

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет»

**Н.М. РОМАНЧЕНКО**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Часть I. Материаловедение**

*Рекомендовано учебно-методическим советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет» для внутривузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование»*

*Электронное издание*

Красноярск 2019

ББК 34.1

Р 53

*Рецензенты:*

*Ф.М. Носков, канд. техн. наук, доцент кафедры  
материаловедения и технологии обработки материалов  
Политехнического института Сибирского федерального  
университета*

*А.А. Климов, канд. техн. наук, доцент Красноярского  
института железнодорожного транспорта (Ир ГУПС)*

Р 53 **Романченко, Н.М.**

**Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Часть I. Материаловедение** [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Н.М. Романченко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2019. – 329 с.

Содержит основные теоретические сведения и методические указания по выполнению лабораторных работ по разделу «Материаловедение» дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». Для проверки полученных знаний предложены контрольные тестовые задания.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» Института инженерных систем и энергетики, 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» Института пищевых производств Красноярского государственного аграрного университета.

ББК 34.1

© Романченко Н.М., 2019

© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее учебное пособие предназначено для изучения первой части дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» студентами, обучающимися по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия» Института инженерных систем и энергетики и 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» Института пищевых производств Красноярского государственного аграрного университета.

Дисциплина «Материаловедение» включена в ООП, в цикл дисциплин базовой части.

*Материаловедение и технология конструкционных материалов* является наукой о строении, свойствах и технологии создания материалов. Эта область знаний относится к числу основополагающих инженерных дисциплин, поскольку изготовление традиционных и разработка новых материалов, изучение свойств и способы их обработки являются основой современного производства.

Достаточный уровень знаний в области материаловедения и технологии материалов является важным показателем образованности специалистов в области агроинженерии и пищевых производств.

В результате изучения первой части курса «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» студент должен

### **знать:**

- основные виды конструкционных и сырьевых, металлических и неметаллических материалов;
- классификацию, свойства, маркировку и область применения конструкционных материалов, принципы их выбора для применения в производстве;
- основные сведения о назначении и свойствах металлов и сплавов, о технологии их производства;
- особенности строения металлов и их сплавов, закономерности процессов кристаллизации и структурообразования;
- основы термообработки металлов;
- способы защиты металлов от коррозии;
- особенности строения, назначения и свойства различных групп неметаллических материалов;
- классификацию и способы получения композиционных материалов;

**уметь:**

- распознавать и классифицировать конструкционные и сырьевые материалы по внешнему виду, происхождению, свойствам;
- подбирать материалы по их назначению и условиям эксплуатации для выполнения работ;
- выбирать и расшифровывать марки конструкционных материалов;
- определять твердость металлов;
- определять режимы отжига, нормализации закалки и отпуска стали;

**владеть** методикой выбора конструкционных материалов для изготовления элементов машин и механизмов.

В предлагаемом учебном пособии представлены основной теоретический материал и лабораторные работы по дисциплине «Материаловедение».

Лабораторные работы предусматривают закрепление теоретических знаний, полученных на лекциях и при чтении специальной литературы, знакомство с оборудованием и материалами, приобретение практических навыков при проведении макроскопического, микроскопического, термического анализа, термической обработки и определении механических свойств металлов и сплавов.

Для проверки полученных знаний по каждой из глав предложены контрольные вопросы и образцы тестовых заданий для текущего контроля по всем разделам дисциплины.

# ГЛАВА I. ОСНОВЫ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

## ТЕМА 1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

### 1.1. Классификация металлов

Металловедение – наука, изучающая строение и свойства металлов и устанавливающая связь между их составом, строением и свойствами.

Что такое металл?

В *химии* под металлами понимают определенную группу элементов, расположенную в левой части Периодической таблицы Д.И. Менделеева. Элементы этой группы, вступая в химическую реакцию с элементами, являющимися неметаллами, отдают им свои внешние, так называемые валентные электроны. Это является следствием того, что у металлов внешние электроны непрочны связаны с ядром; кроме того, на наружных электронных оболочках электронов немного (всего 1–2), тогда как у неметаллов электронов много (5–8). Все элементы, расположенные левее *галлия, индия и таллия*, – металлы, а правее *мышьяка, сурьмы и висмута* – неметаллы.

В *технике* под металлом понимают вещества, обладающие «металлическим» блеском, в той или иной мере присущим всем металлам, и пластичностью. По этому признаку металлы можно легко отличить от неметаллов – например дерева, камня и др.

Кроме металлического блеска и пластичности все металлы обладают высокой электро- и теплопроводностью.

Теория металлического состояния рассматривает металл как вещество, состоящее из положительно заряженных ионов, окруженных отрицательно заряженными частицами – электронами, слабо связанными с ядром. Эти электроны непрерывно перемещаются внутри металла и принадлежат не одному какому-то атому, а всей совокупности атомов.

Таким образом, характерной особенностью атомно-кристаллического строения металлов является наличие электронного газа внутри металла, слабо связанного с положительно заряженными ионами. Легкое перемещение этих электронов внутри металла и малая их связь с атомами обуславливают наличие у металлов опреде-

ленных металлических свойств (высокая электро- и теплопроводность, пластичность и др.).

По некоторым общим признакам металлы объединяют в группы.

Прежде всего, все металлы можно разделить на две большие группы – черные и цветные.

*Черные металлы* имеют темно-серый цвет, большую плотность (кроме щелочноземельных), высокую температуру плавления, относительно высокую твердость и во многих случаях обладают полиморфизмом.

*Цветные металлы* чаще всего имеют характерную окраску: красную, желтую, белую. Обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления, полиморфизм встречается редко.

Черные металлы подразделяются:

на *железные* – Fe, Co, Ni, Mn; Co, Ni, Mn часто применяют как добавки к сплавам железа, а также как основу для соответствующих сплавов;

*тугоплавкие металлы*, температура плавления которых выше, чем у Fe (т.е. выше чем 1539 °C);

*урановые* – актиниды, имеющие преимущественное применение в сплавах для атомной энергетики;

*редкоземельные* (РЗМ) – лантан (La), церий (Ce) и сходные с ними по свойствам иттрий (Y) и скандий (Sc). Их применяют как присадки к сплавам других элементов;

*щелочноземельные* (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Ca, Sr, Ba, Ra) – в свободном металлическом состоянии не применяются, за исключением специальных случаев.

Цветные металлы подразделяются:

на *легкие* – Be, Mg, Al, обладающие малой плотностью;

*благородные* – Ag, Au, металлы платиновой группы. К ним может быть отнесена и «полублагородная» медь. Обладают высокой коррозионной стойкостью;

*легкоплавкие* – Zn, Cd, Hg, Sn, Bi, Tl, Sb, Ga, Ge, Pb.

## 1.2. Кристаллическое строение металлов

Всякое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях – твердом, жидком и газообразном. В чем различие?

В *газах* нет закономерности расположения частиц (атомов, молекул); частицы хаотически двигаются, отталкиваются одна от другой, и газ стремится занять возможно большой объем.

В *твердых* телах порядок расположения атомов определенный, закономерный, силы взаимного притяжения и отталкивания уравновешены и твердое тело сохраняет свою форму.

В *жидкости* частицы сохраняют лишь так называемый ближний порядок, то есть в пространстве закономерно расположено небольшое количество атомов, а не атомы всего объема, как в твердом теле. Ближний порядок неустойчив, он то возникает, то исчезает под действием тепловых колебаний.

Правильное, закономерное расположение частиц атомов, молекул в пространстве характеризует *кристаллическое состояние*.

Кристаллическое строение можно представить себе в виде *пространственной кристаллической решетки*, в узлах которой расположены атомы.

Расположение атомов в кристалле удобно изображать в виде так называемых *элементарных кристаллических ячеек*. Под ними подразумевается наименьший комплекс атомов, который при многократном повторении в пространстве позволяет воспроизвести пространственную кристаллическую решетку.

Большинство металлов имеют простые кристаллические решетки: объемно-центрированную кубическую, гранецентрированную кубическую или гексагональную (рис. 1).

Взаимное расположение атомов в пространстве и величину межуатомных расстояний определяют рентгеноструктурным анализом.

Простейшим типом кристаллической ячейки является кубическая решетка. В простой кубической решетке атомы расположены (упакованы) достаточно плотно.

Стремление атомов занять места, наиболее близкие друг к другу, приводит к образованию решеток других типов: кубической объемно-центрированной, кубической гранецентрированной, гексагональной плотноупакованной.

Кружки, изображающие атомы, располагаются в центре куба и по его вершинам (куб объемно-центрированный), или в центрах граней и по вершинам куба (куб гранецентрированный), или в виде шестигранника, внутрь которого наполовину вставлен также шестигранник, три атома верхней плоскости которого находятся внутри шестигранной призмы (гексагональная решетка).

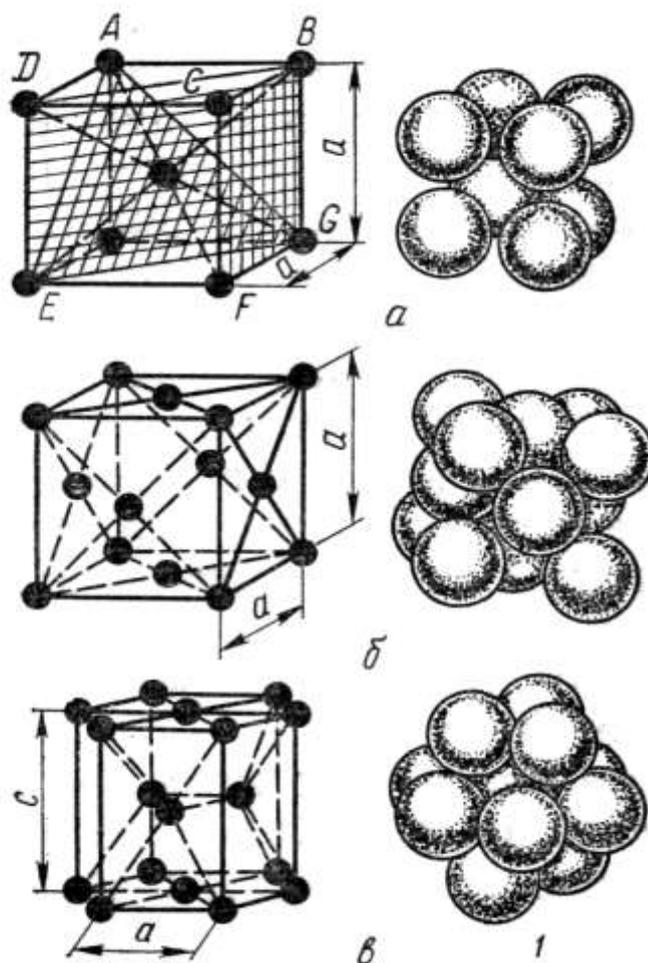


Рис. 1. Элементарные кристаллические решетки металлов:  
 а – объемно-центрированный куб (о.ц.к.);  
 б – гранецентрированный куб; в – гексагональная

Атомы в решетке располагаются друг относительно друга таким образом, чтобы обеспечивался наилучший взаимообмен электронами (при этом вся система имеет наименьшую внутреннюю энергию). А условия для такого обмена тем лучше, чем плотнее друг к другу находятся ион-атомы. Плотнейшими же упаковками шаров являются кубическая гранецентрированная и гексагональная. И в том и в другом случае в моделях таких кристаллов 74 % объема заполнено условными шарами.

Большинство металлов имеет именно такие упаковки ион-атомов: гранецентрированную – Al, Cu, Pb, Ni, Au, Ag и др.; гексагональную – Mg, Cd, Zn, Be и др. У многих металлов объемно-центрированная упаковка – здесь условными шарами заполнено 68 % объема – Li, Cr, V, Mo, W и др.

Размеры кристаллической решетки характеризуются *параметрами, или периодами, решетки*, которые измеряются в ангстремах ( $1\text{Å} = 10^{-10}\text{ м}$ ). Кубическую решетку определяет один параметр – длина ребра куба  $a$  (например, у хрома  $a = 2,9\text{ Å}$ , у алюминия  $a = 4,04\text{ Å}$ ), а гексагональную –  $a$  и  $c$ .

В гексагональной решетке, если три атома внутри решетки касаются атомов, расположенных на верхних и нижних плоскостях, то имеем плотноупакованную гексагональную решетку. Размеры гексагональной плотноупакованной решетки имеют постоянное значение  $c/a = 1,633$ . При иных значениях  $c/a$  получается неплотноупакованная гексагональная решетка.

Некоторые металлы имеют тетрагональную решетку, она характеризуется тем, что ребро  $c$  не равно ребру  $a$ . Отношение этих параметров характеризует так называемую степень тетрагональности. При  $c/a = 1$  получается кубическая решетка. Тетрагональная решетка (как и кубическая) может быть простой, объемно-центрированной и границентрированной.

Существенное значение для свойств данного металла или сплава имеет число атомов, находящихся во взаимном контакте. Это определяется числом атомов, равностоящих на ближайшем расстоянии от любого атома.

*Число атомов, находящихся на наиболее близком и равном расстоянии от данного атома, называется координационным числом.* Так, например, атом в простой кубической решетке имеет шесть ближайших равностоящих соседей, то есть координационное число этой решетки равно 6.

Кристаллы металлов обычно имеют небольшие размеры. Поэтому металлическое изделие состоит из очень большого числа кристаллов.

Подобное строение называется поликристаллическим. По ряду причин (будет сказано ниже) отдельные кристаллы не имеют возможности принять правильную форму. *Кристаллы неправильной формы в поликристаллическом агрегате называются зернами или кристаллитами.*

Различие отдельных зерен состоит в различной пространственной ориентации кристаллической решетки, случайной ориентации.

При очень медленном отводе тепла при кристаллизации, а также с помощью других специальных способов может быть получен кусок металла, представляющий собой один кристалл, так называемый *монокристалл*. Монокристаллы используются в полупроводниковой промышленности.

Кристаллические решетки реальных металлов имеют несовершенства в своем строении.

В чем же физическая причина возникновения дефектов в кристаллической решетке металла?

Находящиеся в узлах решетки ион-атомы не остаются неподвижными. Они колеблются с тем большей амплитудой, чем выше температура. При ее повышении увеличивается средняя энергия большинства ион-атомов, причем в результате их взаимодействия друг с другом отдельные из них приобретают столь большую энергию, что могут покинуть положение равновесия. После этого они или странствуют внутри кристаллической решетки, или испаряются с поверхности металла в окружающее пространство. Блуждающие в решетке ион-атомы называют дислоцированными (дислокация по-английски значит смещение, сдвиг), а пустое место, откуда ушел ион-атом, – вакансией, или «дыркой». В узлах решетки либо между узлами могут находиться и примесные атомы.

Описанные дефекты кристаллических решеток называются *точечными* (рис. 2).

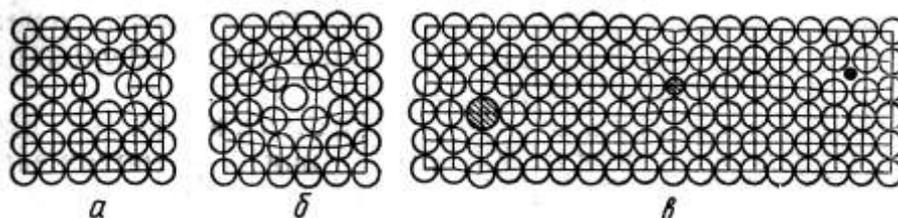


Рис. 2. Точечные дефекты в кристаллической решетке:  
а – вакансия; б – дислоцированный атом;  
в – примесные атомы замещения или внедрения

Другим важнейшим видом несовершенства кристаллического строения являются *линейные дефекты*, или так называемые *дислокации* (рис. 3).

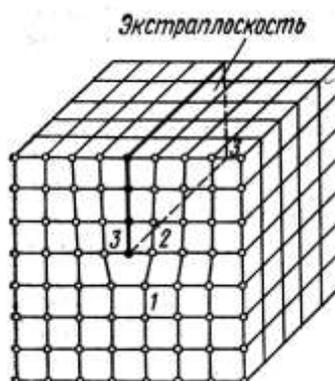


Рис. 3. Схема возникновения дислокации

Так что же такое дислокация? Это особый вид расположения атомов. Представим себе кристалл (см. рис. 3), в котором появилась лишняя полуплоскость атомов, называемая *экстраплоскостью*. Край этой плоскости 3-3 образует дефект решетки, который называется *линейной (краевой) дислокацией*.

Краевая дислокация может простираться в длину на многие тысячи параметров решетки, может быть прямой, может выгибаться в ту или иную сторону, в пределе она может закручиваться в спираль, образуя *винтовую дислокацию*.

Около дислокации возникают другие искажения решетки, поэтому атом 3 может смещаться вправо (влево) и устанавливать связь с атомом 1. В этом случае соседняя полуплоскость переходит в промежуточное положение и превращается в экстраплоскость, образуя дислокацию вдоль краевых атомов 2. Такое перемещение дислокаций может продолжаться дальше вдоль некоторой плоскости, расположенной перпендикулярно к экстраплоскости.

В результате несовершенств кристаллической решетки зерно разделяется на фрагменты, разориентированные между собой на несколько градусов. В свою очередь, фрагмент содержит большое количество блоков. Такая структура называется *блочной, мозаичной*.

Состояние границ зерен, размер фрагментов и блоков, несовершенства кристаллической решетки оказывают влияние на свойства металлов.

### 1.3. Анизотропия свойств кристаллов

Рассматривая различные плоскости в о.ц.к. решетке (см. рис. 1, а) – AEG, BDEG, BCFG, можно легко заключить, что они заполнены атомами с различной плотностью.

Вследствие неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки многие свойства (химические, физические, механические) каждого кристалла зависят от направления испытания. Подобная неодинаковость свойств монокристаллов в разных кристаллографических направлениях называется *анизотропией*.

Кристалл – тело анизотропное в отличие от аморфных тел (стекло, пластмассы и др.), свойства которых не зависят от направления испытания.

Технические металлы являются *поликристаллами*, то есть состоят из большого количества анизотропных кристаллитов. В большинст-

в случаях кристаллы статистически неупорядоченно ориентированы один по отношению к другому, поэтому во всех направлениях свойства более или менее одинаковы, то есть поликристаллическое тело является *псевдоизотропным*. Такая мнимая изотропность металла не будет наблюдаться, если кристаллы имеют одинаковую преимущественную ориентировку в каких-то направлениях. Эта ориентированность или текстура создается в известной степени, но не полностью, например в результате значительной холодной деформации. В этом случае поликристаллический металл приобретает анизотропию свойств.

#### 1.4. Методы изучения строения металлов

Существует много разнообразных способов, при помощи которых изучают кристаллическое строение металлов. Они могут быть разделены на два вида: к первому относятся методы изучения внутреннего строения металлов, ко второму – методы изучения внешних форм кристаллов.

Внутреннее строение кристаллов, то есть расположение атомов в кристаллической решетке, изучают посредством *рентгеноструктурного анализа*, использующего рентгеновские лучи.

Рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные волны весьма малой длины (2–0,005 Å).

Вследствие малой длины волны рентгеновские лучи не отражаются на поверхности, а проникают внутрь вещества. Под действием электромагнитного поля этих лучей электроны атомов приводятся в колебательное движение. Колеблющиеся электроны являются источником электромагнитных волн, так называемых рассеянных лучей, распространяющихся во все стороны. Можно считать, что эти волны исходят из центра атома. Вследствие правильного расположения атомов в кристалле рассеянные лучи взаимодействуют между собой: в одних направлениях усиливают друг друга, в других – гасят. Если по направлению потока этих лучей расположить фотопластинку, то в направлениях усиления лучей возникнут пятна или кольца. Полученная рентгенограмма представляет собой интерференционную картину, которую можно истолковать как результат интерференции лучей, отраженных от отдельных параллельных атомных плоскостей. На этом основании определяется расстояние между атомами, а также и характер расположения атомов в пространстве (то есть тип кристаллической решетки и ее параметр).

Размеры, форму и взаимное расположение кристаллов изучают *металлографическими методами*.

Так как все металлы – вещества непрозрачные (для видимого света), то форму кристаллов, а также их размер и взаимное расположение изучают на специально изготавливаемых микрошлифах. В этом случае делают разрез металла в плоскости, интересующей исследователя. Затем полученную плоскость шлифуют и полируют до зеркального состояния. Чтобы выявить структуру, следует создать рельеф или окрасить в разные цвета структурные составляющие, что достигается обычно химическим травлением. При травлении кислота в первую очередь воздействует на границы зерна как места, имеющие наиболее дефектное строение, которые в травленном шлифе станут углублениями; свет, падая на них, будет рассеиваться, и в поле зрения микроскопа они будут казаться темными, а тело зерна – светлым.

Для рассмотрения микрошлифов при исследовании микроструктуры металлов применяют специальные микроскопы, в которых луч от источника света, отражаясь от шлифа, проходит через объектив и окуляр, давая соответствующее увеличение (обычный, металлографический микроскоп, работающий на видимом свете, – 1000–1500 раз; электронный микроскоп, работающий на пучке электрона, – 15000–20000 раз).

Структура металла, полученная при увеличении на микроскопе, называется *микроструктурой* (зерна, границы зерен). Иногда требуется рассмотреть наиболее грубые детали структуры – конгломераты отдельных более или менее однородных зерен и т.д. В этом случае после глубокого травления шлиф рассматривается глазом или при помощи лупы. Выявленная таким образом структура называется *макроструктурой* (а шлиф – макрошлифом).

## **1.5. Кристаллизация металлов**

Любое вещество, как известно, может находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом.

При переходе из жидкого состояния в твердое образуется кристаллическая решетка, возникают кристаллы. Такой процесс называется *кристаллизацией*.

Чем объясняется существование при одних температурах жидкого, а при других температурах твердого состояния, и почему превращение происходит при строго определенных температурах?

В природе все самопроизвольно протекающие превращения, а следовательно – кристаллизация и плавление, обусловлены тем, что новое состояние в новых условиях является энергетически более устойчивым, обладает меньшим запасом энергии.

Поясним примером.

Тяжелый шарик из положения 1 (рис. 4) стремится попасть в более устойчивое положение 2, так как потенциальная энергия в положении 2 меньше, чем в положении 1.

Энергетическое состояние системы, имеющей огромное число охваченных тепловым движением частиц (атомов, молекул), характеризуется особой термодинамической функцией  $F$ , называемой свободной энергией (свободная энергия  $F = U - TS$ , где  $U$  – внутренняя энергия системы;  $T$  – абсолютная температура,  $S$  – энтропия).

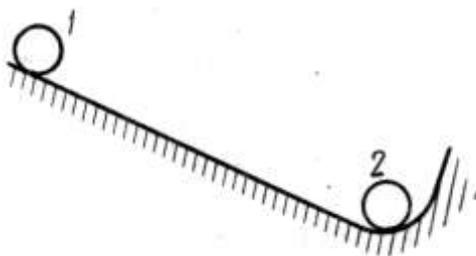


Рис. 4. Пример самопроизвольно протекающего процесса

Чем больше свободная энергия системы, тем система менее устойчива, и если имеется возможность, то система переходит в состояние, где свободная энергия меньше («подобно» шарик, который скатывается из положения 1 в положение 2, если на пути нет препятствий).

С изменением внешних условий, например температуры, свободная энергия системы изменяется по сложному закону, но различно для жидкого и кристаллического состояния. Схематически характер изменения свободной энергии жидкого и твердого состояний с температурой показан на рисунке 5.

Выше температуры  $T_s$  меньшей свободной энергией обладает вещество в жидком состоянии. Ниже  $T_s$  – вещество в твердом состоянии. Следовательно, выше  $T_s$  вещество должно находиться в жидком состоянии, а ниже  $T_s$  – в твердом кристаллическом состоянии. При  $T_s$  свободные энергии жидкого и твердого состояний равны, металл в обоих состояниях находится в равновесии. Эта температура  $T_s$  и есть *равновесная, или теоретическая, температура кристаллизации*.

Однако при  $T_s$  не может происходить процесс кристаллизации (плавления), так как при данной температуре  $F_{ж} = F_{кр}$ .

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы процесс был термодинамически выгоден и сопровождался уменьшением свободной энергии тела. Из рисунка 5 видно, что это возможно только тогда, когда жидкость будет охлаждена ниже точки  $T_s$ . Температура, при которой практически начинается кристаллизация, может быть названа *фактической температурой кристаллизации*.

Охлаждение жидкости ниже равновесной температуры кристаллизации называется *переохлаждением*.

Аналогично – обратное превращение из кристаллического состояния в жидкое может произойти только выше температуры  $T_s$ , это явление называется *перегревом*.

