной мелкозернистой структуры (не достигнутой при предыдущих процессах — литье  $\square$ , ковке или прокатке) и как следствие — повышение его механических свойств (пластичности и ударной вязкости). Нормализация является разновидностью отжига.

Нормализация относится к группе предварительной термической обработки сплавов, позволяющая достигать высоких прочностных свойств материала по сравнению с отожженным состоянием, но меньше, чем после

закалки с последующим отпуском, при этом сохраняется довольно высокий уровень пластических характеристик и в процессе последующей деформации или эксплуатации при знакопеременных нагрузках сохранять стойкость к образованию трещин.

### **3.7. Закалка с полиморфным и без полиморфного превращения**

**Закалка** — вид термической обработки материалов (металлы, их сплавы, стекло), заключающийся в их нагреве выше *критической температуры* (температуры изменения типа кристаллической решетки, т. е. полиморфного превращения, либо температуры, при которой в матрице растворяются фазы, существующие при низкой температуре), с последующим быстрым охлаждением.

Чаще всего охлаждение осуществляется в воде или масле, но существуют и другие способы охлаждения: в псевдокипящем слое твердого теплоносителя, струей сжатого воздуха, водяным туманом, в жидкую полимерную закалочную среду.

Различают закалку с полиморфным превращением, для сталей, и закалку без полиморфного превращения, для большинства цветных металлов.

Материал, подвергшийся закалке, приобретает большую твердость, но становится хрупким, менее пластичным и вязким, если сделать большее количество повторов нагревание-охлаждение. Для снижения хрупкости и увеличения пластичности и вязкости, после закалки с полиморфным превращением применяют отпуск. После закалки без полиморфного превращения применяют старение.

Закалка с полиморфным превращением - нагрев выше температуры полиморфного превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением для получения структурно-неустойчивого состояния (в пределе - фиксирования устойчивого состояния при высокой температуре).

Закалка без полиморфного превращения заключается в нагреве до температур, вызывающих структурные изменения (чаще всего для растворения избыточной фазы) с последующим быстрым охлаждением для получения структурно-неустойчивого состояния - пересыщенного твердого раствора.

## **Тема 4. Химико-термическая и термомеханическая обработка сплавов**

### **4.1. Химико – термическая обработка сплавов**

**Химико-термическая обработка (ХТО)** – процесс изменения химического состава, микроструктуры и свойств поверхностного слоя детали.

Изменение химического состава поверхностных слоев достигается в результате их взаимодействия с окружающей средой (твердой, жидкой, газообразной, плазменной), в которой осуществляется нагрев.



В результате изменения химического состава поверхностного слоя изменяются его фазовый состав и микроструктура.

Основными параметрами химико-термической обработки являются температура нагрева и продолжительность выдержки.

В основе любой разновидности химико-термической обработки лежат процессы *диссоциации, адсорбции, диффузии*.

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



Более высокое содержание углерода приводит к образованию значительных количеств цементита вторичного, сообщающего слою повышенную хрупкость.

На практике применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде).

Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрываются медью (электролитическим способом) или глиняной смесью. Цементации подвергают только железо-углеродистые стали.

### **Азотирование**

**Азотирование** – это технологический процесс химико-термической обработки, при которой поверхность различных металлов или сплавов насыщают азотом в специальной азотирующей среде. Поверхностный слой изделия, насыщенный азотом, имеет в своем составе растворенные нитриды и приобретает повышенную коррозионную стойкость и высочайшую микротвердость. По микротвердости азотирование уступает только борированию, в то же время превосходя цементацию и нитроцементацию (незначительно).

Азотированию подвергают различные виды металлов и сплавов: углеродистые и легированные, конструкционные и инструментальные стали, высокохромистые чугуны, высокохромистые износостойчивые сплавы, хром, титан и его сплавы, бериллий, вольфрам, ниобиевые сплавы и порошковые материалы.

Азотирование проводят с целью повышения коррозионной стойкости и упрочнения поверхности, повышения усталостной прочности.

Азотирование проводят несколькими методами: газовое азотирование, каталитическое газовое, ионно – плазменное и азотирование из растворов электролитов.

Газовое азотирование производят в среде диссоциированного аммиака. Газовое азотирование проводят в двух- или трехступенчатых температурных режимах насыщения разбавленным диссоциированным аммиаком.

Каталитическое газовое азотирование - это последняя модификация технологии газового азотирования. Средой для насыщения является аммиак, диссоциированный при температуре 400—600<sup>0</sup>С на катализаторе в рабочем пространстве печи и основано на перенаправлении потенциала насыщения поверхности металла.

Ионно – плазменное азотирование производят в азотосодержащем вакууме в котором возбуждается тлеющий электрический разряд. Анодом служат стенки камеры нагрева, а катодом — обрабатываемые изделия. Для управления структурой слоя и механическими свойствами слоя применяют (в разные стадии процесса): 1) изменение плотности тока; 2) изменение расхода азота; 3) изменение

степени разряжения; 4) добавки к азоту особо чистых технологических газов ( $\text{H}_2$ , Ar,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ ).

Азотирование из растворов электролита относится к одному из видов электро-химико - термической обработки. Используется в качестве анодного эффекта для диффузионного насыщения обрабатываемой поверхности азотом в многокомпонентных растворах электролитов, (анодный электролитный нагрев) малогабаритных изделий. Анод-деталь при наложении постоянного напряжения в диапазоне от 150 до 300 При высоких температурах обработки обеспечивается сплошная и устойчивая парогазовая оболочка, отделяющая анод от электролита. Для обеспечения азотирования в электролит кроме электропроводящего компонента вводят вещества-доноры, обычно нитраты.

При азотировании увеличиваются не только твердость и износостойкость, но также повышается коррозионная стойкость.

**Силицирование** – это поверхностное или объемное насыщение материала кремнием. Производится обработкой материала в парах кремния, образующихся при высокой температуре над кремниевой засыпкой, или в газовой среде, содержащей хлорсиланы, восстанавливающиеся водородом (например, по реакции  $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 = \text{Si} + 4\text{HCl}$ ). Применяется преимущественно как средство защиты тугоплавких металлов (W, Mo, Ta, Ti и др.) от окисления. Стойкость к окислению обуславливается образованием плотных диффузионных «самозалечивающихся» силицидных покрытий ( $\text{WSi}_2$ ,  $\text{MoSi}_2$  и др.). Широкое применение находит силицированный графит. Применяют газовое, жидкое и порошковое силицирование.

**Диффузионное насыщение металлами** — это поверхностное насыщение стали алюминием, хромом, цинком, кремнием и другими элементами. Один из методов упрочнения материалов.

Изделия, обогащенные этими элементами, приобретают ценные свойства к числу которых относятся высокая жаростойкость, коррозионная стойкость, повышенная износостойкость и твердость. Различают твердую, жидкую и газовую диффузионную металлизацию.

**Твердая диффузионная металлизация:** металлизатором является ферросплав с добавлением хлористого аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). В результате реакции металлизатора с  $\text{HCl}$  или  $\text{Cl}_2$  образуются летучие соединения хлора с металлом ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CrCl}_2$ ,  $\text{SiCl}_4$  и так далее), которое в результате контакта с металлической поверхностью диссоциирует с образованием свободных атомов.

**Жидкая диффузионная металлизация:** данный вид металлизации проводят погружением детали в расплавленный металл, если диффундирующий металл имеет низкую температуру плавления.

**Газовая диффузионная металлизация:** проводят в газовых средах, состоящих из галогенных соединений диффундирующего элемента.

Достоинством диффузионно-металлизированной детали является высокая жаростойкостью поверхности, поэтому жаростойкие изделия изготавливают из

простых углеродистых сталей с последующим алитированием, хромированием, силицированием. Исключительно высокой твердостью (до HV 2000) обладают и высоким сопротивлением абразивному износу обладают борированные слои, вследствие образования на поверхности высокотвердых боридов железа - FeB и Fe<sub>2</sub>B; однако борированный слой очень хрупкий.

Недостатком таких процессов является низкая скорость диффузии хрома, алюминия и других металлов, по сравнению с углеродом и азотом, потому что последние образуют с железом растворы внедрения, а металлы - растворы замещения. При одинаковых температурных и временных условиях диффузионные слои при металлизации в десятки, а то и в сотни раз более тонкие, чем при цементации. Такая малая скорость диффузии препятствует широкому распространению процессов диффузионного насыщения в промышленности, так как процесс является дорогостоящим и его проводят при высоких температурах (1000-1200°C) длительное время. Только особые свойства слоя и возможность экономии легирующих элементов при использовании процессов диффузионной металлизации обусловили некоторое их применение в промышленности.

#### 4.2. Термомеханическая обработка металлов и сплавов

Одним из технологических процессов упрочняющей обработки является термомеханическая обработка (ТМО).

Термомеханическая обработка относится к комбинированным способам изменения строения и свойств материалов.

При термомеханической обработке совмещаются пластическая деформация и термическая обработка.

Преимуществом термомеханической обработки является то, что при существенном увеличении прочности характеристики пластичности снижаются незначительно, а ударная вязкость выше в 1,5...2 раза по сравнению с ударной вязкостью для той же марки сплава после закалки с последующей термической обработкой.

В зависимости от температуры, при которой проводят деформацию, различают высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО) и низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО).

Схема режимов ТМО представлена на рис. 4.1.

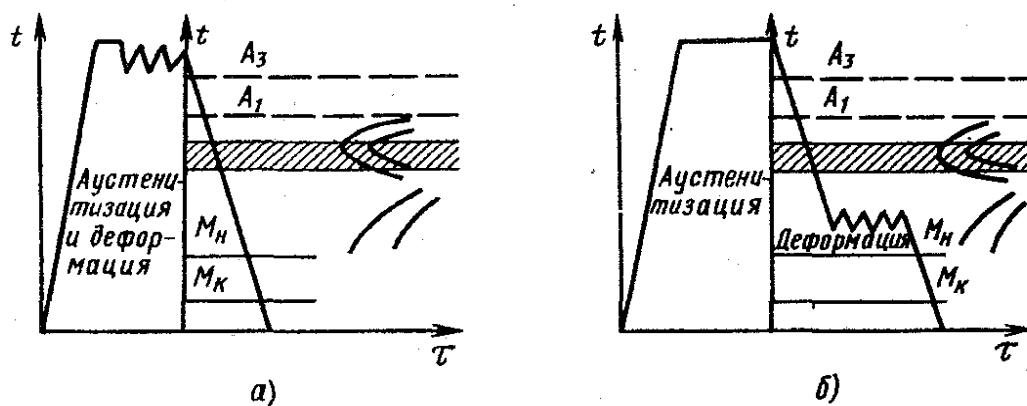


Рис. 4.1. Схема режимов термомеханической обработки стали: а – высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО); б – низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) (заштрихованная зона – интервал температур рекристаллизации)

### **Низкотемпературная ТМО**

Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) включает в себя последовательно проводимые закалку, холодное деформирование, старение. НТМО проводят с целью повысить прочностные свойства стареющих сплавов. Повышение предела текучести в результате холодной деформации закаленного сплава перед старением в сравнении с обычной термообработкой по схеме закалка старение объясняется тем, что при НТМО в металле перед старением создается большее количество дефектов, а сам процесс старения проходит более интенсивно. Обычно посредством НТМО удается повысить прочность металла на 20 - 25 % в сравнении с обычной термообработкой.

### **Высокотемпературная ТМО**

Использование высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО), заключающейся в совмещении горячей пластической деформации с закалкой, исключающей развитие рекристаллизационных процессов, позволяет повысить кратковременную и длительную прочность многих дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов на основе железа и никеля.

ВТМО повышает ударную вязкость сплавов, понижает температурный порог хладоломкости, повышает сопротивление хрупкому разрушению, уменьшает чувствительность к трещинообразованию при термической обработке.

### **Предварительная ТМО**

Сущность ПТМО заключается в том, что полуфабрикат, полученный после горячей деформации в нерекристаллизованном состоянии, сохраняет нерекристаллизованную структуру и при нагреве под закалку. ПТМО отличается от ВТМО тем, что операции горячей деформации и нагрева под закалку разделены.

ТМО широко применяют в технологии производства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. Особенно ПТОМ подходит для обработки таких сплавов как дуралюминий и авиаль, которые с нерекристаллизованной структурой обладают повышенной прочностью.

## **Тема 5. Термическая обработка сталей**

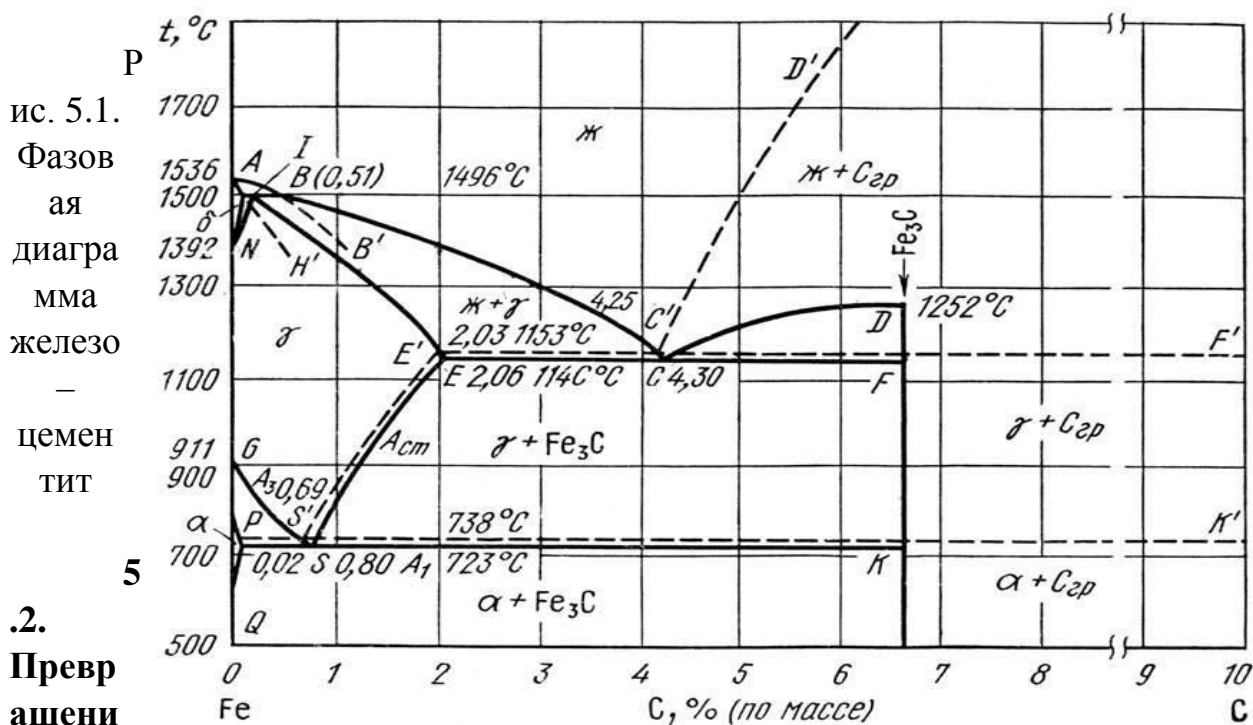
### **5.1. Критические точки на диаграмме состояния «железо-цементит».**

Критическими точками в сталях, называют точки, соответствующие температурам в сталях относительно, которых назначают тот или иной вид термической обработки.

Критические точки  $A_1$  лежат на линии PSK ( $727^\circ\text{C}$ ). Критические точки  $A_2$  находятся на линии MO ( $768^\circ\text{C}$ ). Критические точки  $A_3$  лежат на линии GS, а критические точки  $A_{cm}$  — на линии SE. Вследствие теплового гистерезиса превращения при нагреве и охлаждении проходят при разных температурах. Поэтому для обозначения критических точек при нагреве и охлаждении используют дополнительные индексы: буквы «с» в случае нагрева и «г» в случае охлаждения. Например,  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{r1}$ ,  $A_{r3}$ .

Критические точки, отвечающие за структурные превращения в сталях, соответствуют линиям на диаграмме состояния железо – цементит (рис.5.1.).

Точка  $A_1$  соответствует температуре эвтектоидного превращения стали. Точка  $A_3$  показывает температуру при которой оканчивается растворение феррита в аустените. Точка  $Mn$ . известна как температура мартенситного превращения при закалке. Условия нагрева определяются видом нагревательного устройства, к которым относятся нагревательные печи (топливные или электрические), соляные ванны или ванны с расплавленным металлом, установки индукционного нагрева токами промышленной частоты или токами высокой частоты.



## 2. Превращения в сталях при нагреве и охлаждении

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

1. Превращение перлита в аустенит, происходит при нагреве выше критической температуры  $A_1$ , минимальной свободной энергией обладает аустенит.

2. Превращение аустенита в перлит, происходит при охлаждении ниже  $A_1$ , минимальной свободной энергией обладает перлит.

3. Превращение аустенита в мартенсит, происходит при быстром охлаждении ниже температуры неустойчивого равновесия.

4. Превращение мартенсита в перлит происходит при любых температурах, т.к. свободная энергия мартенсита больше, чем свободная энергия перлита.

