

Министерство образования и науки Российской Федерации  
**Нижекамский химико-технологический институт (филиал)**  
федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения  
высшего образования «Казанский национальный исследовательский  
технологический университет»

**И.А. Сабанаев**

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ студентов МАХП

**Нижекамск  
2017**

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

1. Общие сведения о материалах и материаловедении	3
2. Строение и свойства металлов и сплавов	6
3. Обработка металлов и сплавов	36
4. Черные и цветные металлы	56
5. Неметаллические и электротехнические материалы	95
Список использованной литературы	108

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАТЕРИАЛАХ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

В этом параграфе рассматриваются:

- предмет и задачи дисциплины, его значение;
- из истории материаловедения;
- структура дисциплины;
- классификация материалов;
- область применения материалов;
- литература для изучения дисциплины.

### Предмет и цели изучения курса

Эффективная работа оборудования во многом зависит от материала, из которого оно изготовлено. Стоимость материала в оборудовании составляет значительную часть от всей стоимости. Надежность и эффективность работы оборудования определяют свойства материала. К наиболее важным свойствам материалов относят его прочностные характеристики, теплофизические и электрические свойства, коррозионную стойкость, технологические характеристики. Свойства материала определяются его строением и составом.

Материалом называется вещество, обладающее необходимым комплексом свойств для выполнения заданной функции отдельно и/или в совокупности с другими веществами.

Материаловедение – это раздел научного знания, посвященный свойствам веществ и их направленному изменению с целью получения материалов с заранее заданными рабочими характеристиками, опирающийся на фундаментальную базу всех разделов физики, химии, механики и смежных дисциплин и включающий теоретические основы современных наукоемких технологий получения, обработки и применения материалов. Основу материаловедения составляет знание о процессах, протекающих в материалах под воздействием различных факторов, об их влиянии на комплекс свойств материала, о способах контроля и/или управления ими.

Целью изучения курса «Материаловедение» является знакомство с материалами, применяемыми в машиностроении и химической технологии, а также с методами их исследования и обработки.

Успешное освоение курса материаловедения необходимо для изучения в дальнейшем таких дисциплин как технология конструкционных материалов, сопротивление материалов, детали машин, а также курсового и дипломного проектирования.

### Из истории материаловедения

Приоритет в создании научных основ металловедения по праву принадлежит Чернову Д.К., который установил критические температуры фазовых превращений в сталях и их связь с количеством углерода в сталях. Этим были заложены основы для важнейшей в металловедении диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов.

Открытием аллотропических превращений в стали, Чернов заложил фундамент термической обработки стали. Критические точки в стали, позволили рационально выбирать температуру ее закалки, отпуска и пластической деформации в производственных условиях.

В своих работах по кристаллизации стали, и строению слитка Чернов изложил основные положения теории литья, не утратившие своего научного и практического значения в настоящее время.

Великий русский металлург Аносов П.П. впервые применил микроскоп для исследования структуры металлов. Ему принадлежит приоритет в создании легированных сталей. Он же разработал теорию и технологию изготовления клинков из булатной стали. Из его работ стало ясно, что так называемый булатный узор на поверхности стали, непосредственно зависит от ее внутренней структуры.

В 1873-1876 г.г Гиббс изложил основные законы фазового равновесия и, в частности, правило фаз, основываясь на законах термодинамики. Для решения практических задач знание фазового равновесия в той или иной системе необходимо, но не достаточно для определения состава и относительного количества фаз. Кроме этого, нужно обязательно знать структуру сплавов, то есть атомное строение фаз, составляющих сплав, а также распределение, размер и форму кристаллов каждой фазы.

Определение атомного строения фаз стало возможным после открытия Лауэ (1912 г), показавшего, что атомы в кристалле регулярно заполняют пространство, образуя пространственную дифракционную решетку, и что рентгеновские лучи имеют волновую природу. Дифракция рентгеновских лучей на такой решетке дает возможность исследовать строение кристаллов.

В последнее время для структурного анализа, кроме рентгеновских лучей, используют электроны и нейтроны. Соответствующие методы исследования называются электронографией и нейтронографией. Электронная оптика позволила усовершенствовать микроскопию. В настоящее время на электронных микроскопах полезное максимальное увеличение доведено до 100000 раз.

В пятидесятых годах XX века, когда началось исследование природы свойств металлических материалов, было показано, что

большинство наиболее важных свойств, в том числе сопротивление пластической деформации и разрушению в различных условиях нагружения, зависит от особенностей тонкого кристаллического строения. Этот вывод способствовал привлечению физических теорий о строении реальных металлов для объяснения многих непонятных явлений и для конструирования сплавов с заданными механическими свойствами. Благодаря теории дислокаций, удалось получить достоверные сведения об изменениях в металлах при их пластической деформации.

Особенно интенсивно развивается металловедение в последние десятилетия. Это объясняется потребностью в новых материалах для исследования космоса, развития электроники, атомной энергетики.

### Структура курса

Программа изучения предмета предполагает освоение нескольких тем:

- общие сведения о материалах и материаловедении;
- строение и свойства металлов и сплавов;
- обработка металлов и сплавов;
- черные и цветные металлы;
- неметаллические и электротехнические материалы.

### Учебная литература

Список учебной литературы, которая будет полезна при изучении дисциплины приводится в конце пособия в разделе «Список используемой литературы».

## 2. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### 2.1. Механические свойства конструкционных материалов

Механические свойства конструкционных материалов определяют путем испытания их на растяжение или сжатие, а также проведением испытаний с целью определения их твердости.

#### 2.1.1. Испытания на растяжение

Для испытаний готовят стандартные образцы стандартной длины и стандартного сечения. Можно применять образцы круглой и прямоугольной формы сечения. Образец зажимается в захватах разрывной машины и подвергается растяжению до полного разрушения. Результаты испытаний отражаются на машинной диаграмме, которую автоматически вырисовывает разрывная машина.

Машинная диаграмма представляет собой график зависимости требуемого усилия  $P$  от величины возникающего удлинения стержня  $\Delta\ell$ . Таким образом, машинная диаграмма строится в координатах “растягивающее усилие – удлинение”. Далее машинную диаграмму вручную нужно перестроить в координатах “напряжение – относительная деформация”. С этой целью координаты характерных точек машинной диаграммы (точки перегибов) пересчитывают для новых координат - “напряжение – относительная деформация”.

**Напряжение  $\sigma$**  есть отношение растягивающего усилия  $P$  к площади сечения образца  $F$ , а относительное удлинение образца  $\varepsilon$  есть отношение абсолютного удлинения  $\Delta\ell$  к начальной длине  $\ell_0$ , выраженное в процентах:

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad \varepsilon = \frac{\Delta\ell}{\ell_0} \cdot 100\%$$

Из формул следует, что единицей измерения напряжения является Па:  $1\text{Па} = 1\text{ Н} / \text{м}^2$ .  $1\text{ МПа} = 10^6\text{ Па}$ . Единица измерения напряжения совпадает с единицей измерения величины давления. Это не простое совпадение. Напряжение можно рассматривать как давление, возникающее внутри материала, давление одной внутренней частицы на соседнюю. Очевидно, что увеличение нагрузки приводит к росту напряжений. Но рост напряжений не может быть бесконечным. Если напряжения достигают своего предельного значения, которое у материалов с разной прочностью различно, то произойдет разрушение.

В результате испытания на разрыв для пластичных и хрупких материалов получаются свои характерные диаграммы. Они показаны на рис. 1: а – для пластичных, б – для хрупких материалов.

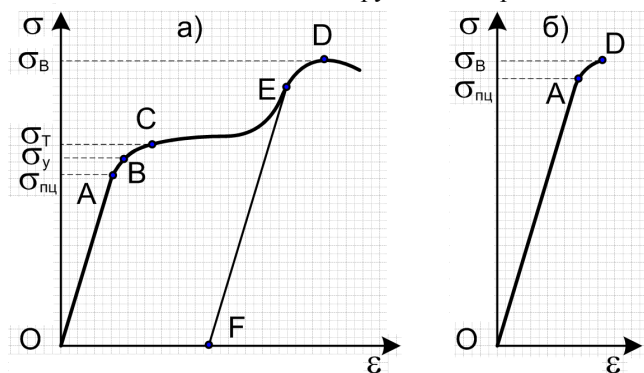


Рис. 1. Диаграммы растяжения пластичного и хрупкого материалов

Точка А – это точка, до которой диаграмма практически прямая линия. До нее зависимость напряжения от деформации – линейна: напряжения прямо пропорциональны деформациям. Наличие прямолинейного участка на диаграмме растяжения характерно почти для всех материалов и носит название закона Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Коэффициент пропорциональности  $E$  называется **модулем упругости** материала. Модуль упругости для каждого материала имеет свое значение.

Записав закон Гука в таком виде:

$$\varepsilon = \sigma / E,$$

можно выяснить физический смысл модуля упругости.

При постоянном напряжении (нагрузке) чем больше модуль упругости материала  $E$ , тем меньше деформация, т.е. он является характеристикой жесткости материала.

Графически закон Гука изображается прямой, проходящей через начало координат. График подъема тем круче, чем больше модуль упругости материала. Например, модуль упругости для стали выше, чем для алюминия, а для алюминия выше, чем для дерева. Поэтому для стали прямолинейный участок диаграммы круче, чем для алюминия, а для алюминия круче, чем для дерева.

Следующая характерная точка диаграммы – это точка В. Если нагружение прервать до достижения этой точки, то разгрузка произойдет по той же линии, по которой происходило нагружение. В результате диаграмма вернется в начало координат. Деформация после снятия нагрузки обнуляется – остаточные деформации не возникают.

Точка С на диаграмме интересна тем, что она находится в самом начале горизонтального участка диаграммы. Этот участок диаграммы называют **площадкой текучести**. По достижению этой точки начинается явление, которое называется течением материала. Машина продолжает растягивать, образец удлиняется, а растягивающее усилие при этом не изменяется. В материале развиваются значительные пластические деформации при постоянной нагрузке. За т. С в любой части диаграммы образец будет содержать остаточные деформации. Если процесс нагружения остановить за т. С, например в т. Е, то разгрузка произойдет по линии ЕF, которая параллельна линии нагружения ОА. В результате диаграмма не вернется в начало координат. Напряжения упадут до нуля, а деформация останется – отрезок ОF. Чем длиннее площадка текучести, тем больше будет остаточная деформация. Самым важным моментом здесь можно считать то, что по достижению т. С образец потерял способность к упругому сопротивлению, что для пластичных материалов равносильно разрушению.

При продолжении деформации площадка текучести завершается и кривая движется к т. D. Это самая высокая точка диаграммы. За ней график напряжения начинает убывать. Снижение напряжения объясняется образованием в образце так называемой шейки. После достижения т. D, в образце образуется местное сужение или **шейка**. Площадь сечения шейки меньше площади остальной части образца и поэтому требуется меньшей силы для растяжения всего образца в целом.

Диаграмма обрывается в момент полного разрушения образца – разделения его на две части.

Точки А, В, С и D – это важнейшие точки, которым соответствуют определенные напряжения по шкале  $\sigma$ . Эти напряжения соответствуют механическими характеристиками данного материала.

Точке А соответствует характеристика, называемая **пределом пропорциональности** материала  $\sigma_{пц}$ . Предел пропорциональности – это напряжение, до которого деформации, возникающие в материале прямо пропорциональны приложенному растягивающему усилию, т.е. выполняется закон Гука.

Точке В соответствует характеристика, называемая **пределом упругости материала**  $\sigma_y$ . Предел упругости – это напряжение, до которого в материале возникают только упругие деформации.

Точке С соответствует характеристика, называемая **пределом текучести** материала  $\sigma_m$ . Предел текучести – это напряжение, при котором деформации растут при постоянной нагрузке.

Точке D соответствует характеристика, называемая **пределом прочности** материала  $\sigma_b$ , или **временным сопротивлением разрыву**. Предел прочности – это максимальное напряжение, которое может возникнуть в материале. Поднять напряжение в материале выше предела прочности никак не получится: деталь просто разрушится.

Можно выделить еще одну важную характеристику материала, называемую **относительным удлинением при разрыве**  $\delta_{разр}$ .

Она рассчитывается по формуле:

$$\delta_{разр} = \frac{\Delta l_{разр}}{l_0} \cdot 100 \% = \frac{l_{разр} - l_0}{l_0} \cdot 100 \%$$

Относительное удлинение при разрыве представляет собой полную продольную деформацию разрушенного образца. При его вычислении за конечную длину принимают длину образца после разрыва, соединив две части бывшего одного целого. Относительное удлинение при разрыве характеризует степень пластичности материала. Чем оно больше, тем выше пластичность материала.

Принято считать, что если  $\delta_{разр}$  больше 5%, то материал является пластичным. В противном случае, материал считают хрупким.

На рис. 1 б показана диаграмма растяжения хрупкого материала. Эта диаграмма не имеет площадки текучести – хрупкие материалы не способны испытывать пластическую деформацию.

### 2.1.2. Способы определения твердости

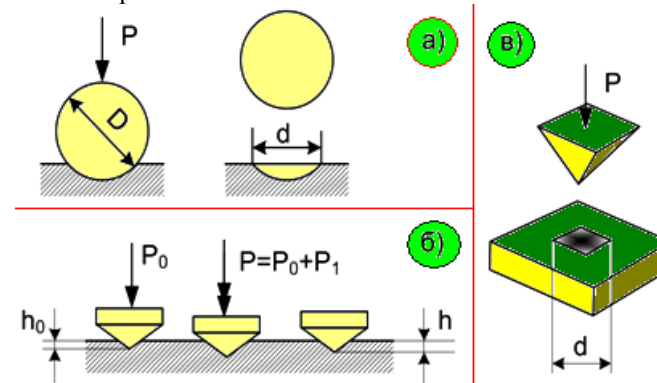
**Твердость** – это сопротивление материала проникновению в его поверхность стандартного тела (**индентора**), не деформирующегося при испытании.

Испытание проводится на специальной машине, называемой твердомером. Широкое распространение твердомеров объясняется тем, что для проведения испытания не требуются специальные образцы.

О твердости материала судят либо по глубине проникновения индентора (метод Роквелла) в образец, либо по величине отпечатка от вдавливания (методы Бринелля, Виккерса, микротвердости).

Во всех случаях происходит пластическая деформация материала. Чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем выше твердость.

Наибольшее распространение получили методы Бринелля, Роквелла, Виккерса и микротвердости. Схемы испытаний представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Схемы получения отпечатков индентора при определении твердости: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

### 2.1.3. Твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012)

Испытание проводят на твердомере Бринелля.

В качестве индентора используется стальной закаленный шарик диаметром  $D = 2,5; 5$  или  $10$  мм, в зависимости от толщины изделия (рис. 2. а).

Нагрузка  $P$  зависит от диаметра шарика и измеряемой твердости: для термически обработанной стали и чугуна –  $P = 30 D^2$ , литой бронзы и латуни –  $P = 10 D^2$ , алюминия и других очень мягких металлов –  $P = 2,5 D^2$ . Продолжительность выдержки: для стали и чугуна –  $10$  с, для латуни и бронзы –  $30$  с. Полученный отпечаток измеряется при помощи лупы Бринелля. Твердость определяется как отношение приложенной нагрузки  $P$  к сферической поверхности отпечатка  $F$ :

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

Стандартными условиями являются  $D = 10$  мм;  $P = 3000$  кгс;  $t = 10$  с. В этом случае твердость по Бринеллю обозначается HB 250, в других случаях указываются условия: HB 5/ 250 /30 – 80.

#### 2.1.4. Метод Роквелла (ГОСТ 9013)

Метод основан на вдавлении в поверхность наконечника под определенной нагрузкой.

Индентор для мягких материалов (до HB 230) – стальной шарик диаметром  $1/16''$  ( $\varnothing 1,6$  мм), для более твердых материалов – конус алмазный (рис. 2 б).

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

В зависимости от природы материала используют три шкалы твердости (табл. 2.1)

Таблица 1. Шкалы для определения твердости по Роквеллу

Шкала	Обозначение	Индентор	Нагрузка, кгс		исследуемый материал
			$P_0$	$P_1$	
A	HRA	алмазный конус	10	50	особо твердый
B	HRB	шарик стальной закаленный	10	90	относительно мягкий
C	HRC	алмазный конус	10	140	относительно твердый

#### 2.1.5. Метод Виккерса

Твердость определяется по величине отпечатка. В качестве индентора используется алмазная четырехгранная пирамида (рис. 2.2. в) с углом при вершине  $136^\circ$ . Твердость рассчитывается как отношение приложенной нагрузки  $P$  к площади поверхности отпечатка площадью  $F$ :

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

Нагрузка  $P$  составляет 5...100 кгс. Диагональ отпечатка  $d$  измеряется при помощи микроскопа, установленного на приборе.

Преимущество метода Виккерса состоит в том, что можно измерять твердость любых материалов, а также тонкие изделия, поверхностные слои; он имеет высокую точность и чувствительность.

#### 2.1.6. Способ определения микротвердости

Измерение микротвердости используется для определения твердости отдельных структурных составляющих и фаз сплава (практически зерен или групп зерен) или очень тонких поверхностных слоев (сотые доли миллиметра).

Метод аналогичен способу Виккерса. Индентор – пирамида меньших размеров, нагрузки при вдавлении  $P$  составляют 5...500 гс. Расчет значения твердости проводится по той же формуле:

$$H_{200} = 1,8544 \frac{P}{d^2}$$

Формула метода совпадает с формулой способа Виккерса. Индекс под обозначением твердости означает нагрузку в гс, например  $H_{200}$  – твердость, измеренная при нагрузке 200 гс.

#### 2.1.7. Динамический метод (метод Шора)

Шарик сбрасывают на поверхность с заданной высоты, он отскакивает вверх на некоторую меньшую высоту. Чем больше величина отскока, тем тверже материал.

В современных электронных приборах для определения твердости динамическим способом стальной шарик отстреливается пружинкой с небольшого расстояния в сторону поверхности образца, для которого измеряется твердость и, далее с помощью электронного датчика фиксируется скорость отскока шарика от поверхности. Чем выше твердость, тем больше скорость отскока шарика.

#### 2.1.8. Способы оценки ударной вязкости

В результате проведения динамических испытаний на ударный изгиб специальных образцов с надрезом (ГОСТ 9454) оценивается вязкость материалов и устанавливается их склонность к переходу из вязкого состояния в хрупкое (рис. 3).

**Вязкость** – способность материала поглощать механическую энергию внешних сил за счет пластической деформации.

Вязкость является энергетической характеристикой материала, выражается в единицах работы. Вязкость металлов и сплавов

определяется их химическим составом, термической обработкой и другими внутренними факторами.

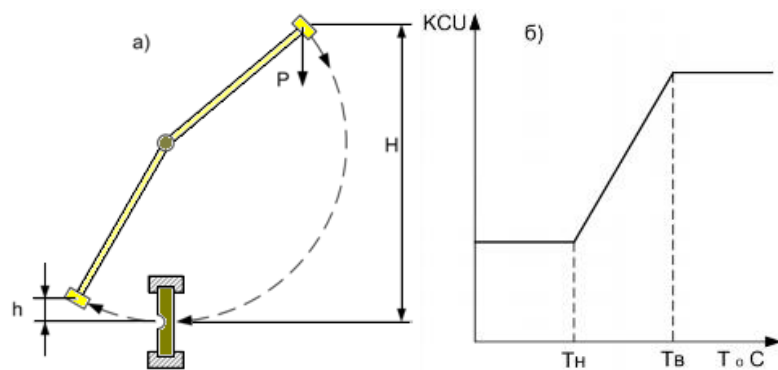
**Ударная вязкость** характеризует надежность материала, его способность сопротивляться хрупкому разрушению.

Испытание проводят на образцах с надрезами определенной формы и размеров. Образец устанавливают на опорах маятничкового копра надрезом в сторону, противоположную удару ножа маятника, который поднимают на определенную высоту (рис. 3.)

На разрушение образца затрачивается работа:

$$A = P \cdot (H - h)$$

где: P – вес маятника, H – высота подъема маятника до удара, h – высота подъема маятника после удара.



**Рис. 3.** Схема испытания на ударную вязкость: а – схема маятничкового копра; б – зависимость вязкости от температуры

Ударная вязкость ( $a_H$ ) численно равна удельной работе разрушения:

$$a_H = \frac{A}{F_0} = \frac{P \cdot (H - h)}{F_0}$$

где  $F_0$  - площадь поперечного сечения в месте надреза.

Согласно ГОСТ 9454 – 78 ударную вязкость обозначает KCV, KCU, KCT; где КС – символ ударной вязкости, третий символ показывает вид надреза:

- острый (V),

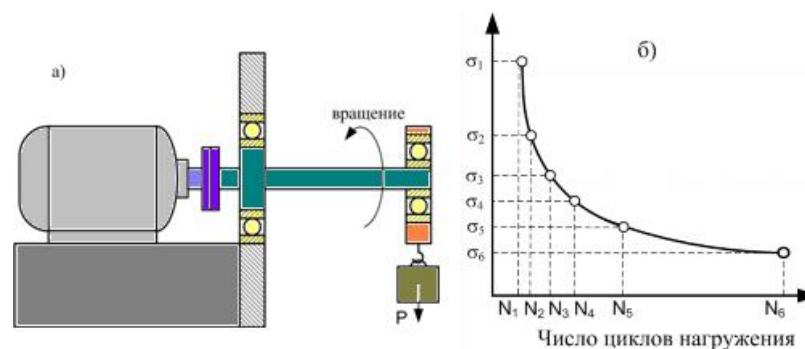
- с радиусом закругления (U),
- трещина (Т).

Для оценки склонности металла к хладоломкости и определения критических порогов хладоломкости испытывают серию образцов при различных температурах и строят кривые ударная вязкость – температура ( $a_H - T$ ) (рис. 3 б), определяя пороги хладоломкости.

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

### 2.1.9. Характеристики усталостной прочности

Характеристики усталостной прочности определяются при циклических испытаниях “изгиб при вращении”. Схема представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Испытания на выносливость: а) схема испытания, б) кривая усталости

Образец из испытываемого материала вращается вокруг своей оси. На правом конце образца с помощью подшипника подвешен груз весом P. Образец деформируется так, что растягиваются его верхние волокна и сжимаются нижние. Из-за вращения каждые пол-оборота волокна меняются местами.

Вращение с постоянной изгибающей нагрузкой равносильно регулярному перегибанию образца то вниз, то вверх. В результате

напряжения в волокнах изменяются во времени по циклическому закону (синусоиде).

По такой схеме проводится ряд испытаний с различным весом груза. Каждое испытание завершается разрушением образца. При этом фиксируется число циклов, которые при данном грузе привели к разрушению. По полученным данным вычисляются разрушающие напряжения и строится кривая усталости. Из кривой видно, что с уменьшением нагрузки (напряжения) число циклов, которые предшествовали разрушению увеличивается.

Основные характеристики

**Предел выносливости**  $\sigma_{-1}$  – максимальное напряжение, выдерживаемое материалом за произвольно большое (бесконечное) число циклов нагружения  $N$ .

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

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

## 2.2. Технологические свойства

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

### 2.2.1. Литейные свойства

Характеризуют способность материала к получению из него качественных отливок.

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

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

**Ликвация** – неоднородность химического состава по объему.

### 2.2.2. Способность материала к обработке давлением

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

Листовой материал испытывают на перегиб и вытяжку сферической лунки. Проволоку испытывают на перегиб, скручивание, на навивание. Трубы испытывают на раздачу, сплющивание до определенной высоты и изгиб.

Критерием годности материала является отсутствие дефектов после испытания.

### 2.2.3. Свариваемость

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

### 2.2.4. Способность к обработке резанием

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

## 2.3. Эксплуатационные свойства

Эксплуатационные свойства характеризуют способность материала работать в конкретных условиях.

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

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

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

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

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

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

Эти свойства определяются специальными испытаниями в зависимости от условий работы изделий.

При выборе материала для создания конструкции необходимо полностью учитывать механические, технологические и эксплуатационные свойства.

## 2.4. Кристаллическое строение материалов

### 2.4.1. Макроструктура материалов

Все материалы, применяемые при изготовлении химико-технологического оборудования можно разделить на 2 группы:



аморфные материалы, имеющие кристаллическое строение. Аморфные материалы (стекло, пластмассы, каучук и др.) характеризуются соединением атомов с помощью ковалентной связи. Особенностью аморфных материалов является то, что при повышении температуры материал сначала размягчается. Дальнейший нагрев приводит к большей степени размягчения и постепенному плавлению. Такие особенности объясняются отсутствием у них жесткого каркаса из упорядоченных атомов или ионов.

Вторая группа материалов характеризуется наличием в их строении **кристаллической решетки**. Решетка образована ионами материала, потерявшими свои внешние электроны. Ионы жестко удерживаются каждый на своем месте за счет сил отталкивания, возникающими между положительно заряженными частицами и электронным газом, образованным сошедшими с орбиты и обобществленными внешними электронами. Ионы в узлах решетки крепко зафиксированы и могут совершать только колебательные движения.