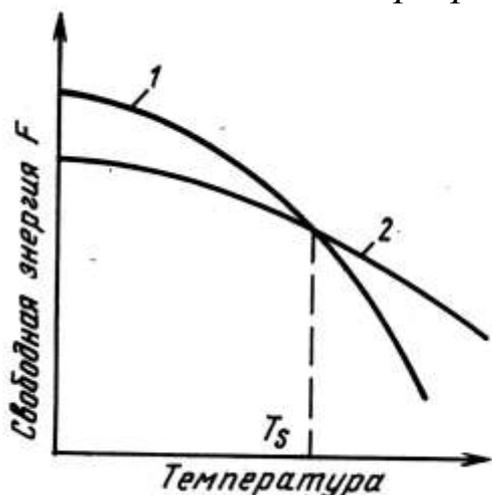


Рис. 5. Изменение свободной энергии жидкого (1) и кристаллического состояния (2) в зависимости от температуры

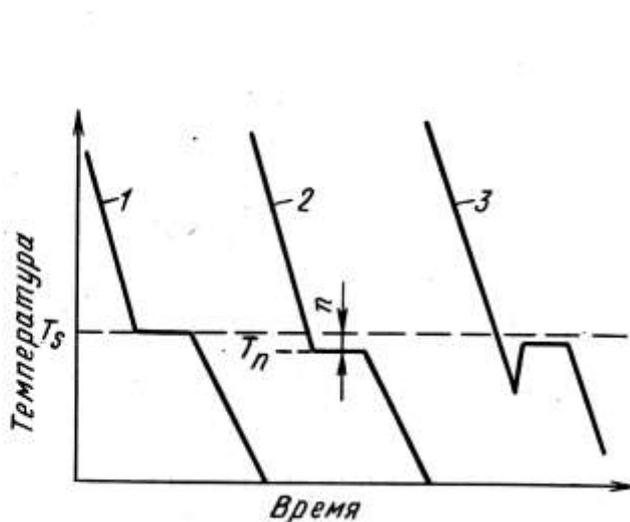


Рис. 6. Кривые охлаждения при кристаллизации

Величиной, или *степенью, переохлаждения* называют разность между теоретической и фактической температурой кристаллизации.

Процесс перехода металла из жидкого состояния в кристаллическое можно изобразить кривыми в координатах *время – температура* (см. рис. 6).

Охлаждение металла в жидком состоянии сопровождается плавным понижением температуры и может быть названо простым охлаждением, так как при этом нет качественного изменения состояния.

При достижении температуры кристаллизации на кривой *температура – время* появляется горизонтальная площадка (см. кривая 1, рис. 6), так как отвод тепла компенсируется выделяющейся при кристаллизации скрытой теплотой кристаллизации. По окончании кри-

сталлизации, то есть после полного перехода в твердое состояние, температура снова начинает снижаться, твердое кристаллическое вещество охлаждается. Теоретически процесс кристаллизации изображается кривой 1. Кривая 2 показывает реальный процесс кристаллизации ( $n$  – степень переохлаждения). Только при охлаждении ниже температуры  $T_s$  создаются энергетические условия, необходимые для протекания процесса кристаллизации.

У некоторых металлов из-за большого переохлаждения скрытая теплота плавления выявляется в первый момент кристаллизации настолько бурно, что температура скачкообразно повышается, приближается к теоретической (кривая 3). Так кристаллизуется, например, сурьма. Для большинства же металлов величина переохлаждения при кристаллизации оказывается весьма незначительной и даже не улавливается в нормальных условиях эксперимента.

Процесс кристаллизации состоит из двух стадий: образования центров кристаллизации или зародышей; роста кристаллов вокруг этих центров.

Установлена зависимость числа центров кристаллизации (ч.ц.) и скорости роста кристаллов (с.к.) от степени переохлаждения (рис. 7).



Рис. 7. Зависимость скорости роста кристаллов (с.к.) и скорости зарождения центров кристаллизации (ч.ц.) от степени переохлаждения

При равновесной температуре  $T_s$  ч.ц. и с.к. равны нулю, кристаллизации не происходит. Если жидкость переохладить до температуры, соответствующей точке  $a$ , то образуются крупные зерна. При температуре, соответствующей точке  $b$ , образуются мелкие зерна.

При большом переохлаждении (точка  $c$ ) жидкость не кристаллизуется – образуется аморфное тело.

Размер зерна зависит не только от числа самопроизвольных зарождающихся центров кристаллизации, но и от количества частичек нерастворимых примесей в жидком металле. Они играют роль готовых центров кристаллизации. Такими центрами могут быть твердые частицы (окислы, нитриды, сульфиды и т.д.), которые имеют небольшую разницу в атомных размерах с основным металлом, а их кристаллические решетки близки по строению и параметрам.

Для получения мелкозернистого металла в расплав специально добавляют небольшое количество тех или иных веществ. Такие добавки называют *модификаторами*, а процесс – *модифицированием*.

Описание процесса кристаллизации в реальных условиях впервые дал в 1878 г. инженер Дмитрий Константинович Чернов, работавший на Обуховском заводе в Петербурге. При заливке металла в изложницу кристаллизация начинается от стенок и распространяется в глубь расплавленного металла. Скорость роста кристаллов в различных направлениях неодинакова. Вначале образуется ствол кристалла  $a$ , а затем от ствола  $a$  под определенным углом растут ветви  $b$ , от которых, в свою очередь, растут боковые ветви  $c$  (рис. 8).

Такие кристаллы напоминают форму дерева, и поэтому они называются *дендритами*. Дендриты можно видеть на поверхности литого металла. Переплетаясь своими ветвями, дендриты вырастают друг в друга, и, таким образом, отдельные металлические зерна цепляются между собой.

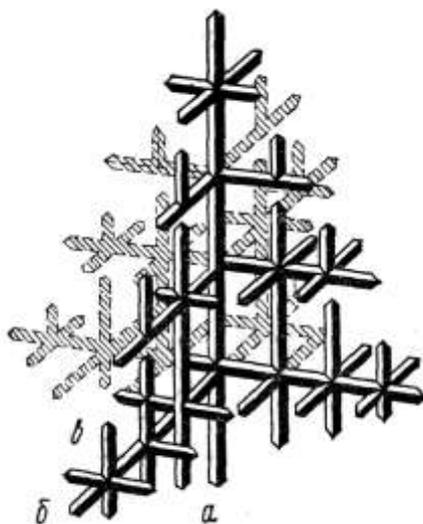


Рис. 8. Схема дендрита

Рассмотрим картину кристаллизации стального слитка (рис. 9). Зона мелких кристаллов 1 образуется у холодной стенки изложницы. Затем по направлению отвода тепла, перпендикулярно стенкам изложницы, растут столбчатые кристаллы 2. В центре слитка скорость охлаждения небольшая и там образуются крупные неориентированные кристаллы 3. Вследствие уменьшения объема металла при кристаллизации в слитке образуется усадочная раковина 4.

При затвердевании металла, кроме того, образуются многочисленные пузырьки газов. Происходит это потому, что растворимость различных газов в твердом металле значительно меньше, чем в жидком, и при кристаллизации металла избыток газа из него выделяется. Часть их уходит в атмосферу, а часть так и остается в застывшем металле в виде газовых пузырей.

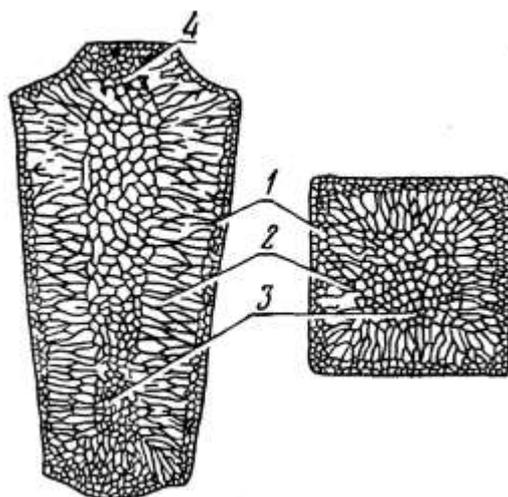


Рис. 9. Схема стального слитка

## 1.6. Превращения в твердом состоянии.

### Аллотропия

Атомы данного элемента могут образовывать, если исходить только из геометрических соображений, любую кристаллическую решетку. Однако устойчивым, а следовательно реально существующим типом является решетка, обладающая наиболее низким запасом энергии. Так, например, в твердом состоянии Li, Na, K, Mo, W и другие металлы имеют объемно-центрированную решетку; Al, Ca, Cu, Au — гранецентрированную.

Однако в ряде случаев, при изменении температуры или давления, может оказаться, что для того же металла более устойчивой будет

другая решетка, чем та, которая была при другой температуре или давлении. В различных решетках кристаллизуются Fe, Co, Sn, Mn, Ti и другие металлы.

Существование одного металла (вещества) в нескольких кристаллических формах носит название *полиморфизма*, или *аллотропии*. Различные кристаллические формы одного вещества называются полиморфными, или аллотропическими модификациями.

Аллотропические формы обозначаются греческими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$  и т.д., которые в виде индексов добавляются к символу, обозначающему элемент. Аллотропическая форма, существующая при самой низкой температуре, обозначается буквой  $\alpha$ , следующая –  $\beta$ .

Превращение одной аллотропической формы в другую при нагреве чистого металла сопровождается поглощением тепла и происходит при постоянной температуре. На термической кривой в координатах *температура – время* превращение отмечается горизонтальным участком. При охлаждении происходит выделение тепла (выделение скрытой теплоты превращения) теоретически при такой же температуре, что и при нагреве, но практически при несколько более низкой вследствие переохлаждения.

Температура, при которой осуществляется переход одной модификации в другую, называется температурой полиморфного (аллотропического) превращения.

В качестве общей закономерности можно указать, что высокотемпературная модификация, как правило, имеет более простое атомно-кристаллическое строение и более высокую пластичность (правило Савицкого Е.М.).

Аллотропические превращения железа показаны на рисунке 10. Ниже 911 °С железо существует в форме  $\alpha$ , при 911 °С объемно-центрированная решетка  $Fe_{\alpha}$  переходит в гранецентрированную решетку  $Fe_{\gamma}$ , которая при 1392 °С вновь превращается в объемно-центрированную  $\alpha$ -решетку. Высокотемпературную  $\alpha$ -модификацию обозначают буквой  $\delta$ .

При 768 °С получается остановка на кривой охлаждения, связанная не с перестройкой решетки, а с изменением магнитных свойств. Выше 768 °С железо немагнитно, а ниже 768 °С железо ферромагнитно (то есть способно хорошо намагничиваться). Эта температура называется точкой Кюри.

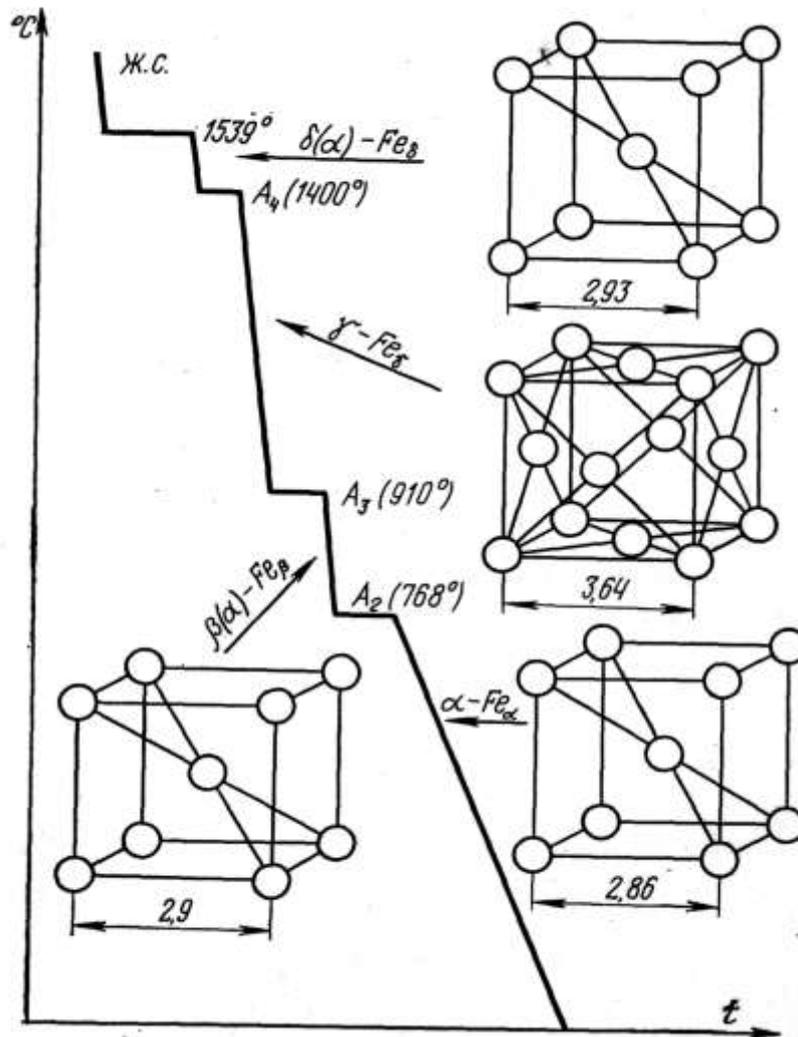


Рис. 10. Кривая охлаждения чистого железа

## ТЕМА 2. СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. НАКЛЕП И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

### 2.1. Свойства металлов и сплавов

Металлы и сплавы характеризуются механическими, физическими, химическими и технологическими свойствами. Они определяют соответствие выбранного материала расчетным нагрузкам при проектировании и обеспечивают надежность и долговечность машины в эксплуатации.

*Механические свойства.* К механическим свойствам относятся: прочность, пластичность, твердость, вязкость, выносливость, ползучесть и др.

Внешняя нагрузка вызывает в твердом теле напряжение и деформацию.

*Напряжение* – это нагрузка  $P$  (Н), отнесенная к единице начальной площади поперечного сечения  $F_0$  ( $\text{м}^2$ ) образца ( $\text{Н}/\text{м}^2$ )

$$\sigma = P / F_0. \quad (1)$$

*Деформация* – изменение формы и размеров тела под действием приложенной нагрузки или в результате физико-механических процессов, возникающих в самом теле. Деформация может быть *упругая*, исчезающая после снятия нагрузки, и *пластическая*, остающаяся после снятия нагрузки.

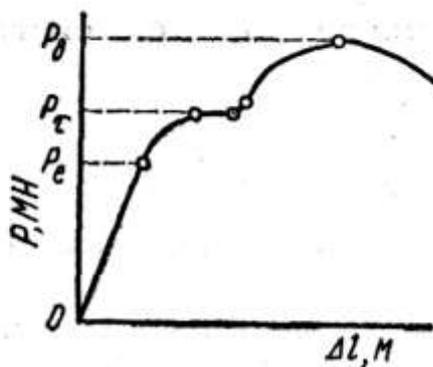


Рис. 11. Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

Упругая деформация при увеличении нагрузки переходит в пластическую; при дальнейшем повышении нагрузки происходит разрушение тела.

Большинство характеристик прочности определяют статическими испытаниями образцов на растяжение. Для этого стандартный образец испытываемого материала разрушают на разрывной машине.

Результаты испытаний представляют диаграммой *нагрузка–деформация*, которая изображена на рисунке 11. По оси ординат отложена нагрузка, а по оси абсцисс – абсолютное удлинение.

Упругая деформация на диаграмме характеризуется прямой линией  $OP_e$ . На этом участке наблюдается пропорциональность между удлинением и нагрузкой. Условное напряжение, при котором остаточные деформации впервые достигают некоторой малой величины, называется пределом упругости

$$\sigma_{уп} = P_e / F_0. \quad (2)$$

Выше точки  $P_e$  нарушается пропорциональность между напряжением и деформацией. Наряду с упругими деформациями в металле возникают пластические деформации. В пределах горизонтального участка (площадка текучести) удлинение происходит при постоянной нагрузке. Минимальное напряжение, при котором начинается текучесть, называется пределом текучести

$$\sigma_{\tau} = P_{\tau} / F_0. \quad (3)$$

Материал течет некоторое время, затем снова обретает сопротивление деформации и нагрузка возрастает. При достижении максимального значения нагрузки деформация сосредоточивается на участке, близком к середине образца. Здесь он удлиняется, одновременно площадь поперечного сечения уменьшается, нагрузка падает и образец разрушается. Напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца, называется пределом прочности при растяжении

$$\sigma_{\epsilon} = P_{\epsilon} / F_0, \quad (4)$$

где  $P_{\epsilon}$  – наибольшая нагрузка перед разрушением, Н.

*Прочность* – способность материала сопротивляться деформации или разрушению.

*Пластичность* – способность металла получать остаточную деформацию без разрушения. Характеризуют пластичность относительным удлинением  $\delta$  и относительным сужением  $\psi$  образца при разрыве

$$\delta = (l_k - l_0) / l_0 \cdot 100, [\%]; \quad (5)$$

$$\psi = (F_0 - F_k) / F_0 \cdot 100, [\%], \quad (6)$$

где  $l_0$  – начальная длина образца, м;

$l_k$  – конечная длина образца после разрыва, м;

$F_0$  – начальная площадь поперечного сечения на участке сужения при разрыве, м<sup>2</sup>;

$F_k$  – конечная площадь поперечного сечения на участке сужения при разрыве, м<sup>2</sup>.

*Твердость* – способность материала сопротивляться пластической деформации при контактном воздействии в поверхностном слое. Наибольшее применение получили методы определения твердости

твердомерами ТШ (прибор Бринелля), ТК (прибор Роквелла), ТП (прибор Виккерса).

Методом Бринелля твердость определяют статическим вдавливанием в испытываемую поверхность под нагрузкой  $P$  (Н) стального закаленного шарика диаметром  $D$ , м.

Методом Роквелла твердость определяют вдавливанием в испытываемый образец специального наконечника (алмазного конуса или стального шарика). Значение твердости определяют по глубине остаточной деформации вдавливания и измеряют в условных единицах. В зависимости от нагрузки и типа наконечника твердость обозначают по шкале А, В, С, например HRC 45, HRA 30 и т.д.

## 2.2. Пластическая деформация

Практически все металлы обладают высокой пластичностью. *Пластичность* – это способность материала под воздействием внешних сил деформироваться без разрушения и сохранять принятую форму после снятия нагрузки.

Внешние силы, приложенные к телу, вызывают в металле внутренние напряжения: *нормальные* (сжатия или растяжения) и *касательные* (сдвиговые). Под действием силы  $P$  (рис. 12) в сечении  $a-b$  (площадь  $F_0$ ) возникают максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_0 = P / F_0$ . В любом сечении  $c-d$ , проведенном под углом  $\alpha$  к сечению  $a-b$ , действуют нормальные напряжения  $\sigma_n = \sigma_0 \cdot \cos^2 \alpha$  и касательные напряжения  $\sigma_\tau = \frac{1}{2} \sigma_0 \cdot \sin 2\alpha$ . Наибольшие нормальные напряжения возникают при  $\alpha = 0^\circ$ , а касательные при  $\alpha = 45^\circ$ .

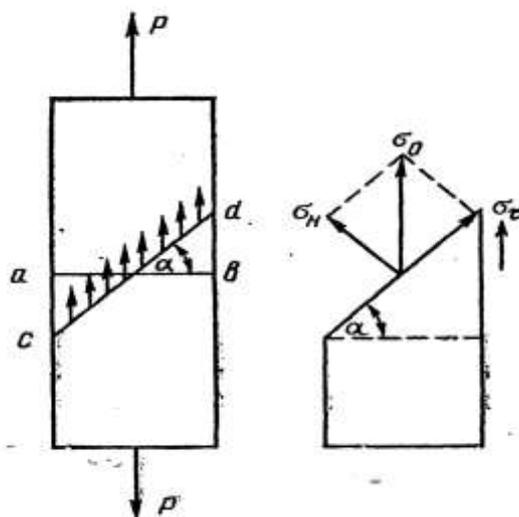


Рис. 12. Схема растягивающих напряжений в стержне

Различают деформацию *упругую* (обратимую) и *пластическую* (необратимую). При упругой деформации смещение атомов с мест устойчивого равновесия не превышает расстояния между соседними атомами кристаллической решетки. После снятия нагрузки атомы возвращаются в исходное положение и форма тела полностью восстанавливается.

При пластической деформации отклонение атомов значительно превышает межатомные расстояния, и они смещаются в новые места устойчивого равновесия. После снятия нагрузки форма тела не восстанавливается.

Нормальные напряжения сначала вызывают упругую деформацию кристаллической решетки, а затем отрыв одной ее части от другой (рис. 13, *а, б, в, г*).

Касательные напряжения вызывают сначала упругую деформацию, а затем сдвиг одной части относительно другой, то есть пластическую деформацию. При развитии пластической деформации может произойти разрушение путем сдвига (рис. 13, *д, е, ж, з*).

Пластическая деформация металла изучалась на крупных кристаллических зернах – монокристаллах.

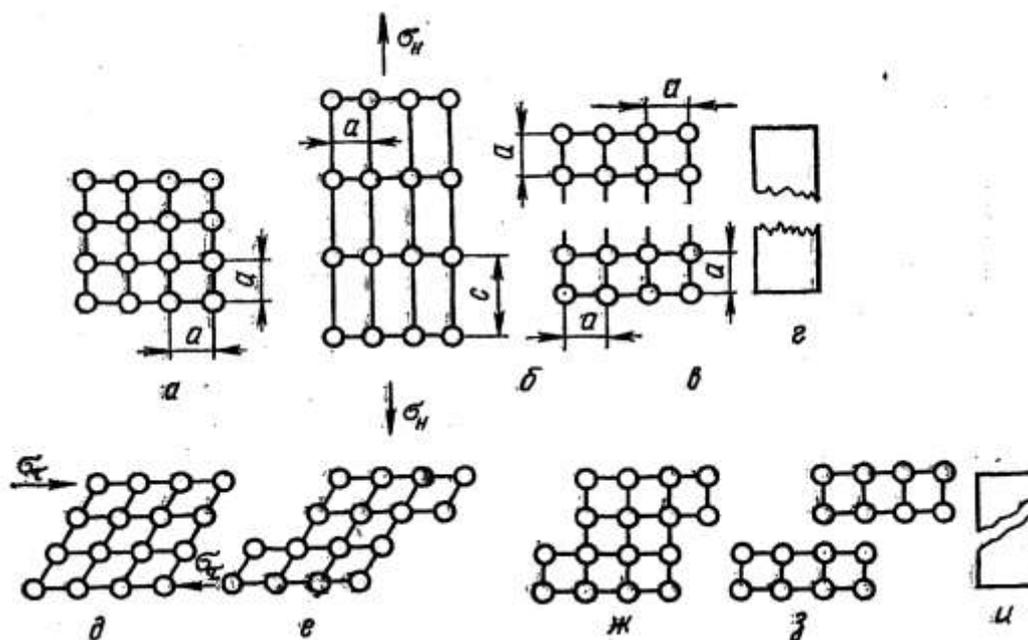


Рис. 13. Схема упругой и пластической деформации и разрушения под действием напряжений:

*а* – ненапряженная решетка; *б, д* – упругая деформация; *в, г* – хрупкое разрушение путем отрыва; *е* – упругая и пластическая деформация; *ж* – пластическая деформация, напряжения сняты; *з, и* – вязкое разрушение путем среза

Под действием внешних сил в кристалле происходит сдвиг по слабой плоскости, расположенной в зоне максимальных касательных напряжений. Обычно это плоскости с более плотной упаковкой атомов, их называют плоскостями сдвига, или скольжения. Теоретические расчеты показывают, что для одновременного перемещения атомов на один параметр решетки в плоскости сдвига требуется значительное напряжение. Реально пластическую деформацию вызывают напряжения, которые намного меньше теоретических. Например, для железа теоретическое напряжение сдвига составляет 2300–11000 МПа, а реальное – 29 МПа. Расхождение между теоретическим и реальным напряжением сдвига объясняет дислокационный механизм пластической деформации.

Процесс скольжения на данной кристаллографической плоскости происходит не сразу, а в результате последовательных перемещений дислокаций в течение определенного времени. Дислокационный механизм пластической деформации монокристалла можно представить схематически. Дислокация, возникнув на одной грани кристалла, пройдет всю плоскость скольжения и выйдет на противоположную поверхность зерна (рис. 14). Для такого движения дислокации требуются относительно малые напряжения сдвига.

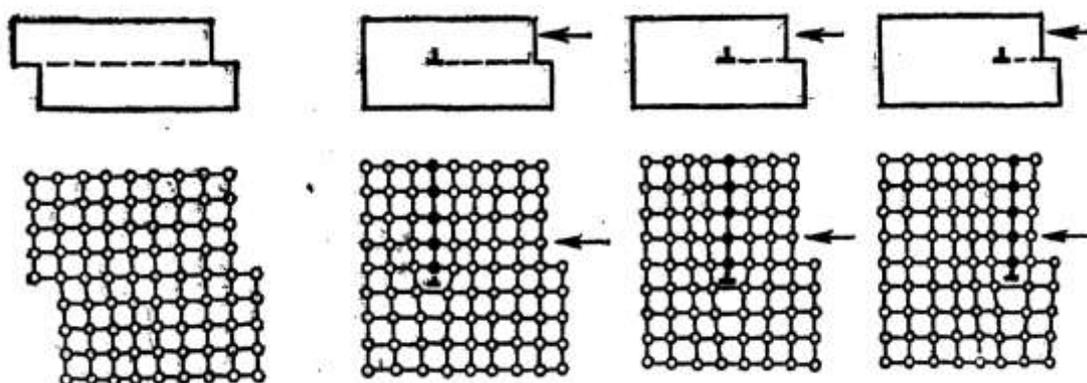


Рис. 14. Схема перемещения дислокации

При пластической деформации в результате скольжения происходит искажение кристаллографической плоскости решетки и образование на ней большого количества обломков. Это приводит к упрочнению плоскости скольжения и прекращению сдвига по ней. При возрастании нагрузки скольжение перебрасывается на следующую плоскость и вызывает здесь упрочнение, затем на третью плоскость и т.д. (рис. 15).

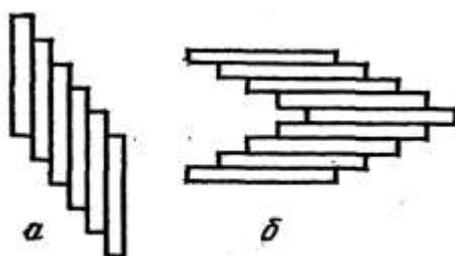


Рис. 15. Схема образования плоскостей сдвига и двойникования:  
*a* – последовательное образование плоскостей сдвига;  
*б* – схема двойникования

Кроме скольжения, пластическое деформирование может происходить путем двойникования. Двойникование заключается в симметричном смещении одной части кристалла относительно другой под действием касательных напряжений.