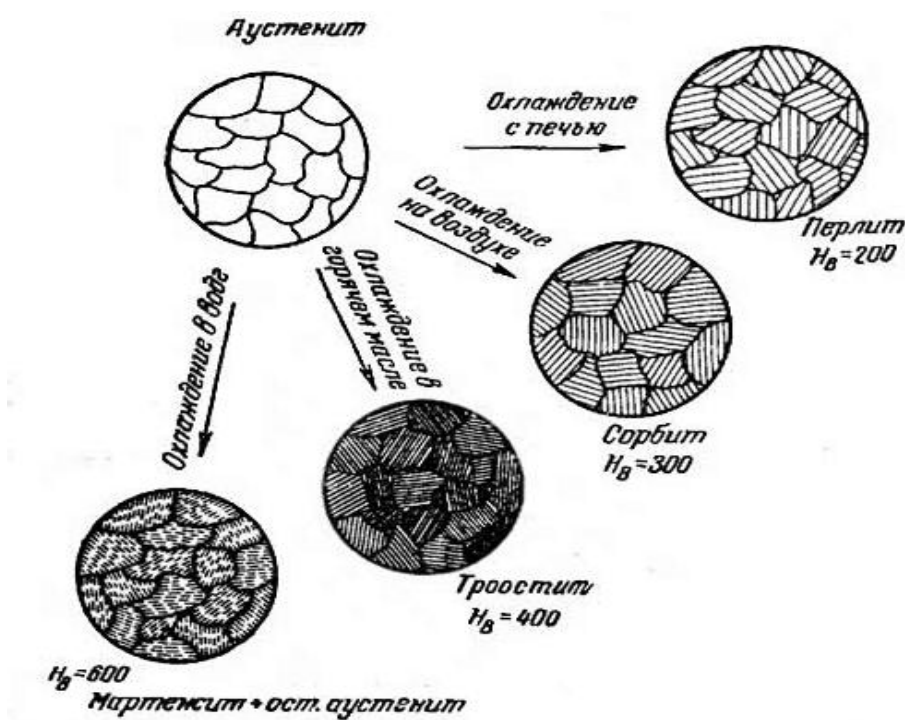


Рис. 5.2. Схема структурных превращений аустенита в стали при охлаждении с различными скоростями

Неправильный режим нагрева может привести либо к *перегреву*, либо к *пережогу* стали.

**Перегрев:** Нагрев доэвтектоидной стали значительно выше температуры приводит к интенсивному росту зерна аустенита. При охлаждении феррит выделяется в виде пластинчатых или игольчатых кристаллов. Такая структура называется видманштеттовой структурой и характеризуется пониженными механическими свойствами. Перегрев можно исправить повторным нагревом до оптимальных температур с последующим медленным охлаждением.

**Пережог:** имеет место, когда температура нагрева приближается к температуре плавления. При этом наблюдается окисление границ зерен, что резко снижает прочность стали. Излом такой стали камневидный. Пережог – неисправимый брак.

При выборе охлаждающей среды необходимо учитывать *закаливаемость* и *прокаливаемость* стали.

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

**Прокаливаемость** – способность получать закаленный слой с мартенситной и троосто-мартенситной структурой, обладающей высокой твердостью, на определенную глубину. За глубину закаленной зоны принимают расстояние от поверхности до середины слоя, где в структуре одинаковые объемы мартенсита и троостита. Чем меньше критическая скорость закалки, тем выше прокаливаемость. Укрупнение зерен повышает прокаливаемость. Если скорость охлаждения в сердцевине изделия превышает критическую, то сталь имеет сквозную прокаливаемость. Нерастворимые частицы и неоднородность аустенита уменьшают прокаливаемость. Характеристикой прокаливаемости является *критический диаметр*.

**Критический диаметр** – максимальное сечение, прокаливающееся в данном охладителе на глубину, равную радиусу изделия. С введением в сталь легирующих элементов закаливаемость и прокаливаемость увеличиваются (особенно молибден и бор, кобальт – наоборот).

## **Тема 6. Классификация конструкционных материалов**

Конструкционными называют материалы, предназначенные для изготовления деталей машин, приборов, инженерных конструкций, подвергающихся механическим нагрузкам.

Конструкционные материалы соответственно классифицируют по свойствам, определяющим выбор материала для конкретных деталей и конструкций. Каждая группа материалов оценивается соответствующими критериями, обеспечивающими работоспособность в эксплуатации.

Исходя из физической природы и свойств, материалы классифицируют на 7 основных групп:

- 1) Материалы, с особыми технологическими свойствами;
- 2) Износостойкие материалы;
- 3) Материалы с высокими упругими свойствами;
- 4) Материалы, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность (стали).
- 5) Материалы с малой плотностью;
- 6) Материалы с высокой удельной прочностью;
- 7) Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды.



## 6.1. Требования, предъявляемые к конструкционным материалам

Детали машин и приборов характеризуются большим разнообразием форм, размеров, условий эксплуатации. Они работают при статических, циклических и ударных нагрузках, при низких и высоких температурах, в контакте с различными средами. Эти факторы определяют требования к конструкционным материалам.

Выбор марки материала для изготовления деталей определяется:

- условиями работы;
- величиной и характером напряжений, возникающих в процессе эксплуатации;
- размерами и формой детали.

Выбранная марка материала должна удовлетворять эксплуатационным, технологическим и экономическим требованиям. Эксплуатационные требования имеют первостепенное значение, так как должны обеспечить работоспособность, надежность и конструктивную прочность материала.

**Конструктивная прочность** - это определенный комплекс механических свойств, обеспечивающий длительную и надежную работу материала в условиях его эксплуатации. Конструктивная прочность определяется четырьмя основными критериями: жесткостью, прочностью, сопротивлением хрупкому разрушению, надежностью.

**Жесткость** конструкции - структурно не чувствительная характеристика, зависящая только от природы материала (межатомных связей). Показателем жесткости является модуль продольной упругости ( $E$ ) (модуль жесткости). Обычно в совокупности с  $E$  учитывают плотность ( $\gamma$ ) материала и используют критерий удельной жесткости ( $E/\gamma$ ), что очень важно в самолетостроении.

Прочность - способность конструкции сопротивляться деформациям и разрушениям. Характеристики прочности определяют в результате статического испытания на растяжение ( $\sigma_B$ ;  $\sigma_{0,2}$ ). Эти характеристики зависят от структуры сплава и термической обработки. Прочность изменяется в широких пределах от 100 до 3500 МПа. Как и в случае жесткости, обычно учитывают плотность материала и оперируют понятиями удельной прочности:  $\sigma_B / \gamma$ ;  $\sigma_{0,2} / \gamma$ .

По этим показателям высшие значения имеют титановые сплавы.

Модуль упругости  $E$  и предел текучести  $\sigma_{0,2}$  являются расчетными характеристиками, определяющими допустимую нагрузку.

**Надежность** - свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки (в часах). Главный показатель надежности - запас вязкости материала.

**Сопротивление материала хрупкому разрушению** является важнейшей характеристикой, определяющей надежность.

**Долговечность** - свойство изделия сохранять работоспособность до предельного состояния (невозможность дальнейшей эксплуатации).

Долговечность зависит от условий эксплуатации и определяется:

- сопротивлением износу при трении;
- состоянием поверхности;
- коррозионной стойкостью материала.

Важным фактором при выборе марки материала являются также экономические требования, такие как невысокая стоимость. Для выполнения данного условия необходимо, прежде всего, рассматривать химический состав и механические свойства материала.

Таким образом, качественный конструкционный материал должен удовлетворять комплексу требований.

## **6.2. Конструкционные стали**

Детали машин и приборов, передающих нагрузку, должны обладать жесткостью и прочностью, достаточными для ограничения упругой и пластической деформации, при гарантированной надежности и долговечности. Из многообразия материалов в наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют сплавы на основе железа – чугуны и особенно стали. Стали обладают высоким, наследуемым от железа, модулем упругости ( $E = 210 \text{ ГПа}$ ).

Высокую жесткость стали сочетают с достаточной статической и циклической прочностью, значение которой можно регулировать в широком диапазоне изменением концентрации углерода, легирующих элементов и технологии термической и химико-термической обработки.

Конструкционные стали можно разделить на несколько подгрупп: стали с высокой удельной прочностью, стали с высоким модулем упругости, стали с улучшенной обрабатываемостью резанием, жаростойкие и коррозионно-стойкие стали, износостойкие стали, стали общего назначения. Различное назначение сталей и их классификация зависит от наличия и количества легирующих элементов.

По структуре Рис. 6.1 стали делят на:

- 1) доэвтектоидные (с избыточным ферритом),
- 2) эвтектоидные (перлитные),
- 3) заэвтектоидные (перлит+вторичный цементит)

По назначению стали делят на: машиностроительные и строительные.

По количеству содержания серы и фосфора стали делят на:

- 1) качественные (содержание серы и фосфора в стали составляет не выше 0,035% каждого);
- 2) высококачественные (содержание серы и фосфора в стали составляет не выше 0,025% каждого);

3) особовысококачественные (содержание серы не должно превышать 0,015%, а фосфора не выше 0,025%).

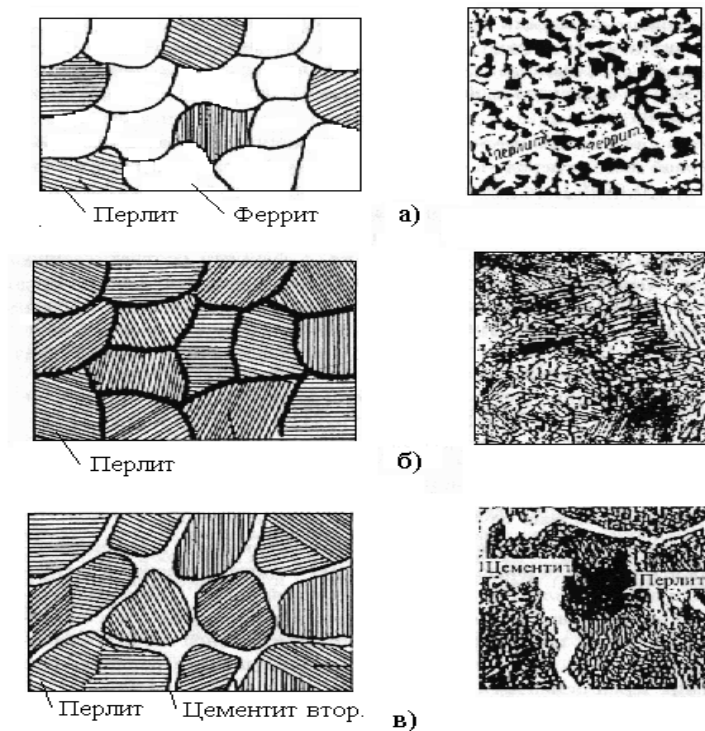


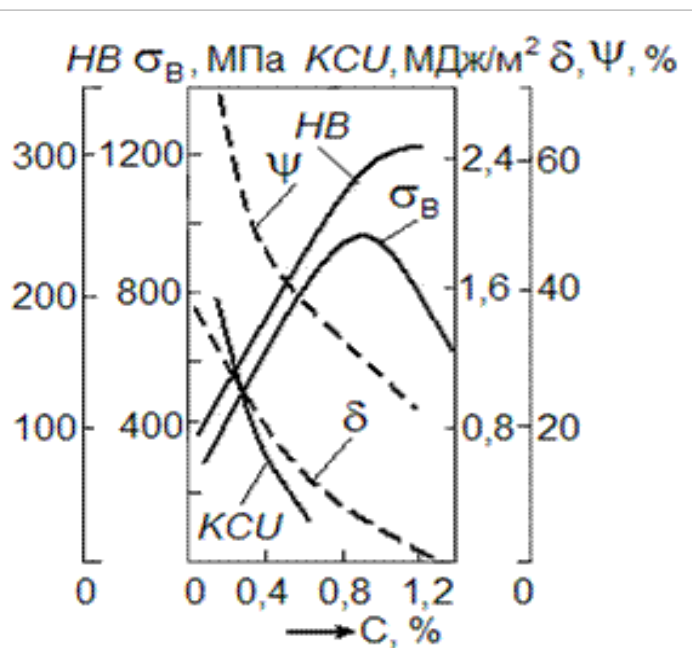
Рис. 6.1 Классификация сталей по структуре  
а- доэвтектоидные (с избыточным ферритом), б- эвтектоидные (перлитные),  
в- заэвтектоидные (перлит+вторичный цементит)

### 6.3. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей

**Легирование** - целенаправленное изменение состава материала путем введения легирующих элементов для изменения структуры и получения требуемых свойств. Влияние углерода на свойства сталей показано на рис.6.2

С ростом содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита, при одновременном снижении доли феррита.

Изменение соотношения между составляющими приводит к уменьшению пластичности, а также к повышению прочности и твердости. Прочность повышается до содержания углерода около 1%, а затем она уменьшается, так как образуется грубая сетка цементита вторичного.



**Рис. 19. Влияние углерода на механические свойства стали**

Рис.6.2 Влияние углерода на свойства сталей

Изменение соотношения между составляющими приводит к уменьшению пластичности, а также к повышению прочности и твердости. Прочность повышается до содержания углерода около 1%, а затем она уменьшается, так как образуется грубая сетка цементита вторичного.

Углерод влияет на вязкие свойства. Увеличение содержания углерода повышает порог хладноломкости и снижает ударную вязкость.

Повышаются электросопротивление и коэрцитивная сила, снижаются магнитная проницаемость и плотность магнитной индукции.

Углерод оказывает влияние и на технологические свойства. Повышение содержания углерода ухудшает литейные свойства стали (используются стали с содержанием углерода до 0,4%), обрабатываемость давлением и резанием, свариваемость. Следует учитывать, что стали с низким содержанием углерода также плохо обрабатываются резанием.

В сталях всегда присутствуют примеси, которые делятся на 4 группы:

1. **Постоянные примеси:** кремний, марганец, сера, фосфор. Марганец и кремний вводятся в процессе выплавки стали для раскисления, они являются технологическими примесями.

Содержание марганца не превышает 0,5...0,8%. Марганец повышает прочность, не снижая пластичности, и резко снижает красноломкость стали, вызванную влиянием серы. Он способствует уменьшению содержания сульфида железа  $FeS$ , так как образует с серой соединение сульфид марганца  $MnS$ . Частицы

сульфида марганца располагаются в виде отдельных включений, которые деформируются и оказываются вытянутыми вдоль направления прокатки.

Содержание кремния не превышает  $0,35...0,4\%$ . Кремний, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает прочность стали, особенно повышается предел текучести, но наблюдается некоторое снижение пластичности, что снижает способность стали к вытяжке

Содержание фосфора в стали  $0,025...0,045\%$ . Фосфор, растворяясь в феррите, искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности и предел текучести, но снижает пластичность и вязкость. Располагаясь вблизи зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладноломкость, уменьшает работу распространения трещин. **Хладноломкость** - повышение хрупкости при пониженных температурах. Повышение содержания фосфора на каждую  $0,01\%$  повышает порог хладноломкости на  $20...25^{\circ}\text{C}$ . Фосфор обладает склонностью к ликвации, поэтому в центре слитка отдельные участки имеют резко пониженную вязкость. Для некоторых сталей возможно увеличение содержания фосфора до  $0,10...0,15\%$ , для улучшения обрабатываемости резанием.

S – уменьшается пластичность, свариваемость и коррозионная стойкость. P – искажает кристаллическую решетку. Содержание серы в сталях составляет  $0,025...0,06\%$ . Сера – вредная примесь, попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – сульфид серы  $\text{FeS}$ , которое, в свою очередь, образует с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления  $988^{\circ}\text{C}$ . При нагреве под прокатку или ковку эвтектика плавится, нарушаются связи между зернами. При деформации в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается – явление *красноломкости*.

**Красноломкость** – повышение хрупкости при высоких температурах.

Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость  $a_n$  пластичность ( $\delta$  и  $\psi$ ), а также предел выносливости ( $\sigma_{-1}$ ). Она ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

**2. Скрытые примеси** - газы (азот, кислород, водород) – попадают в сталь при выплавке. Азот и кислород находятся в стали в виде хрупких неметаллических включений: окислов ( $\text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) нитридов ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ), в виде твердого раствора или в свободном состоянии, располагаясь в дефектах (раковинах, трещинах). Примеси внедрения (азот N, кислород O) повышают порог хладноломкости и снижают сопротивление хрупкому разрушению. Неметаллические включения (окислы, нитриды), являясь концентраторами напряжений, могут значительно понизить предел выносливости и вязкость. Очень вредным является растворенный в стали водород, который значительно охрупчивает сталь. Он приводит к образованию в катаных заготовках и поковках *флокенов*.

Данный документ является частью системы документооборота и предназначен для использования в качестве справочного материала. Любое копирование, распространение или использование без письменного разрешения владельца является нарушением законодательства Российской Федерации. Все права защищены. © 2024. ООО "Система Технологии".

**Флокены** – тонкие трещины овальной или округлой формы, имеющие в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета. Металл с флокенами нельзя использовать в промышленности, при сварке образуются холодные трещины в наплавленном и основном металле.