Такой тип связи элементов в материале называют **металлической связью**. Она характерна для металлов. Металлы характеризуются рядом специфических свойств. Металлы обладают высокой **теплопроводностью**. Распространение тепла в них происходит значительно быстрее, чем у неметаллов. Металлы обладают высокой **электропроводностью**. Именно это свойство обусловило применение медных и алюминиевых проводов в электроэнергетике. Металлы обладают свойством **термоэлектронной эмиссии**. Эта способность металлов используется в электронно-лучевых трубках телевизоров и мониторов. Весь перечисленный набор свойств объясняется имеющим огромным количеством практически свободных электронов, которые легко перемещаются в материале между узлами кристаллической решетки. Свободное перемещение электронов обеспечивает высокую тепло- и электропроводность. При повышенном нагреве электроны могут покидать пределы материала, что называется термоэлектронной эмиссией.

При изучении кристаллического строения материалов можно выделить 2 уровня исследования: микроструктурный анализ и макроструктурный анализ. На макроструктурном уровне выделяют крупные образования частиц материала в виде **зерен**. Для исследования зернистой структуры материала используют оптические микроскопы с небольшим увеличением. Исследование проводят на специальных образцах, которые называются **макрошлифами**. Под микроскопом можно увидеть каждое отдельное зерно материала,

измерить его размеры, определить пространственную ориентацию. Зерна образуются при кристаллизации расплава материала в результате снижения температуры. Первоначально в жидкой фазе выделяются центры кристаллизации, вокруг которых в первую очередь начинает застывать материал. Такие центры распределяются в веществе произвольно, случайным образом. Часто в качестве центров кристаллизации выступают инородные включения – частицы другого материала.

Кристаллы, образующиеся в процессе затвердевания металла, могут иметь различную форму в зависимости от скорости охлаждения, количества и состава примесей. Чаще всего образуются древовидные структуры, которые называются **дендритами**. При кристаллизации первоначально образуются длинные ветви кристаллического дерева (рис. 5.).

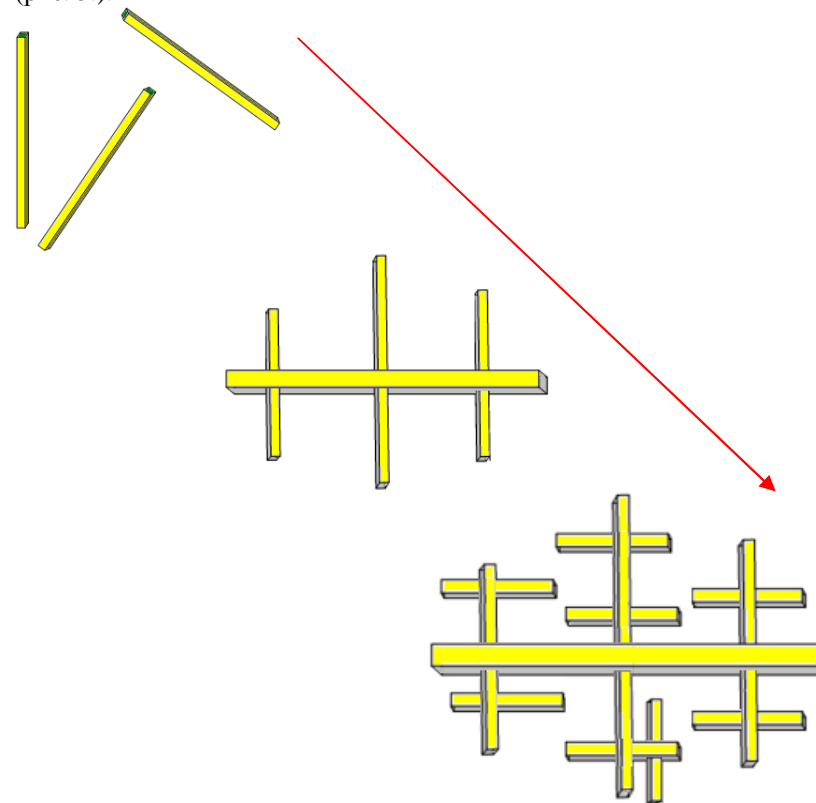


Рис. 5. Рост дендрита

Их называют главными осями кристалла (оси первого порядка). Одновременно с удлинением главных осей на их ребрах зарождаются и начинают расти ветви второго порядка. На ребрах осей второго порядка появляются оси третьего порядка, на тех – оси четвертого порядка и т.д.

Рост зерна останавливается тогда, когда оно встречается с растущим рядом соседним зерном. После завершения кристаллизации всего материала образуется зернистая структура (рис. 6), которую можно увидеть под микроскопом. Каждое зерно – это отдельный дендрит, но его строение под оптическим микроскопом недоступно. Чтобы рассмотреть микроуровень нужен электронный микроскоп.

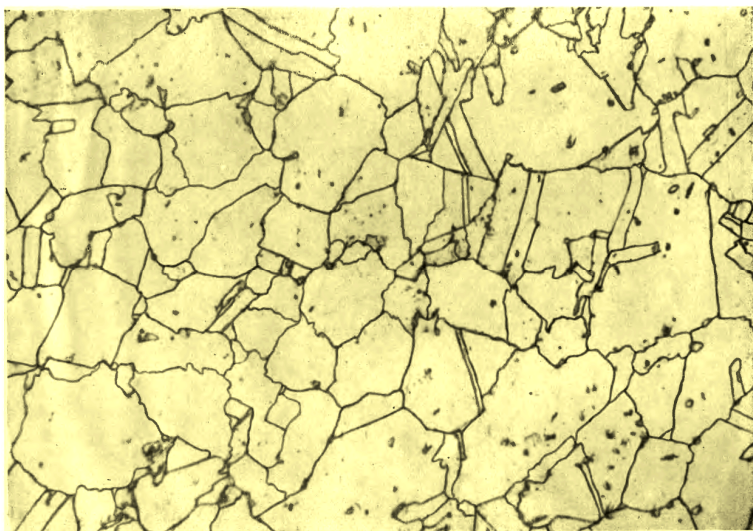


Рис. 6. Зернистая структура под микроскопом

#### 2.4.2. Микроструктура материалов

На микроструктурном уровне кристаллы образованы ионами, упакованными в **кристаллические решетки**. Для изучения такой структуры приходится применять электронные микроскопы. В силу волновой природы света дальнейшее увеличение изображения в оптических микроскопах не позволяет увидеть микроструктуру материала. Принцип работы электронного микроскопа совершенно другой – обстрел тонкой пленки изучаемого материала пучком элементарных частиц и фиксация полученной картины на

чувствительной пластине. Зафиксированная таким образом кристаллическая решетка состоит из элементарных ячеек (рис. 7).

Металлы образуют одну из трех решеток (рис. 7):  
 кубическую гранецентрированную (ГЦК);  
 кубическую объемно-центрированную (ОЦК);  
 гексагональную.

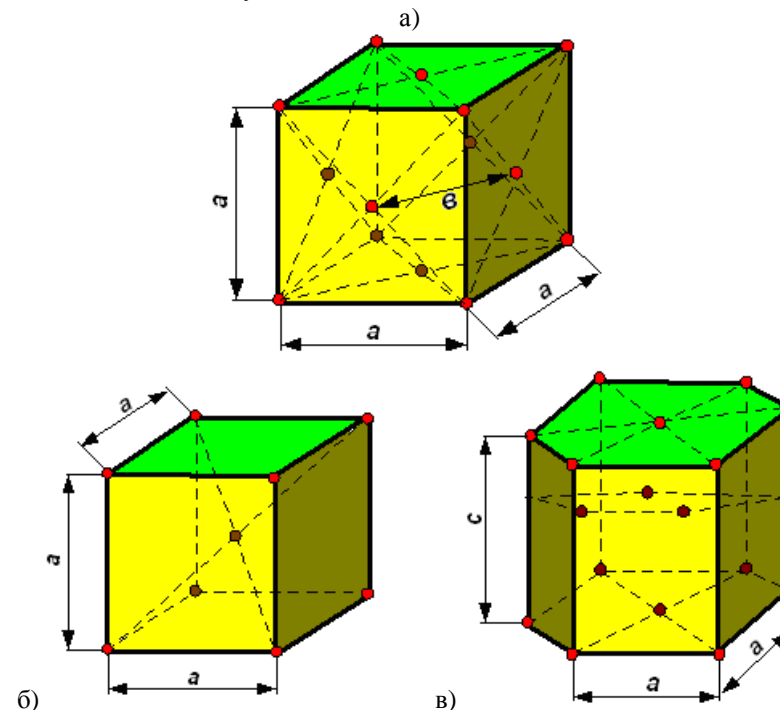


Рис. 7. Строение элементарных ячеек кристаллических решеток  
 а) ГЦК-решетка; б) ОЦК-решетка; в) гексагональная решетка

В ОЦК решетке один атом находится в центре куба (рис. 7 б).

В ГЦК решетке в каждой грани расположен один дополнительный атом (рис. 7 а).

В гексагональной решетке по одному атому расположено в каждой из двух противоположных граней и три атома в средней плоскости призмы (рис. 7 в).

Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства каждого

кристалла зависят от направления. Неодинаковость свойств монокристалла в разных направлениях называется **анизотропией**. В этом проявляется еще одно различие между кристаллами и аморфными материалами. У аморфных тел свойства не зависят от направления.

Технические металлы являются поликристаллами, т.е. состоят из большого количества анизотропных монокристаллов. Вследствие того, что монокристаллы ориентированы в материале беспорядочно, свойства металлов во всех направлениях усредняются и металлы не обладают свойством анизотропности.

Некоторые металлы могут изменять свой тип решетки. Способность некоторых металлов существовать в различных кристаллических формах в зависимости от внешних условий (давление, температура) называется **аллотропией** или **полиморфизмом**.

Каждый вид решетки представляет собой аллотропическое видоизменение или модификацию.

Примером аллотропического видоизменения в зависимости от температуры является железо (Fe).

$T < 911 \text{ } ^\circ\text{C}$  → ОЦК - Fe<sub>α</sub> (альфа-железо);  
 $911 < T < 1392 \text{ } ^\circ\text{C}$  → ГЦК - Fe<sub>γ</sub> (гамма-железо);  
 $1392 < T < 1539 \text{ } ^\circ\text{C}$  → ОЦК - Fe<sub>δ</sub> (дельта или высокотемпературное Fe<sub>α</sub>)

Превращение одной модификации в другую протекает при постоянной температуре и сопровождается тепловым эффектом. Видоизменения элемента обозначается буквами греческого алфавита в виде индекса у основного обозначения металла: Fe<sub>α</sub> или Fe<sub>γ</sub> или Fe<sub>δ</sub>.

Примером аллотропического видоизменения, обусловленного изменением давления, является углерод: при низких давлениях образуется графит, а при высоких – алмаз.

Используя явление полиморфизма, можно упрочнять и разупрочнять сплавы при помощи термической обработки.

### 2.4.3. Дефекты кристаллического строения

Из жидкого расплава можно вырастить монокристалл. Их обычно используют в лабораториях для изучения свойств того или иного вещества.

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, т.е. имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы называются зернами. Они имеют неправильную форму и различно ориентированы в пространстве. Каждое зерно имеет свою ориентировку кристаллической решетки,

отличную от ориентировки соседних зерен, вследствие чего свойства реальных металлов усредняются, и явления анизотропии не наблюдаются

При формировании структуры металла во время кристаллизации могут возникать ошибки в кристаллической решетке. Дефекты кристаллического строения подразделяются на точечные, линейные и плоские. **Точечные дефекты** малы во всех трех измерениях и образуются одним или малой группой атомов (рис. 8). Возможны *вакансии* (рис. 8 б) – один из узлов потерял атом и *межузельный атом* (8 а) – лишний атом дислоцирован в межузельном пространстве.

**Линейные дефекты** имеют малые размеры в двух измерениях и большой размер в третьем измерении. Например, на рис. 9 показан дефект, который по высоте составляет 2 межатомных расстояния (3 соседних атома), а по ширине и толщине его размер равен размеру 1 атома.

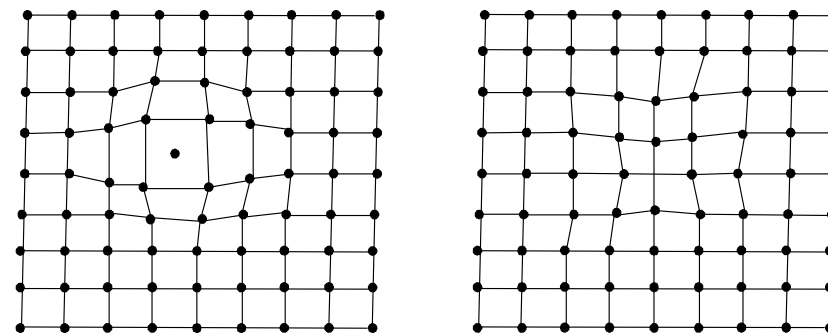


Рис. 8. Точечные дефекты строения:  
 а) межузельный атом, б) точечная вакансия

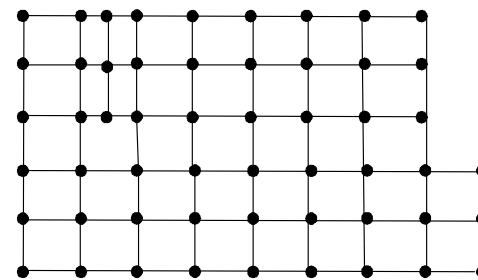
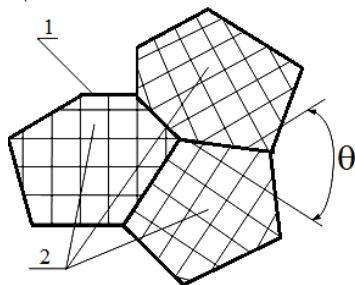


Рис. 9. Пример линейной дислокации

**Плоские дефекты** имеют малый размер только в одном измерении, например по толщине (рис. 10). Каждое зерно металла состоит из нескольких блоков. Блоки разориентированы по отношению друг к другу. На границе блоков решетка одного блока переходит в решетку второго блока и при этом на границе возникает сильное искажение – дислокация.



**Рис. 10.** Разориентация зерен в материале:  
1 – граница зерен, 2 - зерна

Размеры зерен (2) составляют до 1 мм. Углы разориентации  $\theta$  составляют до нескольких десятков градусов.

Граница между зернами (1) представляет собой тонкую в 5 – 10 атомных диаметров поверхностную зону с максимальным нарушением порядка в расположении атомов.

## 2.5. Диффузия в металлах

Многие процессы, протекающие в металлах носят диффузионный характер. Под **диффузией** понимают перемещение атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные расстояния. В основе процесса диффузии лежит атомный механизм. Каждый атом совершает случайные блуждания. Для описания процесса диффузии предложено несколько возможных механизмов: циклический, обменный, вакансионный, межузельный.

**Обменный механизм** объясняет диффузию взаимным обменом положением двух соседних атомов. **Циклический механизм** предполагает, что обмен происходит по кругу сразу между несколькими атомами. В соответствии с **вакансионным** механизмом диффузия объясняется перемещением атома в вакансию и следовательно, созданием на прежнем месте новой вакансии. **Межузельный** механизм объясняет это явление перемещением атома, находящегося в межузельном пространстве в другое место

межузельного пространства.

Количество вещества, задействованного в процесс диффузии определяется первым и вторым **законом Фика**.

$$m = -D \frac{dC}{dx} \quad \frac{dC}{d\tau} = D \frac{d^2C}{dx^2}$$

Второй закон объясняет процесс диффузии когда градиент концентрации изменяется во времени. Коэффициент диффузии  $D$  зависит от температуры по экспоненциальному закону:

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

где  $Q$  – энергия активации диффузии,  $R$  – газовая постоянная,  $T$  – температура.

Энергия активации характеризует энергию связи атомов в кристаллической решетке.

Наиболее легко диффузия происходит на границах зерен, где сосредоточено много дефектов.

## 2.6. Магнитные превращения

Некоторые металлы намагничиваются под действием магнитного поля. После удаления магнитного поля они обладают остаточным магнетизмом. Это явление впервые обнаружено на железе и получило название **ферромагнетизма**. К ферромагнетикам относятся железо, кобальт, никель и некоторые другие металлы.

При нагреве ферромагнитные свойства металла уменьшаются постепенно: вначале слабо, затем резко, и при определенной температуре (**точка Кюри**) исчезают (точка Кюри для железа – 768<sup>0</sup>С). Выше этой температуры металлы становятся **парамагнетиками**. Магнитные превращения не связаны с изменением кристаллической решетки или микроструктуры, они обусловлены изменениями в характере межэлектронного взаимодействия.

## 2.7. Сплавы

### 2.7.1. Основные определения теории сплавов

Чистые металлы обладают низкой прочностью и не обеспечивают требуемых от материала свойств. Поэтому на практике чистые металлы не применяются. При производстве различных металлических изделий, деталей машин используют сплавы металлов. **Сплавы** получают сплавлением, т.е. разбавлением в жидком расплавленном состоянии двух или более металлов или металлов с

неметаллами. Химические элементы, сплавлением которых образуется сплав, называются **компонентами** сплава. **Фазой** называют однородные составные части материала, имеющие одинаковый состав, кристаллическое строение и свойства, одно и то же агрегатное состояние и отделенные от других частей поверхностью раздела.

В сплавах могут образовываться следующие фазы:

жидкие растворы;

твердые растворы;

химические соединения.

**Твердыми растворами** называют фазы, в которых один из компонентов сплава сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы других компонентов располагаются в решетке первого компонента. Твердый раствор имеет один тип решетки и представляет собой одну фазу. При образовании **твердого раствора замещения** атомы растворенного компонента замещают часть атомов растворителя. В **твердых растворах внедрения** атомы растворенного компонента размещаются в междоузлиях решетки растворителя.

В **химических соединениях** компоненты соединяются за счет химической связи, обычно в результате химической реакции. Примерами таких соединений могут служить карбид железа, оксид меди, нитрид титана и т.д.

Фазовый состав сплава в удобной форме можно показать с помощью **диаграммы состояния** или **диаграммы фазового равновесия**. Эти диаграммы характеризуют окончательное состояние сплавов, т.е. полученное после того, как все превращения полностью закончились.

Закономерность изменения числа фаз в многофазной системе определяется **правилом фаз**. Это правило устанавливает зависимость между **числом степеней свободы** системы  $S$ , числом компонентов  $K$  и числом фаз  $\Phi$ . Оно выражается уравнением:

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

Под **числом степеней свободы** понимают возможность изменения температуры, без изменения числа фаз, находящихся в равновесии.

Т.к. число степеней свободы не может быть отрицательным

$$S \geq 0, \text{ то } K - \Phi + 1 \geq 0, \text{ и тогда:}$$

$$\Phi \leq K + 1.$$

Таким образом, из правила фаз следует, что число фаз в сплаве, находящемся в равновесном состоянии не может быть больше числа компонентов плюс единица. Например, в двойной системе в равновесии может находиться не более 3 фаз, в тройной – не более 4.

При нагреве чистого металла переход из жидкого состояния в твердое состояние происходит при одной температуре, называемой **температурой плавления** металла. Эта же температура определяет противоположный процесс – **процесс кристаллизации**, - перехода из жидкого состояния в твердое состояние. При охлаждении расплавленного металла по достижению температуры плавления, начинают образовываться кристаллы твердого вещества. Это продолжается до тех пор, пока вся жидкая фаза не перейдет в твердое состояние.

Для сплавов процесс кристаллизации происходит по более сложному механизму. В жидком состоянии большинство металлов неограниченно растворяются друг в друге, образуя однофазный жидкий раствор. Однако при охлаждении сплава скорость роста кристаллов в жидких растворах ниже, чем в чистых металлах.

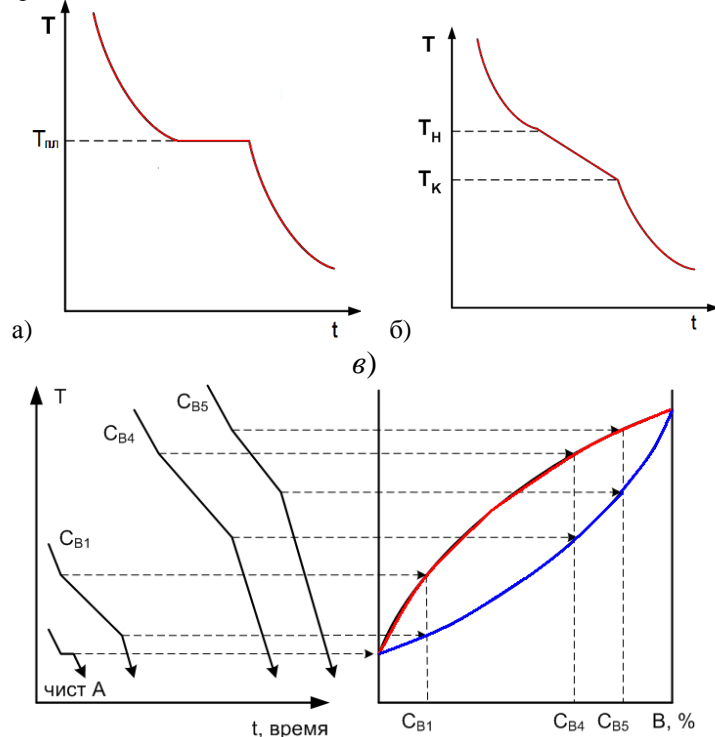
### 2.7.2. Построение диаграммы состояния для случая полной растворимости компонентов

Чтобы построить диаграмму состояния двухкомпонентного сплава, проводят серию опытов по охлаждению жидкого расплава с различным соотношением компонентов в его составе. Готовят исходные компоненты в твердом состоянии, например в порошкообразной форме, так, чтобы массовая доля компонента А в общей смеси была равна  $C_1$ , например  $C_1 = 0,1$  (10%), тогда концентрация компонента  $C_B = 1 - C_1$ , в нашем случае  $C_B = 0,9$  (90%). Гранулы А и В перемешивают и в специальной емкости (тигле) ставят в печь. Далее смесь нагревают до ее полного расплавления и получения однородной жидкой фазы. После небольшой выдержки жидкий расплав медленно охлаждают и одновременно измеряют его температуру. Температура определяется через равные промежутки времени до полного затвердевания сплава. Откладывая по оси абсцисс время, а по оси ординат – соответствующую температуру, получают так называемую **кривую охлаждения**. Пример кривой охлаждения для чистого металла ( $C_1 = 100\%$ ) показан на рис. 11 а.

По графику а) видно, что до достижения температуры плавления температура чистого металла плавно снижается. Достигнув температуры плавления, процесс охлаждения приостанавливается. Начинается кристаллизация, но температура при этом остается постоянной. Процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое состояние является экзотермическим процессом. В момент кристаллизации выделяется столько тепла, что оно компенсирует снижение температуры в результате охлаждения. Только после того,

как весь расплав затвердеет, температура начинает вновь снижаться за счет охлаждения теперь уже твердой фазы.

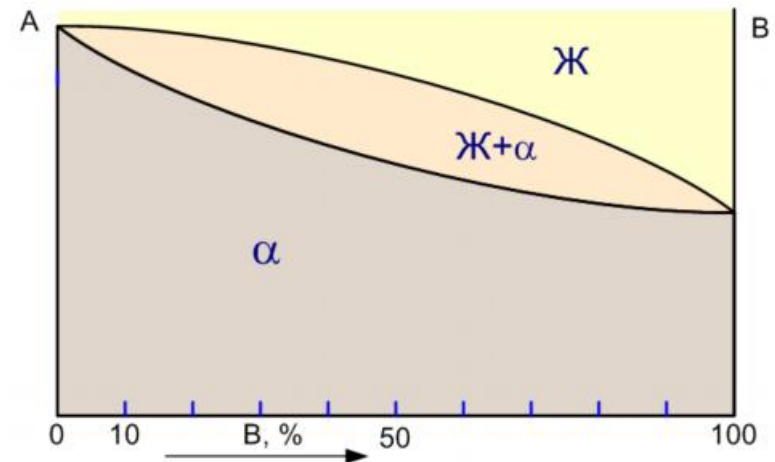
Кривая охлаждения для двухкомпонентного сплава показана на рис. 11 б. На ней можно выделить температуру начала процесса кристаллизации и температуру его окончания. Из-за наличия двух компонентов, которые плавятся при разных температурах, площадки с постоянной температурой здесь нет. Во время затвердевания температура продолжает медленно снижаться.



**Рис. 11.** Кривые охлаждения: а) чистого металла, б) сплава и построение диаграммы состояния (в)

Допустим, построены кривые охлаждения для 7 разных концентраций компонентов (рис. 11 в – показаны только 4 концентрации:  $C_A, C_{B1}, C_{B4}, C_{B5}$ ). Для чистых компонентов А и В получаются кривые охлаждения с горизонтальными площадками. Компонент В является более тугоплавким: его температура

кристаллизации выше температуры кристаллизации компонента А. Остальные кривые получены при разных концентрациях компонента В в сплаве. Проецируя температуры начала и конца кристаллизации на график зависимости температуры кристаллизации сплава от содержания в нем компонента В, получаем диаграмму состояния такую, как, например показана на рис. 11 в), а также на рис. 12, 13, 15 и 16.