Пластическая деформация в поликристаллах протекает сложнее. Она возникает в зернах, у которых плоскости скольжения совпадают с направлением максимальных касательных напряжений. Кроме сдвига происходит поворот смещенных частей зерна в направлении уменьшения угла между плоскостью скольжения и действием силы. Этот поворот объясняется тем, что свободному смещению частей зерна препятствуют соседние зерна (рис. 16). В результате сдвигов и поворотов зерна вытягиваются в направлении растягивающих сил. При дальнейшем увеличении нагрузки деформация начинается и в других зернах. Таким образом, при пластической деформации поликристалла внутри зерна происходит измельчение блоков мозаичной структуры, возникают упругие искажения решетки и внутренние напряжения.

Величина пластической деформации определяется *степенью деформации*  $\varepsilon$ , выраженной в процентах

$$\varepsilon = \frac{F_H - F_K}{F_H} 100, \quad (7)$$

где  $F_H$  – площадь поперечного сечения заготовки до деформации,  $\text{м}^2$ ;  
 $F_K$  – площадь поперечного сечения заготовки после деформации,  $\text{м}^2$ .

Отношение  $F_H / F_K$  называется *уковом*.

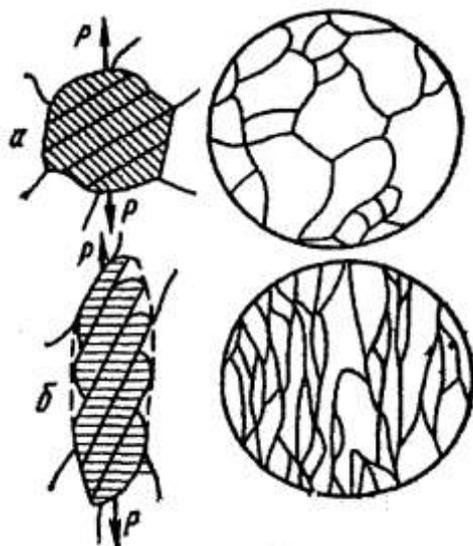


Рис. 16. Схема пластической деформации зерна:  
 а – до деформации; б – после деформации

### 2.3. Наклеп и рекристаллизация

При холодной деформации изменяется форма зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла, повышаются прочность, твердость, растворимость в кислотах, коэрцитивная сила и гистерезис, а пластичность, плотность, магнитная проницаемость, электро- и теплопроводность металла снижаются.

Изменение свойств деформированного металла объясняется остаточным искажением кристаллической решетки и появлением внутренних напряжений. Упрочнение металла при пластической деформации называется *наклепом*. Наклеп повышает сопротивление металла деформированию, что приводит к увеличению необходимой мощности на обработку. Появляется потенциальная опасность образования трещин, расслоений и других дефектов при дальнейшей деформации. Наклеп может играть и положительную роль при некоторых технологических процессах (волочении, листовой штамповке и т.д.).

Искажение кристаллической решетки в процессе холодной пластической деформации вызывает появление термодинамической неустойчивости металла. Поэтому в нем должны протекать процессы, направленные на достижение более равновесного, устойчивого состояния. Переход к этому состоянию связан с уменьшением искажения кристаллической решетки, что приводит к снятию внутренних напряжений. Этот процесс возможен только при перемещении атомов. При низких температурах подвижность атомов мала. С повыше-

нием температуры развиваются процессы, приводящие металл к равновесному состоянию. При сравнительно невысокой температуре (например, для железа 100–400 °С) происходит частичное снятие внутренних напряжений и восстановление упруго искаженной кристаллической решетки. Это явление в деформированном металле называется *отдыхом*, или *возвратом*. При возврате заметных изменений в микроструктуре не наблюдается, металл сохраняет волокнистое строение, однако твердость и прочность несколько понижаются, а пластичность возрастает. Дальнейшее повышение температуры металла увеличивает амплитуду тепловых колебаний его атомов и скорость диффузионных процессов. В результате происходит перегруппировка атомов, появление новых, недеформированных зерен и их рост. При этом полностью исчезают искажения кристаллической решетки и внутренние напряжения.

Процесс, при котором происходит разупрочнение металла, освобождение его от искажений кристаллической решетки и внутренних напряжений, называется *рекристаллизацией*.

Различают два периода рекристаллизации – первичную и собирательную. Рекристаллизация первичная состоит в образовании зародышей и росте новых зерен с неискаженной кристаллической решеткой. Движущей силой первичной рекристаллизации является энергия, аккумулированная в деформированном металле, и стремление вещества перейти в состояние с наименьшим запасом свободной энергии.

Собирательная рекристаллизация заключается в росте образовавшихся новых зерен за счет других (соседних). Движущей силой этого периода является изменение свободной энергии границ зерен.

По данным А.А. Бочвара, температура рекристаллизации  $T_{рек}$  чистых металлов может быть определена для практических целей по формуле

$$T_{рек} = 0,4 T_{пл}, \quad (8)$$

где  $T_{пл}$  – абсолютная температура плавления металла.

Обработка металлов давлением, выполняемая при температуре ниже  $T_{рек}$ , называется холодной, а выше – горячей.

При горячей обработке давлением в металле протекают одновременно процессы упрочнения и разупрочнения. Скорость процесса разупрочнения, вызванного рекристаллизацией, обычно превышает скорость процесса упрочнения. При этом разрушается дендритная структура металла, завариваются микропоры, газовые пузыри и вытя-

гиваются неметаллические включения в направлении преимущественного течения металла. Это приводит к появлению волокнистой структуры. При последующей термической обработке такую структуру изменить невозможно, а повторная обработка давлением изменит лишь направление волокон. Волокнистая структура образует анизотропию механических свойств металла вдоль и поперек волокон, что необходимо учитывать при изготовлении изделий. Механические свойства при горячей обработке металлов давлением изменяются незначительно.

### **Контрольные вопросы**

1. На какие группы подразделяют черные и цветные металлы?
2. Дайте определение элементарной кристаллической ячейки.
3. Какие кристаллические решетки имеют металлы?
4. Что такое координационное число кристаллической решетки?
5. Перечислите точечные дефекты кристаллических решеток.
6. Что такое анизотропия?
7. Что такое кристаллизация?
8. При каких условиях термодинамически возможен процесс кристаллизации?
9. Что такое степень переохлаждения жидкости?
10. Из каких стадий состоит процесс кристаллизации металла?
11. От каких факторов зависит размер зерна в металле?
12. Для чего проводится модифицирование металла при его выплавке?
13. Что такое аллотропия (полиморфизм) металла?
14. Перечислите металлы, которые обладают полиморфизмом.
15. Дайте определения упругой и пластической деформации.
16. Что такое наклеп?
17. Что такое рекристаллизация?

## ***ТЕМА 3. ТЕОРИЯ СПЛАВОВ***

### **3.1. Составляющие структуры сплавов**

Сплавами называются вещества, состоящие из двух и более элементов (компонентов). Металлические сплавы состоят преимущественно из металлов и обладают металлическими свойствами. Они де-

шевле чистых металлов, имеют лучшие механические и технологические свойства. Большинство сплавов получают сплавлением двух или более элементов. Возможны и другие способы приготовления сплавов – спекание, электролиз, возгонка и др.

В жидком состоянии элементы сплава в большинстве случаев обладают неограниченной взаимной растворимостью. Образуется однородный жидкий раствор с равномерным распределением атомов одного металла среди атомов другого металла. Частичная или полная нерастворимость наблюдается у немногих металлов, имеющих большую разницу в атомных диаметрах и температурах плавления (например, в сплавах медь-свинец; железо-свинец).

После затвердевания компоненты, входящие в сплав, могут образовать *твердые растворы, химические соединения, механические смеси*.

*Твердые растворы.* Если при переходе из жидкого состояния в твердое сохраняется однородность и растворимость элементов, то образовавшийся сплав называется твердым раствором. В твердом растворе, подобно чистым металлам, атомы в пространстве образуют кристаллическую решетку. При этом один из элементов, входящих в состав сплава, сохраняет присущую ему кристаллическую решетку. Другой элемент в виде отдельных атомов распределен в кристаллической решетке первого. Первый элемент является *растворителем*, а второй – *растворенным элементом*. По характеру размещения атомов растворенного элемента в кристаллической решетке растворителя различают твердые растворы замещения и внедрения.

В *твердых растворах замещения* атомы растворенного элемента вытесняют из некоторых узлов кристаллической решетки атомы растворителя (рис. 17, *а*).

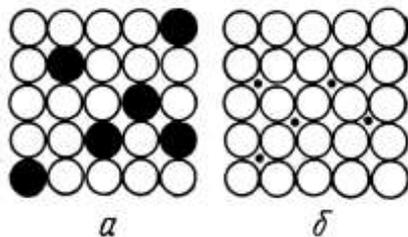


Рис. 17. Схема атомно-кристаллической структуры твердого раствора:  
*а* – замещения; *б* – внедрения

Твердые растворы замещения образуют *неограниченную растворимость* при одинаковых типах кристаллической решетки эле-

ментов, близких температурах плавления и когда различие в атомных размерах не превышает 8 %. Разница в атомных диаметрах в 8–15 % приводит к *ограниченной растворимости*, а более 15 % устраняет возможность образования твердого раствора.

В *твердых растворах внедрения* атомы растворенного элемента находятся в промежутках между узлами решетки растворителя (рис. 17, б). Вследствие малых размеров пустот между атомами в кристаллической решетке внедрение в нее возможно только элементов с малыми атомными параметрами, например углерода, бора, водорода, азота. При образовании твердых растворов внедрения происходит искажение решетки и в ней возникают напряжения. Обычно концентрация растворения для таких сплавов не превышает 1–2 %.

Все твердые растворы металлов обладают металлическим типом связи, и в них может происходить диффузия. Образование твердых растворов сопровождается изменением параметров решетки и свойств металла-растворителя. Твердые растворы имеют переменный состав. Их структура состоит из однородных по внешнему виду зерен. Твердые растворы обозначают греческими буквами:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и т.д.

*Химические соединения* образуются между элементами, которые существенно различаются по своему строению и свойствам. Для химических соединений характерно строго определенное соотношение чисел атомов элементов, выраженное формулой  $A_nB_m$ ; наличие своей кристаллической решетки, отличной от решетки элементов, образовавших это соединение; резкая разница свойств по сравнению со свойствами исходных элементов; большая твердость и хрупкость; постоянная температура плавления.

*Механические (физико-химические) смеси.* Механические смеси двух компонентов получаются, когда они не способны взаимно растворяться в твердом состоянии или образовывать химическое соединение. Структура сплавов может состоять из механической смеси чистых элементов, твердых растворов или химических соединений. Такие смеси получаются при большом различии в свойствах входящих в сплав металлов.

### 3.2. Правило фаз

Для изучения процессов кристаллизации и плавления, обоснования кривых охлаждения и нагревания металлических сплавов пользуются правилом фаз.

*Правило фаз* устанавливает числовую зависимость между фазами, компонентами и степенью свободы системы.

*Системой* называются металлы и металлические сплавы, выбранные для наблюдения и изучения при определенных условиях (температура, давление). Чистый металл является простой системой, сплавы – сложной.

*Компонентами* называют вещества, образующие сплав. В сплавах компонентами могут быть элементы и химические соединения.

*Фазой* называется однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностью раздела. При переходе через поверхность раздела резко изменяются свойства фазы. Фазы бывают твердые, жидкие и газообразные. Например, при кристаллизации чистого металла в системе имеются две фазы: жидкая (расплавленный металл) и твердая (зерна затвердевшего металла). В твердых сплавах фазами могут быть зерна чистого металла, твердого раствора и химического соединения.

*Числом степеней свободы* системы называют число внешних и внутренних факторов (температура, концентрация, давление), которое можно изменять без изменения числа фаз в системе.

В общем виде правило фаз записывается формулой

$$C = K - \Phi + P, \quad (9)$$

где  $K$  – число компонентов;  $\Phi$  – число фаз,  $P$  – число переменных внешних факторов (давление, температура).

Обычно все превращения в металле происходят при постоянном атмосферном давлении, в этом случае правило фаз записывается так

$$C = K - \Phi + 1. \quad (10)$$

Если  $C = 0$ , фазы находятся в равновесии при строго определенных значениях всех факторов; изменение одного из них нарушает равновесие. При  $C = 1$  до определенного значения можно менять температуру, не изменяя числа фаз. При  $C = 2$  возможно изменить две переменные (температуру и концентрацию) без изменения фазового состава системы. Уравнение правила фаз дает возможность корректировать точность построения диаграммы состояния.

### 3.3. Диаграммы состояния двойных сплавов

Диаграмма состояния – это график, который показывает зависимость между фазовым составом, температурой и концентрацией сплава. Она отражает превращения в системе для случая устойчивого равновесия. Пользуясь диаграммой состояния, определяют возможность и режимы термической обработки деталей; температурный интервал проведения горячей обработки металлов давлением; литейные свойства и т.д.

Диаграммы строятся по результатам всесторонних лабораторных испытаний сплавов различного состава. Для этого используют термический, структурный, рентгеноструктурный методы исследования. Дополнительно определяют некоторые механические и физические свойства сплава.

Важнейшим методом построения и изучения диаграмм состояния является *термический анализ*. Он основан на получении серии кривых охлаждения жидкого сплава и определении на них *критических точек*, то есть температур фазовых превращений.

Принято точки начала кристаллизации сплава называть точками *ликвидус*, конца кристаллизации – *солидус*.

При построении диаграмм по оси абсцисс откладывают концентрацию компонентов. Левая крайняя точка на оси концентрации соответствует 100 %-му содержанию одного из компонентов. Процентное содержание второго компонента откладывается по этой оси слева направо. По оси ординат откладывают температуру. Соединяя все точки ликвидус в одну кривую, а солидус – в другую, получают основные линии диаграммы.

#### 3.3.1. Диаграмма состояния для сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (первого рода)

Оба компонента в жидком состоянии неограниченно растворимы, а в твердом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений.

К таким системам относятся сплавы Pb–Sb (рис. 18), образующие в твердом состоянии механические смеси.

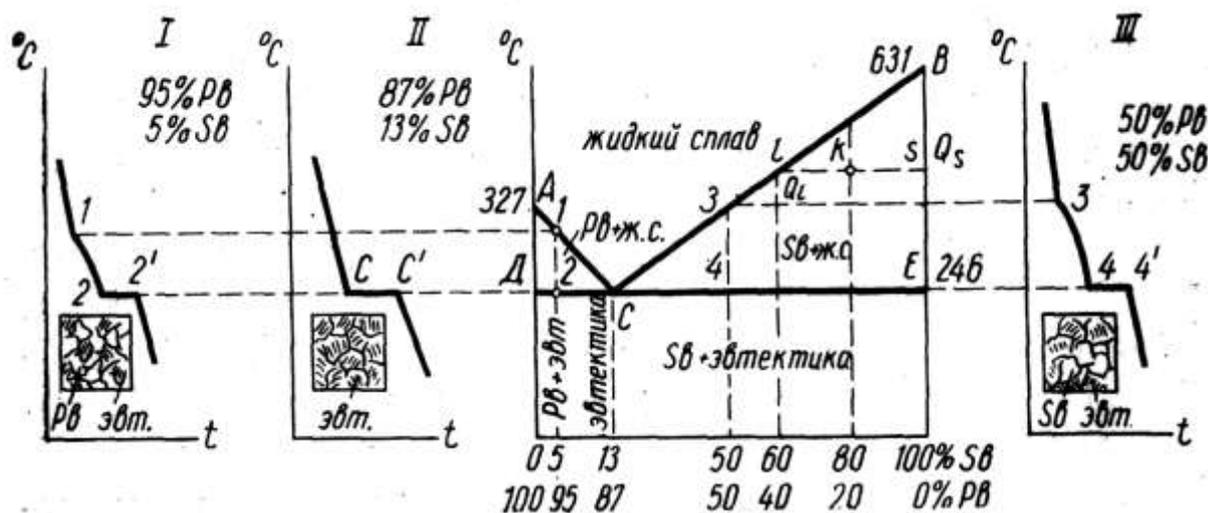


Рис. 18. Диаграмма состояния сплавов Pb–Sb

При охлаждении на кривой ACB (ликвидус) находятся точки температур начала кристаллизации сплавов: выделение из жидкого сплава свинца – по линии AC и сурьмы – по линии CB. Выше кривой ACB сплавы находятся в жидком состоянии.

При температуре соответствующей линии DCE (солидус) из жидкости (концентрации C) путем одновременного выпадения мелких кристаллов свинца и сурьмы образуется механическая смесь – эвтектика. *Эвтектикой* называется физико-химическая смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости.

Сплавы, в которых кристаллизуется только эвтектика (13 % Sb, точка C) называются *эвтектическими*. Сплавы, расположенные слева от эвтектического состава (до 13 % Sb), называют доэвтектическими, а справа (свыше 13 % Sb) – *заэвтектическими*. Структура доэвтектических сплавов состоит из зерен свинца и эвтектики, заэвтектических – сурьмы и эвтектики.

Диаграмма состояний позволяет определить температуру начала и конца плавления сплава и построить кривые охлаждения. Рассмотрим несколько примеров.

Сплав I (5 % Sb, 95 % Pb) выше критической точки 1 состоит из одной фазы – жидкого расплава. Для этой области состояния число степеней свободы равно

$$C = K - \Phi + 1 = 2 - 1 + 1 = 2.$$

Наличие двух степеней свободы позволяет менять состав и температуру без изменения числа фаз, то есть охлаждать. При температуре, соответствующей точке 1, из раствора начинают выделяться кристаллы свинца, возникают две фазы (жидкая и твердая – свинец). Для этой области состояния число степеней свободы равно  $C = 2 - 2 + 1 = 1$ .

При одной степени свободы возможно охлаждение сплава в двухфазной системе до второй критической точки 2. При этом концентрация жидкой фазы в интервале от 1 до 2 меняется по отрезку 1-С линии ликвидуса. Охлаждение в интервале от 1 до 2 происходит замедленно в связи с выделением теплоты при образовании кристаллов свинца. Кривая охлаждения слегка выпуклая.

При температуре, соответствующей точке 2, сплав состоит из кристаллов свинца и жидкой фазы с концентрацией, соответствующей точке С, то есть 13 % Sb и 87 % Pb. В дальнейшем из жидкости кристаллизуется эвтектика (появляется третья фаза – кристаллы сурьмы).

Для этой области число степеней свободы равно  $C = 2 - 3 + 1 = 0$ .

При нулевой степени свободы невозможно изменение каких-либо факторов без изменения числа фаз. Поэтому процесс образования эвтектики протекает при постоянной температуре (отрезок 2-2'). Через некоторый промежуток времени (точка 2) сплав затвердевает. Ниже точки 2' число степеней свободы равно единице, и происходит дальнейшее охлаждение сплава.

Аналогичным способом происходит кристаллизация сплава III (50 % Pb, 50 % Sb). В точке 3 выделяются кристаллы сурьмы, а по линии 4-4' – кристаллизуется эвтектика.

Используя диаграмму состояния, можно для любой температуры определить число фаз и состав каждой фазы, применив *правило отрезков*.

### 3.3.2. Правило отрезков

В процессе кристаллизации сплавов изменяются как концентрации фаз, так и количество каждой фазы. Количество твердой фазы при этом увеличивается, а жидкой уменьшается. В любой точке диаграммы состояния, когда в сплаве одновременно существует две фазы, можно определить количество обеих фаз и их концентрацию. Для этого служит так называемое правило рычага или правило отрезков.

*Первое положение правила отрезков формулируется следующим образом. Чтобы определить концентрацию компонентов в фа-*

зах, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию (коноду) до пересечения с линиями, ограничивающими данную область диаграммы. Проекция точек пересечения на ось концентрации показывают составы фаз.

Следовательно, для сплава, содержащего 80 % Sb, при температуре точки k составы обеих фаз определяются проекциями точек l и s, так как эти точки находятся на пересечении горизонтальной линии, проходящей через точку k с линиями диаграммы.

Проекция точки s определяет состав твердой фазы (100 % Sb), а проекция точки l определяет состав жидкости (60 % Sb).

Количество этих фаз также можно определить, пользуясь вторым положением правила отрезков, которое формулируется так:

Для того чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область диаграммы. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

В нашем случае соотношение между твердой фазой  $Q_S$  и жидкой  $Q_L$  определяется из соотношения  $Q_S / Q_L = l_k / s_k$ , где  $l_k$  и  $s_k$  – длины отрезков, соответствующие фазам.

Для определения соотношения искомой фазы  $Q_S$  и полного количества сплава  $Q_{S+L}$  пользуются выражением  $Q_S / Q_{S+L} = l_k / s_l$ .

### 3.3.3. Диаграмма состояния для сплавов с неограниченной растворимостью в твердом состоянии (второго рода)

Диаграмма состояния сплавов этого рода приведена на рисунке 19. Примером может служить система сплавов Cu–Ni.

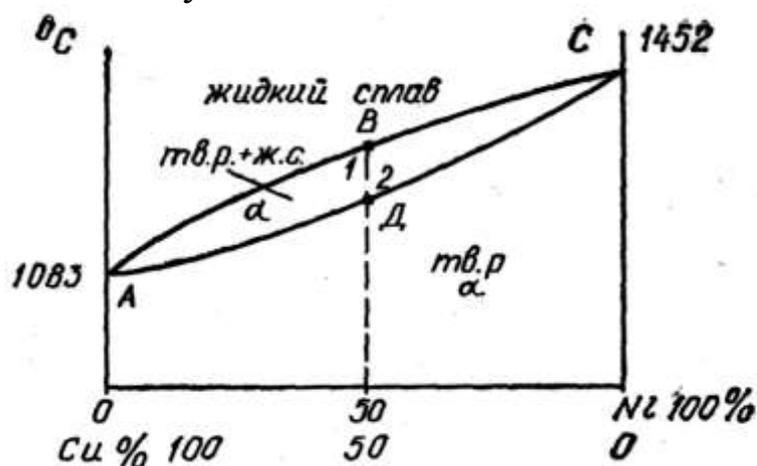


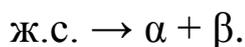
Рис. 19. Диаграмма состояния сплавов Cu-Ni



В этой системе не образуются фазы, представляющие собой чистые компоненты. Из жидкости могут выделяться только твердые растворы  $\alpha$  и  $\beta$ .

Кривая ACB – ликвидус, АДСЕВ – солидус. При температурах, соответствующих линии AC, выпадают кристаллы твердого раствора внедрения атомов компонента В в кристаллической решетке компонента А (кристаллы твердого раствора  $\alpha$ ). При температурах, соответствующих линии СВ, кристаллизуется твердый раствор внедрения атомов компонента А в кристаллической решетке компонента В (кристаллы твердого раствора  $\beta$ ).

При температуре, соответствующей эвтектической линии ДСЕ, происходит эвтектическая реакция



Структура сплавов, лежащих между точками Д и С, после конца кристаллизации состоит из кристаллов  $\alpha$  и эвтектики  $\alpha + \beta$ , а между точками С и Е – из кристаллов  $\beta$  и эвтектики  $\alpha + \beta$ . Сплавы с концентрацией меньше, чем в точке Д, заканчивают кристаллизацию из жидкого раствора по линии АД и состоят из кристаллов  $\alpha$ .

При понижении температуры (линия ДФ) эти кристаллы оказываются пересыщенными атомами компонента В, поэтому из твердого раствора  $\alpha$  кристаллизуются зерна твердого раствора ( $\beta_{\text{вт}}$ ). Принято кристаллизацию из твердого раствора называть вторичной, из жидкого раствора – первичной. В сплавах с концентрацией больше, чем в точке Е, при температурах ниже линии солидус из кристаллов  $\beta$  (линия EG) выпадают кристаллы  $\alpha_{\text{вт}}$ .

### 3.3.5. Диаграмма состояния с перитектикой

Диаграмма состояния с перитектикой (рис. 21) является разновидностью диаграммы состояния с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии. Линия ACB – ликвидус, ADEB – солидус, компоненты условно обозначены А и В, фазы – жидкий сплав (ж.с.), твердые растворы  $\alpha$  и  $\beta$ . Особенностью данной диаграммы является наличие перитектического превращения на линии CDE, где кристаллы  $\beta$  (с концентрацией, соответствующей точке Е) реагируют с жидкостью (состав соответствует точке С). В результате этой

так называемой *перитектической реакции* получается новая фаза – твердый раствор  $\alpha$  (концентрации точки Д)



Такие превращения осуществляются для сплавов, имеющих концентрацию компонентов, соответствующую перитектической точке Д. Левее точки Д в избытке будет жидкая фаза, которая при понижении температуры кристаллизуется в  $\alpha$ -фазу; правее – в избытке  $\beta$ -фаза.

### 3.3.6. Диаграмма состояния для сплавов, образующих химические соединения (четвертого рода)

На рисунке 22 приведена диаграмма состояния сплавов системы магний–кальций (Mg–Ca). Химическое соединение  $\text{Mg}_4\text{Ca}_3$  (в общем виде  $A_nB_m$ ) можно рассматривать как новый, третий компонент, который делит диаграмму состояния Mg–Ca на две диаграммы первого рода: Mg– $\text{Mg}_4\text{Ca}_3$  ( $A$ – $A_nB_m$ ) и  $\text{Mg}_4\text{Ca}_3$ –Ca ( $A_nB_m$ – $B$ ). Химическое соединение  $\text{Mg}_4\text{Ca}_3$  ( $A_nB_m$ ) играет роль компонента.