Если водород находится в поверхностном слое, то он удаляется в результате нагрева при  $150...180^{\circ}C$ , лучше в вакууме

Добавка свинца, кальция – улучшает обрабатываемость резанием. Применение упрочнения термической обработки улучшает комплекс механических свойств. Легирующие элементы растворяются в основных фазах железоуглеродистых сплавов (феррит, аустенит, цементит), или образуют специальные карбиды.

Растворение легирующих элементов в  $Fe_\alpha$  происходит в результате замещения атомов железа атомами этих элементов. Эти атомы создают в решетке напряжения, которые вызывают изменение ее периода. Изменение размеров решетки вызывает изменение свойств феррита – прочность повышается, пластичность уменьшается. Хром, молибден и вольфрам упрочняют меньше, чем никель, кремний и марганец. Молибден и вольфрам, а также кремний и марганец в определенных количествах, снижают вязкость.

#### **6.4. Маркировка конструкционных сталей**

К конструкционным сталям относят следующие группы сталей:

- стали общего назначения обыкновенного качества;
- качественные углеродистые стали;
- марганцовистые стали;
- литейные стали;
- легированные стали;
- автоматные стали;
- шарикоподшипниковые стали;
- рессорно – пружинные стали;
- специальные стали (жаропрочные, жаростойкие и коррозионно-стойкие стали).

В черной металлургии 80% от общего объема всех сталей применяют углеродистые стали. Они дешевы, обладают удовлетворительными механическими свойствами с хорошей обрабатываемостью резанием и давлением. Однако они менее технологичны при термической обработке. Из-за высокой критической скорости закалки их охлаждают только в воде, что вызывает значительные деформации и коробления деталей.

Маркируются конструкционные стали набором цифр и букв, указывающих на содержание основных легирующих элементов.

##### ***1) Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380)***

Стали содержат повышенное количество серы и фосфора. Стали данной группы предназначены для изготовления различных конструкций, слабонагруженных деталей машин и приборов. Этим сталям отдают предпочтение в тех случаях, когда работоспособность деталей и конструкций определяется жесткостью. Для них геометрические размеры часто оказываются такими, что их

прочность заведомо обеспечивается. Поэтому на выбор стали большое влияние оказывает не столько механические, сколько технологические свойства.

Примеры: сварные рамы, фермы и др. строительные металлоконструкции. Специализированное назначение: котло-, мосто- судостроение. Сельскохозяйственное машиностроение: валки, оси, рычаги, детали, изготавливаемые холодной штамповкой и т.д.

Ст5, Ст6 – обладающие большей прочностью, предназначены для рельсов, железнодорожных колес, а также валов, шкивов, шестерен и других деталей грузоподъемных и сельскохозяйственных машин.

Маркируются Ст2, Ст.2кп, БСт.3кп, ВСт.3пс, ВСт.4сп. Ст – индекс данной группы стали. Цифры от 0 до 6 - это условный номер марки стали. С увеличением номера марки возрастает прочность и снижается пластичность стали. По гарантиям при поставке существует три группы сталей: А, Б и В. Для сталей группы А при поставке гарантируются механические свойства, в обозначении индекс группы А не указывается. Для сталей группы Б гарантируется химический состав. Для сталей группы В при поставке гарантируются и механические свойства, и химический состав. Индексы **кп**, **пс**, **сп** указывают степень раскисленности стали: кп - кипящая, пс - полуспокойная, сп - спокойная.

## **2) Качественные углеродистые стали**

Качественные стали поставляют с гарантированными механическими свойствами и химическим составом (группа В). Степень раскисленности, в основном, спокойная.

Стали, содержащие углерода до 0,25%, называют низкоуглеродистыми. Стали с содержанием  $C \leq 0,1\%$  малопрочные, высокопластичные; из-за способности к глубокой вытяжке их применяют для холодной штамповки, изготавливают шайбы, прокладки, кожуха и т.д.

Стали с содержанием углерода в интервале 0,15 – 0,25% называют также цементуемыми. Они предназначены для деталей небольшого размера, например, кулачки, толкатели, малонагруженные шестерни и т.д. Сердцевина сталей из-за низкой прокаливаемости упрочняется слабо. Углеродистые стали хорошо штампуются и свариваются, из них изготавливают крепежные детали, втулки, штуцера и т.п., а также детали для котло-, турбостроения – трубы перегревателей, змеевики, работающие при  $T = -40$  до  $425^{\circ}C$ .

Стали с содержанием углерода 0,30 – 0,55 % называются среднеуглеродистыми, обладающие большой прочностью, но меньшей пластичности. Стали данной группы подвергают термическому улучшению, поэтому их еще называют улучшаемыми, структура которых после такой термической обработки состоит из сорбита. Полеченной структуре соответствует малая чувствительность к концентраторам напряжения. В результате нормализации и поверхностной закалки (с твердостью на поверхности 40-58 HRC) из-за низкой прокаливаемости стали (до 12 мм) из них изготавливают детали небольших размеров, от которых требуется однородность свойств по всему



сечению, то есть, сквозная прокаливаемость – шатуны, зубчатые колеса, маховики, оси и т.п. Для валов, осей и прочих деталей, испытывающих главным образом напряжения изгиба и кручения, толщина упрочненного слоя должна быть не менее половины радиуса детали (до 30 мм), поэтому для сталей рекомендуют проводить закалку ТВЧ.

Для изготовления более крупных деталей (кулачки, шейки коленчатых валов, распределительных валиков, зубья шестерен, длинных валов, ходовых винтов и т.п.), работающих при невысоких циклических и контактных нагрузках, используют стали 40, 45, 50. Конструкционные качественные углеродистые стали маркируются двухзначным числом, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента. Указывается степень раскисленности, если она отличается от спокойной. Также в конце марки могут указываться легирующие элементы заглавными буквами, например, **08Ю**. Количество легирующих элементов не высокое.

Сталь 08 кп, сталь 10 пс, сталь 45.

Содержание углерода, соответственно, 0,08 %, 0,10 %, 0,45 %.

Качественные стали поставляются в виде проката, поковок и других полуфабрикатов с гарантированными химическим составом и механическими свойствами (после нормализации).

### **3) Марганцовистые стали**

Марганцовистые стали относят к низколегированным сталям, которые по содержанию углерода делятся на низкоуглеродистые и среднеуглеродистые. Низкоуглеродистые стали содержат до 0,22% углерода и до 3-4% легирующих элементов, главным из которых является марганец. Она используется в виде листов, сортового фасонного проката в строительстве и машиностроении, хорошо сваривается. Марочный состав сталей данной подгруппы насчитывает 28 марок, например, 09Г2, 12ГС, 15ГФ и пр.

Среднеуглеродистая марганцовистая сталь содержит до 0,45% углерода и количество легирующих элементов не должно превышать 5%.

Маркировка марганцовистых сталей осуществляют по такому же принципу, что и маркировку углеродистых сталей. Буква **Г** в марке стали после численного содержания углерода в сотых долях процента указывает на повышенное содержание марганца.

### **4) Легированные стали**

В соответствии с ГОСТ 4543-71 наименования таких сталей состоят из цифр и букв. Первые цифры марки обозначают среднее содержание углерода в стали в сотых долях процента. Буквы указывают на основные легирующие элементы, включенные в сталь (см. таблицу 1).

Цифры после каждой буквы обозначают примерное процентное содержание соответствующего элемента, округленное до целого числа, при содержании легирующего элемента до 1,5% цифра за соответствующей буквой не указывается. Например, сталь состава С 0,09 - 0,15%, Cr 0,4 - 0,7%, Ni 0,5 - 0,8%

называется 12ХН, а сталь состава С 0.27 - 0.34%, Cr 2.3 - 2.7%, Mo 0.2 - 0.3%, V 0.06 - 0.12% - 30ХЗМФ. Для того, чтобы показать, что в стали ограничено содержание серы и фосфора ( $S < 0.03\%$ ,  $P < 0.03\%$ ) и сталь относится к группе высококачественных в конце ее обозначения ставят букву А.

Их применяют после закалки и высокого отпуска (улучшения), поскольку в отожженном состоянии они по механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых. Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов. Стали, легированные Si, Mn, Ni имеют высокую твердость феррита. Упрочняа феррит и мало влияя на пластичность, большинство лег. элем. снижают КСЧ, МДж/м<sup>2</sup>, особенно если их концентрация выше 1%. Исключение составляет Ni.

Легированные стали производят:

- ✓ качественными;
- ✓ высококачественными;
- ✓ особо высококачественными.

Прокаливаемость легированных сталей является важнейшим фактором, способствующим повышению конструкционной прочности. Наибольший эффект упрочнения достигается комплексным легированием Cr + Mo, Cr + Ni, Cr + Mo + Ni. Возможность менее резкого охлаждения при закалке таких деталей уменьшает в них внутренние напряжения и опасность образования трещин. Большинство легирующих элементов в сталях измельчают зерно, что способствует повышению работы развития трещины и снижению порога хладноломкости. Наиболее сильно понижает порог хладноломкости и увеличивает сопротивление распространению трещины Ni. Остальные легирующие элементы, за исключением небольших добавок Cr, Mn, Mo, повышают порог хладноломкости.

Таким образом, для обеспечения высокой конструкционной прочности количество легирующих элементов в стали должно быть рациональным. После достижения необходимой прокаливаемости избыточное легирование (за исключением никеля) снижает трещиностойкость и облегчает хрупкое разрушение.

Особовысококачественные стали, которые подвергались специальному переплаву, обеспечивающему эффективную очистку от сульфидов и оксидов, обозначаются добавлением в конце наименования, через дефис, буквы: Ш – электрошлаковый переплав, ЭЛ – электронно-лучевой переплав, ВД – вакуумно-дуговой переплав, ПД – пламенно-дуговой переплав, ВН – вакуумно-индукционная плавка, ШД – электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав, ШЛ – электронно-лучевой и электрошлаковый переплав.

Таблица 1. Обозначения легирующих элементов

Легирующий элемент	Обозначение элемента	Легирующий элемент	Обозначение элемента
Хром	<b>Х</b>	Никель	<b>Н</b>
Марганец	<b>Г</b>	Кобальт	<b>К</b>
Вольфрам	<b>В</b>	Бор	<b>Р</b>
Кремний	<b>С</b>	Ниобий	<b>Б</b>
Алюминий	<b>Ю</b>	Цирконий	<b>Ц</b>
Медь	<b>Д</b>	Фосфор	<b>П</b>
Титан	<b>Т</b>	Селен	<b>Е</b>
Ванадий	<b>Ф</b>	Редкоземельные металлы	<b>Ч</b>
Молибден	<b>М</b>	Азот	<b>А</b> (если находится в середине наименования)

Конструкционная легированная сталь используется для изготовления различных улучшаемых деталей; втулок, шестерней, обойм, гильз, дисков плунжеры, других деталей, к которым предъявляются требования высокой поверхностной твердости.

### 6.5. Материалы с особыми технологическими свойствами

Технологические свойства металлов и сплавов характеризуют их способность поддаваться различным методам горячей и холодной обработки для получения определенной формы, размеров и свойств.

К технологическим свойствам металлов и сплавов относятся литейные свойства, ковкость, свариваемость, обрабатываемость режущими инструментами, прокаливаемость.

#### 1) *Сталь с улучшенной обрабатываемостью резанием*

Обрабатываемость сталей зависит от их структуры и химического состава. Крупнозернистая сталь из-за пониженной вязкости лучше обрабатывается резанием, чем мелкозернистая. Обрабатываемость углеродистых сталей ухудшается с увеличением содержания в них углерода.

Для улучшения обрабатываемости сталей в них допускается повышенное содержание серы, а также вводится свинец, селен, другие элементы.

Особое значение свойств обрабатываемости резанием у стали имеет для массового производства, где широко применяют автоматические линии.

Обрабатываемость оценивается:

1. интенсивностью изнашивания режущего инструмента;
2. максимально допустимой скоростью резания, соответствующей определенной величине износа или заданной стойкости инструмента;
3. чистотой поверхности резания (налипание стружки);
4. формой стружки и длиной отвода.

Обрабатываемость стали зависит от ее механических свойств, теплопроводности, микроструктуры и химического состава.

Особенно плохой обрабатываемостью отличаются аустенитные стали, которые кроме высокой пластичности и вязкости имеют пониженную теплопроводность. Выделяющая при их обработке теплота концентрируется в зоне резания, снижая стойкость инструмента.

Повышение обрабатываемости резанием достигается: технологическими и металлургическими приемами.

Технологические приемы заключаются в проведении термической обработки стали - нормализация с высоких температур, укрупняют зерно. Низкоуглеродистые стали подвергают холодной пластической деформации.

Металлургические приемы предусматривают введение в конструкционную сталь серы, фосфора, селена (Е), кальция (Ц), свинца (С), которые образуют различные включения. А последние создают как бы внутреннюю смазку, которая в зоне резания снижает трение между инструментом и стружкой, а также облегчает ее измельчение.

Такие стали называют **автоматными** и маркируют буквой **A**, затем стоит цифра, указывающая на содержание углерода в сотых долях процента. Автоматные стали могут быть углеродистыми и легированные, поэтому в маркировке стали могут присутствовать буквы С, Е, Г, Х, Н, М, которые показывают на содержание легирующих элементов, улучшающих обрабатываемость, стали резанием (табл.1).

Автоматные сернистые А11, А12, А30, А35, А40Г – для снижения красноломкости в них увеличивают количество марганца (Г). Недостатками автоматных сталей является понижение вязкости, пластичности и особенно сопротивления усталости в поперечном направлении прокатки, низкая коррозионная стойкость.

Применяют автоматные стали для изготовления крепких деталей, а также малонагруженных деталей сложной формы, к которым предъявляются требования высокой точности размеров и чистоты поверхности.

Автоматные свинцовосодержащие углеродистые АС14, АС40, АС35Г2, АС45Г2 и легированные АС12ХН, АС14ХГН, АС20ХГНМ, АС30ХМ, АС38ХГМ, АС40ХГНМ.

По обрабатываемости эти стали заметно превосходят сернистые. Введение свинца (С) повышает скорость резания на 30-40% и в 2-7 раз увеличивает стойкость инструмента при сохранении принятой скорости резания. Такие стали применяют на автозаводах для изготовления многих деталей двигателя.

Автоматные селеносодержащие (Е) стали марок А35Е, А45Е (содержание 0,04 – 0,10% Se и 0,06 – 0,12% S) отличаются высокой коррозионной стойкостью, по сравнению с сернистыми сталями. Эти стали в 2 раза снижают расход инструмента и до 30% повышают производительность обработки. Автоматные кальцийсодержащие (Ц) (0,002 – 0,008% Ca) АЦ20, АЦ30, АЦ40Х, АЦ30ХН

предназначены для изготовления термически упрочненных деталей, обрабатываемых твердосплавным инструментом при высоких (100 м/мин) скоростях резания.

## **2) Литейные конструкционные стали**

Во всех литейных сталях условием для обеспечения хорошей раскисленности а, следовательно, и отсутствия газовых раковин является повышенное содержание в них основных раскисляющих элементов марганца и кремния. За счет высокой скорости кристаллизации слитка первичное зерно в литых заготовках очень мелкое, но его можно уменьшить путем модификации стали.

В соответствии с ГОСТ 977-88 литейные стали маркируются по тем же правилам, что и качественные и легированные стали. Отличие заключается лишь в том, что в конце наименований литейных сталей приводится буква Л, например, 15Л, 20Г1ФЛ, 35 ХГЛ и др. Данная группа сталей применяется для изготовления отливок. Использование литейных сталей в условиях климатического холода экономически целесообразно при обеспечении надежности и долговечности отливок. Качество литого металла по сравнению с прокатом или поковками ниже из-за ликвации, более крупного зерна, а также разнотерности в различных частях отливки, наличия пор и раковин. При отрицательных температурах вредное влияние этих факторов усиливается.

## **3) Чугуны (железоуглеродистые сплавы)**

Чугуны, в зависимости от того, в какой форме присутствует углерод в сплавах, различают белые, серые, высокопрочные и ковкие. Высокопрочные чугуны являются разновидностью серых, но из-за повышенных механических свойств их выделяют в особую группу. Пример: СЧ40, ВЧ120-2, КЧ60-3.

## **4) Медные сплавы**

Медь и ее сплавы находят широкое применение в электротехнической промышленности, электронике, приборостроении, плавильном производстве, двигателестроении. Основные сплавы, применяемые в конструкциях - латуни и бронзы. Медь плавится при 1083°C, плотность 8,94 кг/дм<sup>3</sup>, ГЦК – решетка, диамагнитна, не имеет полиморфизма, отлично электро- и теплопроводна.

Вредные элементы в меди: Вi, Рb, О, Н, Se, S, Те и др. придают красноломкость, хрупкость, хладноломкость, трещиночувствительность.

Сплавы меди с цинком называются *латунями*. Они содержат до 45% Zn. Сплавы меди с другими элементами таблицы Менделеева (Ag, Al, Au, Cd, Fe, Ni, Pt, P, Sb, Sn, Zn, Вe, Рb, Кd и др.) называются бронзами.

Латуни бывают деформируемые (ГОСТ 15527 – 70) и литейные (ГОСТ 17711 – 93).