**Рис. 12.** Диаграмма состояния сплава с полной растворимостью компонентов

На диаграмме состояния определяются две линии – линия **солидус** и линия **ликвидус**. *Солидус* – это нижняя линия. Она ограничивает область твердой фазы от области, в которой в равновесии существуют сразу две фазы – жидкая и твердый раствор. Верхняя линия *ликвидус* ограничивает область жидкой фазы.

Немного сплавов имеют диаграмму, как на рис. 12. Для большинства бинарных сплавов растворимость компонентов в твердом состоянии невысока. Все существующие сплавы имеют свои диаграммы, которые можно отнести к одному из четырех классов:

- 1) диаграмма для случая полной нерастворимости компонентов в твердом состоянии;
- 2) диаграмма для случая неограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;
- 3) диаграмма для случая ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии;

4) диаграмма для случая, когда компоненты сплавов образуют устойчивое химическое соединение.

Диаграмма, показанная на рис. 12, относится ко второму типу – типу диаграмм, которые характерны для сплава, компоненты которого растворимы в твердом состоянии при любой концентрации.

Чем больше компонентов входит в сплав, тем сложнее его фазовое и структурное состояния.

### 2.7.3. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси (диаграмма первого типа)

В жидком состоянии компоненты неограниченно растворяются друг в друге. Но в твердом состоянии для большинства сплавов растворимость ухудшается. В результате один из компонентов выпадает из истинного раствора в чистом виде. Есть и такие сплавы, в которых в твердом состоянии компоненты вообще не растворяются. Структура такого сплава перестает быть однородной и при рассмотрении в микроскоп можно увидеть разнородные зерна. Такие сплавы имеют более сложную, по сравнению с рассмотренной на рис. 12, диаграмму состояния (рис. 13).

Между линиями ликвидус и солидус в равновесии находятся 2 фазы: жидкая и твердая - кристаллы компонента А в левой части диаграммы и кристаллы компонента В – в правой части.

**Эвтектикой** называют механическую смесь двух (и более) компонентов (например А и В), одновременно кристаллизующихся из жидкого раствора. На рис. 13 эвтектика показана буквой Э.

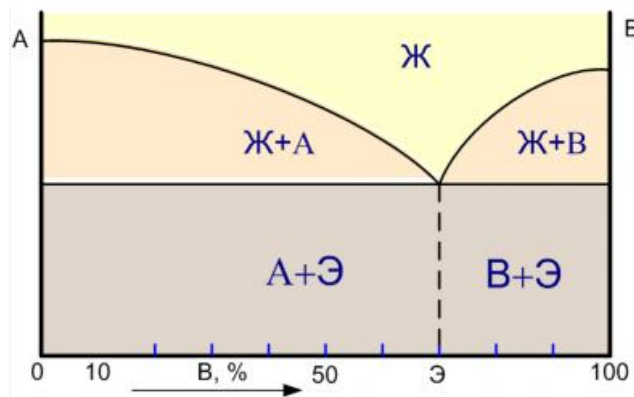


Рис. 13. Характерная диаграмма состояния для сплавов, компоненты которых не растворимы в твердом состоянии

Сплав, состоящий только из эвтектики, называется **эвтектическим**. На рис. 13 концентрация эвтектического сплава обозначена буквой Э на оси абсцисс. Он кристаллизуется при постоянной и наиболее низкой для данной системы температуре; все остальные сплавы затвердевают в интервале температур

Сплавы находящиеся левее эвтектики называются **доэвтектическими**, правее эвтектики – **заэвтектическими**. Под микроскопом они выглядят по-разному. Пример, сплав свинец-сурьма тоже представляет собой механическую смесь. В твердом состоянии ни свинец, ни сурьма, друг в друге не растворяются вообще. Как выглядит такой сплав под микроскопом при разной концентрации компонентов, показано на рис. 14.

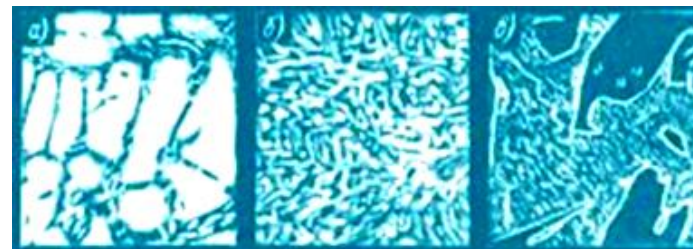


Рис. 14. Сплав свинец-сурьма под микроскопом: а) доэвтектический, б) эвтектический, в) заэвтектический

### 2.7.4. Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма второго типа)

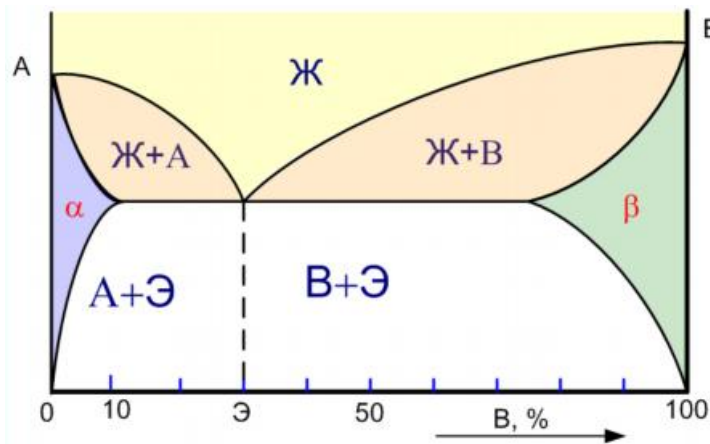
Диаграмма для сплавов такого типа показана на рис. 12 справа. Такие диаграммы не имеют точки эвтектики. Компонент В полностью растворится в компоненте А (или наоборот) и под микроскопом просматривается однородная структура, характерная для настоящих твердых растворов, примерно так, как показано на рис. 6. Сплошная однородность нарушается только границами зерен, которые ориентированы произвольно в пространстве.

### 2.7.5. Диаграмма состояния сплавов, ограниченно растворимых в твердом состоянии (диаграмма третьего типа)

В жидком состоянии компоненты полностью растворяются друг в друге. В твердом состоянии растворимость сильно падает. В компоненте А растворяется только небольшое количество В. Излишки В при кристаллизации жидкого раствора выдавливаются за пределы

зерен. Такие сплавы представляют собой механические смеси фаз с истинными твердыми растворами и нерастворенными компонентами.

**$\alpha$ -раствором** принято называть раствор компонента В в компоненте А. Он существует в левой части диаграммы состояния (рис. 15).  **$\beta$ -раствором** называют раствор компонента А в компоненте В. Он существует в правой части диаграммы.



**Рис. 15.** Характерная диаграмма состояния для сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии

Чистый  $\alpha$ -раствор, также как и  $\beta$ -раствор, может существовать только, если концентрация растворенного вещества мала. Если оно становится больше некоторого определенного значения в составе сплава появляется другой компонент и сплав становится механической смесью. Другой компонент появляется не в чистом виде, а в виде альтернативного, например,  $\beta$ -раствора, смешанного с  $\alpha$ -раствор в форме зерен эвтектики Э.

Для заэвтектических сплавов (после т. Э) наблюдается противоположная картина.

В областях диаграммы (крайняя левая и крайняя правая) кристаллизация происходит аналогично кристаллизации сплавов второго типа. Для сплавов, лежащих в центральной части диаграммы, кристаллизация происходит аналогично кристаллизации сплавов первого типа.

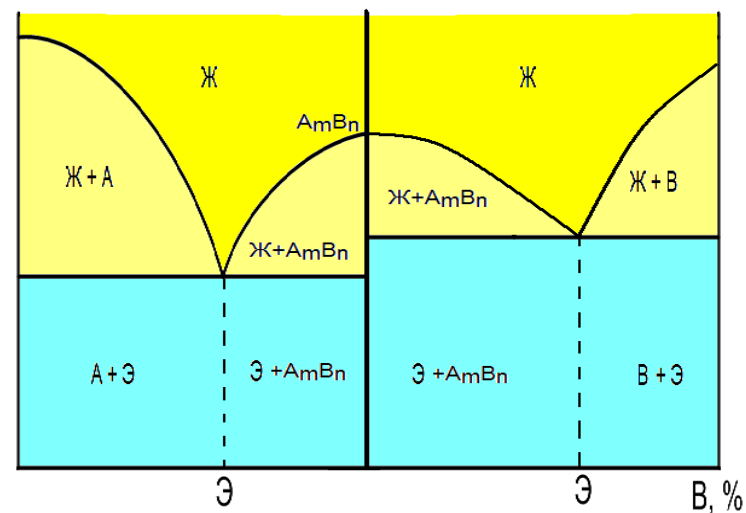
В некоторых сплавах после затвердевания тоже происходят фазовые превращения. Они происходят в результате распада твердого раствора по причине изменения растворимости компонентов в твердом

состоянии. Кристаллизационные процессы образования новых фаз в твердом состоянии подчиняются тем же закономерностям, что и процессы кристаллизации из жидкости.

Существуют также сплавы, в которых при понижении температуры происходит частичный распад твердого раствора. Интенсивность распада зависит от скорости охлаждения сплава. Применяя быстрое охлаждение, можно задержать выделение избыточного компонента и зафиксировать состояние, которое имел сплав при высокой температуре. Это явление называют закалкой сплава. Обычно закаленный твердый раствор неустойчив и при нагревании начинает распадаться.

### 2.7.6. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которого образуют химическое соединение (диаграмма четвертого типа)

Диаграмма такого сплава показана на рис. 16.



**Рис. 16.** Диаграмма состояния четвертого типа

Вертикальная линия по середине диаграммы соответствует химическому соединению  $A_mB_n$ , образуемому компонентами А и В, а точка на линии ликвидус — его температуре плавления. Эта точка называется сингулярной. На диаграмме имеются две эвтектические точки. Эвтектический сплав, соответствующий первой точке представляет механическую смесь кристаллов А и химического соединения  $A_mB_n$  а эвтектический сплав второй точки —



механическую смесь кристаллов В и химического соединения  $A_mB_n$ . Кристаллизация сплавов по этой диаграмме происходит так же, как и кристаллизация сплавов первого типа, только в данном случае образуется механическая смесь не компонентов А и В, а химического соединения  $A_mB_n$  и кристаллов компонента А и В.

Возможны и другие случаи, например, когда диаграмма состояния четвертого типа представляет собой двойную диаграмму состояния второго типа или одна часть диаграммы представляет диаграмму состояния первого типа, а вторая ее часть — диаграмму состояния второго типа и т. д.

#### 2.7.4. Диаграмма состояния железо-углерод

Железо и его сплавы широко распространены в промышленности. Чистое железо имеет температуру плавления, равную 1539 градусов по Цельсию – точка А на диаграмме (рис. 17).

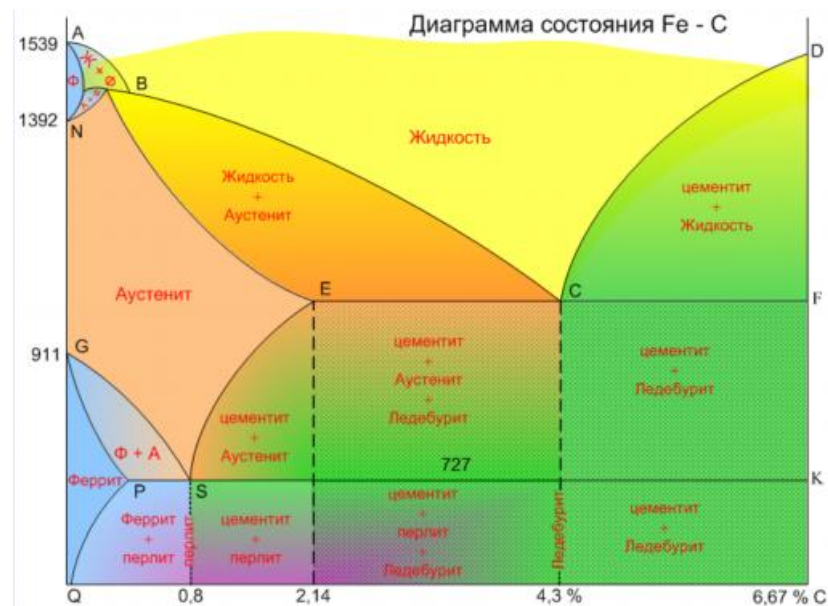


Рис. 17. Диаграмма состояния железо – углерод

Линия ACD – линия ликвидус, показывает температуру начала кристаллизации. Линия AECF – линия солидус очерчивает границу твердого состояния.

Известны 2 полиморфные модификации железа: альфа и

гамма. Альфа-железо существует при температурах ниже 910 град. и выше 1392 град. В интервале температур 1392 – 1539 °C часто альфа-железо обозначают как дельта-железо. Решетка альфа модификации железа представляет собой ОЦК. До температуры 768 град. альфа-железо магнитно. Эту температуру называют **точкой Кюри** и обозначают на диаграмме как  $A_2$ . Кристаллическая решетка гамма модификации железа есть ГЦК. Его плотность немного выше плотности альфа-железа.

Наиболее распространены на практике сплавы железа с углеродом. Если в железе растворено менее 2,14% углерода, то такой сплав называют **сталью**. Если количество углерода больше 2,14%, то сплав называется **чугуном**.

Основным растворимым веществом в стали и чугуне является углерод. Химическое соединение углерода с железом называется цементитом (карбид железа).

В системе железо-углерод различают 5 фаз:

- жидкий сплав;
- твердый раствор феррит;
- твердый раствор аустенит;
- цементит;
- графит.

**Ферритом** называют твердый раствор углерода в альфа-железе. Растворимость углерода в альфа-железе очень низкая – до 0,02%. Поэтому феррит обладает низкими прочностными свойствами.

**Аустенитом** называют твердый раствор углерода в гамма-железе. Растворимость углерода в гамма-железе в сотни раз выше, чем в альфа-железе. Максимальное содержание углерода может достигать 2,14%. Однако, как известно, аустенит при обычных температурах не существует.

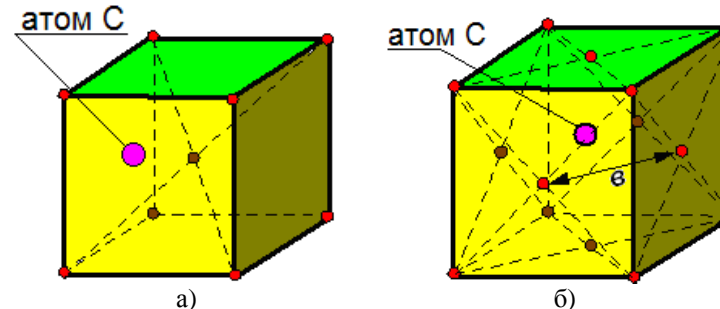


Рис. 18. Кристаллическая решетка феррита (а) и аустенита (б)

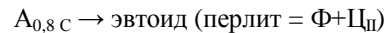
**Цементитом** называют соединение углерода с железом  $Fe_3C$ . В цементите содержится 6,67% углерода. Температура плавления принимается равной 1550 град. – точка D на диаграмме.

**Графит** является модификацией чистого углерода.

Все остальные элементы (перлит, ледебурит, мартенсит, бейнит, сорбит) не являются отдельными фазами – это смеси фаз.

**Ледебуритом** называют эвтектический состав для системы железо-углерод с содержанием углерода в 4,3%. Зерна ледебурита обладают высокой хрупкостью. Линия, соответствующая содержанию углерода 2,14% отделяет область существования стали от области существования чугуна. **Сталью** называют сплав железа, содержащий в составе менее 2,14% углерода. **Чугуном** называют сплав железа с углеродом, когда содержание углерода в его составе более 2,14%. В чугуне, в отличие от стали, присутствуют зерна ледебурита, поэтому чугун является хрупким материалом. Зато присутствие легкоплавкой эвтектики – ледебурита приводит к тому, что чугун обладает более низкой температурой плавления и лучшими литейными свойствами.

Линия, соответствующая содержанию углерода в 0,8% соответствует составу **эвтектоидного** сплава в системе железо-углерод. В т. S при постоянной температуре  $727^{\circ}C$  идет эвтектоидное превращение, заключающееся в том, что аустенит, содержащий 0,8 % углерода, превращается в эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного:



По механизму данное превращение похоже на эвтектическое, но протекает в *твердом* состоянии. Эвтектоид системы железо – цементит называется **перлитом (P)**, содержит 0,8 % углерода. Название получил за то, что на полированном и протравленном шлифе из перлита наблюдается перламутровый блеск.

Стали с содержанием углерода менее 0,8% называют **доэвтектоидными**, более 0,8% - **заэвтектоидными**.

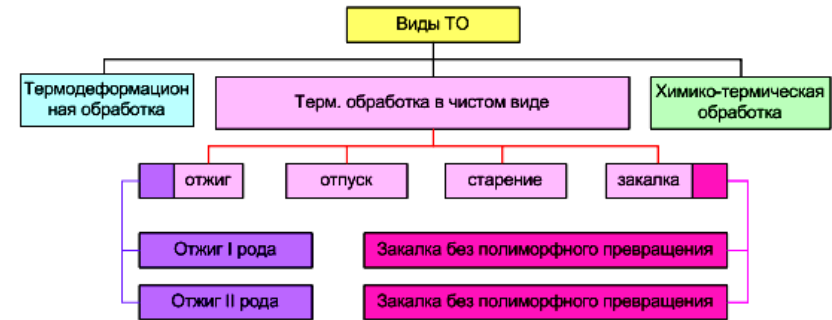
Содержание углерода в стали оказывает сильное влияние на свойства стали. С увеличением содержания углерода увеличивается количество цементита. Цементит обладает в 10 раз большей твердостью, чем феррит, что положительно сказывается на общей твердости стали. Частицы цементита повышают сопротивление стали деформации, но уменьшают пластичность. Поэтому с увеличением содержания углерода растет твердость, предел текучести и предел прочности стали, но уменьшается относительное удлинение и сужение и ударная вязкость. Но при достижении содержания углерода в 1,0 – 1,1% предел прочности начинает снижаться.

### 3. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

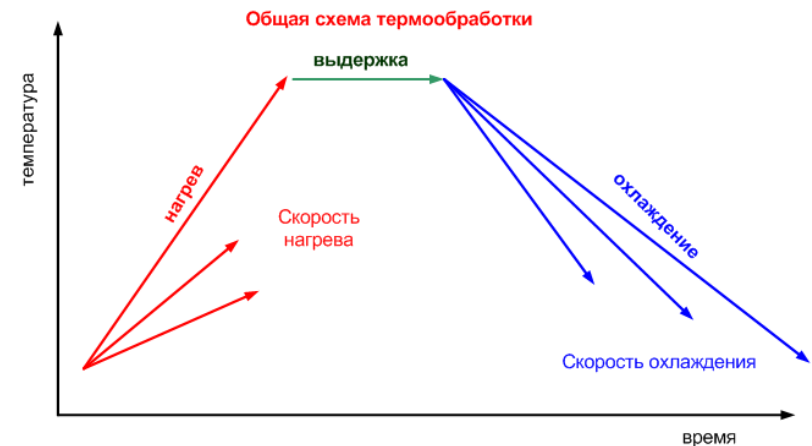
#### 3.1. Термическая обработка стали

##### 3.1.1. Виды термической обработки металлов

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а, следовательно, и свойства является термическая обработка. На практике для различных материалов применяют различные виды термообработки.



**Термическая обработка (в чистом виде)** представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, выполняемых в определенной последовательности при определенных режимах, с целью изменения внутреннего строения сплава и получения нужных свойств.



Различают несколько видов термической обработки:

**1. Отжиг I рода** – возможен для любых металлов и сплавов.

Его проведение не связано с фазовыми превращениями в твердом состоянии.

Нагрев, при отжиге первого рода, повышая подвижность атомов, частично или полностью устраняет химическую неоднородность, уменьшает внутренние 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 эвтектические 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. Скорость охлаждения роли не играет. Происходят превращения, уменьшающие степень неравновесности структуры закаленной стали.

Термическую обработку подразделяют на предварительную и окончательную.

*Предварительная* – применяется для подготовки структуры и свойств материала для последующих технологических операций (для

обработки давлением, улучшения обрабатываемости резанием).

*Окончательная* – формирует свойства готового изделия.

### 3.1.2. Мартенситные превращения в стали

Термическая обработка стали в большинстве случаев предполагает ее нагрев до температур, соответствующих появлению аустенита. Дальнейший нагрев ведет к росту размеров зерен аустенита. После выхода на требуемую температуру сталь выдерживают в течение определенного времени при постоянной температуре. Если затем сталь охладить с определенной скоростью до температуры, при которой аустенит не существует, он начинает распадаться. Все превращения в аустените объясняются диффузионными процессами. Если аустенит переохладить с высокой скоростью ниже некоторой температуры, то диффузионные процессы подавляются. В результате распад аустенита на феррит и цементит становится невозможным. Происходит **бесдиффузионный** процесс превращения аустенита в особую структуру, называемую мартенситом.

**Мартенсит** является упорядоченным пересыщенным твердым раствором внедрения углерода в альфа-железе. В равновесном состоянии растворимость углерода в альфа-железе при 20 град не превышает 0,02%, а мартенсите его содержание равно содержанию углерода в аустените, т.е. может достигать 2,14%. Процесс переохлаждения аустенита с образованием мартенсита называют **закалкой стали**. Выбор температур закалки показан на рис. 19.

Характерной особенностью мартенсита является его высокая твердость и прочность. Твердость мартенсита растет с увеличением содержания в нем углерода. В стали с 0,6-0,7% С твердость мартенсита составляет 65 HRC. С увеличением содержания углерода растет также прочность мартенсита. В стали с 0,7-0,8% углерода предел прочности мартенсита достигает величины 2600 – 2700 МПа. Высокая твердость мартенсита объясняется влиянием внедренных атомов углерода в кристаллическую решетку альфа-фазы.

Если сталь, содержащую мартенсит снова нагреть, то происходит распад мартенсита. Термообработку, заключающуюся в нагреве закаленной стали называют **отпуском**. Распад мартенсита при отпуске влияет на все свойства стали. При низких температурах отпуска (до 250 °С) уменьшается склонность стали к хрупкому разрушению. Высокоуглеродистые стали при низкотемпературном отпуске не снижают своей твердости.

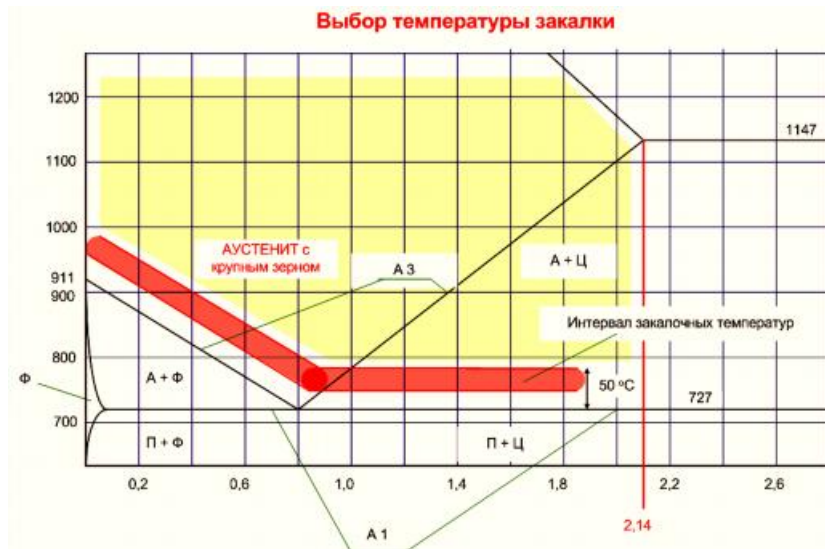


Рис. 19. Интервал закалочных температур для стали

Повышение температуры отпуска до 500-600 град приводит к значительному снижению твердости, предела прочности и текучести, увеличивает относительное удлинение и сужение.

### 3.1.3. Отжиг и нормализация. Назначение и режимы

**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 литье стали;
- подготовить структуру к последующей термической обработке.

Для отжига характерно медленное охлаждение со скоростью 30...100 °С/ч.

#### 3.1.3.1. Отжиг первого рода

1. **Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг.** Применяется для устранения ликвации, выравнивания химического состава сплава.

В его основе – диффузия. В результате нагрева выравнивается состав, растворяются избыточные карбиды. Применяется, в основном, для легированных сталей.

Температура нагрева зависит от температуры плавления,  $T_H = 0,8 T_{пл}$ .

Продолжительность выдержки: 8 ... 20 часов.

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

Продолжительность зависит от габаритов изделия.

3. **Отжиг для снятия напряжений после горячей обработки** (литья, сварки, обработки резанием, когда требуется высокая точность размеров). Температура нагрева выбирается в зависимости от назначения, находится в широком диапазоне:  $T_H = 160.....700^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность зависит от габаритов изделия.

#### 3.1.3.2. Отжиг второго рода

Отжиг второго рода предназначен для изменения фазового состава.