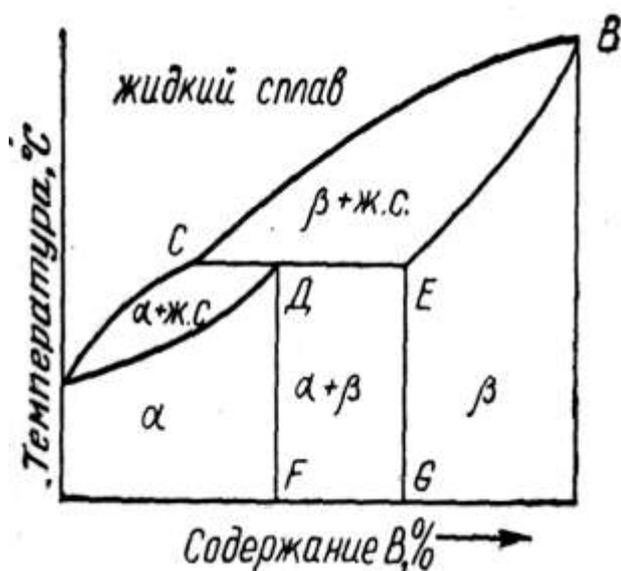


Рис. 21. Диаграмма состояния сплавов с перитектическим превращением

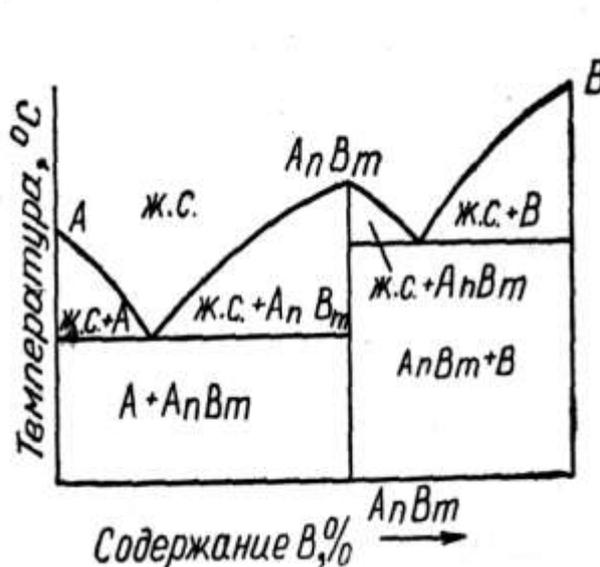


Рис. 22. Диаграмма состояния сплавов с образованием химического соединения

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

Как известно, вид диаграммы состояния зависит от того, какие фазы образуют оба компонента. Свойства сплава также зависят от того, какие соединения или фазы образовали компоненты сплава. Поэтому очевидно, что между видом диаграммы состояния и свойствами сплава должна существовать определенная связь. На рисунке 23 приведены четыре основных типа диаграмм состояний и соответствующие им закономерности изменения свойств сплава (твердости – линия 1; электропроводности – линия 2) с изменением концентрации.

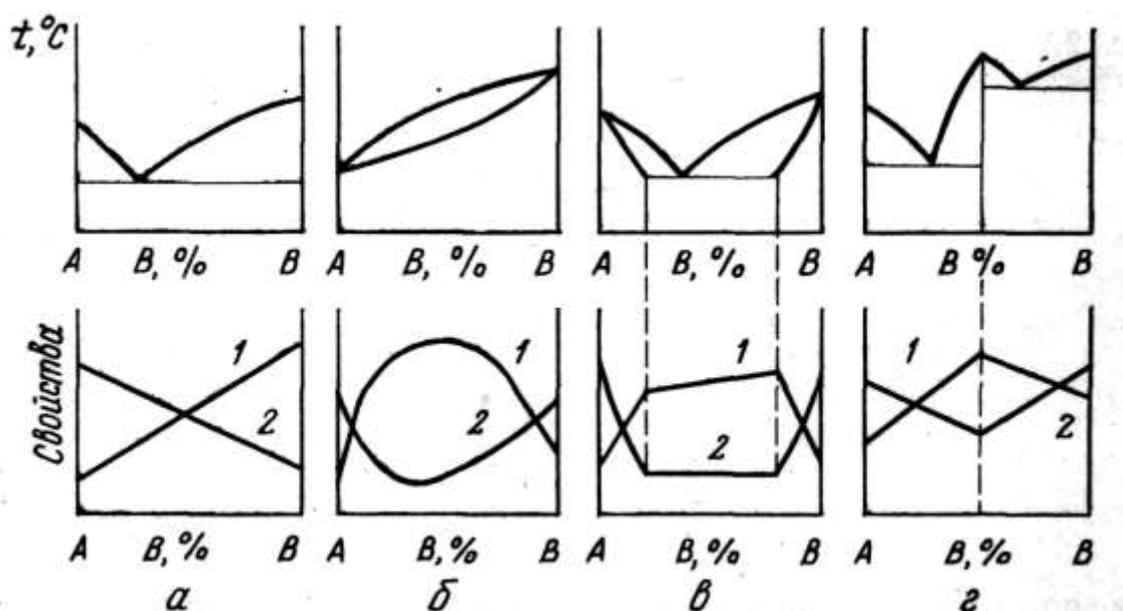


Рис. 23. Свойства сплавов и их диаграммы состояния

В случае образования механических смесей свойства сплавов изменяются по прямолинейному закону (рис. 23, *a*). Создать сплав, механические и электрические свойства которого были бы выше исходных компонентов, невозможно.

При образовании неограниченных твердых растворов (рис. 23, *б*) свойства сплавов изменяются неравномерно. Твердость и электропроводность сплавов могут резко отличаться от исходных компонентов. Высокое электросопротивление имеют сплавы с полной взаимной растворимостью примерно при равном количестве компонентов.

В сплавах с ограниченной растворимостью свойства изменяются в соответствии с принадлежностью сплава к той или иной части диаграммы (рис. 23, в).

При образовании химических соединений (рис. 23, з) свойства сплава изменяются скачкообразно. Точка перелома на диаграмме (сингулярная точка) соответствует химическому соединению.

Точное изучение свойств в зависимости от концентраций (то есть построение диаграммы *состав–свойства*) является важным дополнением при изучении и построении диаграмм состояний.

Метод изучения изменений свойств в зависимости от изменения состава и построения диаграммы *состав–свойство* был положен Н.С. Курнаковым в основу разработанного им физико-химического анализа сплавов. В настоящее время физико-химический анализ является одним из основных методов изучения сплавов и его широко применяют в научных исследованиях новых сплавов

Изучение связи между свойствами сплавов и типом диаграммы является важным фактором при создании новых сплавов, изучении структурных превращений и их свойств.

### Контрольные вопросы

1. Какие виды твердых растворов могут образовываться в сплавах?
2. Какие элементы могут образовывать в твердом состоянии в сплавах химические соединения?
3. В каком случае в сплавах образуются механические смеси компонентов?
4. Как называется уравнение, устанавливающее числовую зависимость между фазами, компонентами и степенью свободы системы?
5. Каково практическое применение диаграмм состояния сплавов?
6. В каких координатах строят диаграммы состояния двойных сплавов?
7. С помощью какого правила определяют число фаз и состав каждой фазы в двойных сплавах?
8. В какой области металловедения возможно применение физико-химического анализа сплавов, разработанного Н.С. Курнаковым?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ БРИНЕЛЛЯ

**Цель работы.** Ознакомиться с устройством прибора Бринелля, изучить методику определения твердости металлов, определить твердость данных образцов.

### **Приборы, материалы, инструменты**

1. Автоматический рычажный прибор Бринелля.
2. Отсчетный микроскоп для измерения диаметра отпечатка.
3. Образцы для измерения твердости.

### **Теоретические сведения**

Твердостью называют свойство металла оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела (индентора), не испытывающего при этом пластической деформации.

Способы испытания на твердость подразделяются на статические и динамические.

К *статическим* способам испытания относятся следующие:

1) метод Бринелля – по величине поверхности отпечатка от вдавливания стального шарика при испытаниях на прессах типа Бринелля;

2) метод Роквелла – по глубине отпечатка при вдавливании алмазного конуса или стального шарика при испытаниях на приборе типа Роквелла;

3) метод Виккерса – по величине поверхности отпечатка от вдавливания алмазной пирамиды при испытаниях на приборе типа Виккерса;

4) измерение микротвердости – по результатам испытаний на микротвердость (малых объемов металла или структурных составляющих). По величине поверхности отпечатка от вдавливания алмазной пирамиды на приборе типа ПМТ.

При *динамических* испытаниях твердость образца определяется по высоте отскока свободнопадающего бойка. Различают методы испытания по Шору, Шварцу, Бауману и др.

В инженерной практике наибольшее распространение получили статические методы испытаний.

Твердость является важным физико-механическим свойством материала. Из всех видов механических испытаний испытание на твердость проводят чаще всего. Это объясняется тем, что:

1) при испытании изделие не разрушается и пригодно для эксплуатации;

2) испытания проводятся просто и быстро;

3) по величине твердости (НВ) можно с некоторым приближением судить и о прочности металлов на растяжение ( $\sigma_{\sigma}$ ), так как существует примерное соотношение:

для ковanej стали и катаной стали:  $\sigma_{\sigma} = 0,36 \text{ НВ}$ ;

для серых чугунов:  $\sigma_{\sigma} = \frac{\text{НВ} - 40}{6}$ ;

для стального литья:  $\sigma_{\sigma} = 0,3 \dots 0,4 \text{ НВ}$ ;

для алюминиевых сплавов:  $\sigma_{\sigma} = 0,38 \text{ НВ}$ .

Износостойкость – одно из важнейших эксплуатационных свойств металлов и сплавов, находится, как правило, в прямо пропорциональной зависимости от твердости. Чем выше твердость конструкционного материала, тем выше его износостойкость.

### Схема испытания по Бринеллю

Методика определения на твердость по Бринеллю состоит в том, что, пользуясь прессом (прессом Бринелля), в испытуемый металл (рис. 24) под определенной нагрузкой ( $P$ ) вдавливается стальной закаленный шарик диаметром ( $D$ ), и по величине полученного отпечатка ( $d$ ) судят о твердости.

Число твердости по Бринеллю определяется отношением нагрузки, действующей на шарик, к поверхности полученного отпечатка, то есть

$$\text{НВ} = \frac{P}{F}, \quad (11)$$

где НВ – число твердости по Бринеллю;

$P$  – нагрузка, кН (кгс);

$F$  – площадь отпечатка (шарового сегмента),  $\text{мм}^2$ .

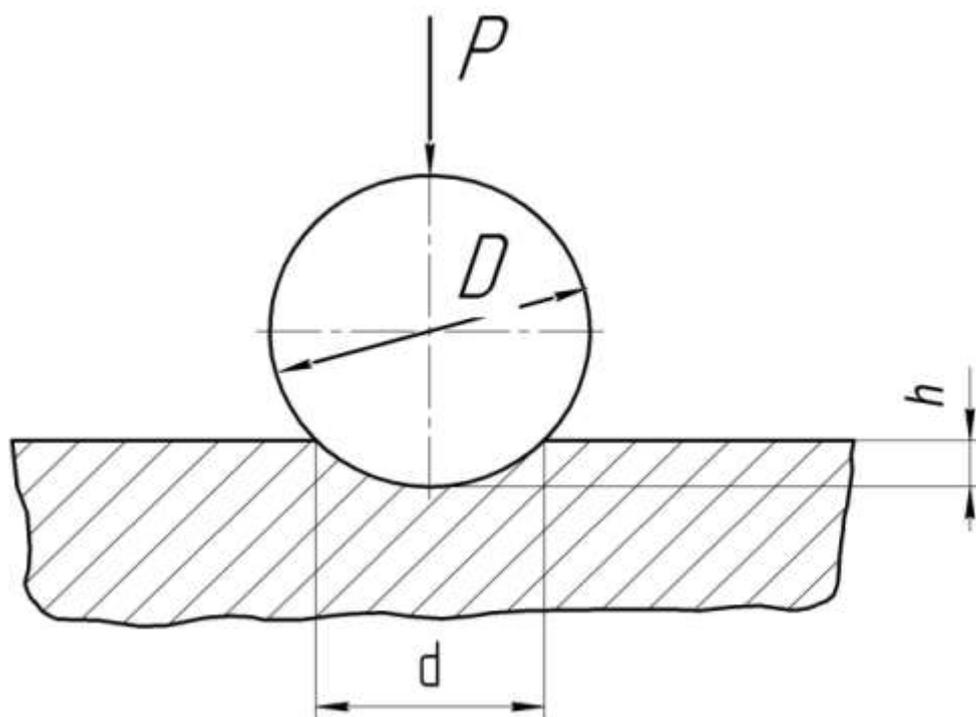


Рис. 24. Схема измерения твердости по Бринеллю

В окончательном виде формула определения твердости по Бринеллю выглядит

$$HB = \frac{P}{\pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (12)$$

где  $d$  – диаметр отпечатка, мм;

$D$  – диаметр шарика, мм.

Число твердости по Бринеллю обозначается HB, указание размерности величины  $\text{кг/мм}^2$  опускается.

На практике для того, чтобы не прибегать каждый раз к длительным расчетам твердости по формуле (12), пользуются специальной таблицей, которая дает перевод диаметра отпечатка в число твердости HB (табл. 1).

Для перевода числа твердости в систему СИ пользуются коэффициентом  $K = 9,81 \cdot 10^6$ , на который умножают табличное значение твердости:  $HB_{\text{СИ}} = HB \cdot K$ , [Па] =  $HB \cdot K \cdot 10^{-6}$ , [МПа] (мегапаскалей).

Таблица 1

## Значение твердости НВ в зависимости от диаметра отпечатка

Диаметр отпечатка, мм	Число твердости по Бринеллю, при нагрузке Р, равной			Диаметр отпечатка, мм	Число твердости по Бринеллю, при нагрузке Р, равной		
	30 D <sup>2</sup>	10 D <sup>2</sup>	2,5 D <sup>2</sup>		30 D <sup>2</sup>	10 D <sup>2</sup>	2,5 D <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8
2,89	448	-	-	3,64	278	92,8	23,2
2,90	444	-	-	3,66	275	91,8	22,9
2,92	438	-	-	3,68	272	90,7	22,7
2,94	432	-	-	3,70	269	89,7	22,4
2,96	426	-	-	3,72	266	88,7	22,2
2,98	420	-	35,0	3,74	263	87,7	21,9
3,00	415	-	34,6	3,76	260	86,8	21,7
3,02	409	-	34,1	3,78	257	85,8	21,5
3,04	404	-	33,7	3,80	255	84,9	21,2
3,06	398	-	33,2	3,82	252	84,0	21,0
3,08	393	-	32,7	3,84	249	83,0	20,8
3,10	388	129	32,3	3,86	246	82,1	20,5
3,12	383	128	31,9	3,88	244	81,3	20,3
3,14	378	126	31,5	3,93	241	80,4	20,1
3,16	373	124	31,1	3,92	239	79,6	19,9
3,18	368	123	30,7	3,94	236	78,7	19,7
3,20	363	121	30,3	3,96	234	77,9	19,5
3,22	359	120	29,9	3,98	231	77,1	19,3
3,24	354	118	29,5	4,00	229	76,3	19,1
3,26	350	117	29,2	4,02	226	75,5	18,9
3,28	345	115	28,8	4,04	224	74,7	18,7
3,30	341	114	28,4	4,06	222	73,9	18,5
3,32	337	112	28,1	4,08	219	73,2	18,3
3,34	333	111	27,7	4,10	217	72,4	18,1
3,36	329	110	27,4	4,12	215	71,7	17,9
3,38	325	108	27,1	4,14	213	71,0	17,7
3,40	321	107	26,7	4,16	211	70,2	17,5
3,42	317	106	26,4	4,18	209	69,5	17,4
3,44	313	104	26,1	4,20	207	68,8	17,2
3,46	309	103	25,8	4,22	204	68,2	17,0
3,50	302	101	25,2	4,24	202	67,5	16,9
3,52	298	99,5	24,9	4,26	200	66,8	16,7
3,54	295	98,3	24,6	4,28	198	66,2	16,5
3,56	292	97,2	24,3	4,30	197	65,5	16,4
3,58	288	96,1	24,0	4,32	195	64,9	16,2
3,60	285	95,0	23,7	4,34	193	64,2	16,1
3,62	282	93,9	23,5	4,36	191	63,6	15,9

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
4,38	189	63,0	15,8				
4,42	185	61,8	15,5	5,22	130	43,3	10,8
4,44	184	61,2	15,3	5,24	129	42,9	10,7
4,46	182	60,6	15,2	5,26	128	42,6	10,6
4,48	180	60,1	15,0	5,28	127	42,2	10,6
4,50	179	59,5	14,9	5,30	126	41,9	10,5
4,52	177	59,0	14,7	5,32	125	41,5	10,4
4,54	175	58,4	14,6	5,34	124	41,2	10,3
4,56	174	57,9	14,5	5,36	123	40,9	10,2
4,58	172	57,3	14,3	5,38	122	40,5	10,1
4,60	170	56,8	14,2	5,40	121	40,2	10,1
4,62	169	56,3	14,1	5,42	120	39,9	9,97
4,64	167	55,8	13,9	5,44	119	39,6	9,90
4,66	166	55,3	13,8	5,46	118	39,2	9,82
4,68	164	54,8	13,7	5,48	117	38,9	9,73
4,70	163	54,3	13,6	5,50	116	38,6	9,66
4,72	161	53,8	13,4	5,52	115	38,3	9,58
4,74	160	53,3	13,3	5,54	114	38,0	9,50
4,76	158	52,8	13,2	5,56	113	37,7	9,43
4,78	157	52,3	13,1	5,58	112	37,4	9,35
4,80	156	51,9	13,0	5,60	111	37,1	9,27
4,82	154	51,4	12,9	5,62	110	36,8	9,20
4,84	153	51,0	12,8	5,64	110	36,5	9,14
4,86	152	50,5	12,6	5,66	109	36,3	9,07
4,88	150	50,1	12,5	5,68	108	36,0	9,00
4,90	149	49,6	12,4	5,70	107	35,7	8,93
4,92	148	49,2	12,3	5,72	106	35,4	8,86
4,94	146	48,8	12,2	5,74	105	35,1	8,79
4,96	145	48,4	12,1	5,76	105	34,9	8,73
4,98	144	47,9	12,0	5,78	104	34,6	8,66
5,00	143	47,5	11,9	5,80	103	34,3	8,59
5,02	141	47,1	11,8	5,82	102	34,1	8,53
5,04	140	46,7	11,7	5,84	101	33,8	8,46
5,06	139	46,3	11,6	5,86	101	33,6	8,40
5,08	138	45,9	11,5	5,88	99,9	33,3	8,33
5,10	137	45,5	11,4	5,90	99,2	33,1	8,26
5,12	135	45,1	11,3	5,92	98,4	32,8	8,20
5,14	134	44,8	11,2	5,94	97,7	32,6	8,14
5,16	133	44,4	11,1	5,96	96,9	32,3	8,08
5,18	133	44,0	11,0	5,98	96,2	32,1	8,02
5,20	131	43,7	10,9	6,00	95,5	31,8	7,96

## Выбор диаметра шарика

Для испытания применяются шарики диаметром 2,5; 5; 10 мм – в зависимости от толщины испытуемого материала и его ориентировочной твердости. Нагрузка  $P$  выбирается в зависимости от качества испытуемого материала по формуле

$$P = K \cdot D^2, \quad (13)$$

где  $K$  – постоянная для данного материала величина, равная 30, 10 или 2,5.

В таблице 2 приведены данные по выбору диаметра шарика и нагрузки в зависимости от качества материала и толщины образцов.

*Таблица 2*

Выбор диаметра шарика  
в зависимости от твердости и толщины образца

Материал	Интервал твердости в числах Бринелля	Минимальная толщина испытуемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой $P$ и диаметром шарика $D$	Диаметр шарика $D$ , мм	Нагрузка, $P$ , кгс	Выдержка под нагрузкой, $\tau$ , с
Черные металлы	140–450	От 6 до 3	$P = 30D^2$	10,0	3000	10
		От 4 до 2		5,0	750	
		Менее 2		2,5	187,5	
То же	< 140	Более 6	$P = 10D^2$	10,0	1000	10
		От 6 до 3		5,0	250	
		Менее 3		2,5	62,5	
Цветные металлы	> 130	От 6 до 3	$P = 30D^2$	10,0	3000	30
		От 3 до 2		5,0	750	
		Менее 2		2,5	187,5	
То же	35–130	От 9 до 6	$P = 10D^2$	10,0	1000	30
		От 6 до 3		5,0	250	
		Менее 3		2,5	62,5	
То же	8–35	От 9 до 6	$P = 2,5D^2$	10,0	250	60
		От 6 до 3		5,0	62,5	
		Менее 3		2,5	15,6	

## Подготовка образца для испытаний

Перед испытанием поверхность образца, в которую будет вдавливаться шарик, шлифуют шкуркой или напильником, чтобы она была ровной, гладкой и не было окалины или других дефектов, чтобы был получен правильный отпечаток с отчетливо видными краями. Центр отпечатка должен находиться от края образца на расстоянии не менее диаметра шарика, а от центра соседнего отпечатка на расстоянии не менее двух диаметров шарика.

## Порядок проведения испытания

Нагрузку  $P$ , диаметр шарика  $D$  и продолжительность выдержки шарика под нагрузкой выбирают по таблице 2.

На рисунке 25 приведена схема рычажного прибора Бринелля (тип ТШ). Прибор имеет станину 1. Испытуемый образец устанавливают на предметный столик 4. Вращая маховик 3, винтом 2 поднимают образец до соприкосновения его с шариком 5 и далее до полного сжатия пружины 7, надетой на шпиндель 6. Пружина создает предварительную нагрузку на шарик, равную 1 кН (100 кгс), что обеспечивает устойчивое положение образца во время нагружения.

После этого включают электродвигатель 13 и через червячную передачу редуктора 12, шатун 11 и систему рычагов 8, 9 с грузами 10 создают заданную полную нагрузку на шарик. На испытуемом образце получается отпечаток. После разгрузки прибора образец снимают и определяют диаметр отпечатка специальным микроскопом. За расчетный диаметр отпечатка принимают среднее арифметическое значение измерений в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По диаметру отпечатка в таблице 1 при шарике диаметром 10 мм и нагрузке 30 кН (3000 кгс) находят соответствующее число твердости НВ и записывают, например – НВ 302.

К недостаткам метода Бринелля необходимо отнести невозможность испытания металлов, имеющих твердость более НВ 450 или толщину образца менее 2 мм. При испытании металлов с твердостью более 450 возможна деформация шарика, и результаты будут неточными.

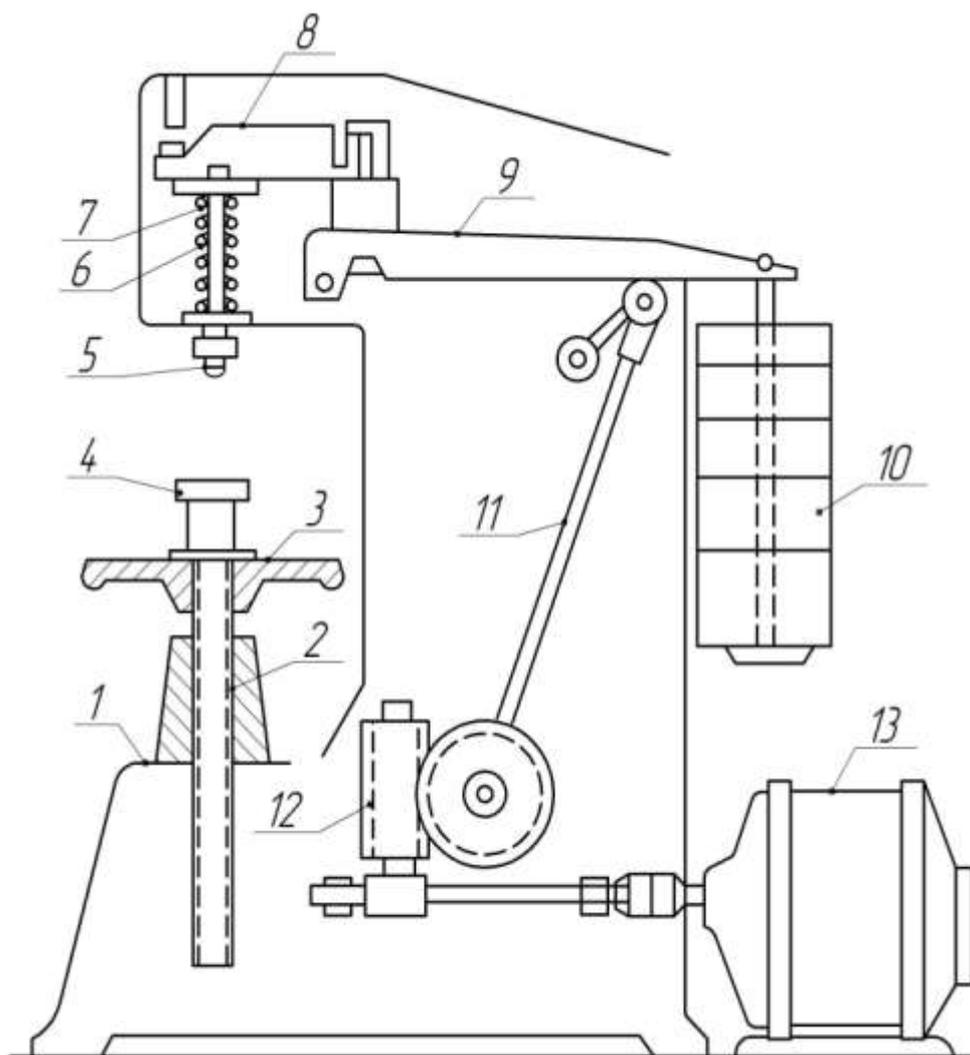


Рис. 25. Схема прибора Бринелля:  
 1 – станина; 2 – винт; 3 – маховик; 4 – предметный столик; 5 – шарик;  
 6 – шпindelь; 7 – пружина; 8, 9 – рычажная система; 10 – грузы;  
 11 – шатун; 12 – червячная передача (редуктор); 13 – электродвигатель

### **Методика измерения отпечатка и определения твердости**

Полученный отпечаток измеряют отсчетным микроскопом. Отсчетный микроскоп необходимо плотно установить нижней опорной частью на испытуемую поверхность и повернуть вырезом (окном) в нижней части к свету. Поворачивая окуляр, надо добиться, чтобы края отпечатка были резко очерчены. Затем, передвигая микроскоп, надо один край отпечатка совместить с началом шкалы (рис. 26). Отсчитать деление шкалы, с которым совпадает противоположный край

отпечатка. Данный отсчет и будет соответствовать диаметру отпечатка. Затем микроскоп надо повернуть на  $90^\circ$  и замерить диаметр отпечатка второй раз.