Деформируемые латуни обозначаются буквой «Л» и цифрой, показывающей содержание меди (Л96, Л63).

**Бронзы** - сплав меди и олова, маркируют буквами **Бр**. В деформируемых бронзах (ГОСТ 5017- 74,18185-78) после этих букв указывают легирующие

элементы, а в конце их содержание. Например, Бр0Ф6,5-04 содержит 6,5% Sn и 0,4% P, остальное медь. Литейные бронзы маркируются (ГОСТ 613 – 79, 493 – 79) с букв. Бр, затем легирующий элемент с цифрой и т. д. Например: Бр03Ц12С5 содержит Sn – 3%, Zn – 12%, Pb – 5%, основа Cu.

Оловянистые бронзы бывают деформируемые и литейные.

Деформируемые бронзы имеют однофазную  $\alpha$  – структуру, их обычно легируют фосфором (до 0,4%). К ним относятся, например, БрОФ65 – 04, БрОЦ4 – 3, БрОЦС4 – 4 – 25 и т.д. Для удешевления оловянистой бронзы в нее добавляют 5 – 10% Zn, 3 – 5% Pb, чтобы получать БрОЦС 5 – 5 – 5.

Литейные оловянистые бронзы Бр03Ц12С5, Бр03Ц7С5Н1, Бр05Ц5С5, Бр05С25, Бр010ФЛ и др. обычно имеют двухфазную структуру ( $\alpha + \delta$ ). Они химстойки, антифрикционны. Из них изготавливают запорную арматуру, подшипники скольжения. Фосфор вводят для легирования и лучшего раскисления от CuO, SnO.

Применяют так же алюминиевые бронзы (БрА5), алюминиевожелезистые (БрА9Ж3), алюминиевомарганцовистые (БрАМц 9 – 2), алюминиевожелезоникелиевые БрАЖН10 – 4 – 4), кремнистые (БрК3), кремниймарганцевые (БрКМц3 – 1), бериллиевые (БрБ2), бериллиевоникельтитановые (19), хромовые (БрХ05), хромосеребряные (БрХAg05 – 05), циркониевые (БрЦр07) и т.д. Эти бронзы имеют большую твердость и упругость, особенно бериллиевые.

Алюминиевые бронзы применяются для изготовления втулок, фланцев, шестерен.

Бериллиевая бронза закаливается с 800°C и подвергается старению при 300 – 350°C. Получается твердость 350 – 400 НВ. Она используется для изготовления пружин, мембран, пружинящих контактов и т.д.

Отличным антифрикционным материалом является свинцовистая бронза (БрС30).

Из латуней, как конструкционных сплавов, изготавливают трубки, сильфоны, гибкие гофрированные шланги, мелкий сортовой прокат, лист и т.д.

Из оловянистых бронз изготавливают антифрикционные изделия, подпятники, подшипники скольжения, втулки, пояски поршневых колец.

Высокопрочные алюминиевые бронзы идут на изготовление шестерен, втулок, пружин, подшипников.

Из бериллиевой бронзы изготавливают упругие элементы манометров, приборов, пружины, мембраны.

Хромистые и циркониевые бронзы используются в двигателестроении.

## **6.6. Материалы с высокой твердостью поверхности**

К материалам с высокой твердостью поверхности или износостойким материалам относят так называемые антифрикционные материалы на

металлической и неметаллической основе, комбинированные материалы, минералы.

К данной группе относят антифрикционные материалы. Антифрикционные материалы могут быть металлическими, неметаллическими и комбинированными. Из неметаллических материалов для изготовления подшипников скольжения используются терморезистивные пластмассы и полимеры (термопластические пластмассы), фторопласты, полиамиды.

К сплавам для подшипников трения - скольжения относятся: шарикоподшипниковые стали, антифрикционные бронзы, чугуны, сплавы на основе Zn, баббиты, а также металлокерамические материалы.

### ***1) Металлокерамические материалы***

Из металлокерамических материалов изготавливают вкладыши для подшипников, но вследствие их пористости пропитываются маслом и могут длительное время работать без подвода смазки. Из неметаллических материалов для вкладышей применяют текстолит, капрон, нейлон, резину, дерево и др. Неметаллические материалы устойчивы против заедания, хорошо прирабатываются, могут работать без смазки или с водяной смазкой, что имеет существенное значение для подшипников гребных винтов, пищевых машин и т.п.

### ***2) Медные сплавы (бронзы)***

Медные сплавы с добавками свинца и алюминия (бронзы) также обладают высокими антифрикционными свойствами, что позволяет изготавливать из них подшипниковые вкладыши. Благодаря высокой прочности антифрикционных бронз их применяют для изготовления вкладышей к подшипникам трения-скольжения, работающим в особо тяжелых условиях эксплуатации (значительные удельные давления и числа оборотов вала).

### ***3) Высококачественный серый чугун***

Для менее ответственных вкладышей в машиностроении применяют высококачественный серый чугун АЧЦ-1 и АЧЦ-2, обладающий перлитной структурой и повышенным содержанием графита.

### ***4) Шарикоподшипниковая сталь***

Ее применяют главным образом для изготовления шариков, роликов и колец подшипников. Но номенклатура марок стали данного вида достаточно широка. Это объясняется разнообразием требований к эксплуатационным свойствам подшипников со стороны традиционных, а также новых отраслей

промышленности и сельского хозяйства. Подшипниковые стали обозначаются так же, как и легированные, только в начале ставится буква **Ш**, после которой обязательно в маркировке стоит буква **Х**, которая указывает на важный легирующий элемент для подшипниковых сталей – хром. Цифры в марке стали указывают на содержание хрома в десятых долях процента. Некоторые марки сталей данной подгруппы в маркировке имеют буквы **Г** и **С** – марганец и кремний. Для сталей, подвергнутых электрошлаковому переплаву, в конце обозначения, через дефис, добавляется буква **Э**.

Наиболее распространенные подшипниковые высокоуглеродистые стали можно классифицировать следующим образом:

- стали для подшипников, работающих в обычных условиях (хромистая, хромистая с добавкой молибдена, хромомарганцевокремнистая, хромомарганцевая с добавкой молибдена);
- стали для подшипников, работающих в агрессивных средах и при повышенной температуре (коррозионно-стойкая, теплостойкая).

К первым относятся стали марок ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ, ШХ4, ШХ6, ШХ9 и т.д. Названия аналогичных марок в других странах - 52100, 100С6, SKF-24, SUJ2 и т.д.

Ко вторым относят стали марок 95Х18-Ш (где буква "Ш" указывает на то, что сталь выплавлена методом электрошлакового переплава, а вакуумно-дуговой переплав стали электрошлакового переплава обозначается "ШД"), 11Х18М-ШД, ЭИ760, ЭИ347 (8Х4В9Ф2) и др.

## 5) **Баббиты**

**Баббиты** - это легкоплавкие сплавы на основе Pb, Sn, Zn, Al. Делятся на оловянные, свинцовые, кальциевые и алюминиевые. Марки баббитов обозначают буквой Б, справа от которой ставится цифра, показывающая % Sn, или буква, характеризующая специальный элемент, входящий в сплав. Например, Б83, Б16 обозначают, что баббит содержит 83 и 16% Sn соответственно. БН – сплав содержит никель и т.д.

Таким образом, обозначение условно и не показывает полностью состав сплава. Для упрочнения Sn вводят элементы (например, Sb, Cu), образующие твердые включения. Sb растворяется в Sn с образованием твердого раствора, который имеет большую твердость и прочность, чем чистое Sn, почти при той же пластичности. Кроме того, Sb с Sn образуют химическое соединение SbSn с высокой твердостью.

В сплавах БН, Б16, БС6 – (олова 5,5-6,5) основой служит уже свинец. Для упрочнения Pb и создания твердых частиц кроме Sn вводят также Sb и Си. Никель улучшает форму включений и измельчает структуру.



## Тема 7. Конструкционные материалы с особыми свойствами

### 7.1. Материалы с малой плотностью

Материалы с малой плотностью (легкие материалы) широко применяют в авиации, ракетной и космической технике, а также в автомобилестроении, судостроении, строительстве и других отраслях промышленности. Применение легких материалов дает возможность снизить массу, увеличить грузоподъемность летательных аппаратов без снижения скорости и дальности полета, повысить скорость движения автомобилей, судов, железнодорожного транспорта.

К основным конструкционным легким материалам относятся пластмассы, цветные металлы Be, Al, Li и сплавы на их основе, а также композиционные материалы. Особенно перспективны материалы, которые дают возможность снизить массу конструкций при одновременном повышении их прочности и жесткости.

#### 1) Сплавы на основе алюминия. Маркировка сплавов

По технологическому признаку алюминиевые сплавы делятся на деформируемые и литейные.

В свою очередь деформируемые сплавы делят на термически не упрочняемые и упрочняемые алюминиевые сплавы.

К литейным алюминиевым сплавам относятся сплавы алюминия с кремнием (так называемые *силумины*), содержащие 4-13 % Si.

Силумины маркируют: *АЛ2*, *АЛ13* (порядковый номер). Применяют такие сплавы для изготовления литых деталей приборов, корпусов турбонасосов, тонкостенных отливок сложной формы.

В настоящее время вводится единая цифровая маркировка алюминиевых сплавов. Первая цифра обозначает основу всех сплавов (алюминию присвоена цифра 1); вторая – главный легирующий элемент или группа главных легирующих элементов; третья или третья со второй – соответствует старой маркировке; четвертая цифра – нечетная (включая 0) указывает, что сплав деформируемый, четная – что сплав литейный.

К деформируемым алюминиевым сплавам относятся:

- сплавы алюминия с марганцем *АМц* (АМцЗ) и сплавы алюминия с магнием *АМг* (АМг6). Марганец и магний повышают прочность алюминия в три раза. Используют эти сплавы при изготовлении сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, трубопроводов, средненагруженных деталей конструкций;

- *дюралюмины* - сплавы алюминия с медью (2,2-4,8 %), магнием (0,4-2,4 %), марганцем (0,4-0,8 %). Это термически упрочняемые сплавы. Обозначение

дюралюминов: Д1, Д6, Д16 (номера условные). Для защиты дюралюминов от коррозии используют так называемое *плакирование* - покрытие тонким защитным слоем из чистого алюминия;

- сплав **В95** - наиболее прочный алюминиевый сплав (2 % Си, 2,5 % Mg, 0,5 % Mn; 6 % Zn, 0,15 % Cr, 0,5 % Si, 0,5 % Fe) и используется он для изготовления элементов летательных аппаратов;

- *ковочные сплавы* (АК) для деталей, изготавливаемых ковкой и давлением. Обозначение: АК1, АК5 (номер условный). Эти сплавы обладают способностью сохранять механические свойства при повышенных температурах.

## 2) *Магниеые сплавы*

Основными его достоинствами являются сравнительно низкая плотность (1,74 г/см<sup>3</sup>), удовлетворительная устойчивость в воздухе и некоторых других средах, высокая активность в качестве восстановителя в химических процессах, а также хорошая способность сплавляться с другими металлами.

Чистый металлический магний используется в основном в качестве легирующей добавки в сплавах на основе алюминия, титана и некоторых других металлов. В черной металлургии магний довольно широко применяется для глубокой десульфурации чугуна и стали, а также для улучшения свойств чугуна путем сфероидизации графита. Кроме того, магний является незаменимым восстановителем, в первую очередь в производстве титановой губки.

Магниеые сплавы широко используются в современной технике, авиастроении, в первую очередь, благодаря низкой плотности, что позволяет существенно снизить вес изделий и конструкций. Сплавы магния химически устойчивы в щелочах, минеральных маслах, фторсодержащих газовых средах. Из-за высокого электрического потенциала эти сплавы используются в качестве протекторов при электрохимической защите стальных конструкций от коррозии в морской воде и подземных сооружениях.

Магниеые сплавы - это сплавы магния с алюминием, марганцем, медью, кремнием, бериллием, цинком, цирконием и т.д.

Маркировка сплавов имеет буквенно-цифровую систему обозначения. Буквы указывают соответствующую группу, а цифры - порядковый номер сплава.

Магниеые сплавы подразделяют на две группы:

1. деформируемые (ГОСТ 14957-79);
2. литейные (ГОСТ 2856-79). Марки деформируемых сплавов: МА1, МА2, ...МА20. Например: МА20 означает, марка **МА** - магниеого деформируемого сплава с порядковым номером 20. Марки литейных сплавов: МЛ3, МЛ4, ... МЛ 19. Например: МЛ15 означает, марка **МЛ** - магниеого литейного сплава с порядковым номером 15.

## 7.2. Материалы с высокими упругими свойствами

Под действием нагрузки пружины и рессоры упруго деформируются, а после прекращения действия нагрузки восстанавливают свою первоначальную форму и размеры. Особенностью работы является то, что при значительных статических и ударных нагрузках они должны испытывать только упругую деформацию, остаточная деформация не допускается. Основные требования к пружинным сталям – обеспечение высоких значений пределов упругости, текучести, выносливости, а также необходимой пластичности и сопротивления хрупкому разрушению, стойкости к релаксации напряжений.

Пружины работают в области упругих деформаций, когда между действующим напряжением и деформацией наблюдается пропорциональность. При длительной работе пропорциональность нарушается из-за перехода части энергии упругой деформации в энергию пластической деформации. Напряжения при этом снижаются.

Группа сталей, которая обладает высоким пределом упругости (текучести), называются рессорно-пружинными.

Характерным признаком рессорно-пружинных сталей является наличие в них углерода в количестве 0,5...0,8 %. По составу эти стали могут быть как углеродистыми, так и легированными. Рессорно-пружинные стали, прежде всего, должны обладать высоким пределом текучести, что обеспечивает высокие упругие свойства. Это достигается закалкой с последующим средним отпуском.

Температура отпуска должна выбираться в пределах 350–500°C (иногда, в зависимости от состава и назначения может достигать и до 600°C). Кроме того, они должны обладать высоким пределом выносливости и достаточно высоким пределом прочности. А вот пластичность этих сталей должна быть пониженной (5–10 % по относительному удлинению и 20–35 % по относительному сужению). Это связано с тем, что в рессорах и пружинах не допускается пластическая деформация.

Чаще для изготовления рессор и пружин используются кремнистые стали с концентрацией кремния 2 % (50С2, 55С2 и 60С2). Кремний в таких сталях задерживает распад мартенсита при отпуске, что приводит к повышению предела текучести и, стало быть, к повышению упругих характеристик.

К недостаткам этих сталей следует отнести их склонность к обезуглероживанию и образованию поверхностных дефектов в процессе горячей обработки, приводящих к снижению предела выносливости. В целях предотвращения образования указанных дефектов, кремнистые стали дополнительно легируют хромом, марганцем, ванадием, никелем и вольфрамом.

К легированным пружинным сталям относят марки 50ХГС, 60С2ХФА, 55ХГР. При одной и той же концентрации углерода, что и у кремнистых сталей, кремний в них заменяется следующими возможными сочетаниями легирующих элементов: хром + марганец, хром + ванадий, хром + марганец + ванадий, хром +

марганец + бор. Например, 50ХГ, 50ХФ, 50ХГФ, 55ХГР. Эти стали обладают повышенной вязкостью и менее чувствительны к надрезу. Для повышения эксплуатационных характеристик, особенно для пружин, работающих при длительных знакопеременных нагрузках, назначают обдувку поверхности пружин дробью. Возникающие при этом в поверхностном слое напряжения сжатия приводят к повышению предела выносливости.

### 7.3. Материалы с высокой удельной прочностью

Материалы, применяемые в авиационной, космонавтической, производственной гидросистем и прочих сложных, ответственных конструкциях должны обладать высокими прочностными характеристиками, а именно, удельной прочностью. К материалам с высокой удельной прочностью относят сплавы на основе титана и бериллия, а также композиционные материалы.

Таблица 2 Прочность, удельная прочность, жесткость сплавов и высокопрочной стали.

Материал	$\sigma_B$ МПа	$\sigma_{B/\rho}$ кН×м/т	$E \times 10^{-3} / \rho$ кН×м/т
МА10 (магниевый сплав)	430	240	23
В95 (алюминиевый сплав)	700	230	24
BT14 (титановый сплав)	1500	300	26
03Н18К9М5Т (высокопрочный сплав)	2000	270	26
Ве (бериллий)	680	370	61

#### 1) Титан и сплавы на его основе

Отличительными особенностями титана являются высокие механические свойства, небольшая плотность и поэтому высокая удельная прочность при 20—25°С и криогенных температурах, хорошая коррозионная стойкость.

Достоинством титановых сплавов по сравнению с титаном являются более высокие прочность и жаропрочность при достаточно хорошей пластичности, высокой коррозионной стойкости и малой плотности.

По влиянию на полиморфизм титана все легирующие элементы подразделяются на три группы:  $\alpha$ -стабилизаторы,  $\beta$ -стабилизаторы и нейтральные элементы.

$\alpha$ -стабилизаторы (Al, O, N) повышают температуру полиморфного превращения, расширяя область твердых растворов на основе  $Ti_\alpha$ . Практическое значение для легирования титана имеет только алюминий, так как остальные вызывают снижение пластичности и вязкости титановых сплавов. Алюминий уменьшает плотность и склонность к водородной хрупкости, повышает прочность, жаропрочность, модуль упругости титановых сплавов.