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

В зависимости от температуры нагрева различают отжиг:

1. **полный**, с температурой нагрева на 30...50 °С выше критической температуры  $A_3$

Проводится для доэвтектоидных сталей для исправления структуры.

При такой температуре нагрева аустенит получается мелкозернистый, и после охлаждения сталь имеет также мелкозернистую структуру.

2. **неполный**, с температурой нагрева на 30...50°С выше критической температуры  $A_1$

Применяется для заэвтектоидных сталей. При таком нагреве в структуре сохраняется цементит вторичный, в результате отжига цементит приобретает сферическую форму (сфероидизация).

Получению зернистого цементита способствует предшествующая отжигу горячая пластическая деформация, при которой дробится цементитная сетка. Структура с зернистым цементитом лучше обрабатывается и имеет лучшую структуру после закалки. Неполный отжиг является обязательным для инструментальных сталей.

3. **циклический или маятниковый отжиг** применяют, если после проведения неполного отжига цементит остается пластинчатым. В этом случае после нагрева выше температуры  $A_1$  следует охлаждение до  $680\text{ }^\circ\text{C}$ , затем снова нагрев до температуры  $750\text{...}760\text{ }^\circ\text{C}$  и охлаждение. В результате получают зернистый цементит.

4. **изотермический отжиг** – после нагрева до требуемой температуры, изделие быстро охлаждают до температуры на  $50\text{...}100\text{ }^\circ\text{C}$  ниже критической температуры  $A_1$  и выдерживают до полного превращения аустенита в перлит, затем охлаждают на спокойном воздухе. Температура изотермической выдержки близка к температуре минимальной устойчивости аустенита.

В результате получают более однородную структуру, так как превращение происходит при одинаковой степени переохлаждения. Значительно сокращается длительность процесса. Применяют для легированных сталей.

5. **Нормализация** – разновидность отжига.

Термическая обработка, при которой изделие нагревают до аустенитного состояния, на  $30\text{...}50\text{ }^\circ\text{C}$  выше  $A_3$  с последующим охлаждением на воздухе.

В результате нормализации получают более тонкое строение эвтектоида (тонкий перлит или сорбит), уменьшаются внутренние напряжения, устраняются пороки, полученные в процессе предшествующей обработки. Твердость и прочность несколько выше, чем после отжига.

В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет грубую сетку вторичного цементита.

Нормализацию чаще применяют как промежуточную операцию, улучшающую структуру. Иногда проводят как окончательную обработку, например, при изготовлении сортового проката.

Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига.

Для среднеуглеродистых сталей нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки с высоким отпуском. В этом случае механические свойства несколько

ниже, но изделие подвергается меньшей деформации, исключаются трещины.

### 3.1.4. Закалка

Конструкционные стали подвергают закалке и отпуску для повышения прочности и твердости, получения высокой пластичности, вязкости и высокой износостойкости, а инструментальные – для повышения твердости и износостойкости.

Основными параметрами являются температура нагрева и скорость охлаждения.

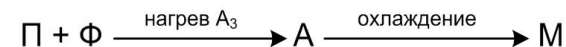
По температуре нагрева различают 2 вида закалки.

Фазовые превращения при закалке стали

	доэвтектоидная	заэвтектоидная
неполная	$P + F \xrightarrow{\text{нагрев } A_1} A + F \xrightarrow{\text{охлаждение}} M + F$	$P + C_{II} \xrightarrow{\text{нагрев } A_1} A + C_{II} \xrightarrow{\text{охлаждение}} M + C_{II}$
полная	$P + F \xrightarrow{\text{нагрев } A_3} A \xrightarrow{\text{охлаждение}} M$	$P + C_{II} \xrightarrow{\text{нагрев } A_3} A \xrightarrow{\text{охлаждение}} M_{\text{груб}} + A_{\text{остат}}$

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

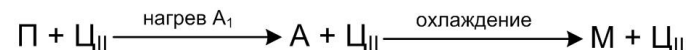
Применяют ее для доэвтектоидных сталей. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:



После полной закалки заэвтектоидных сталей получают дефектную структуру грубоигльчатого мартенсита и поэтому не применяют.

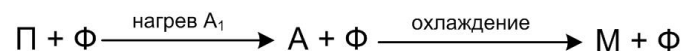
**Неполная закалка** с температурой нагрева на  $30\text{...}50\text{ }^\circ\text{C}$  выше критической температуры  $A_1$

Применяется для заэвтектоидных сталей. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:

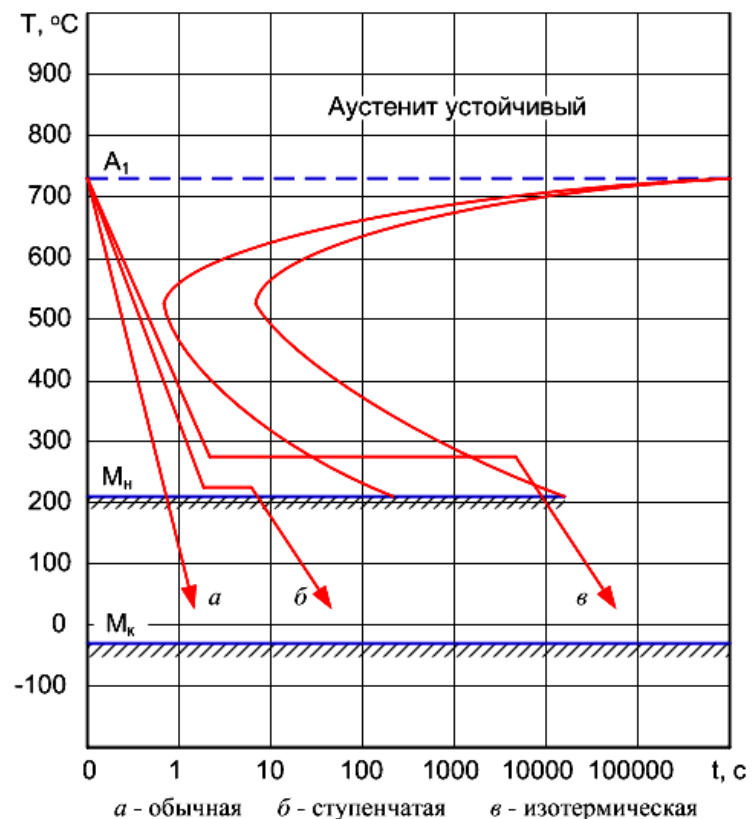


После охлаждения в структуре остается вторичный цементит, который повышает твердость и износостойкость режущего инструмента.

Неполная закалка доэвтектоидных сталей недопустима, так как в структуре остается мягкий феррит. Изменения структуры стали при нагреве и охлаждении происходят по схеме:



В качестве охлаждающих сред при закалке используют воду при различных температурах, технические масла, растворы солей и щелочей, расплавленные металлы. Подбор закалочной среды позволяет обеспечивать нужную скорость охлаждения. Применение нескольких закалочных сред позволяет создавать разные режимы закалки.



Вода имеет существенный недостаток: высокая скорость охлаждения в интервале мартенситного превращения приводит к

образованию закалочных дефектов. С повышением температуры воды ухудшается ее закалочная способность.

Наиболее высокой и равномерной охлаждающей способностью отличаются холодные 8...12 %-ные водные растворы  $\text{NaCl}$  и  $\text{NaOH}$ . Они мгновенно разрушают паровую рубашку и охлаждение происходит более равномерно и на стадии пузырькового кипения.

Увеличения охлаждающей способности достигают при использовании струйного или душевого охлаждения, например, при поверхностной закалке.

Для легированных сталей с высокой устойчивостью аустенита используют минеральное масло (нефтяное). Обеспечивающее небольшую скорость охлаждения в интервале температур мартенситного превращения и постоянство закалывающей способности. Недостатками минеральных масел являются повышенная воспламеняемость, низкая охлаждающая способность в интервале температур перлитного превращения, высокая стоимость.

### 3.1.5. Отпуск

Отпуск является окончательной термической обработкой. Целью отпуска является повышение вязкости и пластичности, снижение твердости и уменьшение внутренних напряжений закаленных сталей. С повышением температуры нагрева прочность обычно снижается, а пластичность и вязкость растут. Температуру отпуска выбирают, исходя из требуемой прочности конкретной детали.

Различают 3 вида отпуска:

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

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

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

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

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

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

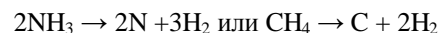
## 3.2. Химико-термическая обработка стали

### 3.2.1. Основные виды ХТО

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,



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

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

Химико-термическая обработка является основным способом **поверхностного упрочнения** деталей.

Основными разновидностями химико-термической обработки являются:

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

### 3.2.2. Цементация

**Цементация** – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя

атомами углерода при нагреве до температуры 900...950 °С.

Цементации подвергают стали с низким содержанием углерода (до 0,25 %).

Нагрев изделий осуществляют в среде, легко отдающей углерод. Подобрав режимы обработки, поверхностный слой насыщают углеродом до требуемой глубины.

Глубина цементации ( $h$ ) – расстояние от поверхности изделия до середины зоны, где в структуре имеются одинаковые объемы феррита и перлита ( $h = 1...2$  мм).

Степень цементации – среднее содержание углерода в поверхностном слое (обычно, не более 1,2 %).

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

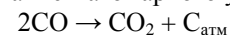
На практике применяют цементацию в твердом и газовом карбюризаторе (науглероживающей среде).

Участки деталей, которые не подвергаются цементации, предварительно покрываются медью (электролитическим способом) или глиняной смесью.

#### 3.2.2.1. Цементация в твердом карбюризаторе

Почти готовые изделия, с припуском под шлифование, укладывают в металлические ящики и пересыпают твердым карбюризатором. Используется древесный уголь с добавками углекислых солей  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в количестве 10...40 %. Закрытые ящики укладывают в печь и выдерживают при температуре 930...950 °С.

За счет кислорода воздуха происходит неполное сгорание угля с образованием окиси углерода (СО), которая разлагается с образованием атомарного углерода по реакции:



Образующиеся атомы углерода адсорбируются поверхностью изделий и диффундируют вглубь металла.

Недостатками данного способа являются:

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

Способ применяется в мелкосерийном производстве.

### 3.2.2.2. Газовая цементация

Процесс осуществляется в печах с герметической камерой, наполненной газовым карбюризатором. Атмосфера углеродсодержащих газов включает азот, водород, водяные пары, которые образуют газ-носитель, а также окись углерода, метан и другие углеводороды, которые являются активными газами.

Глубина цементации определяется температурой нагрева и временем выдержки.

Преимущества способа:

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

### 3.2.3. Азотирование

**Азотирование** – химико-термическая обработка, при которой поверхностные слои насыщаются азотом.

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

При азотировании изделия загружают в герметичные печи, куда поступает аммиак  $\text{NH}_3$  с определенной скоростью. При нагреве аммиак диссоциирует по реакции:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ . Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует вглубь изделия.

Фазы, получающиеся в азотированном слое углеродистых сталей, не обеспечивают высокой твердости, и образующийся слой хрупкий.

Для азотирования используют стали, содержащие алюминий, молибден, хром, титан. Нитриды этих элементов дисперсны и обладают высокой твердостью и термической устойчивостью.

Типовые азотируемые стали: 38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2Н3Ю.

Глубина и поверхностная твердость азотированного слоя зависят от ряда факторов, из которых основные: температура азотирования, продолжительность азотирования и состав азотируемой стали.

В зависимости от условий работы деталей различают азотирование:

- для повышения поверхностной твердости и износостойкости;

- для улучшения коррозионной стойкости (антикоррозионное азотирование).

В первом случае процесс проводят при температуре 500...560°C в течение 24...90 часов, так как скорость азотирования составляет 0,01 мм/ч. Содержание азота в поверхностном слое составляет 10...12 %, толщина слоя (h) – 0,3...0,6 мм. На поверхности получают твердость около 1000 HV. Охлаждение проводят вместе с печью в потоке аммиака.

Значительное сокращение времени азотирования достигается при ионном азотировании, когда между катодом (деталью) и анодом (контейнерной установкой) возбуждается тлеющий разряд. Происходит ионизация азотсодержащего газа, и ионы бомбардируя поверхность катода, нагревают его до температуры насыщения. Катодное распыление осуществляется в течение 5...60 мин при напряжении 1100...1400 В и давлении 0,1...0,2 мм рт. ст., рабочее напряжение 400...1100 В, продолжительность процесса до 24 часов.

Антикоррозионное азотирование проводят и для легированных, и для углеродистых сталей. Температура проведения азотирования – 650...700°C, продолжительность процесса – 10 часов. На поверхности образуется слой  $\epsilon'$  – фазы толщиной 0,01...0,03 мм, который обладает высокой стойкостью против коррозии. ( $\epsilon'$  – фаза – твердый раствор на основе нитрида железа  $\text{Fe}_3\text{N}$ , имеющий гексагональную решетку).

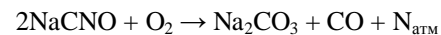
Азотирование проводят на готовых изделиях, прошедших окончательную механическую и термическую обработку (закалка с высоким отпускком).

После азотирования в сердцевине изделия сохраняется структура сорбита, которая обеспечивает повышенную прочность и вязкость.

### 3.2.4. Цианирование и нитроцементация

**Цианирование** – химико-термическая обработка, при которой поверхность насыщается одновременно углеродом и азотом.

Осуществляется в ваннах с расплавленными цианистыми солями, например NaCN с добавками солей NaCl, BaCl и др. При окислении цианистого натрия образуется атомарный азот и окись углерода:



Глубина слоя и концентрация в нем углерода и азота зависят от температуры процесса и его продолжительности. Цианированный



слой обладает высокой твердостью 58...62 HRC и хорошо сопротивляется износу. Повышаются усталостная прочность и коррозионная стойкость. Продолжительности процесса 0,5...2 часа.

Высокотемпературное цианирование – проводится при температуре 800...950°C, сопровождается преимущественным насыщением стали углеродом до 0,6...1,2 %, (жидкостная цементация). Содержание азота в цианированном слое 0,2...0,6 %, толщина слоя 0,15...2 мм. После цианирования изделия подвергаются закалке и низкому отпуску. Окончательная структура цианированного слоя состоит из тонкого слоя карбонитридов Fe<sub>2</sub>(C, N), а затем азотистый мартенсит.

По сравнению с цементацией высокотемпературное цианирование происходит с большей скоростью, приводит к меньшей деформации деталей, обеспечивает большую твердость и сопротивление износу.

Низкотемпературное цианирование – проводится при температуре 540...600°C, сопровождается преимущественным насыщением стали азотом. Проводится для инструментов из быстрорежущих, высокохромистых сталей, является окончательной обработкой.

Основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей.

**Нитроцементация** – газовое цианирование, осуществляется в газовых смесях из цементующего газа и диссоциированного аммиака. Состав газа температура процесса определяют соотношение углерода и азота в цианированном слое. Глубина слоя зависит от температуры и продолжительности выдержки.

Высокотемпературная нитроцементация проводится при температуре 830...950°C, для машиностроительных деталей из углеродистых и малолегированных сталей при повышенном содержании аммиака. Завершающей термической обработкой является закалка с низким отпуском. Твердость достигает 56...62 HRC.

В автомобильном производстве 95 % деталей подвергаются нитроцементации.

Низкотемпературной нитроцементации подвергают инструмент из быстрорежущей стали после термической обработки (закалки и отпуска). Процесс проводят при температуре 530...570°C, в течение 1,5...3 часов. Образуется поверхностный слой толщиной 0,02...0,004 мм с твердостью 900...1200 HV. Нитроцементация характеризуется безопасностью в работе, низкой стоимостью.

### 3.3. Диффузионная металлизация стали

**Диффузионная металлизация** – химико-термическая обработка, при которой поверхность стальных изделий насыщается различными элементами: алюминием, хромом, кремнием, бором и др.

При насыщении хромом процесс называют хромированием, алюминием – алитированием, кремнием – силицированием, бором – борированием.

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

При твердой диффузионной металлизации металлизатором является ферросплав с добавлением хлористого аммония (NH<sub>4</sub>Cl). В результате реакции металлизатора с HCl или Cl<sub>2</sub> образуется соединение хлора с металлом (AlCl<sub>3</sub>, CrCl<sub>2</sub>, SiCl<sub>4</sub>), которые при контакте с поверхностью диссоциируют с образованием свободных атомов.

Жидкая диффузионная металлизация проводится погружением детали в расплавленный металл (например, алюминий).

Газовая диффузионная металлизация проводится в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.

Диффузия металлов протекает очень медленно, так как образуются растворы замещения, поэтому при одинаковых температурах диффузионные слои в десятки и сотни раз тоньше, чем при цементации.

Диффузионная металлизация – процесс дорогостоящий, осуществляется при высоких температурах (1000...1200°C) в течение длительного времени.

Одним из основных свойств металлизированных поверхностей является жаростойкость, поэтому жаростойкие детали для рабочих температур 1000...1200°C изготавливают из простых углеродистых сталей с последующим алитированием, хромированием или силицированием.

Исключительно высокой твердостью (2000 HV) и высоким сопротивлением износу из-за образования боридов железа (FeB, FeB<sub>2</sub>) характеризуются борированные слои, но эти слои очень хрупкие.

### 3.4. Термомеханическая обработка стали

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

(закалка предварительно деформированной стали в аустенитном состоянии).

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 стали после закалки с низким отпуском.

### 3.5. Поверхностное упрочнение стальных деталей

Конструкционная прочность часто зависит от состояния материала в поверхностных слоях детали. Одним из способов поверхностного упрочнения стальных деталей является поверхностная закалка.

В результате поверхностной закалки увеличивается твердость поверхностных слоев изделия с одновременным повышением сопротивления истиранию и предела выносливости.

Общим для всех видов поверхностной закалки является нагрев поверхностного слоя детали до температуры закалки с последующим быстрым охлаждением. Эти способы различаются методами нагрева деталей. Толщина закаленного слоя при поверхностной закалке определяется глубиной нагрева.

Наибольшее распространение имеют электротермическая закалка с нагревом изделий токами высокой частоты (ТВЧ) и газопламенная закалка с нагревом газовой-кислородным или кислородно-керосиновым пламенем.

### 3.6. Закалка токами высокой частоты

Основан на том, что если в переменное магнитное поле, создаваемое проводником-индуктором, поместить металлическую деталь, то в ней будут индуцироваться вихревые токи, вызывающие нагрев металла. Чем больше частота тока, тем тоньше получается закаленный слой.

Обычно используются машинные генераторы с частотой 50...15000 Гц и ламповые генераторы с частотой больше  $10^6$  Гц. Глубина закаленного слоя – до 2 мм.

Индукторы изготавливаются из медных трубок, внутри которых циркулирует вода, благодаря чему они не нагреваются. Форма индуктора соответствует внешней форме изделия, при этом необходимо постоянство зазора между индуктором и поверхностью изделия.

Схема технологического процесса закалки ТВЧ представлена на рис. 20.

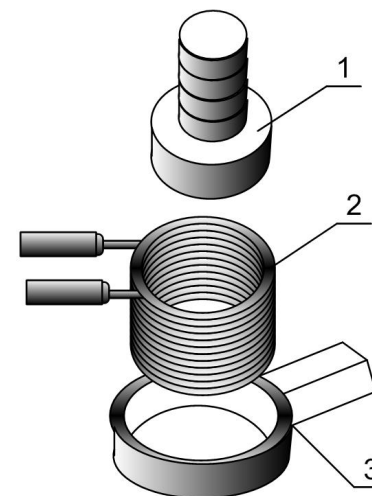


Рис. 20. Схема технологического процесса закалки ТВЧ

После нагрева в течение 3...5 с индуктора 2 деталь 1 быстро перемещается в специальное охлаждающее устройство – спрейер 3, через отверстия которого на нагретую поверхность разбрызгивается закалочная жидкость.

Высокая скорость нагрева смещает фазовые превращения в область более высоких температур. Температура закалки при нагреве токами высокой частоты должна быть выше, чем при обычном нагреве.

При правильных режимах нагрева после охлаждения получается структура мелкоигольчатого мартенсита. Твердость повышается на 2...4 HRC по сравнению с обычной закалкой, возрастает износостойкость и предел выносливости.

Перед закалкой ТВЧ изделие подвергают нормализации, а после закалки низкому отпуску при температуре 150...200°C (самоотпуск).

Наиболее целесообразно использовать этот метод для изделий из сталей с содержанием углерода более 0,4 %.

Преимущества метода:

- большая экономичность, нет необходимости нагревать все изделие;
- более высокие механические свойства;
- отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности

детали;

- снижение брака по короблению и образованию закалочных трещин;
  - возможность автоматизации процесса;
  - использование закалки ТВЧ позволяет заменить легированные стали на более дешевые углеродистые;
  - позволяет проводить закалку отдельных участков детали.
- Основной недостаток метода – высокая стоимость индукционных установок и индукторов.

Целесообразно использовать в серийном и массовом производстве.

### 3.7. Газопламенная закалка

Нагрев осуществляется ацетиленокислородным, газокислородным или керосино-кислородным пламенем с температурой 3000...3200°C.

Структура поверхностного слоя после закалки состоит из мартенсита, мартенсита и феррита. Толщина закаленного слоя 2...4 мм, твердость 50...56 HRC.

Метод применяется для закалки крупных изделий, имеющих сложную поверхность (косозубые шестерни, червяки), для закалки стальных и чугунных прокатных валков. Используется в массовом и индивидуальном производстве, а также при ремонтных работах.

При нагреве крупных изделий горелки и охлаждающие устройства перемещаются вдоль изделия, или – наоборот.

Недостатки метода:

- невысокая производительность;
- сложность регулирования глубины закаленного слоя и температуры нагрева (возможность перегрева).

### 3.8. Старение

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.

В стареющих сплавах выделения из твердых растворов встречаются в следующих основных формах:

- тонкопластинчатой (дискообразной);
- равноосной (сферической или кубической);
- игольчатой.

Форма выделений определяется конкурирующими факторами: поверхностной энергией и энергией упругой деформации, стремящимися к минимуму.

Поверхностная энергия минимальна для равноосных выделений. Энергия упругих искажений минимальна для выделений в виде тонких пластин.

Основное назначение старения – повышение прочности и стабилизация свойств.

Различают старение естественное, искусственное и после пластической деформации.

Естественным старением называется самопроизвольное повышение прочности и уменьшение пластичности закаленного сплава, происходящее в процессе его выдержки при нормальной температуре.

Нагрев сплава увеличивает подвижность атомов, что ускоряет процесс.

Повышение прочности в процессе выдержки при повышенных температурах называется искусственным старением.

Предел прочности, предел текучести и твердость сплава с увеличением продолжительности старения возрастают, достигают максимума и затем снижаются (явление перестаривания)

При естественном старении перестаривания не происходит. С повышением температуры стадия перестаривания достигается раньше.

Если закаленный сплав, имеющий структуру пересыщенного твердого раствора, подвергнуть пластической деформации, то также ускоряются процессы, протекающие при старении – это деформационное старение.

Старение охватывает все процессы, происходящие в пересыщенном твердом растворе: процессы, подготавливающие выделение, и сами процессы выделения.

После старения повышается прочность и снижается пластичность низкоуглеродистых сталей в результате дисперсных выделений в феррите цементита третичного и нитридов.

Старение является основным способом упрочнения алюминиевых и медных сплавов, а также многих жаропрочных сплавов.

### 3.9. Обработка стали холодом

Высокоуглеродистые и многие легированные стали имеют температуру конца мартенситного превращения ( $M_k$ ) ниже  $0^\circ\text{C}$ . Поэтому в структуре стали после закалки наблюдается значительное количество остаточного аустенита, который снижает твердость изделия, а также ухудшает магнитные характеристики. Для устранения аустенита остаточного проводят дополнительное охлаждение детали в области отрицательных температур, до температуры ниже  $t. M_k$  ( $-80^\circ\text{C}$ ). Обычно для этого используют сухой лед.

Такая обработка называется обработкой стали холодом.

Обработку холодом необходимо проводить сразу после закалки, чтобы не допустить стабилизации аустенита. Увеличение твердости после обработки холодом обычно составляет 1...4 HRC.

После обработки холодом сталь подвергают низкому отпуску, так как обработка холодом не снижает внутренних напряжений.

Обработке холодом подвергают детали шарикоподшипников, точных механизмов, измерительные инструменты.

### 3.10. Упрочнение методом пластической деформации

Основное назначение методов механического упрочнения поверхности – повышение усталостной прочности. Методы механического упрочнения – наклепывание поверхностного слоя на глубину 0,2...0,4 мм.

Разновидностями являются дробеструйная обработка и обработка роликами.

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

При **обработке роликами** деформация осуществляется давлением ролика из твердого металла на поверхность обрабатываемого изделия. При усилиях на ролик, превышающих предел текучести обрабатываемого материала, происходит наклеп на нужную глубину. Создание остаточных напряжений сжатия повышает предел усталости и долговечность изделия. Обкатка роликами применяется при обработке шеек валов, проволоки, при калибровке труб, прутков.

## 4. ЧЕРНЫЕ И ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

### 4.1. Стали. Классификация и маркировка сталей

Железо и его сплавы относятся к группе черных металлов. Все остальные металлы и сплавы считаются цветными.