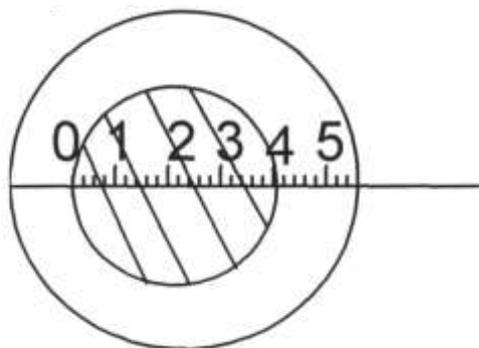


Рис. 26. Схема замера диаметра отпечатка

### Содержание отчета

В отчет должны быть включены ответы на контрольные вопросы, схема прибора и схема замера диаметра отпечатка.

Результаты измерения твердости занести в таблицу 3.

Таблица 3

### Протокол испытаний

№ п/п	Наименование материала или детали	Условия испытаний	Твердость по Бринеллю						
			1-й замер		2-й замер		3-й замер		НВ среднее
			d	НВ	d	НВ	d	НВ	
		D = мм P = кг $\tau$ = с							
		D = мм P = кг $\tau$ = с							
		D = мм P = кг $\tau$ = с							

### Контрольные вопросы

1. Что такое твердость?
2. Существующие методы замера твердости.

3. Какова примерная зависимость основных механических свойств от твердости?
4. На каком принципе осуществляются замеры твердости?
5. Как подбирается диаметр шарика для испытания на твердость по Бринеллю?
6. Из каких соображений выбирается нагрузка при испытании на твердость по Бринеллю?
7. Размерность твердости, замеренной по Бринеллю.
8. Обозначение твердости, замеренной по Бринеллю.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ МЕТОДОМ РОКВЕЛЛА**

**Цель работы.** Изучить устройство твердомера типа Роквелла, освоить методику определения твердости по способу Роквелла, определить твердость данных образцов.

#### **Приборы, материалы, инструменты**

1. Твердомеры ТК-2, HBRV-187,5.
2. Образцы для замера твердости.
3. Сменные наконечники.

#### **Теоретические сведения**

Принципиальное отличие данного метода от метода Бринелля заключается в том, что твердость определяют по глубине отпечатка, получаемого при вдавливании алмазного конуса или стального шарика, а не по площади отпечатка.

Метод Роквелла основан на том, что в испытуемый образец вдавливаются алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или реже закаленный стальной шарик диаметром 1,588 мм (1/16"). Алмазный конус используют для твердых материалов, а шарик – для мягких.

При испытаниях по Роквеллу нагрузку можно изменять в широких пределах, без изменения значений твердости, так как при вдавливании конуса сохраняется закон подобия, а условия деформации под вершиной конуса с увеличением давления не изменяются. Шарик или алмазный конус (рис. 27) вдавливают в испытуемый образец под дей-

ствием двух последовательно прилагаемых нагрузок – предварительной  $P_0$ , равной 0,1 кН (10 кгс), и основной  $P_1$ .

При вдавливании алмаза к нему прилагается общая нагрузка  $P$ , равная 0,6 кН (60 кгс), или 1,5 кН (150 кгс), а при вдавливании шарика – 1 кН (100 кгс). Соответственно этим нагрузкам на индикаторе прибора нанесены шкалы – черные А и С и красная В. Шкалой А пользуются при измерении твердости изделий с очень твердым поверхностным слоем, полученным посредством химико-термической обработки (цементацией, азотированием и др.), а также твердых сплавов с твердостью до HRA 85. Шкалу С используют при измерении твердости закаленных сталей, обладающих твердостью до HRC 67. Шкалой В пользуются при измерении твердости незакаленных сталей, цветных металлов и сплавов, имеющих твердость до HRB 100.

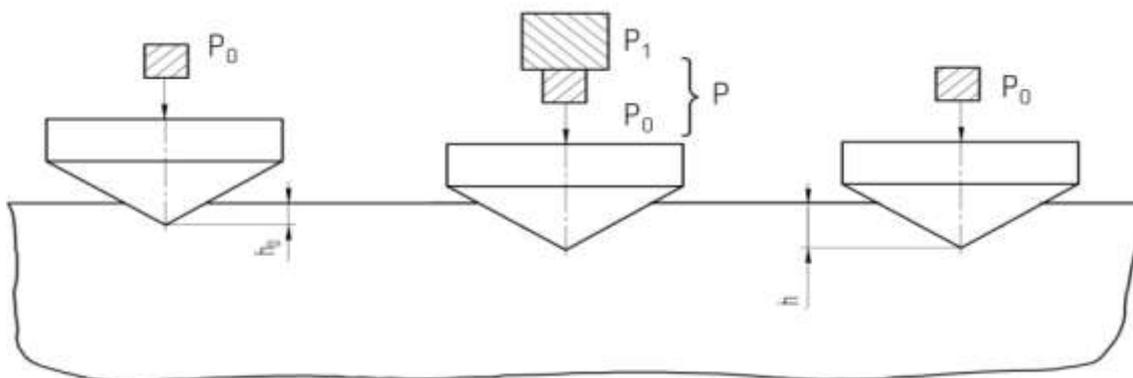


Рис. 27. Схема измерения твердости по Роквеллу

Числа твердости по Роквеллу  $HR$  измеряют в условных единицах и определяют по формулам:

при вдавливании алмазного конуса

$$HRC = 100 - \frac{h - h_0}{0,002}, \quad (14)$$

при вдавливании шарика

$$HRB = 130 - \frac{h - h_0}{0,002}, \quad (15)$$

где 100 – число черных делений шкалы С циферблата индикатора прибора;

130 – число красных делений шкалы В;

$h$  – глубина внедрения алмаза (шарика) под действием общей нагрузки  $P$ , измеренная после снятия основной нагрузки  $P_1$  с оставлением предварительной нагрузки  $P_0$ , мм;

$h_0$  – глубина внедрения алмаза (шарика) под действием предварительной нагрузки  $P_0$ , мм;

0,002 – глубина внедрения алмаза (шарика), соответствующая перемещению стрелки индикатора на одно деление, мм.

Чтобы установить на приборе у мягкого металла малую твердость, а у твердого металла – высокую твердость, полученное число делений ( $\frac{h-h_0}{0,002}$ ) вычитается из общего числа деления 100 для шкалы С или из 130 для шкалы В.

### Устройство прибора и порядок проведения испытаний

На рисунке 28 приведена схема прибора ТК-2 (типа Роквелла).

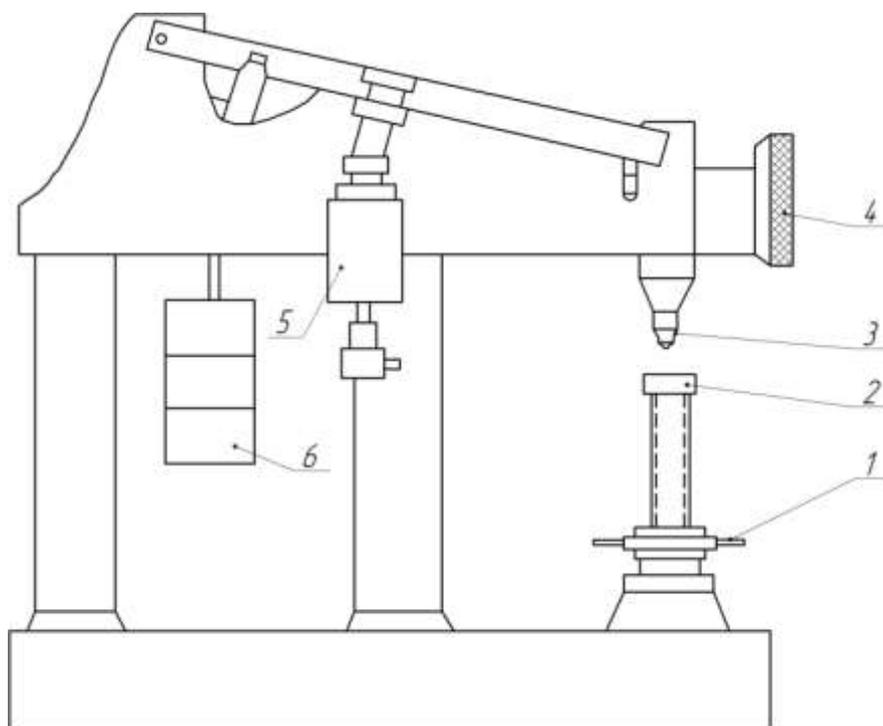


Рис. 28. Схема прибора Роквелла:

- 1 – штурвал; 2 – предметный столик; 3 – алмазный конус;  
4 – циферблат индикатора; 5 – демпфер; 6 – грузы

На предметный столик 2 устанавливают хорошо зачищенный испытуемый образец. Затем вращением штурвала 1 по часовой стрелке поднимают образец до соприкосновения с алмазом или шариком 3.

При дальнейшем вращении штурвала начинают перемещаться малая и большая стрелки циферблата индикатора 4, и создается пред-

варительная нагрузка, равная 0,1 кН (10 кгс), препятствующая смещению образца во время испытания. Предварительное нагружение, кроме того, исключает влияние упругой деформации и различной степени шероховатости поверхности образца на результаты измерений.

Когда малая стрелка совместится с красной точкой, нанесенной на циферблат, вращение штурвала следует прекратить. После этого циферблат индикатора поворачивают так, чтобы нулевое деление черной шкалы С стало против конца большой стрелки и соответственно против 30 деления красной шкалы В. Красная шкала В смещена относительно нулевого деления черной шкалы С на 30 делений, так как при испытании шариком большая стрелка может поворачиваться более чем на 100 делений. Нажатием педали при включенном электрическом приводе посредством грузов *b* создают основную нагрузку  $P_1$  на алмаз (шарик). Благодаря масляному демпферу 5 грузы плавно опускаются, алмаз (шарик) вдавливаются в металл, а большая стрелка циферблата поворачивается влево, в сторону уменьшения числовых значений твердости, то есть происходит то вычитание, о котором было сказано выше. После остановки большей стрелки через 1–3 секунды автоматически снимается основная нагрузка. При этом большая стрелка поворачивается в обратном направлении и останавливается против деления, показывающего значение твердости испытуемого металла.

За число твердости принимается среднее арифметическое значение, полученное при трех испытаниях.

На рисунке 29 приведена схема универсального твердомера HBRV-187,5.

Процесс измерения производится следующим образом:

1. Включите питание, дисплей загорится. Выберите соответствующую шкалу для исследуемого материала образца. Поверните переключатель 10 по часовой стрелке, чтобы установить общую нагрузку.

2. Кнопками «+» и «-» на панели управления установите время выдержки.

3. Поместите образец для испытания на стол и вращайте маховик 7 по часовой стрелке, чтобы поднять стол.

4. После контакта образца с индентором продолжайте вращать маховик до тех пор, пока малая стрелка не сравняется с красной точкой (три оборота большой стрелки), а большая стрелка – с точками «С» и «В». Смещение должно быть не более чем  $\pm 5$  делений.

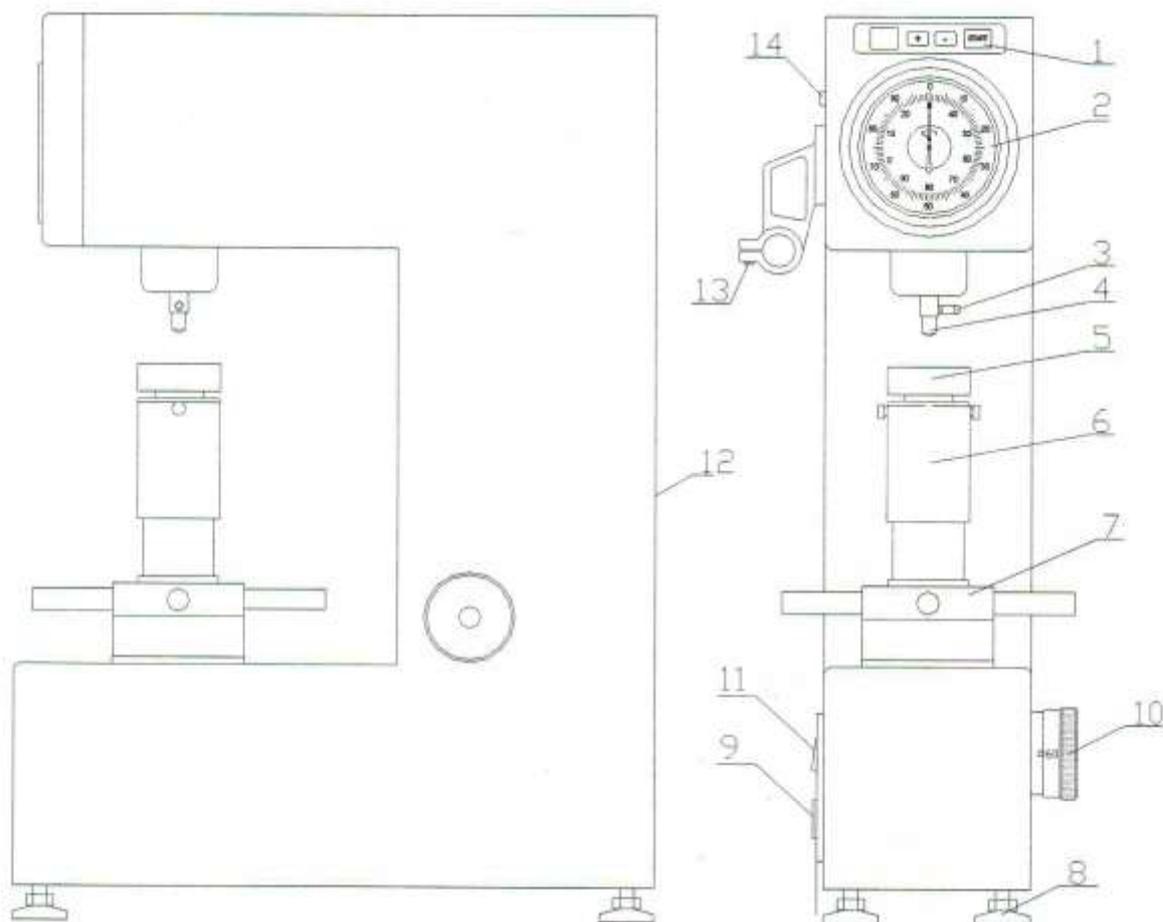


Рис. 29. Схема универсального твердомера HBRV-187,5:

1 – панель управления; 2 – стрелочный циферблат; 3 – винт фиксации индентора; 4 – индентор; 5 – рабочий столик; 6 – подъемный винт; 7 – маховик; 8 – регулировочная ножка; 9 – предохранитель; 10 – переключатель нагрузок; 11 – выключатель; 12 – задняя крышка; 13 – фиксатор микроскопа; 14 – разъем

5. Поверните диск индикатора влево или вправо так, чтобы большая стрелка сравнялась с буквой «С» (или с буквой «В» в случае определения HRB).

6. Нажмите кнопку «START» на сенсорной панели, твердомер начнет процесс нагружения автоматически. После нагружения начнется процесс удержания нагрузки и затем разгрузка.

7. Большая стрелка на циферблате покажет истинное значение твердости. Для шкал HRC и HRA считывание значения твердости производится по внешней шкале. Для шкалы HRB считывание производится по внутренней шкале.

8. Поверните маховик против часовой стрелки, чтобы опустить образец. Повторите измерение в разных местах образца.

9. Каждый образец должен быть измерен в не менее 5 точках (первое измерение не учитывается). При измерении партии образцов количество измерений может быть уменьшено.

Число твердости по Роквеллу можно перевести в число твердости по Бринеллю (табл. 4).

Метод Роквелла отличается простотой и высокой производительностью, обеспечивает сохранение качественной поверхности после испытаний, позволяет испытывать металлы и сплавы как низкой, так и высокой твердости, при толщине изделия (слоя) до 0,8 мм. Этот метод не рекомендуется применять для сплавов с неоднородной структурой (чугуны серые, ковкие и высокопрочные).

Измерения алмазным конусом с нагрузкой 60 кгс (HRA) применяют для очень твердых материалов (более HRC 70), например твердых сплавов, когда вдавливание алмазного конуса с большой нагрузкой может вызвать выкрашивание алмаза, а также для измерения твердых поверхностных слоев (0,3–0,5 мм) или тонких пластинок.

Стальным шариком с нагрузкой 100 кгс (HRB) твердость определяют для мягкой (отожженной) стали или цветных сплавов в деталях или образцах толщиной 0,8–2,0 мм, то есть в условиях, когда измерение по Бринеллю, выполняемое шариком большого диаметра, может вызвать смятие образца.

Измерения алмазным конусом с нагрузкой 150 кгс (HRC) проводят:

- для закаленной или низкоотпущенной стали с твердостью более 450 HB, то есть в условиях, когда вдавливание стального шарика (по Бринеллю или Роквеллу по шкале В) в твердый материал может вызвать деформацию шарика и искажение результатов;

- материалов средней твердости (более 230 HB) как более быстрым способом определения, оставляющим, кроме того, меньший след на измеряемой поверхности, чем при испытании по Бринеллю;

- определения твердости тонких поверхностных слоев, но толщиной не менее 0,5 мм (например, цементованного слоя).

Таблица 4

## Соотношение чисел твердости по Бринеллю и Роквеллу

По Роквеллу	По Бринеллю		По Роквеллу		По Бринеллю		По Роквеллу	По Бринеллю	
Шкала С	Д = 10 мм Р = 3000 кгс		С	В	Д = 10 мм Р = 3000 кгс		Шкала В	Д = 10 мм Р = 3000 кгс	
HRC	Диаметр отпечатка, мм	НВ	HR С	HRВ	Диаметр отпечатка, мм	НВ	HRВ	Диаметр отпечатка, мм	НВ
	d				d			d	
72	2,20	780	33	-	3,40	321	86	4,60	170
70	2,25	745	32	-	3,45	311	85	4,65	167
68	2,30	712	31	-	3,50	302	84	4,70	163
66	2,35	682	30	-	3,55	293	83	4,75	159
64	2,40	653	29	-	3,60	285	82	4,80	156
62	2,45	627	28	-	3,65	277	81	4,85	152
60	2,50	601	27	-	3,70	269	80	4,90	149
58	2,55	578	26	-	3,75	262	78	4,95	146
56	2,60	555	25	-	3,80	255	77	5,0	143
55	2,65	534	24	-	3,85	248	76	5,05	140
52	2,70	514	23	102	3,90	241	75	5,10	137
50	2,75	495	21	101	3,95	235	73	5,15	134
49	2,80	477	20	100	4,00	229	72	5,20	131
48	2,85	461	19	99	4,05	223	71	5,25	128
46	2,90	444	17	98	4,10	217	70	5,30	126
45	2,95	429	15	97	4,15	212	69	5,35	123
43	3,00	415	14	95	4,20	207	68	5,40	121
42	3,05	401	13	94	4,25	201	67	5,45	118
41	3,10	388	12	93	4,30	197	65	5,50	116
40	3,15	375	11	92	4,35	192	64	5,55	114
39	3,20	363	9	91	4,40	187	63	5,60	111
38	3,25	352	8	90	4,45	183	61	5,65	109
36	3,30	341	7	88	4,50	179	59	5,70	107
35	3,35	331	6	87	4,55	174	58	5,75	105

## Содержание отчета

В отчет должны быть включены ответы на контрольные вопросы, схема прибора Роквелла. Результаты измерения твердости занести в таблицу 5.

Таблица 5

### Протокол испытаний

№ п/п	Наименование материала или детали	Условия испытания	Твердость по Роквеллу HR				Соответствие твердости по Бринеллю, HB
			1-й замер	2-й замер	3-й замер	Среднее значение	
		R = кг, шарик или алмаз, шкала –					
		R = кг, шарик или алмаз, шкала –					

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается принципиальное отличие способов замера твердости по Бринеллю и Роквеллу?
2. Чем объясняется более широкое применение способа Роквелла, чем Бринелля?
3. Размерность твердости, замеренной по Роквеллу.
4. Обозначение твердости по Роквеллу.
5. В каких случаях применяется твердосплавный конус или алмаз, а в каких – шарик?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

### МАКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

**Цель работы.** Изучить методику проведения макроанализа, научиться самостоятельно проводить макроанализ металлов и сплавов, для чего использовать коллекцию изломов деталей сельскохозяйственных машин и дать их описание, ознакомиться с коллекцией макрошлифов и дать их описание.

**Приборы, материалы и инструменты:** набор изломов деталей сельскохозяйственных машин, набор макрошлифов, биноклярная лупа.

#### Теоретические сведения

При макроскопическом анализе производится исследование макроструктуры. Макроструктурой называется строение металла, видимое без увеличения или при небольшом увеличении (10–30 раз) с помощью лупы.

Макростроение можно изучить непосредственно на поверхности металла (например, отливок, поковок), в изломе детали (заготовки) или на специальном образце после его шлифования и травления – макрошлифе.

При проведении макроанализа определяют:

- вид излома – кристаллический, волокнистый, смешанный;
- вид разрушения;
- нарушение сплошности металла – усадочную рыхлость, пористость, межкристаллические трещины, дефекты сварки (непровары, газовые пузыри и др.);
- дендритное строение материалов;
- химическую неоднородность металла (ликвацию), наличие в нем грубых включений и вредных примесей;
- волокнистую структуру деформированного металла;
- структурную и химическую неоднородность металла, созданную термической, термомеханической или химико-термической обработкой.

## **Макроанализ изломов**

Образцы изломов деталей (заготовок) получают специально в лабораторных условиях или собирают в процессе исследования надежности машин в эксплуатационных условиях.

Анализ излома позволяет установить многие особенности строения металлов, а в ряде случаев и причины хрупкого или вязкого разрушения.

Анализ строения излома более полно характеризует поведение металла при разрушении. По этому признаку различают изломы:

1. Кристаллический (блестящий) – наблюдается при хрупком разрушении материалов пониженной вязкости, происходящем без заметной пластической деформации.

2. Матовый, или волокнистый, – наблюдается при вязком разрушении, которому предшествовала значительная пластическая деформация.

3. Смешанный – кристаллический в одних участках и волокнистый в других, наблюдается при усталостном разрушении материала.

Смешанный излом характерен также для не полностью прокалившейся стали – в закаленной поверхностной зоне наблюдается волокнистый излом (фарфоровидный), а в середине – кристаллический.

На кристаллическом изломе можно наблюдать зерно, которое дает представление о внутреннем строении металла и его свойствах. Чем меньше зерно в изломе, тем выше механические свойства металла.

Волокнистый излом наблюдается при разрушении, связанном со значительной пластической деформацией, которая искажает действительную форму зерен, и кристаллическая структура не обнаруживается.

По отражению света излом может быть светлым (характерен для стали и белых чугунов, то есть чугунов, в которых весь углерод связан в виде цементита) и темным – у чугунов, содержащих углерод в виде графита (серых, ковких и высокопрочных).

## **Макроанализ шлифов**

Макрошлифом называется поверхность детали (образца), подготовленная для исследования макроструктуры.

Метод макроанализа макрошлифов дает возможность исследовать структуру, образующуюся в процессе кристаллизации или последующей обработки давлением. Этим способом можно выявить во-

локнистость, ликвацию серы и фосфора, различного вида дефекты: усадочную раковину, газовые пузыри, поры, трещины и другие.

Макрошлиф готовят шлифованием вырезанной поверхности детали (образца). Подготовленную поверхность травят соответствующим реактивом для выявления структуры.

Существует несколько способов макроанализа, проводимых на макрошлифах, различающихся конкретными задачами при исследовании конкретных деталей. Для выявления дендритного строения, химической и структурной неоднородности, а также волокнистой структуры стали используют реактивы глубокого и поверхностного травления. Реактивы поверхностного травления хорошо выявляют сравнительно крупную пористость (например, в сварочных заготовках) и другие дефекты, выходящие на поверхность.

Для выявления таких дефектов, как флокены, трещины, поры (не выходящие непосредственно на поверхность шлифа), используют более агрессивные реактивы грубого травления.

Например, волокнистость металла, возникшая при обработке давлением, выявляется глубоким травлением макрошлифа в сильных кислотах, нагретых до 70–100 °С. При этом примеси, скопившиеся на границах зерен, растворяются быстрее основного металла, в результате чего образуется рельефная поверхность в виде тонких волокон. Волокнистость, повторяющая конфигурацию сечения детали, свидетельствует о правильной технологии горячей обработки давлением.