$\beta$ -стабилизаторы снижают температуру полиморфного превращения титана, расширяя область твердых растворов на основе  $Ti_{\beta}$ . Они образуют с титаном диаграммы состояния двух типов.

Изоморфные  $\beta$ -стабилизаторы Mo, V, Ta, Nb, имеющие, как и Ti, кристаллическую решетку объемно-центрированного куба, неограниченно растворяются в Ti. Cr, Mn, Fe, Ni, W, Si и другие образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектоидным распадом. В некоторых сплавах (Ti—Mn, Ti—Cr, Ti—Fe) при охлаждении в условиях, отличающихся от равновесных, эвтектоидного распада не происходит, а превращение идет по штриховой линии.

Большинство  $\beta$ -стабилизаторов, особенно V, Mo, Mn, Cr, повышают прочность при 20—25°C и отрицательных температурах, жаропрочность и термическую стабильность титановых сплавов, несколько снижая их пластичность.

Нейтральные элементы (Sn, Zr, Hf) мало влияют на температуру полиморфного превращения. Наибольшее практическое значение имеют олово и цирконий. Олово упрочняет титановые сплавы без заметного снижения пластичности, повышает жаропрочность; цирконий увеличивает предел ползучести и длительную прочность.

По технологии изготовления титановые сплавы подразделяются на деформируемые, литейные и порошковые, по механическим свойствам — на сплавы нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные, повышенной пластичности. По способности упрочняться с помощью термической обработки они делятся на упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой; по структуре в отожженном состоянии они классифицируются на  $\alpha$ -, псевдо- $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$ , псевдо- $\beta$  и  $\beta$ -сплавы.

Титан имеет высокую коррозионную стойкость в большом количестве агрессивных сред, превосходя в этом отношении нержавеющую сталь. При нагреве до 500°C титан становится активным и поглощает из атмосферы газы (кислород, азот, водород), что сильно влияет на его механические свойства. Технический титан маркируется в зависимости от содержания примесей: VT1-00 (сумма примесей менее 0,398 %), VT1-0 (сумма примесей менее 0,55 %).

Титановые сплавы классифицируются:

- по технологии изготовления на деформируемые, литейные и изготовленные методами порошковой металлургии. Для маркировки деформируемых титановых сплавов используется буквенно-цифровой код:

- OT4-0, OT4-1, OT4 - сплавы, в которых основными легирующими добавками являются алюминий и марганец;

- VT5, VT5-1, VT3-1, VT6, VT9 и т.д. – сплавы, легированные алюминием или алюминием и вольфрамом.

Стоящие за буквами цифры являются условным порядковым номером.

Особенности маркировки литейных титановых сплавов – наличие буквы *Л* в конце обозначения марки: VT5Л, VT3-1Л и др.

Литейные сплавы титана обладают более низкими механическими свойствами, чем соответствующие деформируемые;

- по способу упрочнения на термически упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой;

- по структуре на однофазные  $\alpha$  – сплавы (не содержат  $\beta$ -стабилизаторов); псевдо- $\alpha$  - сплавы (коэффициент  $b$ - стабилизации не более 0,25); ( $a + b$ )-сплавы (коэффициент  $b$ -стабилизации от 0,3 до 0,9); псевдо- $\beta$ -сплавы (коэффициент  $b$ -стабилизации от 1,4 до 4,4) и  $\beta$ -сплавы (коэффициент  $\beta$ -стабилизации  $> 2,5$ ).

Преимуществом титановых сплавов, по сравнению с техническим титаном, являются следующие свойства:

- сочетание высокой прочности ( $\sigma_B = 800-1500$  МПа) с хорошей пластичностью ( $\delta = 18-25$  %);

- малая плотность и высокая удельная прочность ( $\sigma_B/\gamma$  до 40);

- хорошая жаропрочность (до  $600-700^\circ\text{C}$ );

- высокая коррозионная стойкость;

- низкая пластичность при комнатной температуре;

- высокая чувствительность к поверхностным дефектам.

Все титановые сплавы подвергаются термообработке, ХТО+ и ТМО и для повышения их износостойкости возможно применение цементации и азотирования.

Основными недостатками титана и его сплавов являются:

- высокая способность при повышенных температурах к взаимодействию со всеми газами, а также с материалами плавильных печей;

- невысокие антифрикционные свойства;

- плохая обрабатываемость резанием;

- невысокая жесткость конструкции из-за низкого значения модуля упругости.

Титановые сплавы используют в авиа- и ракетостроении (корпуса двигателей, баллоны для газов, сопла, диски, детали крепежа, фюзеляжа), в химической промышленности (компрессоры, клапаны, вентили), в изготовлении криогенной техники.

## **2) Бериллиевые сплавы**

По сравнению с другими легкими материалами бериллий обладает уникальным сочетанием физических и механических свойств. По удельной прочности и жесткости он превосходит все другие металлы. Благодаря высокому значению модуля упругости ( $E = 300$  ГПа) и низкой плотности, бериллий, обладающий повышенной удельной жесткостью, сохраняет данные свойства до  $500-600^\circ\text{C}$ .

Бериллий плохо обрабатывается резанием и требует применения твердосплавного инструмента. Соединения бериллия получают пайкой и дуговой

сваркой в аргоне или вакууме. Механические свойства бериллия зависят от чистоты металла, технологии производства, размера зерна.

Серьезный недостаток бериллия, заключающийся в низкой ударной вязкости и хладноломкости, может быть преодолен использованием сплавов с алюминием.

Широкое распространение получили сплавы меди с 2–5 % бериллия, так называемые бериллиевые бронзы.

Деформированные бериллиевые сплавы обладают высокой жесткостью и низкой плотностью. Эти сплавы являются перспективными для использования в некоторых элементах самолетных двигателей. Для повышения жаропрочных свойств бериллия используется сложное последовательное легирование.

Дальнейшее упрочнение осуществляется введением титана, образующего высокопрочные интерметаллиды TiBe<sub>12</sub>. На основе системы Be—Ni разработан сплав, имеющий марку ВБД-1 при изготовлении из литой заготовки и ВБД-1П при изготовлении из порошков Ni, Ti, остальное — Be.

## Тема 8. Композиционные материалы

**Композиционные материалы (композиты)** – это новый класс легких и высокопрочных материалов с большим сопротивлением развитию трещины. По удельной прочности и удельной жесткости композиты превосходят все обычные конструкционные материалы. Кроме того, они сохраняют высокую прочность при повышенных температурах, хорошо сопротивляются усталостному разрушению. Композиты – сложные материалы, в состав которых входят сильно отличающиеся по свойствам, не растворимые друг в друге компоненты, разделенные ярко выраженной границей. Свойства композиционных материалов (КМ) зависят от свойств компонентов и прочности связи между ними. Для создания композитов выбирают компоненты с дополняющими друг друга свойствами.

Композиционный материал состоит из основы, или матрицы (металлической или полимерной) и наполнителя, или армирующего компонента.

Матрица связывает материал в единое целое, придает ему форму. От свойств матрицы зависят технология получения материала, рабочая температура, удельная прочность  $\sigma_B/\gamma$ , предел усталости  $\sigma_{-1}$ .

Наполнитель равномерно распределяется в матрице в определенном порядке. Наполнитель воспринимает нагрузку, поэтому должен иметь высокие прочность, твердость, модуль упругости.

По форме наполнители могут быть нуль-мерными, одномерными и двумерными (см. рис. 8.1.).

Композиционные материалы, упрочненные мелкими частицами наполнителя, называют *дисперсно-упрочненными*. Композиты, содержащие

волокна, – *волокнистыми*. Двумерные наполнители применяются, в основном, в полимерных композитах.

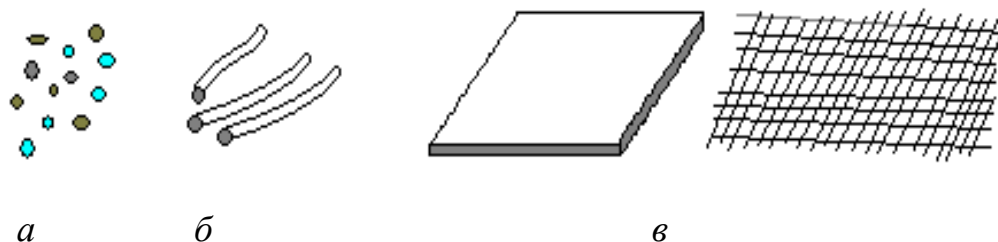


Рис. 8.1. Форма наполнителей в композиционных материалах: *а* – частицы; *б* – волокна; *в* – пластины, листы, ткань

Для матриц дисперсно-упрочненных *КМ* используют либо материалы с малой плотностью (алюминий, магний, титан и их сплавы), либо жаропрочные материалы (никель).

Получают дисперсно-упрочненные *КМ* прессованием и спеканием или введением наполнителя в жидкую матрицу перед разливкой.

Наилучшее сочетание механических свойств достигается при размере частиц 0,01–0,1 мкм и расстоянии между ними 0,05–0,5 мкм.

Примером является спеченная алюминиевая пудра (САП). Она имеет высокую жаропрочность и коррозионную стойкость. Состоит из алюминия и частиц  $Al_2O_3$  в виде чешуек толщиной менее 1 мкм (рис. 8.2.). Чем больше в этом материале доля  $Al_2O_3$ , тем выше прочность, твердость, жаропрочность, но ниже пластичность *КМ*.

Преимуществом такого материала по сравнению с обычными сплавами алюминия являются очень мелкие зерна, равномерное распределение упрочняющих частиц, отсутствие линейных дефектов. Изделия из САП: листы, фольга, профили, трубы. Получают детали для работы при 300–500<sup>0</sup>С: лопатки компрессоров, лопасти турбин и вентиляторов.

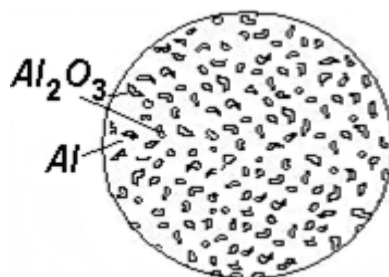


Рис. 8.2. Структура спеченной алюминиевой пудры

Наполнителями в волокнистых *КМ* служат волокна или нитевидные кристаллы: углеродные, борные, из  $SiC$ ,  $Al_2O_3$ , стекла, а также проволока из



коррозионно-стойкой стали, молибдена, вольфрама, бериллия. Волокна являются элементами, воспринимающими нагрузку.

Для матриц используются те же металлы, что и для предыдущей группы. Для достижения максимальной прочности композиционного материала волокна должны быть расположены параллельно направлению действия напряжения. Поэтому расположение волокон может быть одноосным, двухосным или трехосным (рис. 8.3.).

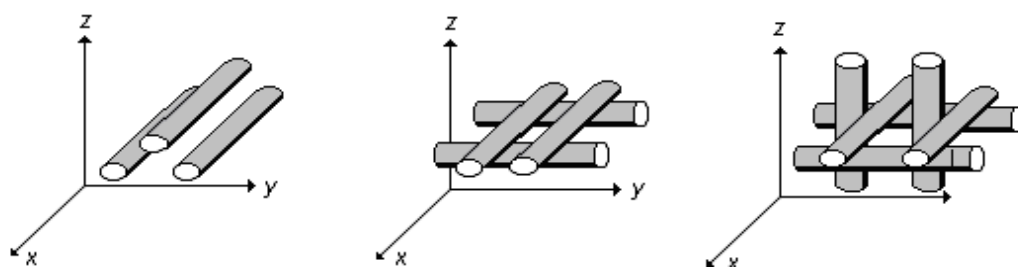


Рис. 8.3. Расположение армирующих волокон в композитах: *a* – одноосное; *б* – двухосное; *в* – трехосное

При одноосном армировании проявляется анизотропия: в направлении волокон прочность выше, чем в поперечном (так как нагрузку воспринимает волокно, а матрица – передающая среда). При двухосном армировании анизотропии нет, но прочность вдоль оси волокон уменьшается примерно в 3 раза (рис. 8.4.).

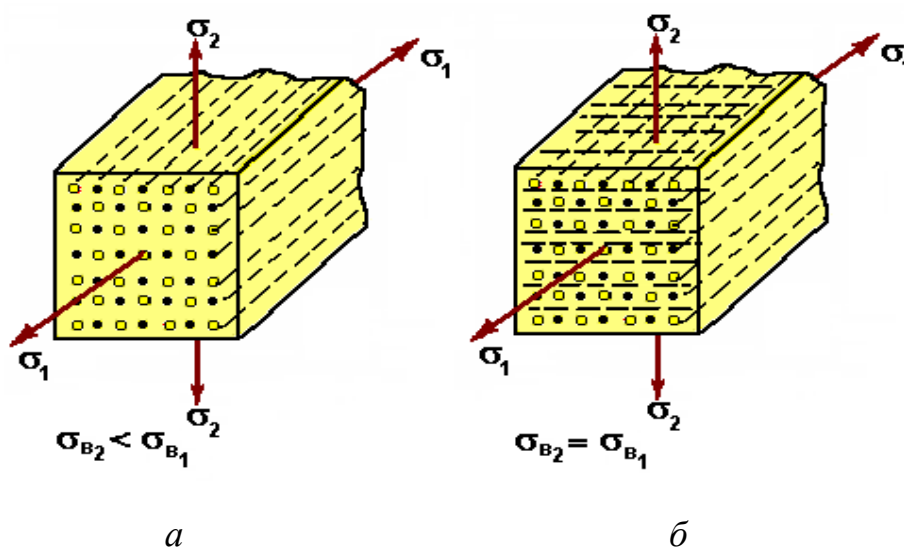


Рис. 8.4. Прочность при одноосном (*a*) и двухосном (*б*) армировании

Чем тоньше и длиннее волокно, тем выше степень упрочнения. Объемная доля волокна составляет от нескольких процентов до 80–90%. Увеличение доли наполнителя повышает прочность и другие характеристики.

Получают волокнистые композиты формированием волокон в порошке матрицы, пропиткой волокна жидким металлом матрицы, осаждением матрицы на волокна с последующим формированием и спеканием другими способами. Все больше применяется способ направленной кристаллизации эвтектик.

Основной недостаток волокнистых композитов – их высокая стоимость и сложная технология получения.

Углеродные волокна несколько дешевле. Их получают из синтетических органических волокон высокотемпературной обработкой. Они могут быть изготовлены в виде жгутов, нитей, ткани, лент. Каждое волокно состоит из мельчайших ленточек – фибрилл.

Стекловолокно производят с квадратной, прямоугольной, шестигранной формой – для лучшей укладки в матрице (рис. 8.5.).

Применяется КМ в – авиастроении, ракетной и космической технике. Из них изготавливают легкие и прочные корпуса, камеры сгорания ракетных двигателей, лопасти турбин, лопасти винтов, кузовные детали автомобилей.

КМ на неметаллической основе несколько отличаются от КМ на металлической основе и более дешевые. В композитах на полимерной основе усилие от матрицы передается армирующему волокну за счет сил межмолекулярного взаимодействия адгезионного характера. Необходимо полное

Форма		Размер блока, мм		Ширина ячейки, мм
блока	ячейки	диаметр	длина	
	□ △	10–15	100–120	1–5
	△	20–50	100–120	1–5
	□ △	20–50	100–120	1–5
	□ △	20–50	100–120	1–5

Рис. 8.5. Виды волокон в КМ

смачивание жидким связующим поверхности волокон.

Борные и углеродные волокна лучше смачиваются эпоксидной смолой. Так получают боропластики и углепластики.

Стекловолокниты имеют максимальную прочность и удельную прочность.

Композиты, в которых матрицей служит полимерный материал, являются одним из самых многочисленных и разнообразных видов материалов. Их применение в различных областях дает значительный экономический эффект. В качестве наполнителей ПКМ используется множество различных веществ.

**Стеклопластики** – полимерные композиционные материалы, армированные стеклянными волокнами, которые формуют из расплавленного неорганического стекла. В качестве матрицы чаще всего применяют как термореактивные синтетические смолы (фенольные, эпоксидные, полиэфирные и т.д.), так и термопластичные полимеры (полиамиды, полиэтилен, полистирол и т.д.). Эти материалы обладают достаточно высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами, кроме того, они прозрачны для радиоволн. Слоистый материал, в котором в качестве наполнителя применяется ткань, плетенная из стеклянных волокон, называется стеклотекстолитом.

Стеклопластики – достаточно дешевые материалы, широко используются в строительстве, судостроении, радиоэлектронике, производстве бытовых предметов, спортивного инвентаря, оконных рам для современных стеклопакетов и т.п.