#### 4.1.1. Влияние углерода и примесей на свойства сталей

##### 4.1.1.1. Влияние углерода

С ростом содержания углерода в структуре стали увеличивается количество цементита, при одновременном снижении доли феррита. Изменение соотношения между составляющими приводит к уменьшению пластичности, а также к повышению прочности и твердости. Прочность повышается до содержания углерода около 1%, а затем она уменьшается, так как образуется грубая сетка цементита вторичного.

Углерод влияет на вязкие свойства. Увеличение содержания углерода повышает порог хладоломкости 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.

##### 4.1.1.2. Влияние примесей

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

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

Марганец и кремний вводятся в процессе выплавки стали для раскисления, они являются технологическими примесями.

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

Содержание кремния не превышает 0,35...0,4 %. Кремний, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Кремний растворяется в феррите и повышает прочность стали, особенно повышается предел текучести,  $\sigma_{0,2}$ . 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  $\sigma_b$  и предел текучести  $\sigma_t$ , но снижает пластичность и вязкость.

Располагаясь вблизи зерен, увеличивает температуру перехода в хрупкое состояние, вызывает хладоломкость, уменьшает работу распространения трещин, Повышение содержания фосфора на каждую 0,01 % повышает порог хладоломкости на 20...25°C.

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 – уменьшает пластичность, свариваемость и коррозионная стойкость. P – искажает кристаллическую решетку.

Содержание серы в сталях составляет 0,025...0,06 %. Сера – вредная примесь, попадает в сталь из чугуна. При взаимодействии с железом образует химическое соединение – сульфид серы FeS, которое, в свою очередь, образует с железом легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 988°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 краснеломкости.

**Краснеломкость** – повышение хрупкости при высоких температурах

Сера снижает механические свойства, особенно ударную вязкость  $a_n$  и пластичность  $\psi$  и  $\delta$ , а так же предел выносливости. 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 (FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) нитридов (Fe<sub>2</sub>N), в виде твердого раствора или в свободном состоянии, располагаясь в дефектах (раковинах, трещинах).

**Примеси внедрения** (азот N, кислород O) повышают порог хладоломкости 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.

**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 до 150...180°, лучше в вакууме  $\sim 10^{-2} \dots 10^{-3}$  мм рт.ст.

Для удаления скрытых примесей используют вакуумирование.

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

#### 4. Случайные примеси.

##### 4.1.2. Назначение легирующих элементов

Основным легирующим элементом является хром (0,8...1,2)%. Он повышает прокаливаемость, способствует получению высокой и равномерной твердости стали. Порог хладоломкости хромистых сталей – около (0...-100)°C.

**Дополнительные легирующие элементы.**

Бор - 0.003%. Увеличивает прокаливаемость, а также повышает порог хладоломкости (+20...-60 °C).

Марганец – увеличивает прокаливаемость, однако содействует росту зерна, и повышает порог хладоломкости до (+40...-60)°C.

Титан (~0,1%) вводят для измельчения зерна в хромомарганцевой стали.

Введение молибдена (0,15...0,46%) в хромистые стали увеличивает прокаливаемость, снижает порог хладоломкости до -20...-120°C. Молибден увеличивает статическую, динамическую и усталостную прочность стали, устраняет склонность к внутреннему окислению. Кроме того, молибден снижает склонность к отпускной хрупкости сталей, содержащих никель.

Ванадий в количестве (0.1...0.3) % в хромистых сталях измельчает зерно и повышает прочность и вязкость.

Введение в хромистые стали никеля, значительно повышает прочность и прокаливаемость, понижает порог хладоломкости, но при этом повышает склонность к отпускной хрупкости (этот недостаток компенсируется введением в сталь молибдена). Хромоникелевые

стали, обладают наилучшим комплексом свойств. Однако никель является дефицитным, и применение таких сталей ограничено.

Значительное количество никеля можно заменить медью, это не приводит к снижению вязкости.

При легировании хромомарганцевых сталей кремнием получают, стали – **хромансиль** (20ХГС, 30ХГСА). Стали обладают хорошим сочетанием прочности и вязкости, хорошо свариваются, штампуются и обрабатываются резанием. Кремний повышает ударную вязкость и температурный запас вязкости.

Добавка свинца, кальция – улучшает обрабатываемость резанием.

#### 4.1.3. Распределение легирующих элементов в стали

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.

В сталях карбиды образуются металлами, расположенными в таблице Менделеева левее железа (хром, ванадий, титан), которые имеют менее достроенную d – электронную полосу.

В процессе карбидообразования углерод отдает свои валентные электроны на заполнение d – электронной полосы атома металла, тогда как у металла валентные электроны образуют металлическую связь, обуславливающую металлические свойства карбидов.

При соотношении атомных радиусов углерода и металла более 0,59 образуются типичные химические соединения:  $Fe_3C$ ,  $Mn_3C$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Fe_3W_3C$ , которые имеют сложную кристаллическую решетку и при нагреве растворяются в аустените.

При соотношении атомных радиусов углерода и металла менее 0,59 образуются фазы внедрения:  $Mo_2C$ ,  $WC$ ,  $VC$ ,  $TiC$ ,  $TaC$ ,  $W_2C$  – которые имеют простую кристаллическую решетку и трудно растворяются в аустените.

Все карбиды обладают высокой твердостью и температурой плавления.

#### 4.1.4. Классификация и маркировка сталей

##### 4.1.4.1. Признаки классификации сталей

Стали классифицируются по множеству признаков.

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

По **содержанию углерода**:

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

По **равновесной структуре**: доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные.

По **качеству**. Количественным показателем качества является содержания вредных примесей: серы и фосфора:

- больше 0,04% - углеродистые стали обыкновенного качества;
- до 0,04% - качественные стали;
- менее 0,03% - высококачественные стали.

По **способу выплавки**:

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

По **назначению**:

- конструкционные – применяются для изготовления деталей машин и механизмов;

- инструментальные – применяются для изготовления различных инструментов;

- специальные – стали с особыми свойствами: электротехнические, с особыми магнитными свойствами и др.

##### 4.1.4.2. Конструкционные стали

Конструкционные стали применяют для изготовления деталей машин, конструкций и сооружений. Конструкционными могут быть углеродистые и легированные стали. Содержание углерода в этой группе сталей обычно не превышает 0,5 – 0,6%.

**Углеродистые конструкционные стали** подразделяются на 2 класса: обыкновенные и повышенного качества.

В **зависимости от условий и степени раскисления** различают несколько видов сталей.

**Спокойные** стали получают полным раскислением металла в печи. В результате в металле содержится минимальное количество закиси железа, что обеспечивает его «спокойное» застывание.

**Кипящие** стали не раскисляют, что приводит к повышенному содержанию в их составе закиси железа. При застывании это соединение реагирует с углеродом металла, образуя угарный газ. Выделение пузырьков этого газа создает впечатление, что металл кипит. Кипящие стали являются более дешевыми, т.к. при их производстве отходы минимальны. Эти стали обладают чуть худшими технологическими свойствами по сравнению со спокойными сталями.

**Полуспокойные** стали относятся к промежуточному классу. Они получают все более широкое применение. При маркировке кипящие стали дополняются буквами кп, спокойные – сп, полуспокойные – пс.

Стали **обыкновенного качества** – дешевые и поэтому самые распространенные стали. В процессе выплавки их меньше очищают от вредных примесей. Их используют для менее ответственных деталей и конструкций: прутки, балки, уголки, трубы, листы и т.п. Маркируют эти стали символами Ст0, Ст1,...Ст6.

“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. Буквы Б и В (кроме А) указывают в названии перед символами “Ст” (БСт.Зкп, ВСт.Зпс, ВСт.4сп).

**Качественные углеродистые** стали выплавляют кислородно-конверторным способом. К сталям этой группы предъявляют более высокие требования по составу. Качественные стали маркируют цифрами 08, 10, 15 20 ... 85. Эти числа указывают содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 20 содержит 0,2% углерода.

**Автоматные** стали предназначены для обработки при больших скоростях резания. Для этого в составе стали повышают содержание серы и фосфора. Стали маркируют буквой А, за которой идут цифры, показывающие содержание углерода в сотых долях.

В **легированные конструкционные** стали специально добавляют компоненты, которые называют легирующими элементами. Легированные стали обладают лучшими по сравнению с

углеродистыми сталями, свойствами. В качестве легирующих добавок используют марганец, хром, бор, никель, молибден, кремний, вольфрам и др. Легированные стали маркируют цифрами и буквами. Цифры показывают содержание углерода, а буквы – легирующие добавки. Если цифры стоят после буквы, обозначающей легирующий элемент, то они показывают его содержание в процентах.

Обозначения легирующих элементов:

Х – хром, Н – никель, М – молибден, В – вольфрам, К – кобальт, Т – титан, А – азот (указывается в середине марки), Г – марганец, Д – медь, Ф – ванадий, С – кремний, П – фосфор, Р – бор, Б – ниобий, Ц – цирконий, Ю – алюминий

Например, сталь 15Х25Н19ВС2 содержит:

0,15 % углерода (“15”),

25% хрома (“Х25”),

19 % никеля (“Н19”),

до 1% вольфрама (“В”),

до 2 % кремния (“С2”).

Для обозначения **высококачественных легированных сталей** в конце марки указывается символ А.

#### 4.1.4.3. Цементуемые стали

Используются для изготовления деталей, работающих на износ и подвергающихся действию переменных и ударных нагрузок. Детали должны сочетать высокую поверхностную прочность и твердость и достаточную вязкость сердцевины.

Цементации подвергаются низкоуглеродистые стали с содержанием углерода до 0,25%, что позволяет получить вязкую сердцевину. Для деталей, работающих с большими нагрузками, применяются стали с повышенным содержанием углерода (до 0,35 %).

С повышением содержания углерода прочность сердцевины увеличивается, а вязкость снижается. Детали подвергаются цианированию и нитроцементации.

**Цементуемые углеродистые** стали 15, 20, 25 используются для изготовления деталей небольшого размера, работающих в условиях изнашивания при малых нагрузках (втулки, валики, оси, шпильки и др.). Твердость на поверхности составляет 60...64 НРС, сердцевина остается мягкой.

**Цементуемые легированные** стали применяют для более крупных и тяжелонагруженных деталей, в которых необходимо иметь, кроме высокой твердости поверхности, достаточно прочную сердцевину (кулачковые муфты, поршни, пальцы, втулки).

**Хромистые** стали 15X, 20X используются для изготовления небольших изделий простой формы, цементуемых на глубину  $h = 1 \dots 1,5$  мм. При закалке с охлаждением в масле, выполняемой после цементации, сердцевина имеет бейнитное строение. Вследствие этого хромистые стали обладают более высокими прочностными свойствами при несколько меньшей пластичности в сердцевине и большей прочностью в цементованном слое.

Дополнительное легирование хромистых сталей **ванадием** (сталь 15XФ), способствует получению более мелкого зерна, что улучшает пластичность и вязкость.

**Никель** увеличивает глубину цементованного слоя, препятствует росту зерна и образованию грубой цементитной сетки, оказывает положительное влияние на свойства сердцевины. Хромоникелевые стали 20ХН, 12ХН3А применяют для изготовления деталей средних и больших размеров, работающих на износ при больших нагрузках (зубчатые колеса, шлицевые валы). Одновременное легирование хромом и никелем, который растворяется в феррите, увеличивает прочность, пластичность и вязкость сердцевины и цементованного слоя. Такие стали мало чувствительны к перегреву. Большая устойчивость переохлажденного аустенита в области перлитного и промежуточного превращений обеспечивает высокую прокаливаемость хромоникелевых сталей и позволяет проводить закалку крупных деталей с охлаждением в масле и на воздухе.

Стали, дополнительно легированные **вольфрамом** или молибденом (18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА), применяют для изготовления крупных тяжело нагруженных деталей. Эти стали являются лучшими конструкционными сталями, но дефицитность никеля ограничивает их применение.

**Хромомарганцевые** стали применяют вместо дорогих хромоникелевых, однако эти стали менее устойчивы к перегреву и имеют меньшую вязкость. Введение небольшого количества **титана** (0,06...0,12 %) уменьшает склонность стали к перегреву (стали 18ХГТ, 30ХГТ).

С целью повышения прочности применяют легирование **бором** (0,001...0,005 %) 20ХГР, но бор способствует росту зерна при нагреве.

#### 4.1.4.4. Улучшаемые стали

Стали, подвергаемые термическому **улучшению**, широко применяют для изготовления различных деталей, работающих в сложных напряженных условиях (при действии разнообразных нагрузок, в том числе переменных и динамических). Стали

приобретают структуру сорбита, хорошо воспринимающую ударные нагрузки. Важное значение имеет сопротивление хрупкому разрушению.

Улучшению подвергаются среднеуглеродистые стали с содержанием углерода 0,30...0,50 %.

Улучшаемые углеродистые стали 35, 40, 45 дешевы, из них изготавливают детали, испытывающие небольшие напряжения (сталь 35), и детали, требующие повышенной прочности (стали 40, 45). Но термическое улучшение этих сталей обеспечивает высокий комплекс механических свойств только в деталях небольшого сечения, так как стали обладают низкой прокаливаемостью. Стали этой группы можно использовать и в нормализованном состоянии.

Детали, требующие высокой поверхностной твердости при вязкой сердцевине (зубчатые колеса, валы, оси, втулки), подвергаются поверхностной закалке токами высокой частоты. Для снятия напряжений проводят низкий отпуск.

#### 4.1.4.5. Улучшаемые легированные стали

Улучшаемые легированные стали применяют для более крупных и более нагруженных ответственных деталей. Стали обладают лучшим комплексом механических свойств: выше прочность при сохранении достаточной вязкости и пластичности, ниже порог хладноломкости.

**Хромистые** стали 30X, 40X, 50X используются для изготовления небольших средненагруженных деталей. Повышение прокаливаемости достигается микролегированием бором (35ХР). Введение в сталь ванадия значительно увеличивает вязкость (40ХФА).

**Хромокремнистые** (33ХС) и хромокремниймарганцевые (хромансил) (25ХГСА) стали обладают высокой прочностью и умеренной вязкостью. Стали хромансилы обладают высокой свариваемостью, из них изготавливают стыковочные сварные узлы, кронштейны, крепежные и другие детали. Широко применяются в автомобилестроении и авиации.

**Хромоникелевые** стали 45ХН, 30ХН3А отличаются хорошей прокаливаемостью, прочностью и вязкостью, Ванадий способствует измельчению зерна.

Стали 36Х2Н2МФА, 38ХН3ВА др. обладают лучшими свойствами, относятся к мартенситному классу, слабо разупрочняются при нагреве до 300...400 °С. из них изготавливаются валы и роторы турбин, тяжело нагруженные детали редукторов и компрессоров.



#### 4.1.4.6. Высокопрочные стали

**Высокопрочными** называют стали, имеющие предел прочности более 1500 МПа, который достигается подбором химического состава и оптимальной термической обработки.

Такой уровень прочности можно получить в среднеуглеродистых легированных сталях, (30ХГСН2А, 40ХН2МА), применяя закалку с низким отпусканием (при температуре 200...250°C) или изотермическую закалку с получением структуры нижнего бейнита.

После изотермической закалки среднеуглеродистые легированные стали имеют несколько меньшую прочность, но большую пластичность и вязкость. Поэтому они более надежны в работе, чем закаленные и низкоотпущенные.

При высоком уровне прочности закаленные и низкоотпущенные среднеуглеродистые стали обладают повышенной чувствительностью к концентраторам напряжения, склонностью к хрупкому разрушению, поэтому их рекомендуется использовать для работы в условиях плавного нагружения.

Высокая прочность может быть получена и за счет термомеханической обработки.

Стали 30ХГСА, 38ХН3МА после низкотемпературной термомеханической обработки имеют предел прочности 2800 МПа, относительное удлинение и ударная вязкость увеличиваются в два раза по сравнению с обычной термической обработкой. Это связано с тем, что частичное выделение углерода из аустенита при деформации облегчает подвижность дислокаций внутри кристаллов мартенсита, что способствует увеличению пластичности.

**Мартенситно-старяющие** стали (03Н18К9М5Т, 04Х11Н9М2Д2ТЮ) превосходят по конструкционной прочности и технологичности среднеуглеродистые легированные стали. Они обладают малой чувствительностью к надрезам, высоким сопротивлением хрупкому разрушению и низким порогом хладоломкости при прочности около 2000 МПа.

Мартенситно-старяющие стали представляют собой безуглеродистые сплавы железа с никелем (8..25 %), дополнительно легированные кобальтом, молибденом, титаном, алюминием, хромом и другими элементами. Благодаря высокому содержанию никеля, кобальта и малой концентрации углерода в результате закалки в воде или на воздухе фиксируется высокопластичный, но низкопрочный железоникелевый мартенсит, пересыщенный легирующими элементами. Основное упрочнение происходит в процессе старения

при температуре 450...550 °С за счет выделения из мартенситной матрицы когерентно с ней связанных мелкодисперсных фаз. Мартенситно-старяющие стали обладают высокой конструкционной прочностью в интервале температур от криогенных до 500 °С и рекомендуются для изготовления корпусов ракетных двигателей, стволов артиллерийского и стрелкового оружия, корпусов подводных лодок, батискафов, высоконагруженных дисков турбомашин, зубчатых колес, шпинделей, червяков и т.д.

#### 4.1.4.7. Рессорно-пружинные стали

Пружины, рессоры и другие упругие элементы являются важнейшими деталями различных машин и механизмов. В работе они испытывают многократные переменные нагрузки. 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. **Релаксацией напряжений** называется самопроизвольное снижение напряжений при постоянной суммарной деформации. Релаксация приводит к снижению упругости и надежности работы пружин.

Пружины изготавливаются из углеродистых (65, 70) и легированных (60С2, 50ХГС, 60С2ХФА, 55ХГР) конструкционных сталей.

Для упрочнения пружинных углеродистых сталей применяют **холодную пластическую деформацию** посредством дробеструйной и гидроабразивной обработок, в процессе которых в поверхностном слое деталей наводятся остаточные напряжения сжатия.

Упругие и прочностные свойства пружинных сталей достигаются при изотермической закалке.

Пружинные стали легируют элементами, которые повышают предел упругости – кремнием, марганцем, хромом, вольфрамом, ванадием, бором.

#### 4.1.4.8. Стали для изделий, работающих при низких температурах

Для изделий, работающих при низких температурах,

необходимо применять стали с пониженным порогом хладоломкости. Особенно сильно понижены температурные пороги хладоломкости в никельсодержащих сталях. Эффективными материалами являются низколегированные малоуглеродистые стали, которые обладают хорошей свариваемостью.

Для обеспечения высокого комплекса механических свойств деталей машин используются малоуглеродистые стали, легированные элементами, способствующими дисперсионному упрочнению и образованию мелкозернистой структуры после термической обработки, 10ХСНД, 15Г2СФ, 12ГН2МФАЮ.

Для работы при сверхнизких температурах применяют **криогенные** стали и сплавы для изготовления емкостей для хранения и перевозки сжиженных газов, имеющих очень низкую температуру кипения (кислород – “–183 °С”, водород – “–253 °С”). Основными материалами для работы в подобных условиях являются аустенитные стали с повышенным содержанием никеля 10Х14Г14Н4Т, 10Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6.

#### 4.1.4.9. Износостойкие стали

Для работы в условиях изнашивания, сопровождаемого большими удельными нагрузками используется **высокомарганцевая** сталь 110Г13Л, имеющая в своем составе 1...1,4% углерода, 12...14 % марганца. Сталь имеет аустенитную структуру и относительно низкую твердость (200...250 НВ). В процессе работы, когда на деталь действуют высокие нагрузки, которые вызывают в материале напряжения, превосходящие предел текучести, происходит интенсивное наклепывание стали и рост ее твердости и износостойкости. При этом сталь сохраняет высокую вязкость. Благодаря этим свойствам сталь широко используется для изготовления корпусов шаровых мельниц, щек камнедробилок, крестовин рельсов, гусеничных траков, козырьков землечерпалок и т.д.

#### 4.1.4.10. Автоматные стали

Автоматными называют стали, обладающие повышенной обрабатываемостью резанием.

Эффективным металлургическим приемом повышения обрабатываемости резанием является введение в сталь серы, селена, теллура, кальция, которые изменяют состав неметаллических включений, а также свинца, который образует собственные включения.

Автоматные стали А12, А20 с повышенным содержанием серы и фосфора используются для изготовления малонагруженных деталей

на станках автоматах (болты, винты, гайки, мелкие детали швейных, текстильных, счетных и других машин). Эти стали обладают улучшенной обрабатываемостью резанием, поверхность деталей получается чистой и ровной. Износостойкость может быть повышена цементацией и закалкой.

Стали А30 и А40Г предназначены для деталей, испытывающих более высокие нагрузки.

У автоматных сталей, содержащих **свинец**, (АС11, АС40), повышается стойкость инструмента в 1...3 раза и скорость резания на 25...50 %.

Легированные **хромистые** и **хромоникелевые** стали с присадкой **свинца** и **кальция** (АЦ45Г2, АСЦ30ХМ, АС20ХГНМ) используются для изготовления нагруженных деталей в автомобильной и тракторной промышленности.

Автоматные стали подвергают диффузионному отжигу при температуре 1100...1150°С, для устранения ликвации серы.

#### 4.1.4.11. Жаростойкие стали и сплавы

**Жаростойкость (окалиностойкость)** – это способность металлов и сплавов сопротивляться газовой коррозии при высоких температурах в течение длительного времени.

Если изделие работает в окислительной газовой среде при температуре 500...550°С без больших нагрузок, то достаточно, чтобы они были только жаростойкими (например, детали нагревательных печей).

Сплавы на основе железа при температурах выше 570°С интенсивно окисляются, так как образующаяся в этих условиях на поверхности металла **оксид железа** Fe<sub>о</sub> (вюстит) с простой решеткой, имеющей дефицит атомов кислорода (твердый раствор вычитания), не препятствует диффузии кислорода и металла. Происходит интенсивное образование хрупкой окалины.

Для повышения жаростойкости в состав стали вводят элементы, которые образуют с кислородом оксиды с плотным строением кристаллической решетки (хром, кремний, алюминий).

Степень легированности стали, для предотвращения окисления, зависит от температуры.

Чем выше содержание **хрома**, тем более окалиностойки стали (например, сталь 15Х25Г является окалиностойкой до температуры 1100...1150°С).

Высокой жаростойкостью обладают **сильхромы**, сплавы на основе никеля – **нихромы**, стали 08Х17Т, 36Х18Н25С2, 15Х6СЮ.

#### 4.1.4.12. Жаропрочные стали и сплавы

**Жаропрочность** – это способность металла сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах. Жаропрочные материалы используются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах, когда имеет место явление ползучести.

Критериями оценки жаропрочности являются кратковременная и длительная прочности, ползучесть.

**Кратковременная прочность** определяется с помощью испытаний на растяжение разрывных образцов. Образцы помещают в печь и испытывают при заданной температуре. Обозначают кратковременную прочность  $\sigma_b^T$ , например  $\sigma_b^{300\text{ }^\circ\text{C}} = 320$  МПа.

Прочность зависит от продолжительности испытаний.

**Пределом длительной прочности** называется максимальное напряжение, которое вызывает разрушение образца при заданной температуре за определенное время.

Например,  $\sigma_{300\text{ ч}}^{900\text{ }^\circ\text{C}} = 320$  МПа, верхний индекс означает температуру испытаний, а нижний – заданную продолжительность испытания в часах. Для котельных установок требуется невысокое значение прочности, но в течение нескольких лет.

**Ползучесть** – свойство металла медленно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при постоянной температуре.

При испытаниях образцы помещают в печь с заданной температурой и прикладывают постоянную нагрузку. Измеряют деформацию индикаторами.

При обычной температуре и напряжениях выше предела упругости  $\sigma_y$  ползучесть не наблюдается, а при температуре выше  $0,6 T_{пл}$ , когда протекают процессы разупрочнения, и при напряжениях выше предела упругости наблюдается ползучесть.

Для углеродистых сталей ползучесть наблюдается при нагреве выше  $400^\circ\text{C}$ .

**Предел ползучести** – напряжение, которое за определенное время при заданной температуре вызывает заданное суммарное удлинение или заданную скорость деформации.

Например  $\sigma_{1/100\text{ ч}}^{900\text{ }^\circ\text{C}} = 250$  МПа, где верхний индекс – температура испытания в  $^\circ\text{C}$ , первый нижний индекс – заданное суммарное удлинение в процентах, второй – заданная продолжительность испытания в часах.

В качестве современных жаропрочных материалов можно отметить перлитные, мартенситные и **аустенитные жаропрочные**

**стали**, никелевые и кобальтовые жаропрочные сплавы, тугоплавкие металлы.

При температурах до  $300^\circ\text{C}$  обычные конструкционные стали имеют высокую прочность, нет необходимости использовать высоколегированные стали.

Для работы в интервале температур  $350\text{...}500^\circ\text{C}$  применяют легированные стали перлитного, ферритного и мартенситного классов.