При несоответствии расположения волокон контуру детали в местах перехода от одной конфигурации к другой создаются напряжения, сокращающие эксплуатационный срок службы детали.

Как указывалось выше, существует много рецептов приготовления реактивов и несколько способов проведения макроанализа. Например, для выявления ликвации серы применяют метод Баумана с использованием фотографической бромосеребряной бумаги, для определения ликвации углерода и фосфора используют реактивы Гейна и др.

Макроанализ не позволяет определить всех особенностей строения металла, поэтому он зачастую является не окончательным, а лишь предварительным видом исследования. По данным микроанализа можно выбрать те участки изучаемой детали, которые надо подвергнуть дальнейшему, более подробному микроскопическому исследованию.

## Порядок выполнения работы

Изучить методику проведения макроанализа, ознакомиться с коллекцией изломов, макрошлифов и дать описание по схеме:

1. Тип излома.
2. Характеристика излома по отражению света (светлый или темный).
3. Мелкозернистая или крупнозернистая структура.
4. Монокристалл или поликристалл.
5. Наличие дефектов структуры, наблюдаемых на изломе.
6. Причины излома.
7. Характерная особенность структуры (зоны химико-термической обработки, строение сварных соединений, волокнистость строения).
8. Схема строения макроструктуры.

## Контрольные вопросы

1. Что такое макроанализ?
2. Что такое поликристалл?
3. Какую информацию дает анализ макрошлифов?
4. Какие типы изломов существуют?
5. Какую информацию дает анализ излома?
6. Какая зависимость существует между величиной зерна металла и его механическими свойствами?
7. Что может служить причиной излома?
8. Чем объясняется волокнистость структуры у кованных и штампованных деталей?
9. Что такое флокены?

## Содержание отчета

В отчет должны быть включены ответы на контрольные вопросы. После исследования макроструктуры образцов и разрушенных деталей сельскохозяйственных машин заполнить таблицу 6.

Таблица 6

### Протокол испытаний

№ п/п	Наименование образца или детали	Тип излома	Зернистость структуры	Наименование металла или сплава	Наличие дефектов структуры	Вид разрушения

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

**Цель работы.** Освоить технологию приготовления микрошлифов, ознакомиться с устройством металлографического микроскопа, рассмотреть на микроскопе микрошлиф до и после травления, дать схематическое изображение и описание микроструктуры, уяснить практическое значение данного метода исследования материалов.

#### **Приборы, материалы, инструменты**

1. Металлографический микроскоп МИМ-7.
2. Металлографический микроскоп ЛабоМет-1.
3. Коллекция микрошлифов.
4. Альбом микроструктур.

#### **Теоретические сведения**

Между структурой и свойствами металлов и сплавов существует прямая зависимость. Поэтому в практике металловедения микроанализ является одним из основных методов, позволяющих наиболее полно изучить строение металлов и сплавов, получить исчерпывающие сведения об их свойствах.

Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры металлов. Наблюдаемая под микроскопом структура называется микроструктурой.

Микроскопический анализ проводят на оптическом микроскопе при увеличении от 50 до 1500 раз или на электронном микроскопе при увеличении порядка 5000–100000 раз.

При помощи микроанализа определяют:

- 1) форму и размер кристаллических зерен, из которых состоит металл или сплав;
- 2) изменение внутреннего строения сплава, происходящее под влиянием различных режимов термической и химико-термической обработки, а также после внешнего механического воздействия на сплав;
- 3) микропороки металла – микротрещины, раковины и т.п.;
- 4) неметаллические включения – сульфиды, оксиды и др.;

5) химический состав некоторых структурных составляющих по их характерной форме и характерному окрашиванию специальными реактивами, в некоторых случаях приблизительно определяют химический состав изучаемого сплава.

Для микроскопического анализа из исследуемого материала вырезают образец и путем ряда операций (шлифования, полирования, травления) доводят до такого состояния, когда при рассмотрении его в металлографический микроскоп выявляются неметаллические включения, мелкие поры, графит в чугуне (после шлифования и полирования) или микроструктура (после шлифования, полирования и травления).

Подготовленная для исследования под микроскопом поверхность образца называется микрошлифом.

Таким образом, микроскопический анализ состоит:

- 1) из приготовления микрошлифов;
- 2) исследования микрошлифов с помощью металлографического микроскопа.

### **Изготовление микрошлифов**

Изготовление микрошлифа включает следующие операции: отрезку образца, его торцовку, шлифование, полирование и травление.

*Отрезка* образца нужных размеров проводится резцом или ножовкой (при твердости металла  $HV < 300$ ) или дисковым шлифовальным кругом (при твердости металла  $HV > 300$ ) с охлаждением водой или эмульсией, чтобы образец не нагревался свыше  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  и его структура не изменялась.

*Торцовка* шлифа осуществляется с целью придания прямолинейности одной из его поверхностей и проводится опиловкой напильником или шлифовальным кругом.

*Шлифование* необходимо для удаления рисок, оставшихся от торцовки. Это достигается обработкой поверхности шлифа шлифовальной бумагой различной зернистости (разных номеров). Шлифовальная бумага отечественного производства имеет следующую нумерацию: 12, 10, 8, 6, 5, 4, 3 (номер обозначает примерную величину зерна в сотых долях миллиметра). Для предварительного чернового шлифования бумагу берут первых четырех номеров. Заканчивают шлифование бумагой номерами 5–3 с мелкими абразивными зёрнами. Шлифование проводят вручную или на специальном шлифовальном

станке. Вручную образец шлифуют так. Наждачную бумагу кладут на толстое стекло, затем образец (шлиф) прижимают к бумаге и, удерживая его тремя пальцами, перемещают по ней в одном направлении, но обязательно перпендикулярно рискам от предыдущей обработки. Этого правила необходимо придерживаться и при переходе с одного номера шлифовальной бумаги на другой, для удобства наблюдений за выведением рисок и ускорения процесса шлифования.

*Полирование* проводят на быстровращающемся диске с сукном, которое смачивается водой с взвешенными в ней частицами какого-либо абразива (окись хрома или алюминия). Частицы окиси металла тверды, поэтому во время полирования они производят резание металла образца. Так как эти частицы дисперсны, они способны снимать мельчайшие неровности, делая поверхность шлифа зеркального вида, без рисок даже при рассмотрении под микроскопом. Готовый полированный шлиф последовательно тщательно промывают водой, спиртом и сушат, прикладывая (промокая) фильтровальную бумагу.

Изучение полированной поверхности шлифа под микроскопом преследует цель определить качество его изготовления (отсутствие следов обработки) и установить характер расположения и размеры микроскопических трещин, неметаллических включений – графита, сульфидов, оксидов в металлической основе.

Выявление структуры металлической основы шлифа после полирования осуществляется *травлением* его реактивом. Для стали и чугуна чаще всего применяют 2–5 % раствор азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) в этиловом спирте. Полированную поверхность шлифа погружают в реактив на 3–15 секунд или протирают ватой, смоченной в реактиве, до появления ровного матового оттенка без наличия каких-либо пятен. Затем шлиф промывают спиртом или водой и просушивают фильтровальной бумагой.

Известно, что любой металл или сплав является поликристаллическим телом, то есть состоит из большого числа различно ориентированных в пространстве кристаллитов или зерен. На границах зерен (даже чистейших металлов) обычно располагают различные примеси. Эти примеси и структурные составляющие двухфазного строения (механические смеси) под действием реактива образуют микроскопические гальванические пары, что способствует более быстрому их растворению. Однофазные структуры (чистые металлы, твердые растворы, химические соединения) травятся медленнее. В результате не-

одинаковой степени травимости структурных составляющих на поверхности шлифа создается микрорельеф.

Изучение протравленной поверхности шлифа под оптическим микроскопом позволяет увидеть микроструктуру металлической основы. Она обычно состоит из светлых и темных участков. Это объясняется неодинаковой степенью отражения света от структурных составляющих.

### **Устройство металлографического микроскопа МИМ-7 и порядок пользования им**

Микроскопы, рассматривающие предметы в отраженном свете, называются металлографическими.

Основной частью металлографического микроскопа (рис. 30) является его оптическая система, состоящая из источника света, объектива, окуляра и т.д. Микроскоп может работать в нескольких режимах (в светлом поле, темном поле, поляризованном свете).

Микроскоп МИМ-7, оптическая схема которого приведена на рисунке 30, состоит из двух взаимосвязанных увеличивающих систем объектива 10 и окуляра 13. Свет от осветительной лампы 1 проходит через коллектор 2 и падает на зеркало 3. Отразившись от зеркала, свет проходит через светофильтр 4, апертурную диафрагму 5, линзу 6, фотозатвор 19, полевую диафрагму 18, пентапризму 7, линзу 8 и падает на зеркало 9, установленное под углом  $45^\circ$  к оси тубуса. Свет от зеркала 9, пройдя оптическую систему объектива 10, падает на поверхность микрошлифа 11, отраженные лучи от которого вновь проходят через объектив 10, зеркало 9, линзу 12 и падают на зеркало 14. От этого зеркала отраженные лучи попадают в систему окуляра 13.

Для фотографирования визуальный тубус с оптической системой 13 и зеркалом 14 следует выдвинуть на себя до отказа. Лучи при этом проходят через фотоокуляр 15 и, отразившись от зеркала 16, падают на фотопластинку, где и образуют изображение.

Для работы в темном поле вместо линзы 8 устанавливается линза 20, в центре которой имеется черный кружок. Краевые лучи падают на кольцевое зеркало 21 (зеркало 9 закрывается заслонкой 23), отразившись от которого они концентрируются параболическим зеркалом 22 объектива. От зеркала 22 лучи поступают на микрошлиф, но отражаются только от отдельных фаз.

Для наблюдения в поляризованном свете на оправу линзы 6 помещают поляризатор 24, а на оправу линзы 12 – анализатор 25.

Общее увеличение микроскопа определяется как произведение увеличения окуляра 13 на увеличение объектива 10.

Объектив дает полезное увеличение объекта, то есть такое, которое добавляет новые детали в рассматриваемом объекте. Окуляр лишь увеличивает изображение, даваемое объективом, для удобства его рассмотрения, не внося в изображение новых деталей.

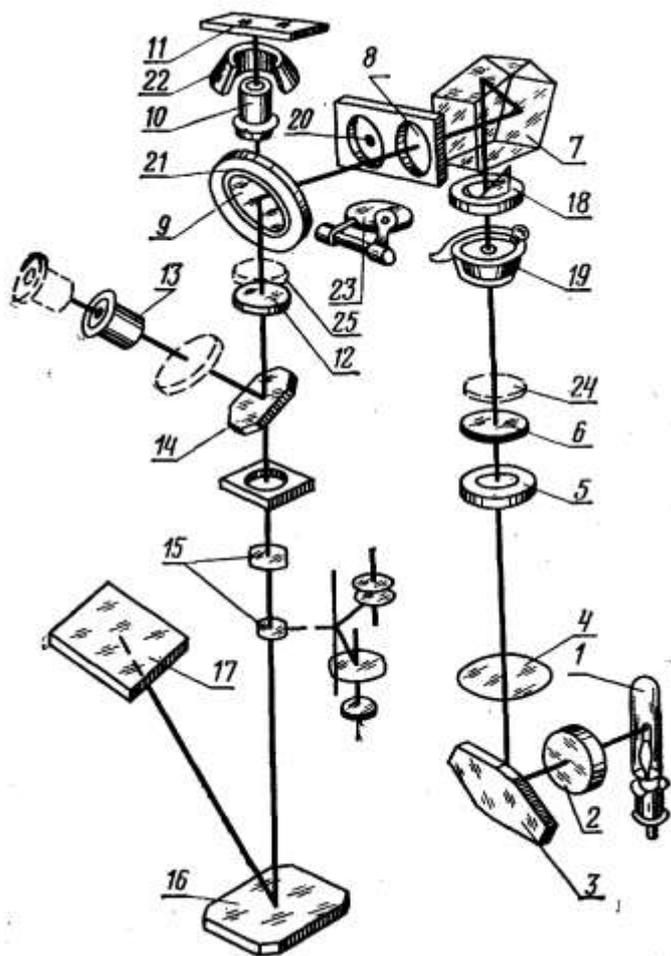


Рис. 30. Оптическая схема микроскопа МИМ-7:

- 1 – лампа; 2 – коллектор; 3 – зеркало; 4 – светофильтр; 5 – апертурная диафрагма; 6 – линза; 7 – пентапризм; 8 – линза; 9 – зеркало; 10 – объектив; 11 – микрошлиф; 12 – ахроматическая линза; 13 – окуляр; 14 – зеркало; 15 – фотоокуляр; 16 – зеркало; 17 – фотопластинка; 18 – полевая диафрагма; 19 – затвор; 20 – линза для работы в темном поле; 21 – кольцевое зеркало; 22 – параболическое зеркало; 23 – заслонка (включается при работе в темном поле); 24 – поляризатор; 25 – анализатор

## Устройство металлографического микроскопа ЛабоМет-1 и порядок пользования им

Микроскоп ЛабоМет-1 предназначен для изучения структуры металлов и других непрозрачных объектов в отраженном свете в светлом поле при прямом освещении.

Оптическая схема микроскопа представлена на рисунке 31.

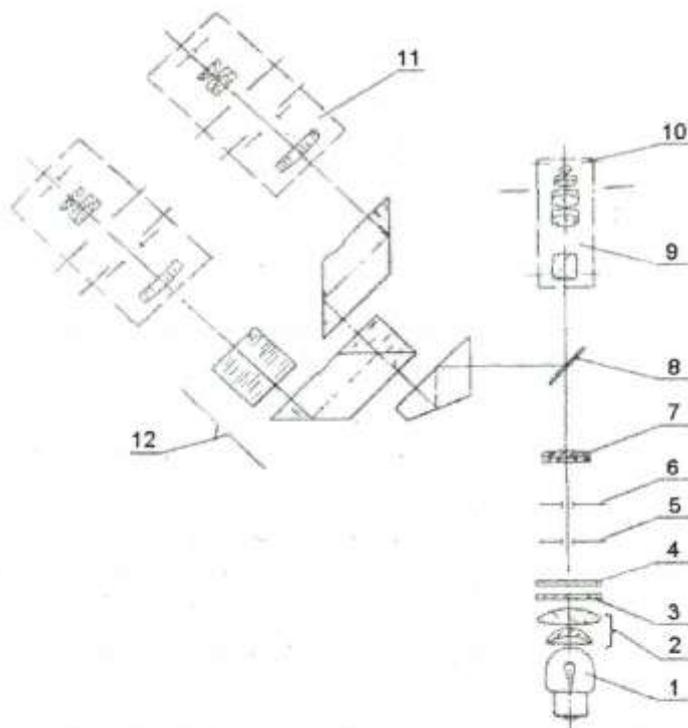


Рис. 31. Оптическая схема микроскопа ЛабоМет-1:

- 1 – источник света; 2 – коллектор; 3 – теплофильтр;
- 4 – светофильтр; 5 и 6 – диафрагмы; 7 – осветительная линза;
- 8 – пластина; 9 – объектив; 10 – объект; 11 – окуляры;
- 12 – призмы

При наблюдении в светлом поле лучи от источника света *1* проходят через коллектор *2*, теплофильтр *3*, светофильтр *4*, диафрагмы *5* и *6*, осветительную линзу *7*, плоскопараллельную полупрозрачную пластину *8* и направляются через объектив *9* на объект *10*.

Лучи, отраженные от поверхности объекта *10*, снова проходят через объектив *9*, который проецирует изображение объекта в фокальную плоскость окуляров *11*, отражаясь от светоделительной пластинки *8*. С помощью системы призм *12* изменяется направление оптической оси микроскопа и разделяется пучок лучей в насадке, тем самым обеспечивается возможность бинокулярного наблюдения объекта.

Общий вид микроскопа представлен на рисунке 32.

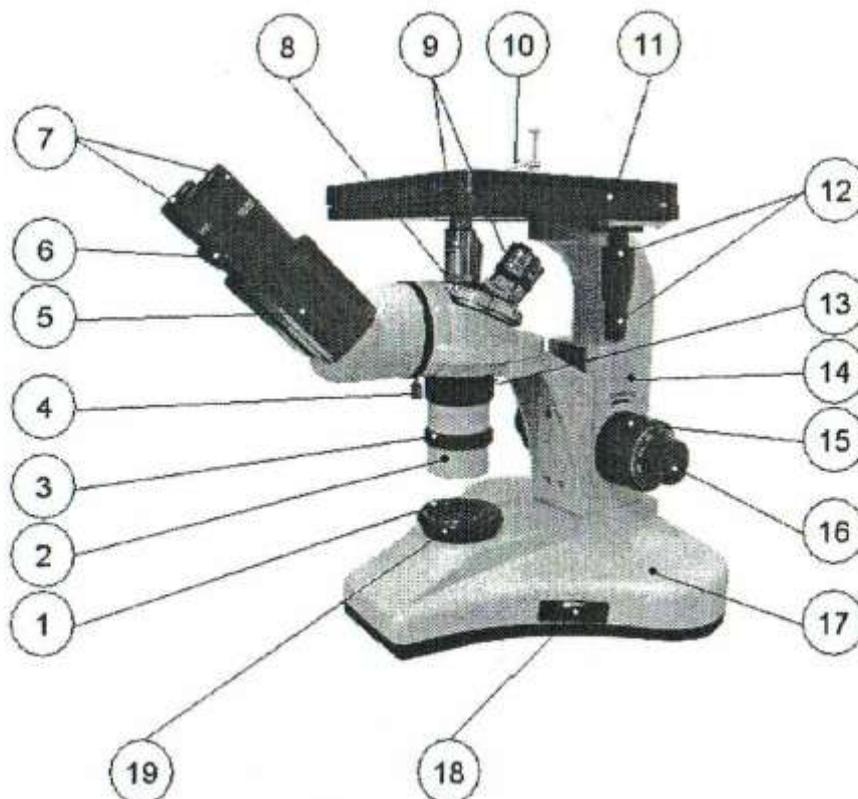


Рис. 32. Общий вид микроскопа ЛабоМет-1:

1 – паз для установки светофильтра; 2 – осветитель отраженного света;  
3 – рукоятка для регулировки диафрагмы; 4 – винт крепления насадки;  
5 – бинокулярная насадка; 6 – кольцо диоптрийного механизма перемещения окуляра; 7 – окуляры; 8 – револьверное устройство; 9 – объективы;  
10 – прижим; 11 – координатный предметный столик; 12 – рукоятки перемещения столика по осям «X» и «Y»; 13 – винт крепления декоративной заглушки; 14 – штатив; 15 – рукоятка грубой фокусировки; 16 – рукоятка микрометрической фокусировки; 17 – основание; 18 – рукоятка регулировки накала лампы; 19 – рукоятка регулировки диаметра апертурной диафрагмы (регулировка контраста изображения)

Фокусировка микроскопа на объект производится следующим образом:

1. Опустите до упора осветитель с системой визуализации.
2. Поместите на координатный предметный столик 11 объект.
3. Включите в ход лучей объектив увеличением 4 или 10 вращением диска револьверного устройства 8 до фиксированного положения. Рекомендуется начинать фокусировку с объективом малого или среднего увеличения, имеющего большое рабочее расстояние и большое поле зрения.

4. Вращением рукояток 15 грубой фокусировки осторожно поднимите осветитель с объективами 9 до упора (или почти до соприкосновения фронтальной линзы объектива с объектом).

5. Наблюдая правым глазом в окуляр, установленный в правый окулярный тубус бинокулярной насадки 5, и медленно опуская осветитель с системой визуализации вращением рукояток 15 и 16 грубой и тонкой фокусировок в направлении «к наблюдателю», сфокусируйте микроскоп на резкое изображение объекта.

6. Наблюдая левым глазом в окуляр, установленный в левый окулярный тубус бинокулярной насадки 5, не трогая рукояток фокусировок, получите резкое изображение объекта вращением кольца 6 диоптрийного механизма левого окулярного тубуса бинокулярной насадки.

7. Сдвиньте или раздвиньте окулярные тубусы насадки таким образом, чтобы изображения объекта в каждом окулярном тубусе при наблюдении двумя глазами воспринимались как одно.

### **Общее руководство к обращению с микроскопом**

Микроскоп является точным прибором, требующим самого аккуратного и осторожного обращения с ним. Прежде чем приступить к работе с микроскопом, нужно сначала ознакомиться с его устройством, то есть с его схемой с отдельными основными частями, их взаимным расположением и назначением.

1. Работая с микроскопом, нельзя допускать быстрых и резких движений (рывков) при наводке объектива на фокус, при установке и перемене оптики (объективов и окуляров). Если вращение макро- и микровинтов почему-либо затруднено, то нельзя применять силу и стремиться во что бы то ни стало повернуть винт, так как это может повлечь за собой смятие резьбы, то есть порчу микроскопа.

2. При наводке на фокус, во избежание ударов фронтальной линзой объектива о поверхность микрошлифа, следует сначала при помощи микровинта приблизить объектив как можно ближе к поверхности микрошлифа (смотря при этом на объектив и шлиф), а затем медленным подниманием объектива вверх с помощью того же микровинта произвести наводку на фокус.

3. Нельзя на предметный столик микроскопа ставить шлиф, не просушенный после травления, так как травящий реактив (раствор

кислоты и т.п.), стекая со шлифа на объектив, а также предметный столик, может повредить микроскоп.

4. Плоскость рассматриваемого шлифа должна быть установлена перпендикулярно оси микроскопа, иначе изображение исследуемой структуры будет не равномерно четким, а искаженным.

5. Ни в коем случае нельзя водить шлифом по столику и трогать его поверхность пальцами.

6. Без руководителя нельзя трогать ответственные части микроскопа, кроме макро- и микроскопических винтов и винтов предметного столика, так как микроскоп отрегулирован и смещение частей приводит к трудновыполняемой работе по новой регулировке.

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить теоретические сведения и последовательность приготовления микрошлифов.

2. Ознакомиться с оптической схемой микроскопов МИМ-7 и ЛабоМет-1.

3. Изучить микроструктуру шлифа под микроскопом до и после травления.

4. Зарисовать схему увеличенной микроструктуры, указав строение материала (металлическую основу, неметаллические включения, границы и размер зерен).

5. Определить общее увеличение микроскопа.

### **Содержание отчета**

В отчет включить ответы на контрольные вопросы, оптическую схему микроскопа, рисунки схем микроструктур исследуемых образцов (по заданию преподавателя).

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое микроанализ металлов?

2. Какую информацию можно получить при проведении микроанализа металлов и сплавов?

3. Какие основные требования предъявляются к операциям «вырезание», «торцовка» при приготовлении микрошлифов?

4. Для чего проводится травление микрошлифов?

5. Каков порядок изготовления микрошлифа?
6. Назначение объектива и окуляра в микроскопе.
7. Какое максимальное увеличение можно получить на микроскопе?
8. Как определить общее увеличение микроскопа?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ Pb–Sb ПО КРИВЫМ ОХЛАЖДЕНИЯ

#### Цели работы

1. Освоить методику построения кривых охлаждения металлов и сплавов и определения на них критических точек.
2. Пользуясь методом термического анализа, построить диаграмму состояния сплавов *свинец–сурьма*.
3. Научиться разбираться во всех структурных изменениях по диаграмме состояния, пользуясь правилом фаз и правилом отрезков

**Приборы, материалы, инструменты:** электропечь, тигли, термомпары, милливольтметры, навески чистых металлов, навески сплавов различных концентраций, микрошлифы металлов и сплавов.

#### Теоретические сведения

Диаграмма состояния является графическим изображением изменения фазового и структурного состояния сплавов данной системы в зависимости от температуры и состава сплавов.

К основным понятиям в теории сплавов относятся *система, компонент, фаза*.

*Система* – это группа веществ, являющихся объектом наблюдения и изучения. В металловедении системами являются металлы и сплавы.

*Компонентами* называются вещества, образующие систему. В металлических сплавах компонентами могут быть элементы и химические соединения.

*Фазой* называется однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностью раздела, при переходе через ко-

торую химический состав или структура изменяется скачкообразно. Фазами могут быть химические соединения, жидкости и твердые растворы.

Обычно для построения диаграммы состояния пользуются результатами *термического анализа*, то есть строят кривые охлаждения и по остановкам и перегибам на кривых охлаждения, вызванным тепловым эффектом превращения, определяют температуру превращения. Температуры, при которых происходят фазовые превращения, а также соответствующие им точки на кривой охлаждения металла или сплава, называются критическими.

### Построение кривых охлаждения

Определение температур кристаллизации металлов и сплавов обычно проводят с помощью термоэлектрического пирометра, состоящего из термопары и милливольтметра (гальванометра). На рисунке 33 показана схема установки для определения критических точек на кривых охлаждения металлов и сплавов.

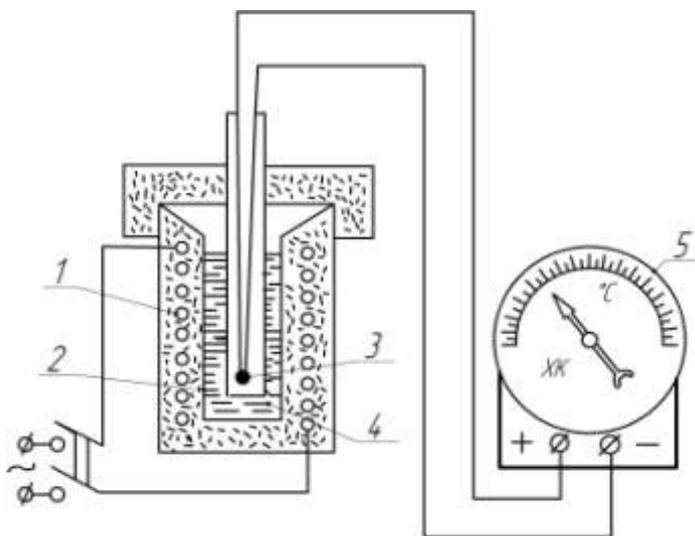


Рис. 33. Схема установки для определения критических точек металлов и сплавов:

- 1 – электропечь; 2 – тигель; 3 – расплавленный металл или сплав;  
4 – термопара; 5 – милливольтметр (гальванометр)

В данной работе изучается построение диаграммы состояния сплавов *свинец–сурьма*, которые в жидком состоянии образуют раствор с неограниченной растворимостью, а в твердом состоянии – мелкодисперсную физико-химическую смесь этих элементов (эвтектику).