**Углеродные волокна** – наполнителем в этих полимерных композитах служат углеродные волокна. Углеродные волокна получают из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д. Термическая обработка волокна проводится, как правило, в три этапа (окисление – 220°C, карбонизация – 1000–1500°C и графитизация – 1800–3000°C) и приводит к образованию волокон, характеризующихся высоким содержанием (до 99,5% по массе) углерода. В зависимости от режима обработки и исходного сырья, полученное углеволокно имеет различную структуру. Для изготовления углеродных композитов используются те же матрицы, что и для стеклопластиков – чаще всего – термореактивные и термопластичные полимеры. Основными преимуществами углеродных композитов по сравнению со стеклопластиковыми является их низкая плотность и более высокий модуль упругости, углеродные композиты – очень легкие и, в то же время, прочные материалы. Углеродные волокна и углеродные композиты имеют практически нулевой коэффициент линейного расширения. Все углеродные композиты хорошо проводят электричество, черного цвета, что несколько ограничивает области их применения. Углеродные композиты используются в авиации, ракетостроении, машиностроении, производстве космической техники, медтехники, протезов, при изготовлении легких велосипедов и другого спортивного инвентаря.

На основе углеродных волокон и углеродной матрицы создают композиционные **углеграфитовые материалы** – наиболее термостойкие композиционные материалы (углеуглеродные композиты), способные долго выдерживать в инертных или восстановительных средах температуры до 3000°C. Существует несколько способов производства подобных материалов. По одному из них углеродные волокна пропитывают фенолформальдегидной смолой, подвергая затем действию высоких температур (2000°C), при этом происходит пиролиз органических веществ и образуется углерод. Чтобы материал был менее пористым и более плотным, операцию повторяют несколько раз. Другой способ

получения углеродного материала состоит в прокаливании обычного графита при высоких температурах в атмосфере метана. Плотность такого материала увеличивается по сравнению с плотностью графита в полтора раза. Из углеуглепластиков делают высокотемпературные узлы ракетной техники и скоростных самолетов, тормозные колодки и диски для скоростных самолетов и многоразовых космических кораблей, электротермическое оборудование.

**Боропластики** – композиционные материалы, содержащие в качестве наполнителя борные волокна, внедренные в терморезистивную полимерную матрицу, при этом волокна могут быть как в виде мононитей, так и в виде жгутов, оплетенных вспомогательной стеклянной нитью или лент, в которых борные нити переплетены с другими нитями. Благодаря большой твердости нитей, получающийся материал обладает высокими механическими свойствами (борные волокна имеют наибольшую прочность при сжатии по сравнению с волокнами из других материалов) и большой стойкостью к агрессивным условиям, но высокая хрупкость материала затрудняет их обработку и накладывает ограничения на форму изделий из боропластиков. Термические свойства боропластиков определяются термостойкостью матрицы, поэтому рабочие температуры, как правило, невелики.

Применение боропластиков ограничивается высокой стоимостью производства борных волокон, поэтому они используются главным образом в авиационной и космической технике в деталях, подвергающихся длительным нагрузкам в условиях агрессивной среды.

Соединяют композиты точечной сваркой, склеиванием, клееболтовыми и клеезаклепочными соединениями.

## **Тема 9. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды**

### **Общие требования и классификация материалов**

При выборе материала для тяжело нагруженных деталей ответственного назначения для конкретной области применения в качестве существенного фактора следует учитывать устойчивость материалов к воздействию рабочей среды. Чтобы правильно подобрать материал детали нужно учитывать не только основные эксплуатационные режимы, очень важно также знать концентрацию, температуру и степень загрязнения рабочей среды. К материалам, устойчивым к воздействию температуры и рабочей температуре относят специальные стали: коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные; жаропрочные сплавы на основе никеля, радиационно – стойкие материалы.

## 9.1. Коррозионно-стойкие материалы

**Коррозионная стойкость металлов** - это способность металла или сплава сопротивляться коррозионному воздействию среды. Коррозионная стойкость определяется скоростью коррозии в данных условиях. Скорость коррозии характеризуется качественными и количественными показателями. Количественными показателями служат множество факторов, например, время до появления первого коррозионного очага или число коррозионных очагов за определенный промежуток времени; уменьшение толщины металла, отнесенное к единице времени; изменение массы металла, отнесенное к единице поверхности и единице времени; и т.п.

Коррозионная стойкость может быть повышена, если содержание углерода свести до минимума, если ввести легирующий элемент, образующий с железом твердые растворы в таком количестве, при котором скачкообразно повысится электродный потенциал сплава.

Важнейшими коррозионно-стойкими техническими сплавами являются *нержавеющие стали* с повышенным содержанием хрома: хромистые и хромоникелевые.

*Хромистые стали*: содержат хрома в не менее 13% (13...18%).

Коррозионная стойкость объясняется образованием на поверхности защитной пленки оксида  $Cr_2O_3$ . Углерод в нержавеющей сталях является нежелательным, так как он обедняет раствор хромом, связывая его в карбиды, и способствует получению двухфазного состояния. Чем ниже содержание углерода, тем выше коррозионная стойкость нержавеющей сталей.

Различают стали ферритного класса 08X13, 12X17, 08X25Т, 15X28. Стали с повышенным содержанием хрома не имеют фазовых превращений в твердом состоянии и поэтому не могут быть подвергнуты закалке. Значительным недостатком ферритных хромистых сталей является повышенная хрупкость из-за крупнокристаллической структуры. Эти стали склонны к межкристаллитной коррозии (по границам зерен) из-за обеднения хромом границ зерен. Для избежания этого вводят небольшое количество титана. Межкристаллитная коррозия обусловлена тем, что часть хрома около границ зерна взаимодействует с углеродом и образует карбиды. Концентрация хрома в твердом растворе у границ становится меньше 13% и сталь приобретает отрицательный потенциал.

Из ферритных сталей изготавливают оборудование азотно-кислотных заводов (емкости, трубы).

Для повышения механических свойств ферритных хромистых сталей в них добавляют 2...3 % никеля. Стали 10X13НЗ, 12X17Н2 используются для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в агрессивных средах. К сталям аустенитного класса относятся высоколегированные хромоникелевые стали.

Никель – аустенитообразующий элемент, сильно понижающий критические точки превращения. После охлаждения на воздухе до комнатной температуры имеет структуру аустенита. Нержавеющие стали аустенитного класса 04X18H10, 12X18H9T имеют более высокую коррозионную стойкость, лучшие технологические свойства по сравнению с хромистыми нержавеющими сталями, лучше свариваются. Они сохраняют прочность до более высоких температур, менее склонны к росту зерна при нагреве и не теряют пластичности при низких температурах.

Хромоникелевые стали коррозионностойки в окислительных средах. Основным элементом является хром, никель только повышает коррозионную стойкость.

К коррозионно – стойким материалам относятся также медные сплавы, легированные никелем.

Легирование меди никелем значительно повышает ее механические свойства, коррозионную стойкость, термоэлектрические характеристики. Промышленные медно-никелевые сплавы можно условно разделить на две группы: конструкционные и электротехнические. К конструкционным относятся коррозионно-стойкие и высокопрочные сплавы типа мельхиор, нейзильбер и куняль. В качестве дополнительных легирующих элементов в них добавляют Mn, Zn, Fe, Co, Al, Pb, Cr, Ce, Mg, Li.

## 9.2. Коррозионно-стойкие покрытия

К коррозионно – стойким покрытиям относятся изолирующие неметаллические покрытия. Эффективность покрытий этого типа зависит от того, насколько хорошо они связаны с поверхностью. Поскольку прочность сцепления сильно зависит от состояния металлической поверхности, в инженерной практике защиты металлов от коррозии при помощи изолирующих покрытий большое внимание уделяется подготовке поверхности защищаемого изделия под покрытие.

При этом при помощи механических или химических методов покрываемую часть поверхности тщательно очищают от загрязнений и продуктов коррозии, а для улучшения сцепления с покрытием дополнительно подвергают специальной химической или электрохимической обработке.

Другой важнейшей характеристикой покрытий, защищающих металл только при помощи его изоляции от агрессивной среды, является их сплошность, а, следовательно, и устойчивость к механическим воздействиям. Покрытия, имеющие дефекты, а таковых большинство, очень часто используются в комбинации с катодной защитой или ингибиторами коррозии.

Все используемые изолирующие покрытия по своему составу могут быть отнесены к неорганическим или органическим покрытиям. И те, и другие

применяются преимущественно для защиты от атмосферной или почвенной коррозии.

**Органические покрытия:** самый распространенный метод защиты от коррозии. Существует весьма широкий ассортимент изолирующих материалов этого типа: лакокрасочные и пластмассовые покрытия, а также покрытия, составленные на основе каменноугольных песков и битумов. полиэтиленовые или эпоксидные покрытия. Лакокрасочные покрытия используются обычно для защиты от атмосферной коррозии.

Лакокрасочные материалы представляют собой очень тонкую смесь пигмента и жидкого лака, которые после нанесения на поверхность формируются в твердое однородное покрытие. Как правило, используются трехслойные покрытия: первым наносят грунтовочный слой, состав которого подбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальную адгезию покрытия с металлом. В качестве пигментов этот слой содержит также вещества, обладающие ингибирующими свойствами, например, свинцовый сурик или хромат цинка. На грунтовочный наносят основной слой, за счет которого покрытие доводят до требуемой толщины. Завершающий или отделочный слой наносят для того, чтобы обеспечить всему покрытию устойчивость к погодным воздействиям, придать ему нужную окраску и текстуру. Как правило, конечная толщина покрытия должна быть не менее 75 мкм, однако, для многих применений этот минимум оказывается недостаточным.

Срок службы лакокрасочных покрытий при прочих равных условиях определяется природой полимерной составляющей материала. Последние десятилетия характеризуются не только быстрыми темпами увеличения количества производимых лакокрасочных материалов, но и непрерывным возрастанием удельного веса синтетических материалов, применение которых вместо натуральных масел позволяет увеличить срок службы покрытия от 3 до 5 раз.

**Неорганические покрытия:** один класс этого вида покрытий – стекловидные эмали, получаемые нагревом защищаемой поверхности с нанесением на нее слоем стекловидного шлака до температуры плавления стекловидного шлака. Такие покрытия используются преимущественно для защиты стали и чугуна от агрессивного воздействия атмосферы и некоторых других сред.

К числу таких покрытий относятся оксидирование, фосфатирование, анодирование, химическое никелирование и др.

а) **Оксидирование:** сущность различных методов оксидирования заключается в создании на поверхности металлов слоя окислов, которые обладают значительно большей коррозионной стойкостью, чем основной металл. Химическому оксидированию подвергают стали, сплавы алюминия, магния. Электрохимический способ оксидирования алюминия носит название

анодирования. Анодирование дает возможность получать на алюминии пленку толщиной 5–20 мкм, а иногда до 100–200 мкм.

**б) Фосфатирование:** чаще всего применяется для защиты стали, цинка, магния. *Фосфатирование* – процесс получения на поверхности пленки фосфорнокислой соли железа и марганца. Фосфатные пленки обладают невысокой коррозионной стойкостью вследствие пористости.

**Химическое никелерование:** осуществляется без приложения тока извне за счет восстановления ионов никеля из кислых или щелочных растворов его солей гипофосфитом натрия или кальция. Химическое никелирование проводится при температуре 90–95°C. После термообработки при 400–600°C твердость покрытия приближается к твердости хрома. При толщине 25–30 мкм пленка практически без пористости. Антикоррозионные свойства покрытия при этом очень высокие.

**в) Металлические покрытия** - включают в себя большую группу различных покрытий. По механизму защиты различают анодные и катодные металлические покрытия.

Металл анодных покрытий имеет электродный потенциал более отрицательный, чем потенциал защищаемого металла. При действии растворов электролитов в возникающем коррозионном элементе основной металл–покрытие основной металл является катодом и поэтому при достаточно большой площади покрытия не разрушается, а защищается электрохимически, за счет растворения металла покрытия. Примерами анодных покрытий являются покрытия железа цинком и кадмием. Анодные покрытия на железе, как правило, обладают сравнительно низкой стойкостью.

**Катодные металлические покрытия,** электродный потенциал которых более электроположителен, чем потенциал основного металла, могут служить надежной защитой от коррозии только при условии отсутствия в них сквозных пор, трещин и других дефектов, так как они механически препятствуют проникновению агрессивной среды к основному металлу. Примерами катодных защитных покрытий являются покрытия железа медью, никелем, хромом и т.п.

**Гальванические покрытия** - принципы получения гальванических покрытий основаны на осаждении на поверхности защищаемых металлов катионов из водных растворов солей при пропускании через них постоянного электрического тока от внешнего источника. Защищаемый металл при этом является катодом, а анодом служат пластины осаждаемого металла (растворимые аноды) либо пластины металла, нерастворимого в электролите (нерастворимые аноды). В первом случае при замыкании электрической цепи металл анода растворяется, а из раствора на катоде выделяется такое же количество металла, так что концентрация раствора соли в процессе электролиза практически не изменяется.

**Термодиффузионные покрытия** - обладают сравнительно высокой коррозионной стойкостью и высокой адгезией.



**Диффузионные покрытия** получают в результате насыщения поверхностных слоев защищаемого металла атомами защищающего металла и диффузии последних в глубину защищаемого металла при высоких температурах. В поверхностных слоях покрываемого металла обычно наблюдается образование новых фаз химических соединений или твердых растворов. Диффузионные покрытия с высокой коррозионной стойкостью и в особенности жаростойкостью - покрытия алюминием (алитирование), кремнием (термосилицирование), хромом (термохромирование). Наблюдаемое при этом значительное повышение жаростойкости изделий обусловлено образованием на их поверхности окислов  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$  или смешанных окислов, обладающих повышенными защитными свойствами и препятствующих дальнейшему окислению сплава.

**Горячие покрытия** - способ заключается в погружении изделий в расплавленный металл. Возможности получения покрытия горячим способом определяются способностью покрываемого металла смачиваться расплавленным металлом покрытия. Покрывающий металл, как правило, должен иметь более низкую температуру плавления, чем покрываемый металл. К числу недостатков этого способа относится: большой расход наносимого металла, неравномерность покрытия по толщине на изделиях сложной формы и т.д. Наиболее широко этот метод применяется в промышленности для нанесения на углеродистую сталь цинка, олова, свинца.

**Плакирование** - способ плакирования или облицовки заключается в том, что на матрицу основного металла накладывают с обеих сторон (или с одной стороны) листы другого металла, затем весь пакет подвергают горячей прокатке, получая в результате диффузии на границах раздела металлов прочное сцепление между слоями. Таким способом сталь плакируют медью, латунью, никелем, медно-никелевыми сплавами, алюминием, нержавеющей сталью, получая биметаллические материалы. Толщина плакировочного слоя обычно составляет 8–20% общей толщины листа.

### 9.3. Жаростойкие материалы

К жаростойким (окалиностойким) относят стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температуре выше  $550^\circ C$  и в слабонагруженном состоянии.

Способность стали сопротивляться окислению при высокой температуре называется **жаростойкостью** (окалиностойкостью).

Способность оксидной пленки защищать сплав от активного взаимодействия с кислородом определяется главным образом механической плотностью пленки, прочностью сцепления с основным материалом, а при высоких температурах и сопротивлением оксида диффузионному проникновению ионов металла и кислорода. Жаростойкость материалов характеризуется

изменением массы на единицу поверхности за время пребывания при данной температуре.

Основой жаростойких сплавов, применяемых в авиастроении, являются никель и сплавы никель — железо и кобальт — никель. Однако высокотемпературные оксиды этих металлов (особенно оксиды железа и кобальта) не обеспечивают достаточно эффективной защиты от диффузионного проникновения реагирующих компонентов. Для получения на поверхности указанных материалов оксидной пленки с высокой защитной способностью они должны содержать хром. Этот металл, обладая более высокой теплотой окисления, чем другие компоненты сплава, образует при высокой температуре на поверхности сплавов пленку тугоплавкого оксида хрома  $Cr_2O_3$ , защитная способность которого выше, чем у оксидов никеля, железа и кобальта.

Помимо химического воздействия газовой среды жаростойкие сплавы могут испытывать действие механических нагрузок при рабочих температурах, в связи с чем, в жаростойкую композицию вводят некоторое количество тугоплавких металлов (например, молибдена, вольфрама), что повышает жаропрочность за счет замедления самодиффузии в твердом растворе, не выводя сплав из однофазного состояния. Еще более эффективно упрочнение за счет старения. С этой целью в сплав вводят алюминий, титан, ниобий, образующие термостабильные химические соединения с переменной растворимостью в основе сплава, что позволяет с помощью термической обработки (заковки и старения) резко повысить кратковременную и длительную прочность жаростойких сплавов. Стареющие сплавы, как правило, обладают пониженными технологическими свойствами (свариваемость, пластичность), что ограничивает возможность их упрочнения старением.

Наиболее часто применяемыми жаростойкими сплавами являются жаростойкие сплавы: хромистые стали ферритного класса; хромокремнистые стали мартенситного класса; хромоникелевые стали аустенитно-ферритного класса; хромоникелевые аустенитные стали.

Хромистые стали ферритного класса (15X25, 15X28) могут применяться для изготовления сварных конструкций, не подвергающихся действию ударных нагрузок при температуре эксплуатации не ниже минус  $20^{\circ}C$ ; для изготовления труб для теплообменной аппаратуры, работающей в агрессивных средах; аппаратуры, деталей, чехлов терморпар, электродов искровых зажигательных свечей, труб пиролизных установок, теплообменников; для спаев со стеклом. Жаростойкость - до  $1100^{\circ}C$ .