**Перлитные жаропрочные стали.** К этой группе относятся котельные стали и сильхромы. Эти стали применяются для изготовления деталей котельных агрегатов, паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания. Стали содержат относительно мало углерода. Легирование сталей хромом, молибденом и ванадием производится для повышения температуры рекристаллизации (марки 12Х1МФ, 20Х3МФ).

Перлитные стали обладают удовлетворительной свариваемостью, поэтому используются для сварных конструкций (например, трубы пароперегревателей).

Для деталей газовых турбин применяют сложнолегированные стали мартенситного класса 12Х2МФСР, 12Х2МФБ, 15Х12ВНМФ. Увеличение содержания хрома повышает жаростойкость сталей. Хром, вольфрам, молибден и ванадий повышают температуру рекристаллизации, образуются карбиды, повышающие прочность после термической обработки. Термическая обработка состоит из закалки от температур выше  $1000^\circ\text{C}$  в масле или на воздухе и высокого отпуска при температурах выше температуры эксплуатации.

Для изготовления жаропрочных деталей, не требующих сварки (клапаны двигателей внутреннего сгорания), применяются хромокремнистые стали – сильхромы: 40Х10С2М, 40Х9С2, Х6С.

Жаропрочные свойства растут с увеличением степени легированности. Сильхромы подвергаются закалке от температуры около  $1000^\circ\text{C}$  и отпуску при температуре  $720\text{...}780^\circ\text{C}$ .

При рабочих температурах  $500\text{...}700^\circ\text{C}$  применяются стали аустенитного класса. Из этих сталей изготавливают клапаны двигателей, лопатки газовых турбин, сопловые аппараты реактивных двигателей и т.д.

Основными жаропрочными аустенитными сталями являются хромоникелевые стали, дополнительно легированные вольфрамом, молибденом, ванадием и другими элементами. Стали содержат 15...20 % хрома и 10...20 % никеля. Обладают жаропрочностью и жаростойкостью, пластичны, хорошо свариваются, но затруднена обработка резанием и давлением.

Детали, работающие при температурах 700...900°C, изготавливают из сплавов на основе никеля и кобальта (например, турбины реактивных двигателей).

Никелевые сплавы преимущественно применяют в деформированном виде. Они содержат более 55 % никеля и минимальное количество углерода (0,06...0,12 %). По жаропрочным свойствам превосходят лучшие жаропрочные стали.

По структуре никелевые сплавы разделяют на гомогенные (**нихромы**) и гетерогенные (**нимоники**).

**Нихромы.** Основой этих сплавов является никель, а основным легирующим элементом – хром (ХН60Ю, ХН78Т). Нихромы не обладают высокой жаропрочностью, но они очень жаростойки. Их применяют для малонагруженных деталей, работающих в окислительных средах, в том числе и для нагревательных элементов.

**Нимоники** являются четвертными сплавами никель – хром (около 20 %) – титан (около 2%) – алюминий (около 1 %) (ХН77ТЮ, ХН70МВТЮБ, ХН55ВМТФКЮ). Используются только в термически обработанном состоянии. Термическая обработка состоит из закалки с 1050...1150°C на воздухе и отпуска – старения при 600...800°C.

Основными материалами, которые могут работать при температурах выше 900°C (до 2500°C), являются сплавы на основе тугоплавких металлов – вольфрама, молибдена, ниобия и других.

Температуры плавления основных тугоплавких металлов: вольфрам – 3400°C, тантал – 3000°C, молибден – 2640°C, ниобий – 2415°C, хром – 1900°C.

Высокая жаропрочность таких металлов обусловлена большими силами межатомных связей в кристаллической решетке и высокими температурами рекристаллизации.

Наиболее часто применяют сплавы на основе молибдена. В качестве легирующих добавок в сплавы вводят титан, цирконий, ниобий. С целью защиты от окисления проводят силицирование, на поверхности сплавов образуется слой  $MoSi_2$  толщиной 0,03...0,04 мм. При температуре 1700°C силицированные детали могут работать 30 часов.

**Вольфрам** – наиболее тугоплавкий металл. Его используют в качестве легирующего элемента в сталях и сплавах различного назначения, в электротехнике и электронике (нити накала, нагреватели в вакуумных приборах).

В качестве легирующих элементов к вольфраму добавляют молибден, рений, тантал. Сплавы вольфрама с рением сохраняют

пластичность до –196°C и имеют предел прочности 150 МПа при температуре 1800°C.

#### 4.1.4.13. Инструментальные стали

**Инструментальными** называют стали, применяемые для изготовления различного инструмента. Углеродистые инструментальные стали маркируют буквой У, за которой следует цифра, показывающая содержание углерода в десятых долях процента. Если в конце маркировки стоит буква А, то означает, что сталь повышенного качества.

**Легируемые инструментальные стали.** Легируемые инструментальные стали маркируют цифрой, показывающей содержание углерода в десятых долях процента и буквами, показывающими состав легирующих элементов.

Например, Сталь 9ХС, сталь ХВГ.

В начале марки указывается однозначное число, показывающее содержание углерода в десятых долях процента. При содержании углерода более 1 %, число не указывается,

Далее перечисляются легирующие элементы, с указанием их содержания.

Некоторые стали имеют нестандартные обозначения.

**Быстрорежущие инструментальные стали.** Быстрорежущие стали маркируют буквой Р, за которой следует содержание в стали вольфрама в процентах.

Например, Сталь Р18

Р – индекс данной группы сталей (от rapid – скорость). Содержание углерода более 1%. Число показывает содержание основного легирующего элемента – вольфрама.

В указанной стали содержание вольфрама – 18 %.

Если стали содержат легирующие элемент, то их содержание указывается после обозначения соответствующего элемента.

**Шарикоподшипниковые стали.** Например, сталь ШХ6, сталь ШХ15ГС. Маркировка включает в обозначении несколько позиций: Ш – индекс данной группы сталей. Х – указывает на наличие в стали хрома. Последующее число показывает содержание хрома в десятых долях процента, в указанных сталях, соответственно, 0,6 % и 1,5 %. Также указываются входящие в состав стали легирующие элементы. Содержание углерода более 1 %.

**Стали для режущего инструмента.** Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, износостойкостью, достаточной прочностью и вязкостью (для инструментов ударного действия).

Режущие кромки могут нагреваться до температуры 500...900°C, поэтому важным свойством является теплостойкость, т. е., способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продолжительном нагреве (красностойкость).

#### **Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435)**

Содержат 0,65...1,35% углерода.

Стали У7...У13А – обладают высокой твердостью, хорошо шлифуются, дешевы и недефицитны. Из сталей марок У7, У8А изготавливают инструмент для работы по дереву и инструмент ударного действия, когда требуется повышенная вязкость – пуансоны, зубила, штампы, молотки.

Стали марок У9...У12 обладают более высокой твердостью и износостойкостью – используются для изготовления сверл, метчиков, фрез.

Сталь У13 обладает максимальной твердостью, используется для изготовления напильников, граверного инструмента.

Для снижения твердости и создания благоприятной структуры, все инструментальные стали до изготовления инструмента подвергают отжигу.

Для **заэвтектоидных** сталей проводят **сфероидизирующий отжиг**, в результате которого цементит вторичный приобретает зернистую форму. Регулируя скорость охлаждения можно получить любой размер зерен.

Окончательная термическая обработка – закалка с последующим отпуском.

Закалку для доэвтектоидных сталей проводят полную, а для заэвтектоидных – неполную. Структура закаленных сталей или мартенсит, или мартенсит и карбиды.

Температура отпуска выбирается в зависимости от твердости, необходимой для инструмента.

Для **инструментов ударного действия**, требующих повышенной вязкости, из сталей У7, У8 отпуск проводят при температуре 280...300°C, что обеспечивает твердость HRC 56...58.

Для напильников, метчиков, плашек отпуск проводят при температуре 150...200°C, при этом обеспечивается получение максимальной твердости — HRC 62...64.

Основными недостатками углеродистых инструментальных сталей является их невысокая прокаливаемость (5...10 мм), низкая теплостойкость (до 200°C), то есть инструменты могут работать только при невысоких скоростях резания.

**Легированные инструментальные стали.** Содержат 0,9...1,4 % углерода. В качестве легирующих элементов содержат хром, вольфрам, ванадий, марганец, кремний и другие. Общее содержание легирующих элементов до 5%.

Высокая твердость и износостойкость в основном определяются высоким содержанием углерода. Легирование используется для повышения закаливемости и прокаливаемости, сохранения мелкого зерна, повышения прочности и вязкости.

Термическая обработка включает закалку и отпуск.

Проводят закалку с температуры 800...850°C в масло или ступенчатую закалку, что уменьшает возможность коробления и образования закалочных трещин.

Отпуск проводят низкотемпературный, при температуре 150...200°C, что обеспечивает твердость HRC 61...66. Иногда, для увеличения вязкости, температуру отпуска увеличивают до 300°C, но при этом наблюдается снижение твердости HRC 55...60.

Для деревообрабатывающего инструмента из сталей 6ХС и 9ХФ рекомендуется изотермическая закалка, значительно улучшающая вязкость.

**Повышенное содержание кремния** (сталь 9ХС) способствует увеличению прокаливаемости до 40 мм и повышению устойчивости мартенсита при отпуске. Недостатками сталей, содержащих кремний, являются чувствительность их к обезуглероживанию при термообработке, плохая обрабатываемость резанием и деформированием из-за упрочнения феррита кремнием.

**Повышенное содержание марганца** (стали ХВГ, 9ХВСГ) способствует увеличению количества остаточного аустенита, что уменьшает деформацию инструмента при закалке. Это особенно важно для инструмента, имеющего большую длину при малом диаметре, например, протяжек.

**Хром** увеличивает прокаливаемость и твердость после закалки. Стали используются для изготовления инструмента и ударного, и режущего.

**Быстрорежущие стали.** Стали получили свое название за свойства. Вследствие высокой теплостойкости (550...650°C), изготовленные из них инструменты могут работать с достаточно высокими скоростями резания.

Стали содержат 0,7...1,5 % углерода, до 18 % основного легирующего элемента – вольфрама, до 5 % хрома и молибдена, до 10 % кобальта.

Добавление **ванадия** повышает износостойкость инструмента, но ухудшает шлифуемость. **Кобальт** повышает теплостойкость до 650°C и вторичную твердость HRC 67...70.

Охлаждение от закалочной температуры производится в масле. Структура стали после закалки состоит из легированного, очень тонкодисперсного мартенсита, значительного количества (30...40 %) остаточного аустенита и карбидов вольфрама. Твердость составляет 60...62 HRC. Наличие аустенита остаточного в структуре закаленной стали ухудшает режущие свойства.

Твердость стали после отпуска составляет 64...65 HRC. Структура стали после термообработки состоит из мартенсита отпуска и карбидов.

При термической обработке быстрорежущих сталей применяют обработку холодом. После закалки сталь охлаждают до температуры — 80 ... — 100°C, после этого проводят однократный отпуск при температуре 560°C для снятия напряжений.

Иногда для повышения износостойкости быстрорежущих сталей применяют низкотемпературное цианирование.

Основными видами режущих инструментов из быстрорежущей стали являются резцы, сверла, долбяки, протяжки, метчики машинные, ножи для резки бумаги. Часто из быстрорежущей стали изготавливают только рабочую часть инструмента.

Стали для **измерительных инструментов**. Основными требованиями, предъявляемыми к сталям, из которых изготавливаются измерительные инструменты, являются высокая твердость и износостойчивость, стабильность в размерах в течение длительного времени. Последнее требование обеспечивается минимальным температурным коэффициентом линейного расширения и сведением к минимуму структурных превращений во времени.

Для изготовления измерительных инструментов применяются:

- высокоуглеродистые инструментальные стали, легированные и углеродистые (стали У12, Х, Х9, ХГ), после закалки и стабилизирующего низкотемпературного (120...170 °С ) отпуска в течение 10...30 ч. До отпуска желательно провести обработку холодом. Получают твердость 62...67 HRC;

- малоуглеродистые стали (сталь 15, 20) после цементации и закалки с низким отпуском;

- нитралои (сталь 38ХМЮА) после азотирования на высокую твердость.

**Штамповые стали.** Инструмент, применяемый для обработки металлов давлением (штампы, пуансоны, матрицы) изготавливают из

штамповых сталей. Различают стали для штампов холодного и горячего деформирования.

Стали для **штампов холодного деформирования**. Стали должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, прочностью, вязкостью (чтобы воспринимать ударные нагрузки), сопротивлением пластическим деформациям.

Для **штампов небольших размеров** (до 25 мм) используют углеродистые инструментальные стали У10, У11, У12 после закалки и низкого отпуска на твердость 57...59 HRC. Это позволяет получить хорошую износостойкость и ударную вязкость.

Для более **крупных изделий** применяют легированные стали Х, Х9, Х6ВФ. Для повышения износостойкости инструмента после термической обработки проводят цианирование или хромирование рабочих поверхностей.

Для уменьшения брака при закалке необходимо медленное охлаждение в области температур мартенситного превращения (например, закалка из воды в масло для углеродистых сталей, ступенчатая закалка для легированных сталей).

Если штамповый инструмент испытывает **ударные нагрузки**, то используют стали, обладающие большей вязкостью (стали 4ХС4, 5ХНМ). Это достигается снижением содержания углерода, введением легирующих элементов и соответствующей термической обработкой. После закалки проводят высокий отпуск при температуре 480...580°C, что обеспечивает твердость 38...45 HRC.

Стали для **штампов горячего деформирования**. Дополнительно к общим требованиям, от сталей этой группы требуется устойчивость против образования трещин при многократном нагреве и охлаждении, окалиностойкость, высокая теплопроводность для отвода теплоты от рабочих поверхностей штампа, высокая прокаливаемость для обеспечения высокой прочности по всему сечению инструмента.

Для изготовления **молотовых штампов** применяют хромоникелевые среднеуглеродистые стали 5ХНМ, 5ХНВ, 4ХСМФ. Вольфрам и молибден добавляют для снижения склонности к отпускной хрупкости. После термической обработки, включающей закалку с температуры 760...820°C и отпуск при 460...540°C, сталь имеет структуру – сорбит или троостит и сорбит отпуска. Твердость 40...45 HRC.

Штампы горячего прессования работают в более тяжелых условиях. Для их изготовления применяются стали повышенной теплостойкости. Сталь 3Х2В8Ф сохраняет теплостойкость до 650°C, но

наличие карбидов вольфрама снижает вязкость. Сталь 4X5B2ФС имеет высокую вязкость. Повышенное содержание хрома и кремния значительно увеличивает окалиностойкость стали.

#### 4.1.5. Стали с особыми физическими свойствами

**Магнитные стали** применяют для изготовления постоянных магнитов. Высокие магнитные свойства стали получают после нагрева до 1250 градусов и охлаждением с определенной скоростью. После закалки следует отпуск при температуре 600 градусов.

Стали с **высоким электрическим сопротивлением** изготавливают в виде проволоки и ленты. В качестве них применяют хромоалюминиевые низкоуглеродистые стали ферритного класса.

Стали с **заданным температурным коэффициентом линейного расширения** применяют в машиностроении и приборостроении. Наиболее распространены сплавы железо-никель. Из них например, изготавливают детали машин и приборов, которые должны сохранять свои размеры постоянными в определенном интервале температур.

Стали с **особыми упругими свойствами** применяют для изготовления упругих элементов – пружин, рессор, торсион, сильфонов и т.д.

#### 4.1.6. Коррозионностойкие стали

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.** Содержание хрома должно быть не менее 13% (13...18%). Коррозионная стойкость объясняется образованием на поверхности защитной пленки оксида  $Cr_2O_3$ .

Углерод в нержавеющих 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 нержавеющих сталей.

Различают несколько классов сталей.

**Стали ферритного класса** 08X13, 12X17, 08X25T, 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 10X13H3, 12X17H2 используются для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в агрессивных средах. После закалки от температуры 1000°C и отпуска при 700...750°C предел текучести сталей составляет 1000 МПа.

Термическую обработку для ферритных сталей проводят для получения структуры более однородного твердого раствора, что увеличивает коррозионную стойкость.

**Стали мартенситного класса** 20X13, 30X13, 40X13. После закалки и отпуска при 180...250°C стали 30X13, 40X13 имеют твердость 50...60 HRC и используются для изготовления режущего инструмента (хирургического), пружин для работы при температуре 400...450°, предметов домашнего обихода.

**Стали аустенитного класса** – высоколегированные хромоникелевые стали.

**Никель** – аустенитобразующий элемент, сильно понижающий критические точки  $\gamma \rightarrow \alpha$  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.

Упрочняют аустенитные стали холодной пластической деформацией, что вызывает эффект наклепа. Предел текучести при этом может достигнуть значений 1000...1200 МПа, а предел прочности – 1200...1400 МПа.

Для уменьшения дефицитного никеля часть его заменяют марганцем (сталь 40X14Г14НЗТ) или азотом (сталь 10X20Н4АГ11).

**Аустенитно-ферритные стали** 12X21Н5Т, 08X22Н6Т являются заменителями хромоникелевых сталей с целью экономии никеля. Аустенитно-ферритные стали не подвержены коррозионному растрескиванию под напряжением: трещины могут возникать только на аустенитных участках, но ферритные участки задерживают их развитие. При комнатных температурах аустенитно-ферритные стали имеют твердость и прочность выше, а пластичность и ударную вязкость ниже, чем стали аустенитного класса.

Кроме нержавеющей сталей в промышленности применяют **коррозионно-стойкие сплавы** – это сплавы на никелевой основе. Сплавы типа **хастеллой** содержат до 80 % никеля, другим элементом является молибден в количестве до 15...30 %. Сплавы являются коррозионно-стойкими в особо агрессивных средах (кипящая фосфорная или соляная кислота), обладают высокими механическими свойствами. После термической обработки – закалки и старения при температуре 800°C – сплавы имеют предел прочности 1200 МПа, и твердость НВ 360. Недостатком является склонность к межкристаллической коррозии, поэтому содержание углерода в этих сплавах должно быть минимальным.

## 4.2. Твердые сплавы

В качестве материалов для инструментов используются твердые сплавы, которые состоят из твердых карбидов и связующей фазы. Они изготавливаются методами порошковой металлургии.

Характерной особенностью твердых сплавов является очень высокая твердость 87...92 HRC при достаточно высокой прочности. Твердость и прочность зависят от количества связующей фазы (кобальта) и величины зерен карбидов. Чем крупнее зерна карбидов, тем выше прочность. Твердые сплавы отличаются большой износостойкостью и теплостойкостью. Основными твердыми сплавами являются группы ВК (WC + Co), ТК (WC + TiC + Co), ТТК (WC + TiC + TaC + Co). Наиболее распространенными сплавами группы ВК являются сплавы марок ВК3, ВК6, ВК8, ВК20, где число показывает содержание кобальта в процентах, остальное – карбиды вольфрама WC. Сплавы группы ТК марок Т30К6, Т14К8 – первое число

показывает содержание карбидов титана в процентах, второе – содержание кобальта в процентах. Сплавы этой группы лучше противостоят изнашиванию, обладают большей твердостью, тепло- и жаростойкостью, стойкостью к коррозии, но меньшей теплопроводностью и большей хрупкостью. Используются на средних и высоких скоростях резания.

Сплавы с **малым** количеством **кобальта** обладают повышенной твердостью и износостойкостью, но минимальной прочностью, Поэтому их используют для чистового точения (ВК3, Т30К4).

Сплавы с **повышенным** содержанием **кобальта** используют для черного точения (ВК8, Т14К8).

Сплав ВК20 используют для армирования штампов, что повышает их износостойкость.

Износостойкость инструментов из твердых сплавов превышает износостойкость инструментов из быстрорежущих сталей в 10...20 раз и сохраняется до температур 800...1000°C.

### 4.2.1. Чугуны. Особенности строения чугуна

Чугун отличается от стали: по составу – более высокое содержание углерода и примесей; по технологическим свойствам – более высокие литейные свойства, малая способность к пластической деформации, почти не используется в сварных конструкциях.

В зависимости от состояния углерода в чугуне различают:

**белый чугун** – углерод в связанном состоянии в виде цементита, в изломе имеет белый цвет и металлический блеск;

**серый чугун** – весь углерод или большая часть находится в свободном состоянии в виде графита, а в связанном состоянии находится не более 0,8 % углерода. Из-за большого количества графита его излом имеет серый цвет;

**половинчатый** – часть углерода находится в свободном состоянии в форме графита, но не менее 2 % углерода находится в форме цементита. Мало используется в технике.

В результате превращения углерод может не только химически взаимодействовать с железом, но и выделяться в элементарном состоянии в форме графита. Жидкая фаза, аустенит и феррит могут находиться в равновесии и с графитом.

При высоких температурах цементит разлагается с выделением графита, поэтому диаграмма состояния железо – цементит является метастабильной, а диаграмма железо – графит – стабильной.



Процесс образования графита в сплавах железа с углеродом называется графитизацией.

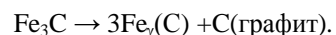
**Графит** – это полиморфная модификация углерода. Так как графит содержит 100% углерода, а цементит – 6,67 %, то жидкая фаза и аустенит по составу более близки к цементиту, чем к графиту. Следовательно, образование цементита из жидкой фазы и аустенита должно протекать легче, чем графита.

С другой стороны, при нагреве цементит разлагается на железо и углерод. Следовательно, графит является более стабильной фазой, чем цементит.

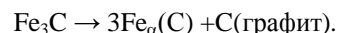
Возможны два пути образования графита в чугуне.

При благоприятных условиях (наличие в жидкой фазе готовых центров кристаллизации графита и очень медленное охлаждение) происходит непосредственное образование графита из жидкой фазы.

При разложении ранее образовавшегося цементита. При температурах выше 738°C цементит разлагается на смесь аустенита и графита по схеме:



При температурах ниже 738°C разложение цементита осуществляется по схеме:



При малых скоростях охлаждения степень разложения цементита больше.

Структура чугунов зависит от степени графитизации, т.е. от того, сколько углерода находится в связанном состоянии.

Выдержка при температуре больше 738°C приводит к графитизации избыточного нерастворившегося цементита. Если процесс завершить полностью, то при высокой температуре структура будет состоять из аустенита и графита, а после охлаждения – из перлита и графита.

При незавершенности процесса первичной графитизации, выше температуры 738°C структура состоит из аустенита, графита и цементита, а ниже этой температуры – из перлита, графита и цементита.

При переходе через критическую точку превращения аустенита в перлит, и выдержке при температуре ниже критической приведет к распаду цементита, входящего в состав перлита (вторичная графитизация). Если процесс завершен полностью, то структура состоит из феррита и графита, при незавершенности процесса – из перлита, феррита и графита.

#### 4.2.2. Строение, свойства, классификация и маркировка серых чугунов

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

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

Углерод и кремний способствуют графитизации, марганец затрудняет графитизацию и способствует отбеливанию чугуна. Сера способствует отбеливанию чугуна и ухудшает литейные свойства, ее содержание ограничено – 0,08...0,12 %. Фосфор на процесс графитизации не влияет, но улучшает жидкотекучесть, Фосфор является в чугунах полезной примесью, его содержание – 0,3...0,8 %.

Графитовые включения можно рассматривать как соответствующей формы пустоты в структуре чугуна. Около таких дефектов при нагружении концентрируются напряжения, значение которых тем больше, чем острее дефект. Отсюда следует, что графитовые включения пластинчатой формы в максимальной мере разупрочняют металл. Более благоприятна хлопьевидная форма, а оптимальной является шаровидная форма графита. Пластичность зависит от формы таким же образом. Относительное удлинение ( $\delta$ ) для серых чугунов составляет 0,5 %, для ковких – до 10 %, для высокопрочных – до 15%.

Наличие графита наиболее резко снижает сопротивление при жестких способах нагружения: удар; разрыв. Сопротивление сжатию снижается мало.

##### Положительные стороны наличия графита:

- графит улучшает обрабатываемость резанием, так как образуется ломкая стружка;
- чугун имеет лучшие антифрикционные свойства, по сравнению со сталью, так как наличие графита обеспечивает дополнительную смазку поверхностей трения;
- из-за микропустот, заполненных графитом, чугун хорошо гасит вибрации и имеет повышенную циклическую вязкость;

- детали из чугуна не чувствительны к внешним концентраторам напряжений (выточки, отверстия, переходы в сечениях);

- чугун значительно дешевле стали;

- производство изделий из чугуна литьем дешевле изготовления изделий из стальных заготовок обработкой резанием, а также литьем и обработкой давлением с последующей механической обработкой.

#### 4.2.3. Серый чугун

Структура не оказывает влияние на пластичность, она остается чрезвычайно низкой. Но оказывает влияние на твердость. Механическая прочность в основном определяется количеством, формой и размерами включений графита. Мелкие, завихренной формы чешуйки графита меньше снижают прочность. Такая форма достигается путем модифицирования. В качестве модификаторов применяют **алюминий, силикокальций, ферросилиций**.

Серый чугун широко применяется в машиностроении, так как легко обрабатывается и обладает хорошими свойствами.

В зависимости от прочности серый чугун подразделяют на 10 марок (ГОСТ 1412).

Серые чугуны при малом сопротивлении растяжению имеют достаточно высокое сопротивление сжатию. Серые чугуны содержат углерода – 3,2...3,5 %; кремния – 1,9...2,5 %; марганца – 0,5...0,8 %; фосфора – 0,1...0,3 %; серы – < 0,12 %.