Эвтектикой называется физико-химическая смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости.

Для построения диаграммы состояния используют чистые металлы свинец и сурьму и ряд их сплавов, например доэвтектический (6 % Sb и 94 % Pb); эвтектический (13 % Sb и 87 % Pb) и заэвтектический (55 % Sb и 45 % Pb). Затем для каждого сплава и чистых металлов строят кривые охлаждения, определяют на них положение критических точек и соответствующие им температуры.

На рисунке 34 показаны кривые охлаждения сплавов доэвтектического (II), эвтектического (III), заэвтектического (IV). Кривые охлаждения построены в координатах температура – время.

На рисунке 35 показаны схемы структуры доэвтектического, эвтектического и заэвтектического сплавов при комнатной температуре.

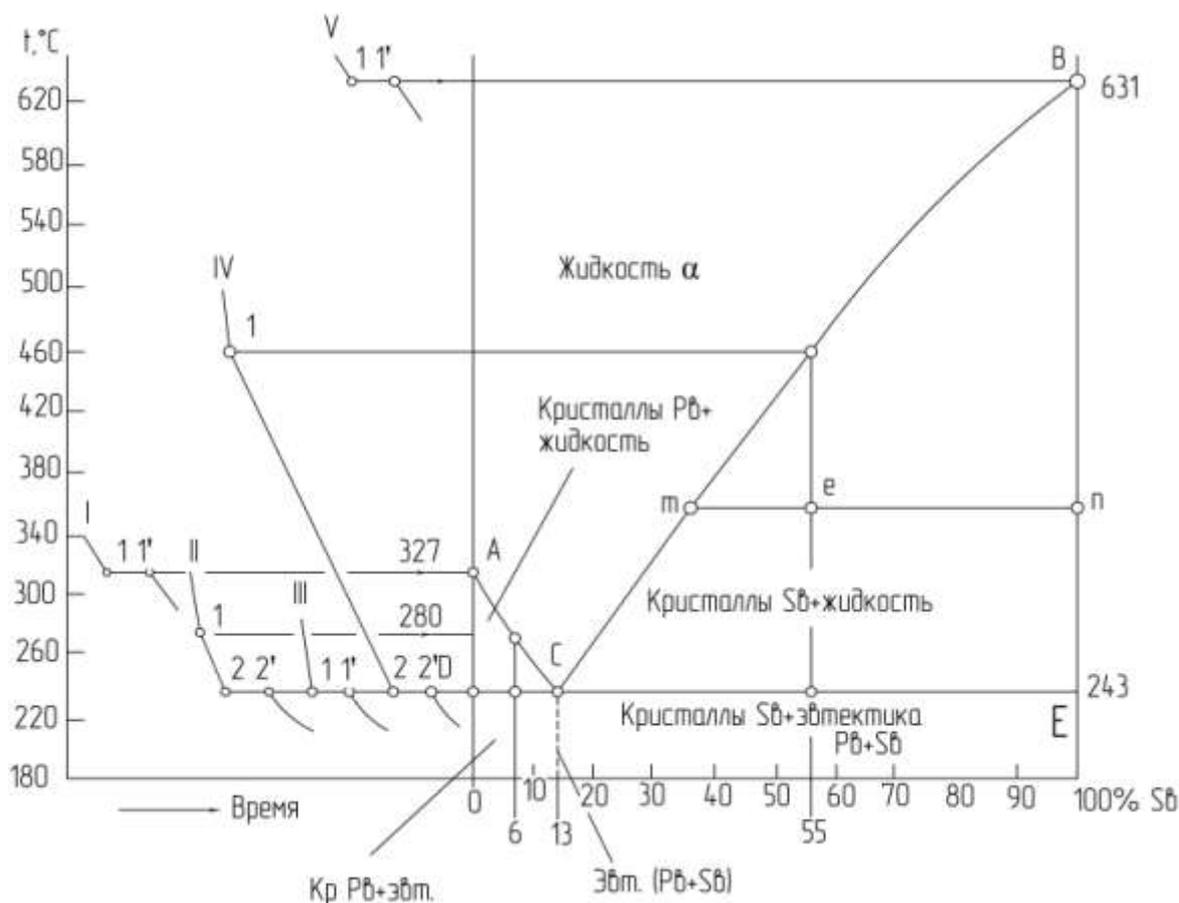


Рис. 34. Построение диаграммы состояния свинец–сурьма

Диаграмма состояния (рис. 34) строится в координатах концентрация–температура, то есть по оси абсцисс откладывается процентное содержание сурьмы в исследуемых сплавах – 6, 13 и 55 %, а на ординаты, соответствующие этим сплавам, с их кривых ох-

лаждения сносят температуры критических точек. Полученные точки соединяют. Линия АСВ соответствует началу затвердения сплава и называется *линией ликвидус*. Линия ДСЕ соответствует концу затвердения сплава и называется *линией солидус*. Левее точки С сплавы называются доэвтектическими, правее точки С – заэвтектическими.

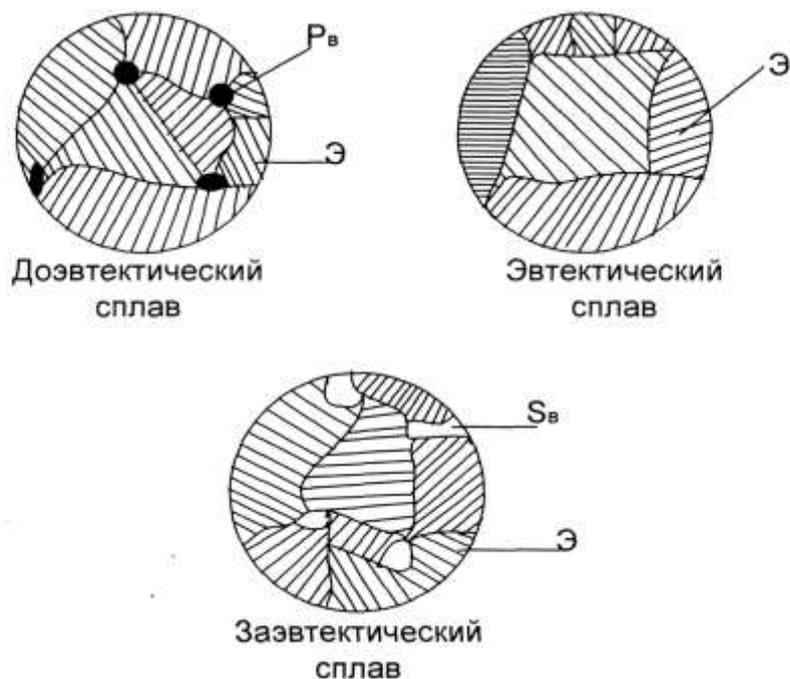


Рис. 35. Схемы зарисовки структуры сплавов

### Порядок выполнения работы

1. Взять тигли с чистым свинцом, сурьмой и тремя сплавами: доэвтектическим (6 % Sb), эвтектическим (13 % Sb) и заэвтектическим (55 % Sb), нагреть на 20–30 °С выше температуры плавления металла (сплава). Температуру нагрева замерить термоэлектрическим пирометром.

2. Выключить ток и охладить тигли с расплавленными металлами и сплавами, фиксируя показания гальванометра через 10–15 секунд. После затвердевания металла (сплава) и получения температурной площадки на кривой охлаждения (линия постоянной температуры) снять еще 3–5 показаний гальванометра (через 10–15 с каждое).

3. По результатам опытов построить на миллиметровой бумаге кривые охлаждения и для каждой кривой указать процентный состав сплава.

4. По кривым охлаждения построить диаграмму состояния сплавов *свинец–сурьма*. Критические точки кривых охлаждения, перенесенные для соответствующих концентраций на диаграмму состояния, обвести кружками. В случае рассева опытных точек допустимо проведение средних линий.

### Содержание отчета

Отчет должен содержать построенные по экспериментальным данным кривые охлаждения заэвтектического, эвтектического и доэвтектического сплавов.

Используя справочные данные по температуре кристаллизации чистых металлов (свинец и сурьма) и полученные экспериментальные данные, необходимо построить диаграмму состояния сплава системы Pb–Sb.

На примере конкретного сплава (по заданию преподавателя) показать применение правила фаз и правила коноды.

В отчете поместить ответы на контрольные вопросы, схему экспериментальной установки для термического анализа сплавов, зарисовать структуру вышеуказанных сплавов.

Экспериментальные данные занести в таблицу 7.

Таблица 7

Данные проведения термического анализа

Доэвтектический сплав				Эвтектический сплав				Заэвтектический сплав			
№ п/п	Время, с	Показания милливольтметра, мВ	Температура, °С	№ п/п	Время, с	Показания милливольтметра, мВ	Температура, °С	№ п/п	Время, с	Показания милливольтметра, мВ	Температура, °С
1				1				1			
2				2				2			
3				3				3			
...				...				...			

## Контрольные вопросы

1. Что называется компонентом?
2. Что называется фазой?
3. Что такое эвтектика?
4. Что такое ликвидус?
5. Что такое солидус?
6. Сущность термического метода анализа сплавов.
7. Как формулируется правило фаз?
8. Как определяется состав фаз?
9. Как формулируется правило коноды?
10. Назовите структурный и фазовый состав до- и заэвтектических сплавов.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ I

**1. Группа металлов, к которой относятся железо и его сплавы:**

- А) диамагнетики;
- В) металлы с высокой удельной прочностью;
- С) тугоплавкие;
- Д) черные.

**2. Металл (сплав), который относят к черным:**

- А) баббит;
- В) дуралюмин;
- С) коррозионностойкая сталь;
- Д) латунь.

**3. Группа металлов, к которой относится вольфрам:**

- А) актиноиды;
- В) благородные;
- С) редкоземельные;
- Д) тугоплавкие.

**4. Группа, в которой содержатся только тугоплавкие металлы:**

- А) вольфрам, железо;
- В) молибден, цирконий;
- С) никель, алюминий;
- Д) титан, актиний.

**5. Вещество, которое не является металлом:**

- A) пластмасса;
- B) закаленная сталь;
- C) бронза;
- D) бериллий.

**6. Метод испытаний, который является структурным:**

- A) испытание на разрыв;
- B) измерение твердости;
- C) микроанализ;
- D) испытание на свариваемость.

**7. Элементарная кристаллическая решетка:**

- A) тип кристаллической решетки, характерный для данного химического элемента;
- B) минимальный объем кристаллической решетки, при трансляции которого по координатным осям можно воспроизвести всю решетку;
- C) кристаллическая ячейка, содержащая один атом;
- D) бездефектная (за исключением точечных дефектов) область кристаллической решетки.

**8. Свойство, состоящее в способности вещества существовать в различных кристаллических модификациях:**

- A) полиморфизм;
- B) изомерия;
- C) анизотропия;
- D) текстура.

**9. Вещества, обладающие анизотропией:**

- A) парамагнетики;
- B) монокристаллы;
- C) вещества, обладающие полиморфизмом;
- D) переохлажденные жидкости.

**10. Метод испытаний, который является структурным:**

- A) испытание на разрыв;
- B) измерение твердости;
- C) макроанализ;
- D) испытание на свариваемость.

**11. Вид поверхности разрушения при усталостном изломе:**

- А) поверхность имеет волокнистое строение;
- В) поверхность гладкая;
- С) поверхность имеет кристаллическое строение;
- Д) на поверхности имеются две зоны – с волокнистым и с кристаллическим строением.

**12. Поверхность излома, характерная для вязкого разрушения:**

- А) волокнистая, матовая;
- В) блестящая, кристаллическая;
- С) мелкокристаллическая;
- Д) крупнокристаллическая.

**13. Структура металла, обеспечивающая получение высоких механических свойств:**

- А) дендритная;
- В) мелкокристаллическая;
- С) крупнокристаллическая;
- Д) столбчатая.

**14. Микроанализ:**

- А) визуальное исследование;
- В) исследование при помощи микроскопов;
- С) испытания на твердость;
- Д) исследование при помощи лупы.

**15. Микрошлиф:**

- А) образец металла;
- В) поверхность образца, подготовленная для исследования микроструктуры;
- С) поверхность образца, подготовленная для исследования макроструктуры;
- Д) поверхность образца, подготовленная для измерения твердости.

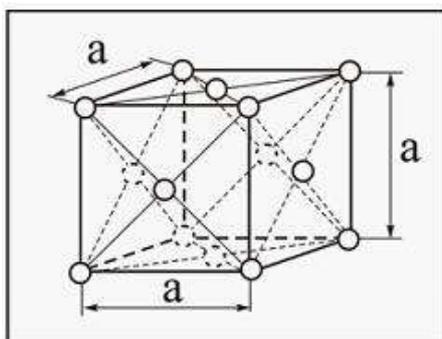
**16. Прибор, применяемый для изучения структуры металлов и сплавов:**

- А) микроскоп;
- В) спектроскоп;
- С) структуроскоп;
- Д) телескоп.

17. **Отличительная особенность кристаллического состояния вещества:**

- A) высокая электропроводность;
- B) высокая ковкость;
- C) наличие только ближнего порядка в расположении частиц;
- D) наличие дальнего порядка в расположении частиц.

18. **Кристаллическая решетка, элементарная ячейка которой представлена на рисунке:**



- A) гранецентрированная кубическая;
- B) примитивная кубическая;
- C) объемно-центрированная кубическая;
- D) тетрагональная.

19. **Дефект кристаллической решетки, представляющий собой край лишней полуплоскости:**

- A) двойник;
- B) граница зерна;
- C) дислокация;
- D) вакансия.

20. **Линейный дефект кристаллической решетки:**

- A) дислокация;
- B) трещина;
- C) граница зерна;
- D) вакансия.

21. **Свойство, заключающееся в зависимости свойств от направления в кристалле:**

- A) анизотропия;
- B) аллотропия;

- С) полиморфизм;
- Д) изомерия.

**22. Характеристика решетки, определяющая число атомов, находящихся на наименьшем равном расстоянии от данного атома:**

- А) координационное число;
- В) базис;
- С) параметр решетки;
- Д) коэффициент компактности.

**23. Установите соответствие вида дефекта кристаллической решетки его названию:**

*Вид дефекта:*

- 1) линейный дефект;
- 2) точечный дефект;

*Название дефекта:*

- А) вакансия;
- В) дислокация;
- С) примесный атом;

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**24. Установите соответствие названия металлов их месту в классификации:**

*Название металла:*

- 1) железо;
- 2) алюминий;

*Классификация:*

- А) благородный;
- В) черный;
- С) цветной;

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**25. Дополните:**

Процесс перехода металла из жидкого состояния в твердое с образованием пространственной кристаллической решетки называется

\_\_\_\_\_.

**26. Обозначение на чертеже HRC 60 означает:**

- А) твердость по Бринеллю;
- В) твердость по Роквеллу, измеренная алмазным конусом;
- С) ударная вязкость;
- Д) относительное сужение материала при растяжении.

**27. Индентор при измерении твердости по методу Роквелла (шкала С):**

- А) алмазная пирамида;

- В) стальной конус;
- С) алмазный конус;
- Д) стальной шар.

**28. Размерность твердости по Роквеллу:**

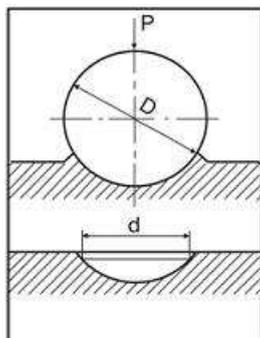
- А)  $\text{кг/мм}^2$ ;
- В) мм;
- С)  $\text{кг/мм}$ ;
- Д) твердость по Роквеллу – величина безразмерная.

**29. Обозначение твердости по Виккерсу:**

- А) НВ;
- В) HRC;
- С) HV;
- Д) HRA.

**30. Метод измерения твердости, схема которого представлена на рисунке:**

- А) Бринелля;
- В) Виккерса;
- С) Роквелла;
- Д) Шора.



**31. Единицы измерения временного сопротивления (предела прочности):**

- А) %;
- В) ампер;
- С) МПа;
- Д)  $\text{МДж/м}^2$ .

**32. Обозначение ударной вязкости:**

- А) HV;

- B) HB;
- C) HRC;
- D) KCU.

**33. Единицы измерения твердости по Бринеллю:**

- A) мм;
- B) мм<sup>2</sup>;
- C) кг/мм;
- D) МПа.

**34. Свойство материала, которое характеризует его сопротивление упругому и пластическому деформированию при вдавливании в него другого, более твердого тела:**

- A) выносливость;
- B) прочность;
- C) упругость;
- D) твердость.

**35. Механическое свойство, определяющее способность металла сопротивляться деформации и разрушению при статическом нагружении:**

- A) прочность;
- B) твердость;
- C) ударная вязкость;
- D) живучесть.

**36. Свойство, состоящее в способности вещества существовать в различных кристаллических модификациях:**

- A) аллотропия;
- B) изомерия;
- C) анизотропия;
- D) текстура.

**37. Неоднородность свойств в различных направлениях заготовки:**

- A) анизотропия;
- B) ликвация;
- C) строчечность;
- D) полосчатость.

**38. Причина, по которой не рекомендуется проводить на приборе Бринелля исследования образцов с твердостью выше 450 кг/мм<sup>2</sup>:**

- А) выйдет из строя пресс;
- В) мощность прессы окажется недостаточной для проведения испытания;
- С) из-за деформации шарика результаты испытания могут оказаться неточными.

**39. Шкала, которая используется при замера твердости по Роквеллу металлов и сплавов после химико-термической обработки:**

- А) А;
- В) В;
- С) С.

**40. Шкала, которая используется при замера твердости по Роквеллу незакаленных сталей:**

- А) А;
- В) В;
- С) С.

**41. Шкала, которая используется при замера твердости по Роквеллу цветных металлов и сплавов:**

- А) А;
- В) В;
- С) С.

**42. Обозначение на чертеже HRB 90:**

- А) твердость по Бринеллю;
- В) твердость по Роквеллу, измеренная стальным шариком;
- С) ударная вязкость;
- Д) относительное сужение материала при растяжении.

**43. Ударная вязкость:**

- А) способность материала противостоять действию знакопеременных нагрузок;
- В) способность материала сопротивляться внедрению другого твердого тела;
- С) способность материала сопротивляться разрушению под действием динамической нагрузки;

Д) способность материала восстанавливать первоначальную форму и прежние размеры после прекращения действия сил, вызвавших изменение формы и размеров.

**44. Устройство, на котором определяют предел прочности (временное сопротивление):**

- А) твердомер;
- В) маятниковый копер;
- С) разрывная машина;
- Д) пресс.

**45. Установите соответствие группы свойств названию свойства:**

*Группа свойств:*

- 1) механическое свойство;
- 2) технологическое свойство;

*Название свойства:*

- А) экономичность;
- В) прочность;
- С) свариваемость;

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**46. Установите соответствие метода измерения твердости обозначению твердости:**

*Метод измерения твердости:*

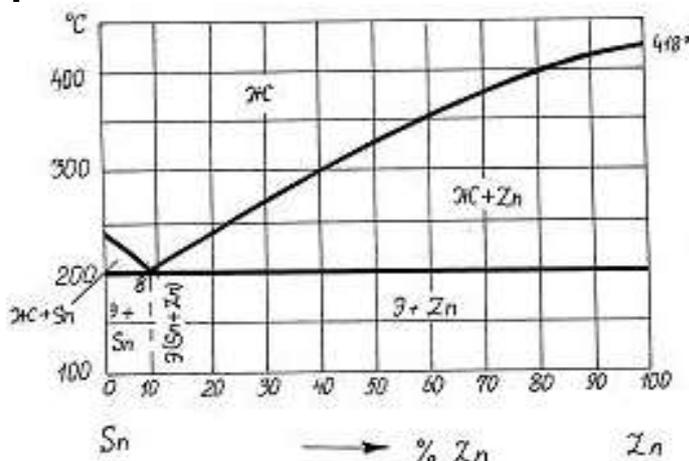
- 1) по Бринеллю;
- 2) по Роквеллу;

*Обозначение:*

- А) HB;
- В) HRC;
- С) HV;

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**47. Фазовый состав сплава, содержащего 60 % Zn и 40 % Sn, при температуре 300 °С:**



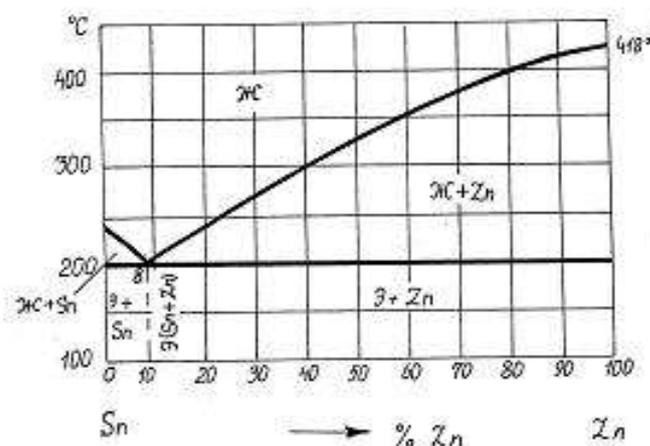
А) эвтектическая смесь смесь кристаллов Zn и Sn;

- В) жидкая фаза и кристаллы Zn;
- С) жидкая фаза;
- Д) жидкая фаза и кристаллы Sn.

48. Уравнение правила фаз (при постоянном атмосферном давлении) имеет вид:

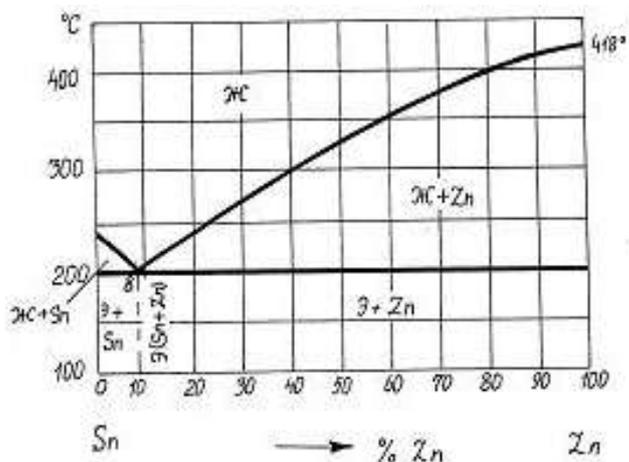
- А)  $C = K + F - 1$ ;
- В)  $C = F + K + 1$ ;
- С)  $C = F - K + 1$ ;
- Д)  $C = K - F + 1$ .

49. Фазовый состав сплава, содержащего 60 % Zn и 40 %Sn, при температуре 400 °С:



- А) эвтектическая смесь смесь кристаллов Zn и Sn;
- В) жидкая фаза и кристаллы Zn;
- С) жидкая фаза;
- Д) жидкая фаза и кристаллы Sn.

50. Фазовый состав сплава, содержащего 60 % Zn и 40 %Sn, при температуре 150 °С:



- A) эвтектика и кристаллы Zn;
- B) жидкая фаза и кристаллы Zn;
- C) жидкая фаза;
- D) жидкая фаза и кристаллы Sn.

**51. Линия начала кристаллизации на диаграммах состояния:**

- A) ликвидус;
- B) солидус;
- C) эвтектическая линия;
- D) перитектическая линия.

**52. Линия конца кристаллизации на диаграммах состояния:**

- A) ликвидус;
- B) солидус;
- C) эвтектическая линия;
- D) перитектическая линия.

**53. Эвтектика:**

- A) вещество, образующееся при некотором соотношении компонентов и имеющее кристаллическую решетку, отличную от решеток, составляющих эвтектику веществ;
- B) ограниченный твердый раствор компонентов друг в друге;
- C) неограниченный твердый раствор компонентов друг в друге;
- D) смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости.

**54. Температурные условия, при которых кристаллизуются чистые металлы:**

- A) в зависимости от природы металла температура может снижаться в одних случаях, повышаться в других и оставаться постоянной в третьих;
- B) снижающаяся температура;
- C) растущая температура;
- D) постоянная температура.

**55. Температурные условия, при которых кристаллизуются эвтектики в двухкомпонентных сплавах:**

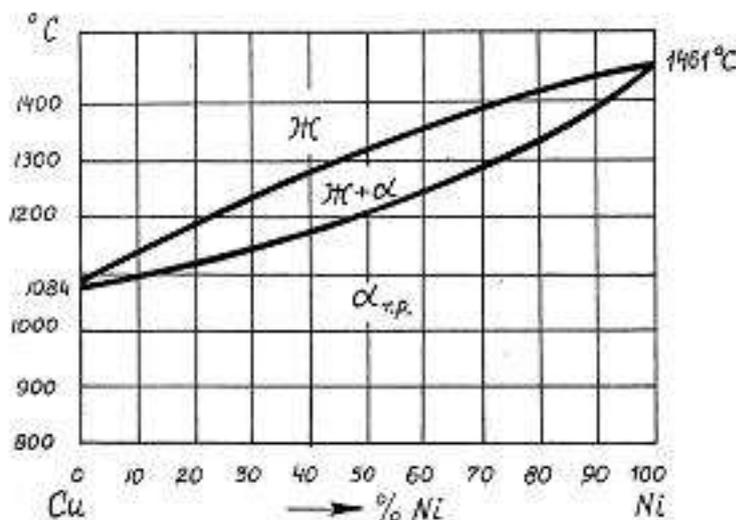
- A) снижающаяся температура;

- В) в зависимости от вида сплава температура может расти в одних случаях, снижаться в других и оставаться постоянной в третьих;  
 С) постоянная температура;  
 В) растущая температура.