Хромоникелевые стали аустенито-ферритного класса (20X23H13) применяются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах в слабонагруженном состоянии. Жаростойкость до  $900-1000^{\circ}C$ .

Хромокремнистые стали мартенситного класса (40X10C2M) применяются для изготовления клапанов авиационных двигателей, автомобильных и тракторных дизельных двигателей, крепежные детали двигателей.

Хромоникелевые аустенитные стали (10X23H18, 20X25H20C2) применяются для изготовления листовых деталей, труб, арматуры (при пониженных нагрузках), а также деталей печей, работающих при температурах до 1000-1100<sup>0</sup>С в воздушной и углеводородной атмосферах. Сталь 15X5 (5 % Cr) жаростойка до 700<sup>0</sup>С, сталь 12X17 (17 % Cr) -до 900<sup>0</sup>С, стала 15X28 (28 % Cr) - до 1100 – 1150<sup>0</sup>С. Сплавы на никелевой основе с Cr и Al (ХН70Ю с 26-29 % Cr и 2,8-3,5 % Al) обладают жаростойкостью до 1200<sup>0</sup>С.

#### 9.4. Жаропрочные материалы

**Жаропрочность** - способность материала сохранять необходимую длительную прочность при высоких температурах.

Одним из факторов, определяющих жаропрочность, является высокое сопротивление ползучести. Жаропрочность сплавов оценивается пределами длительной прочности или ползучести при высоких температурах, и связана, в первую очередь, с их структурой и составом.

**Ползучесть** - это деформация, непрерывно увеличивающаяся и завершающаяся разрушением под действием постоянной нагрузки при длительном воздействии температуры.

**Предел ползучести** - это напряжение, вызывающее деформацию заданной величины (обычно от 0,1 до 1 %) за определенный промежуток времени (100, 300, 500, 1000 ч) при заданной температуре.

Ползучесть может развиваться следующими способами:

1) за счет *движения дислокаций* (скольжения и переползания – перемещения дислокаций вверх или вниз относительно плоскости скольжения);

2) за счет *зернограничного скольжения*, когда идет сдвиг зерен относительно друг друга вдоль общих границ (это возможно только при мелком зерне);

3) за счет *диффузионного переноса атомов* вдоль растянутых границ зерен. У растянутых границ зерен легче образуются вакансии, поэтому туда устремляются атомы из других граничных областей:

Для повышения жаропрочности необходимо ограничить подвижность дислокаций и замедлить диффузию.

**Жаропрочные сплавы** — металлические материалы, обладающие высоким сопротивлением пластической деформации и разрушению при действии высоких температур и окислительных сред.

Структура жаропрочного материала должна быть крупнозернистой (с меньшей протяженностью границ), с однородным распределением мелких упрочняющих частиц внутри зерен и на границах.

Дисперсные частицы повышают жаропрочность эффективнее, чем твердый раствор. Чем мельче частицы и меньше расстояния между ними, тем эффективнее упрочнение.

Идеальным для работы при повышенных температурах является монокристалл.

Поликристаллические материалы упрочняют малыми добавками компонентов, которые располагаются по границам зерен и уменьшают скорость диффузии (бор, церий, редкоземельные металлы). В никелевых сплавах для этой цели служат карбиды.

Жаропрочные сплавы могут быть на алюминиевой, титановой, железной, медной, кобальтовой и никелевой основах. Наиболее широкое применение в авиационных двигателях получили никелевые жаропрочные сплавы, из которых изготавливают рабочие и сопловые лопатки, диски ротора турбины, детали камеры сгорания и т.п. В зависимости от технологии изготовления никелевые жаропрочные сплавы могут быть литейными, деформируемыми и порошковыми. Наиболее жаропрочными являются литейные сложнолегированные сплавы на никелевой основе, способные работать до температур 1050—1100°C в течение сотен и тысяч часов при высоких статических и динамических нагрузках.

Факторами, способствующими повышению жаропрочности, являются:

- высокая температура плавления основного металла;
- наличие в сплаве твердого раствора и мелкодисперсных упрочняющих фаз;
- пластическая деформация, вызывающая наклеп; - высокая температура рекристаллизации;
- рациональное легирование;
- термическая и термомеханическая обработка;
- введение в жаропрочные стали бора, церия, ниобия, циркония, (в десятых, сотых и даже тысячных долях). По температуре эксплуатации жаропрочные стали разделяют на группы:
  - для работы при температуре до 350 – 400<sup>0</sup> С (обычные конструкционные стали - углеродистые и малолегированные);
  - для работы при температуре 400 – 550<sup>0</sup> С (стали перлитного класса 15ХМ, 12Х1МФ для деталей котлов, труб паропроводов и пароперегревателей, нагруженные сравнительно мало, но работающие до 100 000 ч);
  - для работы при температуре 500 – 600<sup>0</sup> С (стали мартенситного класса: высокохромистые 15Х11МФ для лопаток паровых турбин; сильхромы 40Х9С2 для клапанов моторов; 20Х12ВНМФ для дисков, роторов, валов);
  - для работы при температуре 500 – 750<sup>0</sup> С (стали аустенитного класса: нестареющие 09Х14Н16В для труб пароперегревателей высокого давления; стареющие 40Х15Н7Г7Ф2МС для лопаток газовых турбин);
  - для работы при температуре 800 - 850- 1200<sup>0</sup> С (жаропрочные сплавы на никелевой основе ХН77ТЮР, ХН55ВМТФКЮ для лопаток турбин).

Основой котлостроения являются *перлитные жаропрочные стали*. Они применяются при температурах до 580<sup>0</sup> С. Технологичны, недороги. Содержат 0,25-0,3 % С и легирующие элементы: хром, молибден, ванадий.

Марки: 12Х1МФ, 25Х2М1Ф.

Критерий жаропрочности:  $\varepsilon = 1\%$  за 104 или 105 часов.

Структура: легированный феррит и равномерно распределенные в нем частицы карбидов (пластинчатой формы). Недопустимые изменения структуры – появление зернистого перлита, рост карбидов, образование графита. Все эти изменения ведут к снижению прочности и развитию ползучести.

Из перлитных жаропрочных сталей изготавливают трубы пароперегревателей, паропроводов и других частей теплоэнергетических установок, а также валы и цельнокованные роторы, плоские пружины, крепеж.

*Мартенситные жаропрочные стали* прочнее и выдерживают температуру до 650<sup>0</sup>С. Это, так называемые, *сильхромы* (например, 40Х10С2М), легированные хромом и кремнием, а также 11Х11Н2В2МФ, 15Х11МФ, 18Х12ВМБФР.

Сильхромы стойки к окислению в парах и топочных газах. Критерий жаропрочности – предел ползучести с допустимой деформацией  $\varepsilon = 0,1\%$  за 104 или  $\varepsilon = 1\%$  за 105 часов. Применяют для клапанов ДВС. Они плохо свариваются и труднее перлитных сталей обрабатываются резанием.

*Аустенитные жаропрочные стали* работают до 700<sup>0</sup> С. Подразделяются на однофазные (12Х18Н10Т), стали с карбидным упрочнением и стали с интерметаллидным упрочнением.

Вдобавок к ползучести, при воздействии высоких температур идет релаксация (снижение) напряжений. Затянутые резьбовые соединения ослабевают, так как идет пластическая деформация, и доля упругой деформации снижается.

## **Тема 10. Материалы для режущих, измерительных и деформирующих инструментов**

### **10.1. Материалы для режущих и измерительных инструментов**

Инструментальные материалы предназначены для изготовления инструментов, применяемых в процессе металлообработки, а также для измерений. Эти материалы подразделяются на инструментальные стали, твердые сплавы и особо твердые материалы.

По назначению инструментальные материалы классифицируются на материалы для режущего, штампового и измерительного инструментов.

Режущий инструмент работает в условиях длительного контакта и трения с обрабатываемым металлом. В процессе эксплуатации должны сохраняться неизменными конфигурация и свойства режущей кромки. Материал для изготовления режущего инструмента должен обладать высокой твердостью (60–62 HRC<sub>3</sub>) и износостойкостью.

Вместе с тем, режущий инструмент должен обладать высокой прочностью и достаточной вязкостью, чтобы сохранять форму режущей кромки и

сопротивляться разрушению при изгибающем (резцы) и крутящем (сверла) моментах и динамических нагрузках.

В процессе резания происходит, нагрев режущей кромки инструмента. Поэтому основным требованием, предъявляемым к инструментальным материалам, является высокая теплостойкость (краснотойкость) — способность сохранять твердость и режущие свойства при длительном нагреве в процессе работы.

По теплостойкости применяемые материалы подразделяются на следующие группы:

- углеродистые и низколегированные стали с теплостойкостью до 200°C (*нетеплостойкие*); среднелегированные стали с теплостойкостью до 400–500°C (*полутеплостойкие*); высоколегированные быстрорежущие стали с теплостойкостью до 600–640°C (*теплостойкие*);
- твердые сплавы с теплостойкостью до 800–1000°C;
- особо твердые материалы с теплостойкостью до 1200°C.

## 10.2 Углеродистые стали

Углеродистые стали применяют для изготовления режущих инструментов, работающих в условиях, не вызывающих нагрева рабочей кромки свыше 150–200°C. Они используются также для штамповых и измерительных инструментов. Основные достоинства углеродистых сталей - получение высокой твердости в поверхностном слое при сохранении вязкой сердцевины. Это в ряде случаев обеспечивает минимальную поводку инструмента и повышение его механических свойств; низкую твердость в отожженном состоянии HB 1800–2000 МПа, позволяющую использовать высокопроизводительные методы изготовления инструмента (накатку, насечку); закалку с низких температур (770–820°C); получение после закалки малых количеств остаточного аустенита, что обеспечивает им повышенное сопротивление пластической деформации; сохранение чистой поверхности при закалке вследствие охлаждения в воде, что упрощает очистку инструментов; низкую стоимость.

Вместе с тем недостатки углеродистых сталей существенно ограничивают область их применения: вследствие низкой теплостойкости - способности сохранять твердость лишь при нагреве до температур, не превышающих 170–200°C.

Меньшая прочность по сравнению с быстрорежущими сталями связана с получением более крупного зерна (8–9 балл) при оптимальных температурах закалки.

Склонность к росту зерна при незначительных перегревах при закалке приводит к понижению механических свойств. Ограниченная технологическая закаливаемость требует применения высоких скоростей охлаждения в перлитном

интервале, что приводит к неоднородной твердости, особенно у инструментов небольшой толщины, а также к большой поводке и термическим трещинам.

Стали нельзя применять для относительно крупных инструментов (диаметром или толщиной больше 30 мм), если они предназначены для работы при повышенных давлениях. Стали склонны к отпуску поверхностных слоев при нагреве во время шлифования и заточки.

Углеродистые инструментальные легко отличаются от конструкционных углеродистых количеством углерода и маркируются иначе. В начале марки стали стоит буква **У**, указывающая на класс стали – инструментальная сталь. Далее стоит цифра, указывающая на содержание углерода в десятых долях процента (от 0,7 до 1,3%). Все стали дублируются и в конце марки стоит буква **А**, что показывает повышенное качество стали с меньшим содержанием серы и фосфора.

### **Назначение инструментальной углеродистой стали**

У7, У7А	Инструменты для обработки дерева - топоры, колуны, стамески, долота; пневматические инструменты небольших размеров - зубила, обжимки, бойки. Слесарно-монтажные инструменты - кусачки, плоскогубцы, острогубцы, молотки, кувалды, отвертки, бородки и др.
У8, У8А	Инструменты для обработки дерева - фрезы, зенковки, цековки, топоры, стамески, долота, продольные и дисковые пилы. Накатные ролики. Плиты и стержни для форм литья под давлением оловянно-свинцовых сплавов. Обжимки, кернеры, бородки, отвертки, плоскогубцы, острогубцы, боковые кусачки
У9, У9А	Инструменты для обработки дерева, слесарно-монтажные инструменты, калибры простой формы и пониженных классов точности
У10, У10А	Столярные пилы ручные и машинные, ручные ножовки, спиральные сверла; слесарные шаберы, напильники, накатные ролики; штампы для холодной штамповки деталей небольших размеров и простой формы; калибры простой формы и пониженных классов точности
У11, У11А	То же, а также ручные метчики, холодновысадочные пуансоны и штампы мелких размеров, калибры простой формы и пониженных классов точности
У12, У12А	То же, а также небольшие пресс-формы для пластмасс
У13, У13А	Инструменты повышенной износостойкости, работающие при умеренных и значительных давлениях без разогрева режущей кромки (напильники, бритвенные ножи, лезвия, острые хирургические инструменты, шаберы, гравировальные инструменты)

Оптимальное содержание углерода определяется особенностями работы инструмента, его формой и технологией изготовления. Если инструмент

подвергается в основном ударным нагрузкам (деревообрабатывающий инструмент, зубила, некоторые штампы), целесообразно применять доэвтектоидные стали с 0,6-0,7% С с трооститной структурой. Для остального режущего инструмента более целесообразна мартенситная структура с избыточными карбидами, образующаяся в заэвтектоидных сталях, содержащих 0,9- 1,3% С. Эти стали имеют высокую твердость и износостойкость и удовлетворительные механические свойства. Сталь эвтектоидного состава (0,8% С) более склонна к росту зерна (перегреву), обладает меньшей стабильностью свойств и в связи с этим находит ограниченное применение.

### 10.3 Быстрорежущие стали

**Быстрорежущие стали** — легированные стали, предназначенные, главным образом, для изготовления металлорежущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания.

Быстрорежущая сталь должна обладать высоким сопротивлением разрушению, твердостью (в холодном и горячем состояниях) и красностойкостью.

Высоким сопротивлением разрушению и твердостью в холодном состоянии обладают и углеродистые инструментальные стали. Однако, инструмент из них не в состоянии обеспечить высокоскоростные режимы резания. Легирование быстрорежущих сталей вольфрамом, молибденом, ванадием и кобальтом обеспечивает горячую твердость и красностойкость стали.

К сталям нормальной теплостойкости относятся вольфрамовые Р18, Р12, Р9 и вольфрамомолибденовые Р6М5, Р6М3, Р8М3. Эти стали имеют твердость в закаленном состоянии 63...66 HRC, предел прочности при изгибе 2900...3400 МПа, ударную вязкость 2,7...4,8 Дж/м<sup>2</sup> и теплостойкость 600...650°С. Указанные марки сталей получили наиболее широкое распространение при изготовлении режущих инструментов.

Они используются при обработке конструкционных сталей, чугунов, цветных металлов, пластмасс. Иногда применяются быстрорежущие стали, дополнительно легированные азотом (Р6АМ5, Р18А и др.). Легирование азотом повышает режущие свойства инструмента на 20...30 %, твердость - на 1- 2 единицы HRC.

Стали повышенной теплостойкости характеризуются повышенным содержанием углерода — 10Р8М3, 10Р6М5; ванадия — Р12Ф3, Р2М3Ф8, Р9Ф5; кобальта — Р18Ф2К5, Р6М5К5, Р9К5, Р9К10, Р9М4К8Ф и др.

Твердость сталей в закаленном состоянии достигает 66...68 HRC, они имеют более высокую теплостойкость (до 620...670°С).

Это дает возможность использовать их для обработки жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, а также конструкционных сталей повышенной прочности и закаленных. Период стойкости инструментов из таких сталей в 3—5 раз выше, чем из сталей Р18, Р6М5.



Стали высокой теплостойкости характеризуются пониженным содержанием углерода, но весьма большим количеством легирующих элементов — В11М7К.23, В14М7К25, 3В20К20Х4Ф. Они имеют твердость 69...70 HRC, и теплостойкость 700...720°С.

Наиболее рациональная область их использования — резание труднообрабатываемых материалов и титановых сплавов. В последнем случае период стойкости инструментов в 30 - 80 раз выше, чем из стали P18, и в 8 - 15 раз выше, чем из твердого сплава ВК8. При резании конструкционных сталей и чугунов период стойкости возрастает менее значительно (в 3 - 8 раз).

Недостатком всех быстрорежущих сталей является высокая стоимость легирующих компонентов. Поэтому, в последнее время, быстрорежущие стали применяются очень ограниченно.

#### 10.4 Спеченные твердые сплавы

**Твердые сплавы** — это твердые и износостойкие металлические материалы, способные сохранять эти свойства при 900—1150°С.

В основном изготавливаются из высокотвердых и тугоплавких материалов на основе карбидов вольфрама, титана, тантала, хрома, связанные кобальтовой металлической связкой, при различном содержании кобальта или никеля.

Различают **спеченные** и **литые твердые сплавы**. Главной особенностью спеченных твердых сплавов является то, что изделия из них получают методами порошковой металлургии и они поддаются только обработке шлифованием или физико-химическим методам обработки (лазер, ультразвук, травление в кислотах и др.), а литые твердые сплавы предназначены для наплавки на оснащаемый инструмент и проходят не только механическую, но часто и термическую обработку (закалка, отжиг, старение и др.).

Порошковые твердые сплавы закрепляются на оснащаемом инструменте методами пайки или механическим закреплением.