Учитывая малое сопротивление отливок из серого чугуна растягивающим и ударным нагрузкам, следует использовать этот материал для деталей, которые подвергаются сжимающим или изгибающим нагрузкам. В станкостроении это – базовые, корпусные детали, кронштейны, зубчатые колеса, направляющие; в автостроении – блоки цилиндров, поршневые кольца, распределительные валы, диски сцепления. Отливки из серого чугуна также используются в электромашиностроении, для изготовления товаров народного потребления.

Обозначаются индексом СЧ (серый чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, деленное на 10, например СЧ 15 – предел прочности на растяжение 150 МПа.

#### 4.2.4. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом

Высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293) могут иметь **ферритную** (ВЧ 35), **феррито-перлитную** (ВЧ45) и **перлитную** (ВЧ 80)

металлическую основу. Получают эти чугуны из серых, в результате модифицирования магнием или церием (добавляется 0,03...0,07% от массы отливки). По сравнению с серыми чугунами, механические свойства повышаются, это вызвано отсутствием неравномерности в распределении напряжений из-за шаровидной формы графита.

Чугуны с **перлитной** металлической основой имеют высокие показатели прочности при меньшем значении пластичности. Соотношение пластичности и прочности ферритных чугунов – обратное.

Высокопрочные чугуны обладают высоким пределом текучести – в пределах 300 ... 420 МПа. Эти значения выше предела текучести стальных отливок.

Также характерна достаточно высокая ударная вязкость и усталостная прочность – 230 ... 250 МПа.

Высокопрочные чугуны содержат: углерода – 3,2...3,8 %, кремния – 1,9...2,6 %, марганца – 0,6...0,8 %, фосфора – до 0,12 %, серы – до 0,3 %.

Эти чугуны обладают высокой жидкотекучестью, линейная усадка – около 1%. Литейные напряжения в отливках несколько выше, чем для серого чугуна. Из-за высокого модуля упругости достаточно высокая обрабатываемость резанием. Обладают удовлетворительной свариваемостью.

Из высокопрочного чугуна изготавливают тонкостенные отливки (поршневые кольца), шаботы ковочных молотов, станины и рамы прессов и прокатных станов, изложницы, резцедержатели, планшайбы.

Обозначаются индексом ВЧ (высокопрочный чугун) и числом, которое показывает значение предела прочности, деленное на 10, например ВЧ 100 имеет предел прочности 1000 МПа.

#### 4.2.5. Ковкий чугун

Получают отжигом белого доэвтектического чугуна.

Хорошие свойства у отливок обеспечиваются, если в процессе кристаллизации и охлаждения отливок в форме не происходит процесс графитизации. Чтобы предотвратить графитизацию, чугуны должны иметь пониженное содержание углерода и кремния.

Ковкие чугуны содержат: углерода – 2,4...3,0 %, кремния – 0,8...1,4 %, марганца – 0,3...1,0 %, фосфора – до 0,2 %, серы – до 0,1 %.

Отливки выдерживаются в печи при температуре 950...1000<sup>0</sup>С в течении 15...20 часов. За это время происходит разложение цементита:  $Fe_3C \rightarrow 3Fe_7(C) + C(\text{графит})$ .

Структура после выдержки состоит из аустенита и графита (углерод отжига). При медленном охлаждении в интервале 760...720°C, происходит разложение цементита, входящего в состав перлита, и структура после отжига состоит из феррита и углерода отжига (получается ферритный ковкий чугун).

При относительно быстром охлаждении вторая стадия полностью устраняется, и получается перлитный ковкий чугун.

Отжиг является длительной 70...80 часов и дорогостоящей операцией. В последнее время, в результате усовершенствований, длительность сократилась до 40 часов.

Различают 7 марок ковкого чугуна: три с ферритной (КЧ 30 – б) и четыре с перлитной (КЧ 65 – 3) основой (ГОСТ 1215).

По механическим и технологическим свойствам ковкий чугун занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. Недостатком ковкого чугуна по сравнению с высокопрочным является ограничение толщины стенок для отливки и необходимость отжига.

Отливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

Из ферритных чугунов изготавливают картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы, хомутики, муфты, фланцы.

Из перлитных чугунов, характеризующихся высокой прочностью, достаточной пластичностью, изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, тормозные колодки.

Обозначаются индексом КЧ (высокопрочный чугун) и двумя числами, первое из которых показывает значение предела прочности, деленное на 10, а второе – относительное удлинение - КЧ 30 - 6.

#### 4.2.6. Отбеленные и другие чугуны

Отбеленные – отливки, поверхность которых состоит из белого чугуна, а внутри серый или высокопрочный чугун.

В составе чугуна 2,8...3,6 % углерода, и пониженное содержание кремния –0,5...0,8 %.

Имеют высокую поверхностную твердость (950...1000 НВ) и очень высокую износостойкость. Используются для изготовления прокатных валов, вагонных колес с отбеленным ободом, шаров для шаровых мельниц.

Для изготовления деталей, работающих в условиях абразивного износа, используются белые чугуны, легированные хромом, хромом и марганцем, хромом и никелем. Отливки из такого чугуна отличаются высокой твердостью и износостойкостью.

Для деталей, работающих в условиях износа при высоких температурах, используют высокохромистые и хромоникелевые чугуны. Жаростойкость достигается легированием чугунов кремнием (5...6 %) и алюминием (1...2 %). Коррозионная стойкость увеличивается легированием хромом, никелем, кремнием.

Для чугунов можно применять термическую обработку.

### 4.3. Цветные металлы и сплавы

#### 4.3.1. Титан и его сплавы

Титан серебристо-белый легкий металл с плотностью 4,5 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления титана зависит от степени чистоты и находится в пределах 1660...1680°C.

Чистый **иодидный титан**, в котором сумма примесей составляют 0,05...0,1 %, имеет модуль упругости 112 000 МПа, предел прочности около 300 МПа, относительное удлинение 65%. Наличие примесей сильно влияет на свойства. Для технического титана ВТ1, с суммарным содержанием примесей 0,8 %, предел прочности составляет 650 МПа, а относительное удлинение – 20 %.

При температуре 882°C титан претерпевает полиморфное превращение, α–титан с гексагональной решеткой переходит в β–титан с объемно-центрированной кубической решеткой. Наличие полиморфизма у титана создает предпосылки для улучшения свойств титановых сплавов с помощью термической обработки.

Титан имеет низкую теплопроводность. При нормальной температуре обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосфере, в воде, в органических и неорганических кислотах (не стоек в плавиковой, крепких серной и азотной кислотах), благодаря тому, что на воздухе быстро покрывается защитной пленкой плотных оксидов. При нагреве выше 500°C становится очень активным элементом. Он либо растворяет почти все соприкасающиеся с ним вещества, либо образует с ними химические соединения.

Титановые сплавы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими:

- сочетание высокой прочности – предел прочности до 1000 МПа с хорошей пластичностью – относительное удлинение до 25 %;
- малая плотность, обеспечивающая высокую удельную прочность;
- хорошая жаропрочность, до 600...700°C;
- высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах.

Однородные титановые сплавы, не подверженные старению, используют в криогенных установках до гелиевых температур.

В результате легирования титановых сплавов можно получить нужный комплекс свойств. Легирующие элементы, входящие в состав промышленных титановых сплавов, образуют с титаном твердые растворы замещения и изменяют температуру аллотропического превращения.

Элементы, повышающие температуру превращения, способствуют стабилизации  $\alpha$ -твердого раствора и называются  $\alpha$ -стабилизаторами, это – алюминий, кислород, азот, углерод.

Элементы, понижающие температуру превращения, способствуют стабилизации  $\beta$ -твердого раствора и называются  $\beta$ -стабилизаторами, это – молибден, ванадий, хром, железо.

Кроме  $\alpha$ - и  $\beta$ -стабилизаторов различают нейтральные упрочнители: олово, цирконий, гафний.

Под влиянием легирующих элементов титановые сплавы при нормальной температуре могут иметь структуру  $\alpha$  или  $\alpha+\beta$ .

Сплавы на основе титана можно подвергать всем видам термической обработки, химико-термической и термомеханической обработке. Упрочнение титановых сплавов достигается легированием, наклепом, термической обработкой.

Часто титановые сплавы легируют алюминием, он увеличивает прочность и жаропрочность, уменьшает вредное влияние водорода, увеличивает термическую стабильность. Для повышения износостойкости титановых сплавов их подвергают цементации или азотированию.

Основным недостатком титановых сплавов является плохая обрабатываемость режущим инструментом.

По способу производства деталей различаются деформируемые (ВТ 9, ВТ 18) и литейные (ВТ 21Л, ВТ 31Л) сплавы.

#### Области применения титановых сплавов:

- авиация и ракетостроение (корпуса двигателей, баллоны для газов, сопла, диски, детали крепежа);
- химическая промышленность (компрессоры, клапаны, вентили для агрессивных жидкостей);
- оборудование для обработки ядерного топлива;
- морское и речное судостроение (гребные винты, обшивка морских судов, подводных лодок);
- криогенная техника (высокая ударная вязкость сохраняется до  $-253^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.3.2. Алюминий и его сплавы

Алюминий – легкий металл с плотностью  $2,7 \text{ г/см}^3$  и

температурой плавления  $660^{\circ}\text{C}$ . Имеет гранцентрированную кубическую решетку. Обладает высокой тепло- и электропроводностью. Химически активен, но образующаяся плотная пленка оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , предохраняет его от коррозии.

Механические свойства: предел прочности – 150 МПа, относительное удлинение 50 %, модуль упругости 7000 МПа.

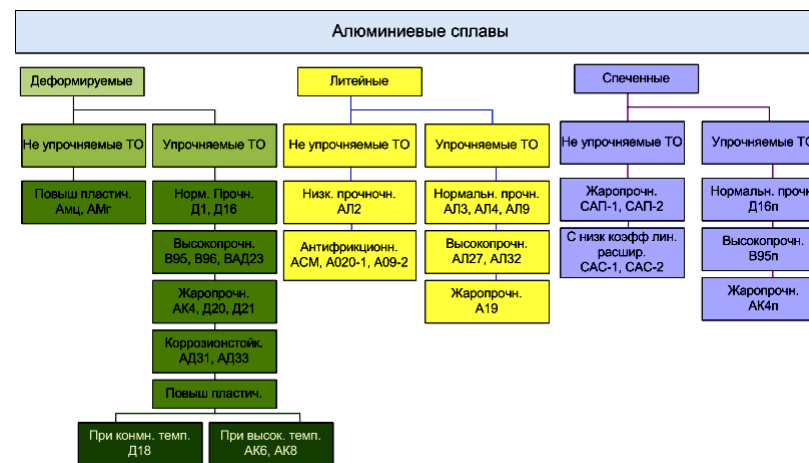
Алюминий высокой чистоты маркируется А99 (99,999 % Al), А8, А7, А6, А5, А0 (содержание алюминия от 99,85 % до 99 %).

Технический алюминий хорошо сваривается, имеет высокую пластичность. Из него изготавливают строительные конструкции, малонагруженные детали машин, используют в качестве электротехнического материала для кабелей, проводов.

Принцип маркировки алюминиевых сплавов. В начале указывается тип сплава: Д – сплавы типа дюралюминов; А – технический алюминий; АК – ковкие алюминиевые сплавы; В – высокопрочные сплавы; АЛ – литейные сплавы.

Далее указывается условный номер сплава. За условным номером следует обозначение, характеризующее состояние сплава: М – мягкий (отожженный); Т – термически обработанный (закалка плюс старение); Н – нагартованный; П – полунагартованный.

Классификация алюминиевых сплавов выполнена по нескольким признакам.



По технологическим свойствам сплавы подразделяются на три группы:

- деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой:

- деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой;

- литейные сплавы.

Методами порошковой металлургии изготавливают спеченные алюминиевые сплавы (САС) и спеченные алюминиевые порошковые сплавы (САП).

**Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой.** Прочность алюминия можно повысить легированием. В сплавы, не упрочняемые термической обработкой, вводят марганец или магний. Атомы этих элементов существенно повышают его прочность, снижая пластичность. Обозначаются сплавы: с марганцем – АМц, с магнием – АМг; после обозначения элемента указывается его содержание (АМгЗ).

**Магний** действует только как упрочнитель, марганец упрочняет и повышает коррозионную стойкость.

Прочность сплавов повышается только в результате деформации в холодном состоянии. Чем больше степень деформации, тем значительно растет прочность и снижается пластичность. В зависимости от степени упрочнения различают сплавы **нагартованные** и **полунагартованные** (АМгЗП).

Эти сплавы применяют для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, мало- и средненагруженных конструкций.

**Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой.** К таким сплавам относятся **дюралюмины** (сложные сплавы систем алюминий – медь – магний или алюминий – медь – магний – цинк). Они имеют пониженную коррозионную стойкость, для повышения которой вводится марганец.

**Дюралюмины** обычно подвергаются закалке с температуры 500°С и естественному старению, которому предшествует двух-, трехчасовой инкубационный период. Максимальная прочность достигается через 4...5 суток.

Широкое применение дюралюмины находят в авиастроении, автомобилестроении, строительстве.

**Высокопрочными стареющими сплавами** являются сплавы, которые кроме меди и магния содержат цинк. Сплавы В95, В96 имеют предел прочности около 650 МПа. Основным потребителем – авиастроение (обшивка, стрингеры, лонжероны).

**Ковочные алюминиевые сплавы** АК., АК8 применяются для изготовления поковок. Поковки изготавливаются при температуре 380...450°С, подвергаются закалке от температуры 500...560°С и старению при 150...165°С в течение 6...15 часов.

В состав алюминиевых сплавов дополнительно вводят никель, железо, титан, которые повышают температуру рекристаллизации и жаропрочность до 300°С.

Изготавливают поршни, лопатки и диски осевых компрессоров, турбореактивных двигателей.

**Литейные алюминиевые сплавы.** К литейным сплавам относятся сплавы системы алюминий – кремний (**силумины**), содержащие 10...13 % кремния.

Присадка к силуминам магния, меди содействует эффекту упрочнения литейных сплавов при старении. Титан и цирконий измельчают зерно. Марганец повышает антикоррозионные свойства. Никель и железо повышают жаропрочность.

**Литейные сплавы** маркируются от АЛ2 до АЛ20. Силумины широко применяют для изготовления литых деталей приборов и других средне- и малонагруженных деталей, в том числе тонкостенных отливок сложной формы.

#### 4.3.3. Магний и его сплавы

Магний – очень легкий металл, его плотность – 1,74 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления – 650°С. Магний имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку. Очень активен химически, вплоть до самовозгорания на воздухе. Механические свойства технически чистого магния (Мг1): предел прочности – 190 МПа, относительное удлинение – 18 %, модуль упругости – 4500 МПа.

Основными магниевыми сплавами являются сплавы магния с алюминием, цинком, марганцем, цирконием. Сплавы делятся на **деформируемые** и **литейные**.

Сплавы упрочняются после закалки и искусственного старения. Закалку проводят от температуры 380...420°С, старение при температуре 260...300°С в течение 10...24 часов. Особенностью является длительная выдержка под закалку – 4...24 часа.

**Деформируемые магниевые сплавы.** Магний плохо деформируется при нормальной температуре. Пластичность сплавов значительно увеличивается при горячей обработке давлением (360...520°С). Деформируемые сплавы маркируют МА1, МА8, МА9, ВМ 5—1.

Из деформируемых магниевых сплавов изготавливают детали автомашин, самолетов, прядильных и ткацких станков. В большинстве случаев эти сплавы обладают удовлетворительной свариваемостью.

**Литейные магниевые сплавы.** Литейные сплавы маркируются МЛЗ, МЛ5, ВМЛ–1. Последний сплав является жаропрочным, может работать при температурах до 300°C. Отливки изготавливают литьем в землю, в кокиль, под давлением. Необходимы меры, предотвращающие загорание сплава при плавке, в процессе литья. Из литейных сплавов изготавливают детали двигателей, приборов, телевизоров, швейных машин. Магниевые сплавы, благодаря высокой удельной прочности широко используются в самолето- и ракетостроении.

#### 4.3.4. Медь и ее сплавы

Медь имеет гранцентрированную кубическую решетку. Плотность меди 8,94 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1083°C.

Характерным свойством меди является ее высокая электропроводность, поэтому она находит широкое применение в электротехнике. Технически чистая медь маркируется: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М2, М3 и М4 (99 % Cu).

Механические свойства меди относительно низкие: предел прочности составляет 150...200 МПа, относительное удлинение – 15...25 %. Поэтому в качестве конструкционного материала медь применяется редко. Повышение механических свойств достигается созданием различных сплавов на основе меди.

Различают две группы медных сплавов: латуни – сплавы меди с цинком, бронзы – сплавы меди с другими (кроме цинка) элементами.

**Латуни.** Латуни могут иметь в своем составе до 45 % цинка. Повышение содержания цинка до 45 % приводит к увеличению предела прочности до 450 МПа. Максимальная пластичность имеет место при содержании цинка около 37 %.

По способу изготовления изделий различают латуни **деформируемые** и **литейные**.

**Деформируемые латуни** маркируются буквой Л, за которой следует число, показывающее содержание меди в процентах, например в латуни Л62 содержится 62 % меди и 38 % цинка. Если кроме меди и цинка, имеются другие элементы, то ставятся их начальные буквы ( О – олово, С – свинец, Ж – железо, Ф – фосфор, Мц – марганец, А – алюминий, Ц – цинк). Количество этих элементов обозначается соответствующими цифрами после числа, показывающего содержание

меди, например, сплав ЛАЖ60-1-1 содержит 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и 38 % цинка.

Однофазные  $\alpha$ -латуни используются для изготовления деталей деформированием в холодном состоянии. Изготавливают ленты, гильзы патронов, радиаторные трубки, проволоку.

Для изготовления деталей деформированием при температуре выше 500°C используют  $\alpha+\beta$  – латуни. Из двухфазных латуней изготавливают листы, прутки и другие заготовки, из которых последующей механической обработкой изготавливают детали. Обрабатываемость резанием улучшается присадкой в состав латуни свинца, например, латунь марки ЛС59-1, которую называют “автоматной латувью”.

Латуни имеют хорошую коррозионную стойкость, которую можно повысить дополнительно присадкой олова. Латунь ЛО70-1 стойка против коррозии в морской воде и называется “морской латувью”.

Добавка **никеля** и **железа** повышает механическую прочность до 550 МПа.

**Литейные латуни** также маркируются буквой Л, После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 содержит 23 % цинка, 6 % алюминия, 3 % железа, 2 % марганца.. Наилучшей жидкотекучестью обладает латунь марки ЛЦ16К4. К литейным латуням относятся латуни типа ЛС, ЛК, ЛА, ЛАЖ, ЛАЖМц. Литейные латуни не склонны к ликвации, имеют сосредоточенную усадку, отливки получаются с высокой плотностью.

Латуни являются хорошим материалом для конструкций, работающих при отрицательных температурах.

**Бронзы.** Сплавы меди с другими элементами кроме цинка называются бронзами.

Бронзы подразделяются на **деформируемые** и **литейные**.

При маркировке **деформируемых бронз** на первом месте ставятся буквы Бр, затем буквы, указывающие, какие элементы, кроме меди, входят в состав сплава. После букв идут цифры, показывающие содержание компонентов в сплаве. Например, марка БрОФ10-1 означает, что в бронзу входит 10 % олова, 1 % фосфора, остальное – медь.

Маркировка **литейных бронз** также начинается с букв Бр, затем указываются буквенные обозначения легирующих элементов и ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве.

Например, бронза БрОЗЦ12С5 содержит 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца, остальное – медь.

**Оловянные бронзы.** При сплавлении меди с оловом образуются твердые растворы. Эти сплавы очень склонны к ликвации из-за большого температурного интервала кристаллизации. Благодаря ликвации сплавы с содержанием олова выше 5 % имеют в структуре эвтектоидную составляющую  $\alpha(\alpha+\delta)$ , состоящую из мягкой и твердой фаз. Такое строение является благоприятным для деталей типа подшипников скольжения: мягкая фаза обеспечивает хорошую **прирабатываемость**, твердые частицы создают износостойкость. Поэтому оловянные бронзы являются хорошими **антифрикционными** материалами.

Оловянные бронзы имеют низкую объемную усадку (около 0,8 %), поэтому используются в художественном литье.

Наличие **фосфора** обеспечивает хорошую **жидкотекучесть**.

Оловянные бронзы подразделяются на **деформируемые** и **литейные**.

В **деформируемых бронзах** содержание олова не должно превышать 6 %, для обеспечения необходимой пластичности, БрОФ6,5-0,15.

В зависимости от состава деформируемые бронзы отличаются высокими механическими, антикоррозионными, антифрикционными и упругими свойствами, и используются в различных отраслях промышленности. Из этих сплавов изготавливают прутки, трубы, ленту, проволоку.

**Литейные оловянные бронзы**, БрОЗЦ7С5Н1, БрО4Ц4С17, применяются для изготовления пароводяной арматуры и для отливок антифрикционных деталей типа втулок, венцов червячных колес, вкладышей подшипников.

**Алюминиевые бронзы**, БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л, БрАЖН10-4-4.

Бронзы с содержанием алюминия до 9,4 % имеют однофазное строение  $\alpha$ - твердого раствора. При содержании алюминия 9,4...15,6 % сплавы системы медь – алюминий двухфазные и состоят из  $\alpha$ - и  $\gamma$ - фаз.

Оптимальными свойствами обладают алюминиевые бронзы, содержащие 5...8 % алюминия. Увеличение содержания алюминия до 10...11 % вследствие появления  $\lambda$ - фазы ведет к резкому повышению прочности и сильному снижению пластичности. Дополнительное повышение прочности для сплавов с содержанием алюминия 8...9,5 % можно достичь закалкой.

Положительные особенности алюминиевых бронз по сравнению с оловянными:

- меньшая склонность к внутрикристаллической ликвации;
- большая плотность отливок;
- более высокая прочность и жаропрочность;
- меньшая склонность к хладоломкости.

Основные недостатки алюминиевых бронз:

- значительная усадка;
- склонность к образованию столбчатых кристаллов при кристаллизации и росту зерна при нагреве, что охрупчивает сплав;
- сильное газопоглощение жидкого расплава;
- самоотпуск при медленном охлаждении;
- недостаточная коррозионная стойкость в перегретом паре.

Для устранения этих недостатков сплавы дополнительно легируют марганцем, железом, никелем, свинцом.

Из алюминиевых бронз изготавливают относительно мелкие, но высокоответственные детали типа шестерен, втулок, фланцев литьем и обработкой давлением. Из бронзы БрА5 штамповкой изготавливают медали и мелкую разменную монету.

**Кремнистые бронзы**, БрКМц3-1, БрК4, применяют как заменители оловянных бронз. Они немагнитны и морозостойки, превосходят оловянные бронзы по коррозионной стойкости и механическим свойствам, имеют высокие упругие свойства. Сплавы хорошо свариваются и подвергаются пайке. Благодаря высокой устойчивости к щелочным средам и сухим газам, их используют для производства сточных труб, газо- и дымопроводов.

**Свинцовые бронзы**, БрС30, используют как высококачественный антифрикционный материал. По сравнению с оловянными бронзами имеют более низкие механические и технологические свойства.

**Бериллиевые бронзы** являются высококачественным пружинным материалом. Растворимость бериллия в меди с понижением температуры значительно уменьшается. Это явление используют для получения высоких упругих и прочностных свойств изделий методом дисперсионного твердения. Готовые изделия из бериллиевых бронз подвергают закалке от 800°C, благодаря чему фиксируется при комнатной температуре пересыщенный твердый раствор бериллия в меди. Затем проводят искусственное старение при температуре 300...350°C. При этом происходит выделение дисперсных частиц, возрастают прочность и упругость. После старения предел прочности достигает 1100...1200 МПа.

## 5. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### 5.1. Полимеры

#### 5.1.1 Общие сведения

Полимеры – это сложные высокомолекулярные соединения. У полимеров нет определённой температуры плавления. Отличие в степени насыщения. Предела насыщения не существует. Полимеры обладают очень высокой вязкостью, высокой молекулярной массой. Полимеры – это макромолекулы, которые состоят из большого числа небольших молекул, которые называются мономерами.

Например, Бутадиен – мономер.

Бутадиен + ... + бутадиен (4000 раз) → полибутадиен (искусственный каучук)  $[-CH_2-CH=CH-(n)CH_2-]$ ,

n – степень полимеризации.

Полимеры получают либо **полимеризацией**, либо **поликонденсацией**. Процесс, при котором полимер получается вследствие соединения мономеров друг с другом, наз. **полимеризацией**. **Поликонденсация** - это процесс образования полимера в результате химической реакции исходных веществ с получением нового вещества, структура которого отличается от исходной.

**Термопласты**, при повышении температуры размягчаются, им придаётся определенная форма, которую они сохраняют при охлаждении, получают полимеризацией.

**Реактопласты**, при повышении температуры претерпевают химические изменения и превращение в неплавкую массу, получают полимеризацией и поликонденсацией.

#### 5.1.2 Механические свойства полимеров

Свойства полимеров определяются: природой мономера, молекулярной массой полимера, структурой полимера (кристаллический полимер или аморфный полимер), температурой нагрева. Есть пластическое и хрупкое разрушение.

Фазовые переходы аморфных полимеров:

стеклообразное состояние → (Температура стеклования)  
высокоэластическое состояние (каучук) → (Температура текучести)  
расплав полимера.

В стеклообразном состоянии полимеры не обладают ни сегментальной, ни молекулярной подвижностью. Это состояние

характеризуется только колебательным движением атомов. **Стеклообразное состояние** – это твёрдое и хрупкое состояние.

В **высокоэластическом** состоянии полимер обладает сегментальной подвижностью, при этом сегменты цепи обладают значительной свободой в движении, но в то же время перемещение макромолекул запрещено.

В **высокоэластическом** состоянии полимеры похожи на жидкости с включёнными в них твёрдоподобными областями. Это состояние характеризуется высокой вязкостью и претерпевает вязкоупругую деформацию. Температура перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное называется температурой стеклования. При дальнейшем нагревании полимер начинает течь. Температура, при которой происходит переход из высокоэластичного состояния в вязкотекучее, называется температурой текучести. Из-за отсутствия в полимерах истинной кристаллической решётки процесса плавления как такового в аморфных полимерах не существует.

**Ориентационное упрочнение** справедливо как для аморфных, так и для кристаллических полимеров. Оно состоит в том, что все макромолекулы ориентированы в одном направлении и имеют в этом направлении большую прочность и больший модуль упругости (E, МПа, характеризует жёсткость системы). Оно достигается вытяжкой либо в одном направлении, либо в двух направлениях.

#### 5.1.3 Старение полимеров

Старение полимеров – это самопроизвольное, необратимое изменение свойств полимера вследствие разрушения межмолекулярных связей в цепочках макромолекул. При старении происходят реакции, вызывающие: деструкцию (разложение) полимера, структурные изменения (увеличивается хрупкость, уменьшение прочности, понижение эластичности). При ионизирующем излучении или под действием света процессы деструкции ускоряются. Для замедления старения вводят стабилизаторы.

### 5.2. Пластмассы

#### 5.2.1. Общие сведения

Пластмассы – это органические вещества, связующими которых являются полимеры. Они состоят из: 1) связующее (матрица) - полимеры; 2) наполнители (низкомолекулярные вещества), их вводят для придания специальных свойств: понижения усадки, повышения механических свойств (твёрдость НВ,  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ).

**Наполнители:**



- 1) порошковые (сажа, графит, древесная мука),
- 2) волокнистые (волокна, стекловолокна, асболокна),
- 3) слоистые (гетинакс, текстолит), стеклоткань (стеклотекстолиты), газовые (газонаполненные: поропласты, пенопласты, сотопласты);
- 4) пластификаторы – жидкие вещества, для повышения эластичности материала;
- 5) отвердители;
- 6) краски (оксиды металлов), их вводят для изменения цвета пластмасс.

Пластмассы классифицируются на: термопластичные, терморезистивные и газонаполненные.

### 5.2.2. Термопластичные пластмассы

1. **Полиэтилен (ПЭ)**. Состав мономера:  $[-CH_2-CH_2-]_n$ . Этилен  $[-CH_2-CH_2-]$  при комнатной температуре находится в газовом состоянии, температура кипения составляет  $-140^\circ C$ . ПЭ бывает двух видов:

1) **Низкой плотности высокого давления ПЭНП (ПЭВД)**, разветвлённая структура, плотность  $\rho = 0,91-0,92 \text{ г/см}^3$ ,  $t_{\text{экспл}} = -70 \div 120-140^\circ C$ ,  $t_{\text{плавл}} = 110-125^\circ C$ ;

2) **Высокой плотности низкого давления ПЭВП (ПЭВД)**, линейная структура,  $\rho = 0,96 \text{ г/см}^3$ ,  $t_{\text{экспл}} = -70 \div 140-150^\circ C$ ,  $t_{\text{плавл}} = 150^\circ C$ . Недостаток – старение ПЭ. При воздействии ионизированного излучения увеличивается прочность материала и теплостойкость. Применение: упаковочная плёнка, литые бутылки, трубы, электроизоляционный кабель.

2. **Фторопласт (ФП)**. Состав мономера:  $[-CF_2-CF_2-]_n$ . ФП обладает аморфной кристаллической структурой. Плотность  $\rho = 0,25$ ,  $t_{\text{экспл.}} = -269 \div +250^\circ C$ . Химически стоек к действию растворителей. ФП обладает очень низким коэффициентом трения  $\mu = 0,04$ . Недостаток: трудность его переработки. Применение: насосы, вентили, антифрикционные покрытия.

### 5.2.3. Терморезистивные пластмассы

Типичным представителем является **текстолит**. Его относят к **слоистым** пластикам. **Связующее** в этом полимере – это терморезистивные смолы. **Наполнители**: хлопчатобумажные ткани. Среди всех слоистых пластиков этот материал обладает наибольшей способностью поглощать вибрационные нагрузки. Кроме этого хорошо сопротивляется раскалыванию. Применяют для зубчатых колёс и как

вкладыши для подшипников. Температура эксплуатации:  $-60 \div 60-80^\circ C$ .

### 5.2.4. Газонаполненные пластмассы. Строение. Область применения

Это гетерогенные (состоят из нескольких фаз) химически сложные системы, состоящие из твёрдой и газообразной фаз. В качестве связывающего используются термопласты (или реактопласты), которые образуют стенки ячеек или пор. В качестве наполнителей используют газообразные вещества.

В зависимости от физической структуры газонаполненные пластмассы делят на **пенопласты**, **поропласты** и **сотопласты**.

**Пенопласт** – система, в которой присутствуют замкнутая ячеистая структура, а газовый наполнитель изолирован от окр. среды тонкими слоями полимерного связующего. Замкнутая ячеистая структура обеспечивает высокие теплоизоляционные свойства и хорошую плавучесть. Прочность таких материалов низкая и зависит от плотности материала.  $\rho = 20-300 \text{ кг/м}^3$ . Применяется для изоляции кабин, холодильников, рефрижераторов, труб (поропласт), в авиа-, кораблестроении, на ж/д транспорте.

Поропласт – материал с открыто-пористой структурой. Применяется для впитывания жидкости.  $\rho = 130-500 \text{ кг/м}^3$ .

**Сотопласты** – тонкие листовые материалы, выполненные в форме гофра, которые затем сшиваются в виде пчелиных сот. Материалом для гофров служат ткани, которые пропитываются различными связующими. Применение: тепло- и звукоизоляционные материалы (авиация), обладают радиопрозрачностью, используются для заполнения многослойных панелей в авиа- и судостроении.

### 5.2.5. Пластмассы как конструкционный материал

Полиэтилен, фторопласт, текстолит. Малая плотность материала  $\rho = 1-2 \text{ т/м}^3$ . Низкие значения модуля упругости и других механических свойств. Низкая теплопроводность. Хорошие изоляционные свойства (электро, звуко, тепло). Для них характерно старение материалов и ползучесть.

### 5.3. Эластомеры и резины. Процесс вулканизации

Эластомеры – это материалы, которые при приложении нагрузки удлиняются, а при снятии нагрузки восстанавливают свою первоначальную форму. Цепные макромолекулы под действием нагрузки распрямляются, а при снятии нагрузки сворачиваются. Для

этого состояния характерна сегментальная подвижность, кроме этого, данные полимеры должны обладать определённым межцепным свободным пространством для осуществления движения сегментов.

Наиболее распространённым эластомером является **каучук**  $C_5H_8$ . На основе каучука получают **резины**. Молекулы чистого каучука слабо связаны друг с другом, поэтому легко отделяются одна от другой. В результате этого каучук прилипает к предметам, с которыми он взаимодействует. Для устранения этого дефекта применяют вулканизацию. **Вулканизация** – нагрев каучука вместе с серой. При нагреве сера разрывает двойные связи в молекуле каучука и образуются мостики между линейными цепочками каучука. Свойства каучука зависят от содержания серы, до 30% S – твёрдый каучук (шайбы).

## 5.4. Стекло

### 5.4.1 Структура. Классификация по составу. Влияние состава на свойства. Применения

**Неорганическое стекло** – химически сложные аморфные изотропные материалы, которые обладают свойствами хрупкого твёрдого тела.

Стекла состоят:

#### 1. Стеклообразователи – основа:

а)  $SiO_2$  – **силикатное** стекло, если  $SiO_2 > 99\%$ , то это **кварцевое** стекло;

б)  $Al_2O_3 + SiO_2$  – **алюмосиликатное** стекло;

в)  $B_2O_3 + SiO_2$  – **боросиликатное** стекло;

г)  $Al_2O_3 + B_2O_3 + SiO_2$  – **алюмоборосиликатное** стекло;

2. **Модификаторы**, вводятся для придания стеклу определённых свойств.

Ввод **оксидов щелочноземельных** металлов (I, II группа: Na, K) уменьшает температуру размягчения. Оксиды хрома, железа, ванадия придают стеклу определённые цвета. Оксиды свинца увеличивают коэффициент преломления.

По количеству модификаторов стекла бывают трёх типов: **щёлочные** – стекла, в которых содержится модификаторов до 20-30%, **бесщёлочные** – до 5% модификаторов, **кварцевое** стекло – модификаторов нет;

3. Компенсаторы, подавляют негативное воздействие модификаторов. Стекла в автомобилях, в стеклопластиках, оптика, теплопроводимость низкая, нерастворимы в кислотах (кроме плавиковой  $HF$ ) и щелочах.

### 5.4.2 Механические свойства стекла. Методы повышения прочности

Свойства стёкол: Стекла отличаются высокой твёрдостью и пределом прочности. Модуль упругости  $E = 70$  ГПа. Твёрдость по Виккерсу  $HV \sim 750$  кгс/мм<sup>2</sup>. Практически предел прочности составляет 50-100 МПа. Низкий  $\sigma_B$  объясняется высоким коэффициентом линейного расширения. Когда стекло остывает, на его поверхности образуются растягивающие напряжения. Это приводит к появлению трещин на поверхности. Кроме этого, стекло является хорошим теплоизолятором, что также приводит к образованию трещин. Стекло плохо сопротивляется динамическим нагрузкам.

Способы упрочнения стёкол.

1) **Травление** с целью удаления дефектного поверхностного слоя. Предел прочности увеличивается до 3000 МПа. Но этот способ малоэффективен, т.к. в дальнейшем стекло взаимодействует с абразивными частицами или др. твёрдыми материалами.

2) Создание на поверхности **сжимающих напряжений**. Это достигается путём закалки. Идёт нагрев до определённой температуры, а затем производят охлаждение в заданном режиме (температура нагревания, охлаждение и время выдержки). Предел прочности в этом случае увеличивается до 1000-1500 Мпа.

3) Нанесение на поверхность стёкол **полимерных материалов**. Полимерное связующее склеивает микротрещины на поверхности стекла.

## 5.5. Ситаллы

Ситаллы – частично закристаллизовавшиеся стекла. По структуре от обычных стёкол отличаются тем, что в них водят затравки (это соли серебра, золота, меди, свинца и т.д.). Эти стекла непрозрачны. По способу получения ситаллы различаются на **фотоситаллы** и **термоситаллы**.

## 5.6. Композиционные материалы

Композиционные материалы (композиты) – многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими высокой прочностью, жесткостью и т.д. Сочетание разнородных веществ приводит к созданию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств каждого из его составляющих. Варьируя состав матрицы и наполнителя, их соотношение, ориентацию наполнителя, получают широкий спектр

материалов с требуемым набором свойств. Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам и в то же время они легче. Использование композитов обычно позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении ее механических характеристик.

Компонентами композитов являются самые разнообразные материалы - металлы, керамика, стекла, пластмассы, углерод и т.п. Известны многокомпонентные композиционные материалы - полиматричные, когда в одном материале сочетают несколько матриц, или гибридные, включающие в себя разные наполнители. Наполнитель определяет прочность, жесткость и деформируемость материала, а матрица обеспечивает монолитность материала, передачу напряжения в наполнителе и стойкость к различным внешним воздействиям.

По структуре композиты делятся на несколько основных классов: волокнистые, слоистые, дисперсноупрочненные, упрочненные частицами и нанокompозиты.

**Волокнистые** композиты армированы волокнами или нитевидными кристаллами. Уже небольшое содержание наполнителя в композитах такого типа приводит к появлению качественно новых механических свойств материала. Широко варьировать свойства материала позволяет также изменение ориентации размера и концентрации волокон. Кроме того, армирование волокнами придает материалу анизотропию свойств (различие свойств в разных направлениях), а за счет добавки волокон проводников можно придать материалу электропроводность вдоль заданной оси.

В **слоистых** композиционных материалах матрица и наполнитель расположены слоями, как, например, в особо прочном стекле, армированном несколькими слоями полимерных пленок.

Микроструктура **остальных** классов композиционных материалов характеризуется тем, что матрицу наполняют частицами армирующего вещества, а различаются они размерами частиц. В композитах, упрочненных частицами, их размер больше 1 мкм, а содержание составляет 20-25% (по объему), тогда как дисперсноупрочненные композиты включают в себя от 1 до 15% (по объему) частиц размером от 0,01 до 0,1 мкм. Размеры частиц, входящих в состав нанокompозитов - нового класса композиционных материалов - еще меньше и составляют 10-100 нм.

### 5.7. Полимерные композиционные материалы

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. Например, использование ПКМ при производстве космической и авиационной техники позволяет сэкономить от 5 до 30% веса летательного аппарата. А снижение веса, например, искусственного спутника на околоземной орбите на 1 кг приводит к экономии 1000\$. В качестве наполнителей ПКМ используется множество различных веществ.

**А. 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. Использование стеклопластиков началось в конце Второй мировой войны для изготовления антенных обтекателей - куполообразных конструкций, в которых размещается антенна локатора. В первых армированных стеклопластиках количество волокон было небольшим, волокно вводилось, главным образом, чтобы нейтрализовать грубые дефекты хрупкой матрицы. Однако со временем назначение матрицы изменилось - она стала служить только для склеивания прочных волокон между собой, содержание волокон во многих стеклопластиках достигает 80% по массе. Слоистый материал, в котором в качестве наполнителя применяется ткань, плетенная из стеклянных волокон, называется стеклотекстолитом.

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

**Б. Углеродные пластики** - 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° С, карбонизация - 1000-1500° С и графитизация - 1800-3000° С) 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 углепластиков используются те же матрицы, что и для стеклопластиков - чаще всего - терморезактивные и термопластичные полимеры. Основными преимуществами углепластиков по сравнению со стеклопластиковыми является их низкая плотность и более высокий модуль упругости, углепластики - очень легкие и, в то же время, прочные материалы. Углеродные волокна и углепластики имеют практически нулевой коэффициент линейного расширения. Все углепластики хорошо проводят электричество, черного цвета, что несколько ограничивает области их применения. Углепластики 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 (углеуглепластики), способные долго выдерживать в инертных или восстановительных средах температуры до 3000° С.

Существует несколько способов производства подобных материалов. По одному из них углеродные волокна пропитывают фенолформальдегидной смолой, подвергая затем действию высоких температур (2000° С), 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. Мелкодисперсный углерод, образующийся при пиролизе метана, закрывает все поры в структуре графита. 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.

**В. Боропластики** - композиционные материалы, содержащие в качестве наполнителя борные волокна, внедренные в терморезактивную 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. Кроме того, стоимость борных волокон очень высока (порядка 400 \$/кг) в связи с особенностями технологии их получения (бор осаждают из хлорида на вольфрамовую подложку, стоимость которой может достигать до 30% стоимости волокна). **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.

**Г. Органопластики** - композиты, в которых наполнителями служат органические синтетические, реже - природные и искусственные волокна в виде жгутов, нитей, тканей, бумаги и т.д. В терморезактивных органопластиках матрицей служат, как правило, эпоксидные, полиэфирные и фенольные смолы, а также полиимиды. Материал содержит 40-70% наполнителя. Содержание наполнителя в органопластиках на основе термопластичных полимеров - полиэтилена, ПВХ, полиуретана и т.п. - варьируется в значительно больших пределах - от 2 до 70%. Органопластики обладают низкой плотностью, они легче стекло- и углепластиков, относительно высокой прочностью при растяжении; высоким сопротивлением удару и динамическим нагрузкам, но, в то же время, низкой прочностью при сжатии и изгибе.

**Органопластики** находят широкое применение в авто-, судо-, машиностроении, авиа- и космической технике, радиоэлектронике, химическом машиностроении, производстве спортивного инвентаря и т.д.

**Д. Полимеры**, наполненные порошками. Известно более 10000 марок наполненных полимеров. Наполнители используются как для снижения стоимости материала, так и для придания ему специальных свойств. Впервые наполненный полимер начал производить доктор Бейкеленд (Leo H. Baekeland, США), открывший в начале 20 в. способ синтеза фенолформальдегидной (бакелитовой) смолы. Сама по себе эта смола - вещество хрупкое, обладающее

невысокой прочностью. Бейкеленд обнаружил, что добавка волокон, в частности, древесной муки к смоле до ее затвердевания, увеличивает ее прочность. Созданный им материал - бакелит - приобрел большую популярность. Технология его приготовления проста: смесь частично отвержденного полимера и наполнителя - пресс-порошок - под давлением необратимо затвердевает в форме.

Сейчас применяются разнообразные наполнители так терморезистивных, так и термопластичных полимеров. Карбонат кальция и каолин (белая глина) дешевы, запасы их практически не ограничены, белый цвет дает возможность окрашивать материал. Применяют для изготовления жестких и эластичных поливинилхлоридных материалов для производства труб, электроизоляции, облицовочных плиток и т.д., полиэфирных стеклопластиков, наполнения полиэтилена и полипропилена. Добавление талька в полипропилен существенно увеличивает модуль упругости и теплостойкость данного полимера. Сажа больше всего используется в качестве наполнителя резин, но вводится и в полиэтилен, полипропилен, полистирол и т.п. По-прежнему широко применяют органические наполнители - древесную муку, молотую скорлупу орехов, растительные и синтетические волокна. Для создания биоразлагающихся композитов в качестве наполнителя используют крахмал.

Е. **Текстолиты** - слоистые пластики, армированные тканями из различных волокон. Технология получения текстолитов была разработана в 1920-х на основе фенолформальдегидной смолы. Полотна ткани пропитывали смолой, затем прессовали при повышенной температуре, получая текстолитовые пластины. Роль одного из первых применений текстолитов - покрытия для кухонных столов - трудно переоценить.

Основные принципы получения текстолитов сохранились, но сейчас из них формуют не только пластины, но и фигурные изделия. И, конечно, расширился круг исходных материалов. Связующими в текстолитах является широкий круг терморезистивных и термопластичных полимеров, иногда даже применяются и неорганические связующие - на основе силикатов и фосфатов. В качестве наполнителя используются ткани из самых разнообразных волокон - хлопковых, синтетических, стеклянных, углеродных, асбестовых, базальтовых и т.д. Соответственно разнообразны свойства и применение текстолитов.

## **5.8. Композиционные материалы с металлической матрицей**

При создании композитов на основе металлов в качестве матрицы применяют алюминий, магний, никель, медь и т.д. Наполнителем служат или высокопрочные волокна, или тугоплавкие, не растворяющиеся в основном металле частицы различной дисперсности.

Свойства **дисперсноупрочненных металлических композитов** изотропны - одинаковы во всех направлениях. Добавление 5-10% армирующих наполнителей (тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов) приводит к повышению сопротивляемости матрицы нагрузкам. Эффект увеличения прочности сравнительно невелик, однако ценно увеличение жаропрочности композита по сравнению с исходной матрицей. Так, введение в жаропрочный хромоникелевый сплав тонкодисперсных порошков оксида тория или оксида циркония позволяет увеличить температуру, при которой изделия из этого сплава способны к длительной работе, с 1000° С до 1200° С. Дисперсноупрочненные металлические композиты получают, вводя порошок наполнителя в расплавленный металл, или методами порошковой металлургии.

**Армирование металлов волокнами**, нитевидными кристаллами, проволокой значительно повышает как прочность, так и жаростойкость металла. Например, сплавы алюминия, армированные волокнами бора, можно эксплуатировать при температурах до 450-500° С, вместо 250-300° С. Применяют оксидные, боридные, карбидные, нитридные металлические наполнители, углеродные волокна. Керамические и оксидные волокна из-за своей хрупкости не допускают пластическую деформацию материала, что создает значительные технологические трудности при изготовлении изделий, тогда как использование более пластичных металлических наполнителей позволяет переформование. Получают такие композиты пропитыванием пучков волокон расплавами металлов, электроосаждением, смешением с порошком металла и последующим спеканием и т.д.

## **5.9. Перспективные материалы и сплавы**

### **5.9.1. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе**

Из анализа структуры применения основных материалов следует, что в первой трети XXI века в плане самолетов преобладающее место будут занимать высокопрочные алюминиевые

сплавы и материалы на их основе. Поэтому усовершенствование существующих и разработка новых материалов на основе алюминия по-прежнему является актуальной задачей современного материаловедения.

Наиболее перспективными направлениями в улучшении комплекса свойств материалов авиакосмического назначения являются:

- разработка высокопрочных сплавов новых систем легирования с использованием микродобавок переходных и редкоземельных металлов, наномодификаторов, интерметаллидов и др. для высокопрочных сплавов системы Al - Zn - Mg - Si - Zr и для свариваемых сплавов на основе системы Al - Si - Li - Mg, а также изыскание способов регламентирования их структуры;

- создание и освоение гибридных материалов - слоистых алюмокомпозитов типа СИАЛ (GLARE), отличающихся от традиционных алюминиевых сплавов чрезвычайно высокой трещиностойкостью (~ в 10 раз), повышенной прочностью (в 1,5-2 раза) и пониженной плотностью (на 10-15%).

### 5.9.2. Композиционные материалы на основе керамики

Армирование **керамических материалов волокнами**, а также металлическими и керамическими дисперсными частицами позволяет получать высокопрочные композиты, однако, ассортимент волокон, пригодных для армирования керамики, ограничен свойствами исходного материала. Часто используют металлические волокна. Сопротивление растяжению растет незначительно, но зато повышается сопротивление тепловым ударам - материал меньше растрескивается при нагревании, но возможны случаи, когда прочность материала падает. Это зависит от соотношения коэффициентов термического расширения матрицы и наполнителя.

Армирование керамики **дисперсными металлическими частицами** приводит к новым материалам (**керметам**) с повышенной стойкостью, устойчивостью относительно тепловых ударов, с повышенной теплопроводностью. Из высокотемпературных керметов делают детали для газовых турбин, арматуру электропечей, детали для ракетной и реактивной техники. Твердые износостойкие керметы используют для изготовления режущих инструментов и деталей. Кроме того, керметы применяют в специальных областях техники - это теплоделяющие элементы атомных реакторов на основе оксида урана, фрикционные материалы для тормозных устройств и т.д.

Керамические композиционные материалы получают методами горячего прессования (таблетирование с последующим спеканием под давлением) или методом шликерного литья (волокна заливаются суспензией матричного материала, которая после сушки также подвергается спеканию).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стуканов В. А. *Материаловедение [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.А. Стуканов. - М.: ИД ФОРУМ : НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 368 с.: ил.; 60x90 1/16. - (Профессиональное образование).- Режим доступа: <http://znanium.com/bookread2.php?book=430337>, по паролю.- ЭБС «Znanium».*
2. Двоглазов Г. *Материаловедение : учебник / Г. Двоглазов. – Ростов н/Д. : Феникс, 2015.- 445 с.- (Среднее профессиональное образование).*
3. Батиенков В.Т. *Материаловедение [Электронный ресурс] : учебник / В.Т. Батиенков, Г.Г. Сеферов, А.Л. Фоменко, Г.Г. Сеферов; Под ред. В.Т. Батиенкова. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 151 с.: 60x90 1/16. - (Среднее профессиональное образование). <http://znanium.com/bookread2.php?book=417979>, по паролю.- ЭБС «Znanium».*
4. Лахтин Ю. М. *Основы металловедения [Электронный ресурс] : учебник / Ю.М. Лахтин. - М.: НИЦ Инфра-М, 2013. - 272 с. - (Среднее профессиональное образование).- Режим доступа: [znanium.com/bookread2.php?book=363145](http://znanium.com/bookread2.php?book=363145), по паролю.- ЭБС «Znanium»*
5. Гарифуллин Ф.А. *Материаловедение и технология конструкционных материалов [Электронный ресурс] : учебно-метод. пособие. / Ф.А. Гарифуллин, Р.Ш. Аюпов, В.В. Жилияков. - Казань: Изд-во КНИТУ, 2013.- 248 с.- Режим доступа: <http://www.kstu.ru/ft/Garifullin-materialovedenie.pdf>.*
6. Теплухин Г.Н. *Металловедение и термическая обработка [Электронный ресурс] : учебное пособие. / Г.Н. Теплухин, А.В. Гропянов - СПб.: СПбГТУРП, 2011. - 169 с.- Режим доступа: <http://window.edu.ru/resource/153/76153>.*