Твердые сплавы различают по металлам карбидов, в них присутствующих: вольфрамовые — ВК2, ВК3, ВК3М, ВК4В, ВК6М, ВК6, ВК6В, ВК8, ВК8В, ВК10, ВК15, ВК20, ВК25; титано-вольфрамовые — Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10, Т5К12В; титано-тантало-вольфрамовые — ТТ7К12, ТТ10К8Б. Безвольфрамовые ТНМ20, ТНМ25, ТНМ30. По химическому составу твердые сплавы классифицируют:

- вольфрамокобальтовые твердые сплавы (ВК);
- титановольфрамокобальтовые твердые сплавы (ТК);
- титанотанталовольфрамокобальтовые твердые сплавы (ТТК).

Твердые сплавы по назначению делятся (классификация ИСО) на:

**Р** — для стальных отливок и материалов, при обработке которых образуется сливная стружка;

**М** — для обработки труднообрабатываемых материалов (обычно нержавеющей сталь);

**К** — для обработки чугуна;

**Н** — для обработки алюминия, а также других цветных металлов и их сплавов;

**С** — для обработки жаропрочных сплавов и сплавов на основе титана;

**Н** — для закаленной стали.

Из-за дефицита вольфрама разработана группа безвольфрамовых твердых сплавов, называемых **керметами**. Эти сплавы содержат в своем составе карбиды титана (TiC), карбонитриды титана (TiCN), связанные никельмолибденовой основой. Технология их изготовления аналогична вольфрамосодержащим твердым сплавам.

Эти сплавы по сравнению с вольфрамовыми твердыми сплавами имеют меньшую прочность на изгиб, ударную вязкость, чувствительны к перепаду температур из-за низкой теплопроводности, но имеют преимущества — повышенную теплостойкость (1000°C) и низкую схватываемость с обрабатываемыми материалами, благодаря чему не склонны к наростообразованию при резании. Поэтому их рекомендуют использовать для чистового и получистового точения, фрезерования.

Твердые сплавы изготавливают путем спекания смеси порошков карбидов и кобальта. Порошки предварительно изготавливают методом химического восстановления (1-10 мкм), смешивают в соответствующем соотношении и прессуют под давлением 200—300 кгс/см<sup>2</sup>, а затем спекают в формах, соответствующих размерам готовых пластин, при температуре 1400—1500°C, в защитной атмосфере. Термической обработке твердые сплавы не подвергаются, так как сразу же после изготовления обладают требуемым комплексом основных свойств.

Обозначения марок сплавов построено по следующему принципу:

**1 группа** – сплавы, содержащие карбид вольфрама и кобальт.

Обозначаются буквами ВК, после которых цифрами указывается процентное содержание в сплаве кобальта. К этой группе относятся следующие марки: ВК3, ВК3М, ВК6, ВК6М, ВК60М, ВК6КС, ВК6В, ВК8, ВК8ВК, ВК8В, ВК10КС, ВК15, ВК20, ВК20КС, ВК10ХОМ, ВК4В.

**2 группа** - титановольфрамовые сплавы, имеющие в своем составе карбид титана, карбид вольфрама и кобальт. Обозначается буквами ТК, при этом цифра, стоящая после букв Т обозначает % содержание карбидов титана, а после буквы К - содержание кобальта. К этой группе относятся следующие марки: Т5К10, Т14К8, Т15К6, Т30К4.

**3 группа** — титанотанталовольфрамовые сплавы, имеющие в своем составе карбид титана, тантала и вольфрама, а также кобальт и обозначаются буквами ТТК, при этом цифра, стоящая после ТТ % содержание карбидов титана и тантала, а после буквы К - содержание кобальта. К этой группе относятся следующие марки: ТТ7К12, ТТ20К9.

**4 группа** — сплавы с износостойкими покрытиями. Имеют буквенное обозначение ВП. К этой группе относятся следующие марки: ВП3115 (основа ВК6), ВП3325 (основа ВК8), ВП1255 (основа ТТ7К12).

## **10.5 Сверхтвердые материалы**

**Сверхтвердые материалы (СТМ)** — группа веществ, обладающих высочайшей твердостью, к которой относят материалы, твердость и износостойчивость которых превышает твердость и износостойчивость твердых сплавов на основе карбидов вольфрама и титана с кобальтовой связкой карбидтитановых сплавов на никель-молибденовой связке.

Широко применяемые сверхтвердые материалы: электрокорунд, победит (один из самых твердых), оксид циркония, карбид кремния, карбид бора, боразон, диборид бора, алмаз. СТМ часто применяются в качестве материалов для абразивной обработки.

Делятся сверхтвердые материалы на две группы: композиционные материалы, изготовленные на основе нитрида бора (композиты), и поликристаллические и монокристаллические синтетические алмазы.

Выпускают следующие марки поликристаллических алмазов: АСБ – типа баллас (АСБ-6, АСБ-5, АСБ-5А); АСПК – типа карбонадо (АСПК-3, АСПК-2, АСПК-1); СВ, СВАБ, СВС – тип СВ алмазные спеки, композиция нитрида бора и алмазных порошков.

Поликристаллическое строение алмазов различных марок, позволяет им обладать высокой динамической прочностью и изотропностью механических свойств, что позволяет использовать лезвийный инструмент, оснащенный вставками из алмаза, при обработке труднообрабатываемых и особо прочных материалов.

Монокристаллические алмазы производят двух марок: АСТ и САМ. Из марки САМ изготавливают режущий инструмент для обработки радиотехнической керамики, полупроводниковых материалов, высококремнистых цветных сплавов, марка алмаза АСТ используется для изготовления наконечников измерительных приборов.

## **10.6 Стали для измерительных инструментов**

Измерительный инструмент служит для проверки размеров изготавливаемых деталей. При измерении поверхность инструмента непосредственно соприкасается с поверхностью проверяемой детали и изнашивается. Поэтому поверхность измерительного инструмента должна быть твердой и износостойкой для сохранения размеров и формы в процессе работы. Для измерительного инструмента (особенно высоких классов точности) большое значение имеет сохранение постоянства линейных размеров и формы закаленного инструмента в течение длительного времени.

Калибры и плитки высоких классов точности изготавливают из сталей X, ХВГ, калибры простой формы и пониженных классов точности — из сталей У10А, У11А, У12А, 11Х; лекала сложной формы — из стали Х; плоские скобы, угольники и шаблоны — из сталей 15, 20, 15Х, 20Х; плоские линейки, угольники — из сталей 50, 50Х, 55; инструменты, стойкие против коррозии, — из стали 40Х13. Стали для измерительного инструмента Стали для измерительного инструмента должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, небольшим коэффициентом теплового расширения и сохранять постоянство размеров.

### **10.7 Стали для инструментов холодной обработки давлением**

Основные свойства, которыми должны обладать стали для штампов и других инструментов холодной обработки давлением, - высокие твердость, износостойкость, прочность, сочетающиеся с удовлетворительной вязкостью.

При больших скоростях деформирования, вызывающих разогрев рабочей кромки инструментов до 450°С, от сталей требуется достаточная теплостойкость. Для штампов со сложной гравюрой важно обеспечить минимальные объемные изменения при закалке. В связи с разнообразием условий деформирования, формы и размеров штампов применяют различные стали. Низколегированные стали X, 9ХС, ХВГ, ХВСГ, также, как и углеродистые У10, У И, У12, используют преимущественно для вытяжных и высадочных штампов, которые из-за несквозной прокаливаемости имеют твердый износостойкий слой и вязкую сердцевину, позволяющую работать при небольших ударных нагрузках.

Вытяжные штампы, подвергающиеся интенсивному износу без динамических нагрузок, после неполной закалки отпускают при 150-180°С на твердость HRC 58-61. Высадочные штампы и пуансоны, работающие с ударными нагрузками, подвергают отпуску при 275-325°С на твердость рабочей части HRC 52-54.

Высокохромистые стали X12, X12М, X12Ф1 обладают высокой износостойкостью и глубокой прокаливаемостью (150-200 мм и более). Их широко применяют для изготовления крупных инструментов сложной формы: **вырубных, обрезных, чеканочных штампов повышенной точности, штампов выдавливания, калибровочных волочильных досок, накатных роликов и др.** Эти стали близки к быстрорежущим: по структуре после отжига относятся к ледебуритному классу, после нормализации к мартенситному. Их высокая износостойкость обусловлена большим количеством карбидов СГ7С3, сохраняющихся в структуре после закалки. Вместе с тем большое количество карбидной фазы (примерно 15-17% у сталей X12М и X12Ф1 и около 30% у стали X12) приводит к повышенной карбидной неоднородности, вызывающей снижение прочности и вязкости. Наиболее сильно этот недостаток выражен у стали X12. По этой причине чаще применяют стали X12М и X12Ф1.

Стали X12Ф1 и X12М обрабатывают как на первичную, так и на вторичную твердость. На первичную твердость их закаливают с более низких температур, когда количество остаточного аустенита невелико, затем подвергают низкому отпуску (150-170°C), сохраняющему высокую твердость (HRC 61-63). Такой режим обеспечивает наибольшую прочность при низкой теплостойкости и применяется для большинства штампов и накатных роликов.

Сталь X6ВФ содержит меньше углерода и хрома и обладает меньшей карбидной неоднородностью, чем высокохромистые стали. Поэтому она превосходит их по прочности (в среднем на 500 МПа) и вязкости (почти в 2 раза), более пригодна для штампов с тонкой гравюрой и резьбонакатных роликов. При закалке сталь X6ВФ более склонна к росту зерна, поэтому обрабатывается только на первичную твердость.

Хромосилицистые стали 4ХС, 6ХС и дополнительно легированные вольфрамом (2,0-2,7%) 4ХВ2С, 5ХВ2С, 6ХВ2С образуют группу сталей повышенной вязкости, используемых для изготовления инструментов, подвергающихся ударам (зубила, гибочные штампы, обжимные матрицы и др.). Повышение вязкости сталей достигается снижением содержания углерода (до 0,4-0,6%) и увеличением температуры отпуска. Стали 4ХС и 6ХС отпускают на твердость HRC 52-55 при температуре 240-270°C, которая несколько ниже температуры проявления отпускной хрупкости первого рода.

Стали с вольфрамом, нечувствительные к отпускной хрупкости второго рода, подвергают отпуску в более широком интервале температур: при 200-250°C (HRC 53-58) или при 430-470°C (HRC 45-50). Эти стали благодаря сохранению более мелкого зерна имеют несколько большую вязкость и предназначены для инструментов, работающих с повышенными ударными нагрузками.

### **10.8 Стали для инструментов горячей обработки давлением.**

Стали для штампов горячей обработки давлением работают в тяжелых условиях, испытывая интенсивное ударное нагружение, периодический нагрев и охлаждение поверхности. От них требуется сложный комплекс эксплуатационных и технологических свойств. Кроме достаточной прочности, износостойкости, вязкости и прокаливаемости (для крупных штампов) эти стали должны обладать также теплостойкостью, окалиностойкостью и разгаростойкостью. Под разгаростойкостью понимают устойчивость к образованию поверхностных трещин, вызываемых объемными изменениями в поверхностном слое при резкой смене температур. Это свойство обеспечивается снижением содержания углерода в стали, которое сопровождается повышением пластичности, вязкости, а также теплопроводности, уменьшающей разогрев поверхностного слоя и термические напряжения в нем.

В соответствии с указанными требованиями для штампов горячей обработки давлением применяют легированные стали, содержащие 0,3-0,6% С, которые после закалки подвергают отпуску при 550 - 680°C на структуру

троостита или троосто-сорбита. Среди них следует выделить несколько групп, обладающих в наибольшей степени теми свойствами, которые необходимы для определенных условий эксплуатации.

*Стали для молотовых штампов, стали для штампов горизонтально-ковочных машин и прессов:*

**Стали для молотовых штампов.** Молотовые штампы имеют большие размеры, работают с ударными нагрузками при относительно невысоком нагреве поверхности (400-500°C). Для изготовления этих штампов используют низколегированные стали высокой прокаливаемости с повышенной ударной вязкостью и разгаростойкостью. Среди легирующих элементов они содержат молибден или вольфрам, необходимые для предупреждения отпускной хрупкости второго рода, которую в больших сечениях нельзя устранить быстрым охлаждением.

Сталь 5ХНМ-лучшая в этой группе. Из-за высокой прокаливаемости ее применяют для изготовления крупных (наибольшая сторона призматических заготовок 400-500 мм) штампов сложной формы. После закалки и отпуска при 550°C ее предел прочности при температуре 20°C составляет  $\sigma_B = 1200 - 1300$  МПа. Сталь сохраняет достаточно высокий предел прочности  $\sigma_B = 900$  МПа до температуры 500°C.

Стали 5ХГМ и 5ХНВС при одинаковой со сталью 5ХНМ прокаливаемостью уступают ей в вязкости. Они предназначены для средних штампов (наибольшая сторона заготовок 300 - 400 мм) или для более крупных (сталь 5ХНВС) простой формы.

*Стали для штампов горизонтальноковочных машин и прессов.*

Штампы горячей высадки, протяжки и прессования испытывают при работе высокие давления без больших ударных нагрузок, имеют меньшие размеры, чем молотовые штампы, но нагреваются до более высоких температур. Для сталей этого назначения наиболее важные свойства - теплостойкость и разгаростойкость. При тяжелых условиях работы применяют комплексно-легированные стали: 3Х2В8Ф, 4Х2В5МФ, 4Х5В2ФС и др., которые по составу и видам превращений при термической обработке сходны с быстрорежущими сталями. В отличие от последних они содержат меньше избыточных карбидов типа  $Mn_3C$  и  $MgC$  и являются азвтектоидными. Для повышения теплостойкости их закаливают с высоких температур (1025-1125°C). Отпуск в интервале температур 500-580°C вызывает, как и в быстрорежущих сталях, дисперсионное твердение мартенсита и явление вторичной твердости.

Для повышения вязкости отпуск ведут при более высоких температурах (600-650°C) на структуру троостита и твердость HRC 45 - 50. При такой твердости стали имеют предел прочности  $\sigma_B = 1500 - 1800$  МПа; предел текучести  $\sigma_{0,2} = 1350 - 1650$  МПа.

Стали 3Х2В8Ф, 4Х2В5МФ с высоким содержанием вольфрама характеризуются повышенной теплостойкостью. Они сохраняют твердость HRC 45 и предел текучести около 1000 МПа до температуры 650 - 670°С. Стали предназначены для изготовления тяжело нагруженных инструментов, работающих с разогревом поверхности до 700°С.

Стали 4Х5МФС, 4Х5В2ФС, 4Х4ВМФС с небольшими добавками вольфрама (молибдена) отличаются повышенной разгаростойкостью благодаря более высокой вязкости. Они теплостойки до 600°С. Хром (4-5%) придает им хорошую окалиностойкость и повышенную износостойкость при нагреве. Эти стали предназначены для изготовления инструментов с высокой устойчивостью к резкой смене температур, в частности для инструментов высокоскоростной штамповки.

Рассмотренные стали используют также для изготовления прессформ литья под давлением, работающих в тяжелых условиях, связанных с периодическим нагревом и охлаждением поверхности и воздействием расплавленного металла. Для изготовления прессформ для литья медных сплавов при температуре около 1000°С применяют стали повышенной теплостойкости; для литья алюминиевых и магниевых сплавов при температуре около 500 - 650°С применяют стали повышенной разгаростойкости. В последнее время для изготовления пресс-форм применяют также мартенситно-старяющие стали.

Для пресс-форм, менее нагруженных в тепловом отношении, используют стали 4ХВ2С, Х12, 7Х3, 8Х3, коррозионно-стойкую сталь 30Х13, конструкционные стали 40Х, 30ХГС и др. Для повышения работоспособности пресс-формы и штампы подвергают азотированию, нитро цементации или хромированию. Азотирование повышает в 4 - 5 раз устойчивость стали против коррозионного действия жидких алюминиевых сплавов. Для этого на деталях пресс-форм из сталей 3Х2В8Ф и 4Х5В2ФС рекомендуется формировать азотированный слой толщиной около 0,2 мм.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов Б.Н. Конструкционные материалы. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1990 - 687 с.
2. Материаловедение и технология металлов: Учебник для ВУЗов по машиностроительным специальностям / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. – М.: Высшая школа, 2000 – 637с.
3. Материаловедение: Учебник для ВУЗов, обучающихся по направлению подготовки и специализации в области техники и технологии / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др. – 5-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003 – 646с.
4. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1983 – 360с.
5. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986 – 544с.
6. Калачев Б.А., Ливанов Б.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2005 – 256с.
7. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.Н. Материаловедение. Учебник для ВУЗов технич. спец. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1990 – 528с.
8. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных ВУЗов / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др.; Под общ. ред. А.М. Дальского. – 5-е изд., испр. – М. Машиностроение, 2003. - 511с.: ил.
9. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Учебник для ВУЗов / Ю.П. Солнцев, В.А. Веселов, В.П. Демьянцевич, А.В. Кузин, Д.И. Чашников. – 2-е изд., перер., доп. – М. МИСИС, 1996. – 576с.
10. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для студентов электротехнических и электромеханических спец. ВУЗов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М. Высшая школа, 2004. – 518с.