**56. Отличие эвтектоидного превращения от эвтектического заключается в том, что:**

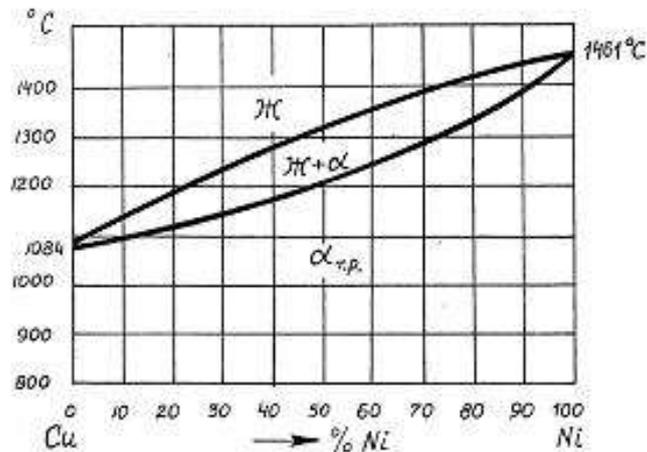
- А) при эвтектоидном превращении возникают промежуточные фазы, при эвтектическом – физико-химические смеси;  
 В) принципиальных отличий нет, это однотипные превращения;  
 С) при эвтектоидном превращении распадается твердый раствор, при эвтектическом – жидкий;  
 Д) при эвтектоидном превращении из твердых растворов выделяются вторичные кристаллы, при эвтектическом – из жидкости – первичные.

**57. Фазовый состав сплава, содержащего 20 % Ni и 80 % Cu, при температуре 1300 °С:**



- А) твердый раствор никеля в меди;  
 В) жидкая фаза (жидкий раствор никеля в меди);  
 С) жидкая фаза и кристаллы твердого раствора никеля в меди;  
 Д) механическая смесь кристаллов никеля и меди.

**58. Фазовый состав сплава, содержащего 30 % Ni и 70 % Cu, при температуре 1200 °С:**



- А) твердый раствор никеля в меди;
- В) жидкий раствор никеля в меди;
- С) жидкая фаза и кристаллы твердого раствора никеля в меди;
- Д) механическая смесь кристаллов никеля и меди.

59. Правило, по которому определяют состав и количество фаз в двухфазных областях диаграмм равновесия:

- А) Гиббса;
- В) отрезков;
- С) Курнакова;
- Д) фаз.

60. Координаты, в которых строят диаграммы состояния двухкомпонентных систем:

- А) скорость охлаждения-состав;
- В) температура-время;
- С) время-состав;
- Д) температура-состав.

61. Дополните:

Линия начала кристаллизации на диаграммах состояния называется линией \_\_\_\_\_.

62. Дополните:

Линия конца кристаллизации на диаграммах состояния называется линией \_\_\_\_\_.

## Глава II. СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

### ТЕМА 4. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО–УГЛЕРОД

Железоуглеродистые сплавы – стали и чугуны – важнейшие металлические сплавы современной техники. Диаграмма состояния *железо-углерод* дает основное представление о строении этих сплавов.

Важнейшие работы по построению этой диаграммы относятся к последней четверти XIX века. Большой вклад в теорию вопроса внесли русские ученые Д.К. Чернов, А.А. Байков, французские исследователи Ф. Осмонд, Ле-Шателье, голландцы Г. Розебум, Робертс-Аустен и др.

Диаграмма *железо-углерод*, как ясно из названия, должна распространяться от железа до углерода.

Железо образует с углеродом химическое соединение – *цементит* –  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

Одно из положений теории сплавов гласит, что каждое устойчивое химическое соединение можно рассматривать как компонент, и диаграмму можно рассматривать по частям.

Будем рассматривать только часть системы от железа до химического соединения  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Это не только упрощает задачу знакомства с системой, но оправдано еще и тем, что на практике применяют металлические сплавы с содержанием углерода не более 5 % (цементит содержит углерода 6,67 %).

Следовательно, рассматривая диаграмму *железо-углерод* на участке от железа до цементита, компонентами системы можно считать железо и цементит.

*Железо.* Чистое железо – серебристо-светлый металл, имеющий температуру плавления  $1539\text{ }^\circ\text{C}$  и плотность  $7,86 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ . Железо обладает невысокой твердостью и прочностью и хорошей пластичностью:  $\text{HB}800\text{ МН/м}^2$ ;  $\sigma_s \approx 250\text{ МПа}$ ;  $\delta = 50\text{ \%}$ . Железо имеет несколько аллотропических форм, которые показаны на кривой охлаждения (рис. 18). В интервалах температур  $1539\text{--}1392\text{ }^\circ\text{C}$  и ниже  $911\text{ }^\circ\text{C}$  существует  $\alpha$ -железо с объемно-центрированной кубической решеткой. В интервале температур от  $1392$  до  $911\text{ }^\circ\text{C}$  существует  $\gamma$ -железо с гранцентрированной кубической решеткой.

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами – растворы замещения; с углеродом, азотом и водородом – растворы внедрения.

Растворимость углерода в железе существенно зависит от того, в какой кристаллической форме существует железо. Растворимость углерода в  $\alpha$ -железе ничтожно мала (менее 0,02 % в низкотемпературном феррите и около 0,1 % в высокотемпературном феррите) и значительно больше (до 2 %) в  $\gamma$ -железе.

Твердый раствор углерода и других элементов в  $\alpha$ -железе называется *ферритом*, а в  $\gamma$ -железе – *аустенитом*.

Атом углерода располагается в решетке феррита в центре грани куба, где помещается сфера радиусом 0,29 атомного радиуса железа, а также в вакансиях, на дислокациях и т.д. Под микроскопом феррит выявляется в виде однородных полиэдрических зерен. Феррит (при 0,006 % C) имеет примерно следующие механические свойства:  $HV$  800–900  $Mn/m^2$ ;  $\sigma_s = 250$  МПа;  $\delta = 50$  %;  $\varphi = 80$  %.

Атом углерода в решетке  $\gamma$ -железа располагается в центре элементарной ячейки, в которой может поместиться сфера радиусом 0,41 атомного радиуса железа, и в дефектных областях кристалла. Аустенит обладает высокой пластичностью, низкими пределами текучести и прочности. Микроструктура аустенита – полиэдрические зерна.

*Цементит.* Цементит – это химическое соединение железа с углеродом – карбид железа  $Fe_3C$ . В цементите содержится 6,67 % углерода. Имеет сложную ромбическую решетку с плотной упаковкой атомов. Температура плавления цементита точно не определена в связи с возможностью его распада и принимается примерно равной 1250 °С (по некоторым данным – 1500 °С). До температуры 210 °С цементит ферромагнитен. Он обладает высокой твердостью ( $HV$  1000) и очень малой пластичностью.

Цементит – соединение неустойчивое и при определенных условиях распадается с образованием свободного углерода в виде графита. Этот процесс имеет важное практическое значение для высокоуглеродистых сплавов – чугунов.

### Диаграмма состояния

Диаграмма состояния системы сплавов *железо-углерод* в интервале концентраций от железа до цементита представлена на рисунке 36. Ось абсцисс (концентрационная) на этом рисунке двойная: содержание углерода и содержание цементита.

Линия ABCD является ликвидусом системы, линия ANJESF – солидусом.

Так как железо, кроме того что образует с углеродом химическое соединение  $Fe_3C$ , имеет две аллотропические формы  $\alpha$  и  $\gamma$ , то в системе существуют следующие фазы:

*жидкость* (L) – (жидкий раствор углерода в железе), существующая выше линии ликвидус;

*цементит*  $Fe_3C$  (Ц) – линия DFKL;

*феррит* (Ф, иногда  $\alpha$ ) – твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе. Область феррита в системе *железо–углерод* расположена левее линий GPQ и ANN;

*аустенит* (А, иногда  $\gamma$ ) – твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе. Область аустенита на диаграмме – NJESG.

Три горизонтальные линии на диаграмме (HJB, ECF, PSK) указывают на протекание трех нонвариантных реакций.

При 1499 °С (линия HJB) протекает перитектическая реакция



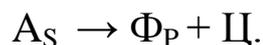
В результате перитектической реакции образуется аустенит. Реакция эта наблюдается только у сплавов, содержащих углерода от 0,1 до 0,5 %.

При 1147 °С (горизонталь ECF) протекает эвтектическая реакция



В результате этой реакции образуется эвтектическая смесь. Эвтектическая смесь аустенита и цементита называется *ледебуритом*. Реакция эта происходит у всех сплавов системы, содержащих углерода более 2,14 %.

При 727 °С (горизонталь PSK) протекает эвтектоидная реакция



Продуктом превращения является эвтектоидная смесь. Эвтектоидная смесь феррита и цементита называется *перлитом*.

У всех сплавов, содержащих свыше 0,02 % С, то есть практически у всех промышленных железоуглеродистых сплавов, происходит перлитное (эвтектоидное) превращение.

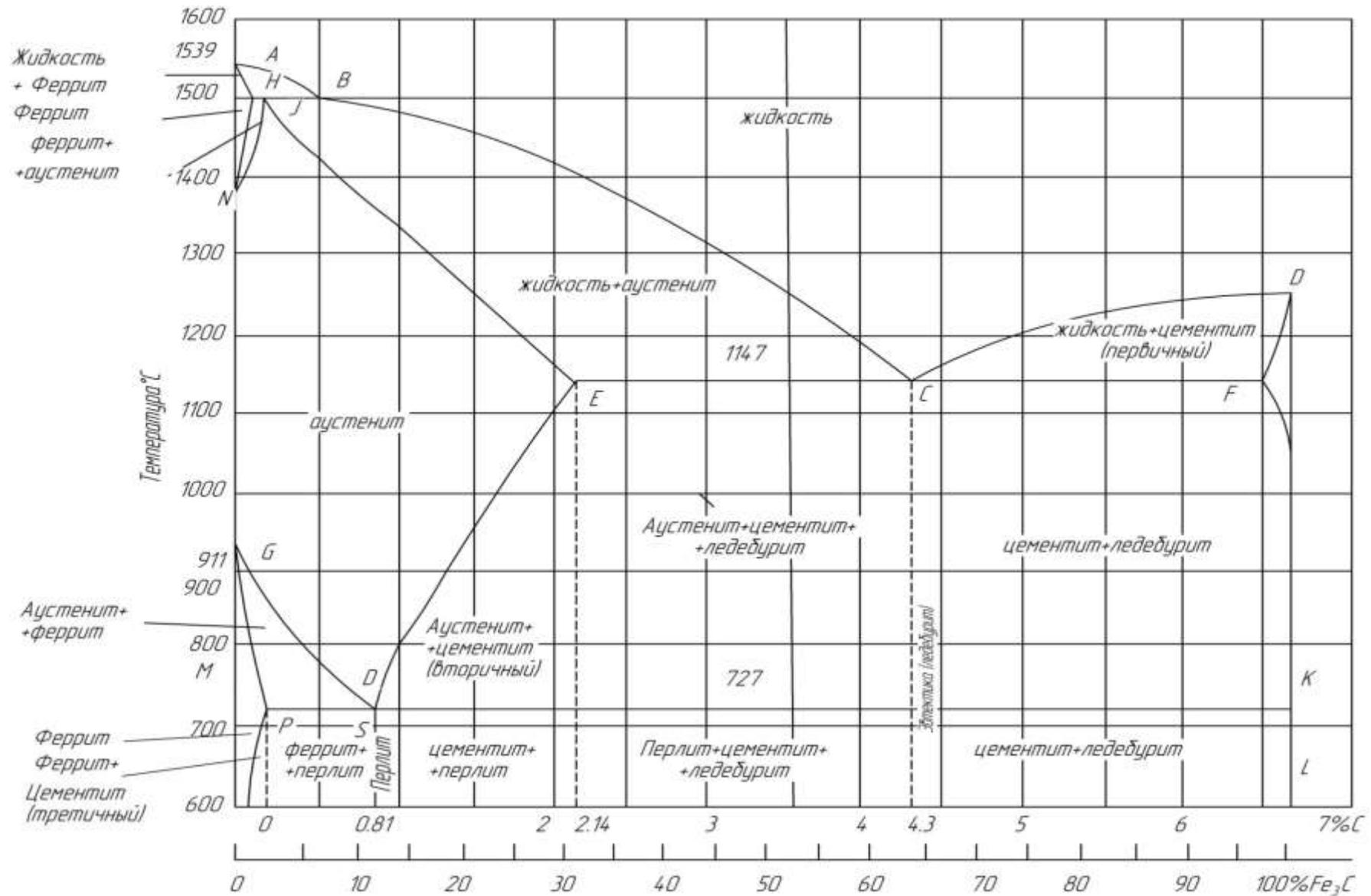


Рис. 36. Диаграмма состояния сплавов системы железо-углерод

Различают три группы сталей: *эвтектоидные*, содержащие около 0,8 % С, структура которых состоит только из перлита); *доэвтектоидные*, содержащие меньше 0,8 % С, структура которых состоит из феррита и перлита) и *заэвтектоидные*, содержащие от 0,8 до 2,14 % С, структура которых состоит из перлита и цементита.

Области существования различных структур показаны на диаграмме состояния Fe-C. Несмотря на видимую сложность структурных форм, особенно у высокоуглеродистых сплавов, следует указать, что все области диаграммы являются однофазными или двухфазными.

В частности, в области SEFK имеется две фазы – аустенит и цементит, а в области PKLQ – феррит и цементит, образующие различные структурные составляющие, как указано на диаграмме.

При изучении диаграммы *железо-углерод* принято обозначать критические температуры (точки) буквой А. Нижняя критическая точка, обозначаемая  $A_1$ , лежит на линии PSK и соответствует равновесному превращению аустенит  $\leftrightarrow$  перлит. Верхняя критическая точка  $A_3$  лежит на линии GSE и соответствует началу выпадения или концу растворения феррита в доэвтектоидных сталях или вторичного цементита в заэвтектоидных сталях.

Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, рядом с буквой А ставят букву *s* в первом случае и *r* – во втором.

Следовательно, критическая точка превращения аустенита в перлит обозначается  $Ar_1$ , а перлита в аустенит –  $Ac_1$ ; начало выделения феррита из аустенита обозначается  $Ar_3$ ; конец растворения феррита в аустените –  $Ac_3$ . Начало выделения вторичного цементита из аустенита обозначается также  $Ar_3$ , а конец растворения вторичного цементита в аустените –  $Ac_3$  (эту точку часто обозначают  $Ac_m$ ).

Рассмотренные равновесные превращения железоуглеродистых сплавов происходят при непрерывном и медленном охлаждении (вместе с печью).

## **ТЕМА 5. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ**

Основной продукцией черной металлургии является сталь, причем приблизительно 90 % изготавливается углеродистой стали и 10 % легированной.

Углеродистая сталь является многокомпонентным сплавом, содержащим углерод и ряд постоянных или неизбежных примесей (Mn, Si, S, O, H и др.), которые оказывают влияние на ее свойства. Присутствие этих примесей объясняется трудностью удаления части из них при выплавке (S, P), переходом их в сталь в процессе раскисления (Mn, Si) или из шихты – легированного металлического лома (Cr, Ni и др.). Эти же примеси, но в больших количествах, присутствуют и в чугунах.

### **5.1. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали**

Структура стали после медленного охлаждения состоит из двух фаз – феррита и цементита. Количество цементита возрастает в стали прямо пропорционально содержанию *углерода*.

Частицы цементита повышают сопротивление движению дислокаций, то есть повышают сопротивление деформации и, кроме того, уменьшают пластичность и вязкость. Вследствие этого с увеличением в стали содержания углерода возрастает твердость, временное сопротивление, предел текучести, уменьшаются относительное удлинение, относительное сужение и ударная вязкость.

С увеличением содержания углерода в стали снижается плотность, растут электросопротивление и коэрцитивная сила, уменьшаются теплопроводность и магнитная проницаемость.

*Марганец и кремний* – полезные примеси. Марганец устраняет вредное действие серы, образуя сернистый марганец (MnS), значительное количество которого всплывает и удаляется вместе со шлаком. К тому же сернистый марганец менее вреден, чем сернистое железо. Марганец и кремний растворяются в феррите, повышая его прочность. Углеродистые стали содержат около 0,8 % Mn и 0,5 % Si.

*Сера и фосфор* – вредные примеси. Они попадают в сталь с исходным сырьем.

*Сера* образует с железом соединение FeS и эвтектику Fe-FeS с температурой плавления 988 °С. При нагревании стали для пластиче-

ской деформации до температур выше 1000 °С эта эвтектика, располагающаяся по границам зерен, плавится и придает стали красноломкость, то есть большую хрупкость. Содержание серы в сталях допускают не более 0,05 %.

*Фосфор* растворяется в феррите и резко снижает его пластичность при низких температурах, то есть вызывает хладноломкость. Обладает большой склонностью к ликвации, создавая хрупкие участки, богатые фосфором. Содержание его в углеродистой стали допускается до 0,05 %.

*Азот (N<sub>2</sub>) и кислород (O<sub>2</sub>)* присутствуют в стали в виде хрупких неметаллических включений (например, окислов FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нитридов Fe<sub>4</sub>N и др.), как твердые растворы или в свободном виде. Они располагаются в дефектных участках металла (раковинах, трещинах и др.). Нитриды и оксиды, выделяясь по границам зерен, повышают порог хладноломкости и понижают сопротивление хрупкому разрушению.

Очень вредным является растворенный в металле *водород*, который сильно охрупчивает сталь. Поглощенный при выплавке стали он не только охрупчивает сталь, но и приводит к образованию в катаных заготовках *флокенов*. Флокены представляют собой очень тонкие трещины овальной или округлой формы, имеющие в изломе вид пятен – хлопьев серебристого цвета. Флокены резко ухудшают свойства стали.

Радикальным средством уменьшения содержания указанных элементов в стали является выплавка или разливка металла в вакууме. Вакуумированный металл обладает более высокими свойствами вследствие высокой чистоты по неметаллическим включениям и отсутствием растворенных газов.

## 5.2. Классификация углеродистых сталей

Углеродистые стали классифицируют по содержанию углерода, назначению, качеству, степени раскисления и структуре в равновесном состоянии.

*По содержанию углерода* стали подразделяются на низкоуглеродистые (0,3 % < C), среднеуглеродистые (0,3–0,7 % C) и высокоуглеродистые (C > 0,7 %).

*По назначению* стали классифицируют на конструкционные и инструментальные. Конструкционные стали представляют наиболее

обширную группу, предназначенную для изготовления строительных сооружений, деталей машин и приборов. К этим сталям относят цементуемые, улучшаемые, высокопрочные и рессорно-пружинные. Инструментальные стали подразделяют на стали для режущего, измерительного инструмента, штампов холодного и горячего деформирования.

*По качеству* стали подразделяют на стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные. Под качеством стали понимается совокупность свойств, определяемых металлургическим процессом ее производства. Нормы содержания вредных примесей служат основными показателями для разделения сталей по качеству. Стали обыкновенного качества содержат до 0,06 % S и 0,07 % P, качественные – не более 0,04 % S и 0,035 % P, высококачественные – не более 0,025 % S и 0,025 % P. Стали обыкновенного качества бывают только углеродистыми (до 0,5 % C), качественные и высококачественные – углеродистыми и легированными.

*По степени раскисления* стали классифицируют на спокойные, полуспокойные и кипящие. *Раскисление* – процесс удаления из жидкого металла кислорода и оксидов, проводимый с целью предотвращения хрупкого разрушения стали при горячей деформации.

Спокойные стали раскисляют марганцем, кремнием, алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газовой выделения. Кипящие стали раскисляют марганцем. Перед разливкой в них содержится повышенное содержание кислорода, который при затвердевании слитка или отливки частично взаимодействует с углеродом и удаляется в виде CO. Выделение пузырьков CO создает впечатление кипения стали, с чем и связано ее название. Кипящие стали достаточно дешевые, их производят низкоуглеродистыми и практически без кремния ( $Si < 0,07\%$ ), но с повышенным количеством газовых примесей.

Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

Легированные стали производят спокойными, углеродистые – спокойными, полуспокойными и кипящими.

*По структуре в равновесном состоянии* стали делятся на доэвтектоидные (в структуре – феррит и перлит), эвтектоидные (перлит) и заэвтектоидные (перлит и цементит вторичный).

### 5.3. Углеродистые стали обыкновенного качества

Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-2005) выпускают в виде проката (прутки, балки, листы, уголки, швеллеры и т.п.) в нормализованном состоянии и в зависимости от назначения и комплекса свойств подразделяют на группы: А, Б, В.

*Группа А* – это стали, поставляемые по механическим свойствам без уточнения их химического состава. Их обозначают буквами Ст (сталь) и цифрами, обозначающими порядковый номер стали, – 0, 1, 2, 3, ..., 6 (то есть Ст0, Ст1, Ст2, ..., Ст6). Чем больше цифра, тем больше содержание углерода и, следовательно, выше прочность и ниже пластичность.

Стали группы А используют в состоянии поставки для изделий, изготовление которых не сопровождается горячей обработкой. В этом случае они сохраняют структуру нормализации и механические свойства, гарантируемые составом.

*Группа Б* – это стали, поставляемые с гарантируемым химическим составом, в обозначении марки сталей впереди ставится буква Б (в основном регламентируется содержание С, Мп, Si) – БСт0, БСт1, ..., БСт6. Механические свойства при этом не гарантируются. Чем больше число в марке, тем выше содержание С и Мп.

Стали этой группы применяют для изделий, изготавливаемых с применением горячей обработки. Для таких сталей важны сведения о химическом составе, необходимые для определения режима горячей обработки.

*Группа В* – это стали повышенного качества. Их поставляют с гарантированными химическим составом и механическими свойствами. В обозначение марки вводится буква В (ВСт1, ..., ВСт5). Стали группы В дороже, чем стали групп А и Б, их применяют для ответственных деталей (для производства сварных конструкций). В этом случае важно знать исходные механические свойства стали, так как они сохраняются неизменными в участках, не подвергаемых нагреву при сварке. Для оценки свариваемости важны сведения о химическом составе.

При маркировке сталей обыкновенного качества степень раскисления обозначается добавлением индексов: в спокойных сталях – «сп», полуспокойных – «пс», кипящих – «кп», например, Ст3сп, БСт3пс или ВСт4кп. Спокойными и полуспокойными производят

стали Ст1-Ст6, кипящими – Ст1-Ст4 всех групп. Сталь Ст0 по степени раскисления не разделяют.

Углеродистые стали обыкновенного качества (всех трех групп) предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагруженных деталей машин и приборов. Способностью к сварке и к холодной обработке давлением отвечают стали групп Б и В номеров 1–4, поэтому из них изготавливают сварные фермы, различные рамы и строительные металлоконструкции.

Стали номеров 5 и 6, обладающие большей прочностью, предназначены для рельсов, железнодорожных колес, а также валов, шкивов, шестерен и других деталей грузоподъемных машин, некоторые детали из этих сталей групп Б и В подвергаются термической обработке – закалке с последующим высоким отпуском.

К недостаткам углеродистых сталей обыкновенного качества можно отнести то, что они часто не обеспечивают необходимых качеств по хладостойкости. Существенным их недостатком является и их малая прочность, что приводит к большому расходу металла и увеличению массы металлоконструкций. Решаются эти проблемы путем термического упрочнения углеродистых сталей и применения низколегированных сталей.

#### **5.4. Углеродистые качественные стали**

Качественные углеродистые стали выплавляют с соблюдением более строгих условий в отношении состава шихты и ведения плавки и разливки. К ним предъявляют более высокие требования по химическому составу: содержание серы не более 0,04 %, фосфора – 0,035 %, а также меньшее количество неметаллических включений, регламентированные макро- и микроструктура. Маркируют эти стали (ГОСТ 1050-88) двузначными цифрами 05, 08, 10, 15, 20–75, 80, 85, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 20 содержит в среднем 0,20 % С, сталь 70 – 0,70 % С и т.д.

Спокойные стали маркируют без индекса, полуспокойные и кипящие – с индексом соответственно «пс» и «кп». Кипящие стали производят марок 05кп, 08кп, 10кп, 15кп, 20кп, полуспокойные – 08пс, 10пс, 15пс, 20пс.

Качественные стали широко применяются в машиностроении и приборостроении, так как за счет разного содержания углерода в них,

а соответственно и термической обработки, можно получить широкий диапазон механических и технологических свойств.

Низкоуглеродистые стали 05кп, 08кп, 10кп, 15кп, 20кп отличаются малой прочностью и высокой пластичностью в холодном состоянии. Эти стали производят в основном в виде тонкого листа и используют после отжига или нормализации для холодной штамповки с глубокой вытяжкой. Глубокая вытяжка из листа этих сталей применяется при изготовлении консервных банок, эмалированной посуды и других промышленных изделий.

Спокойные стали 08, 10 применяют в отожженном состоянии для конструкций невысокой прочности – изготовления емкостей, труб и т.д.

Стали 10, 15, 20 и 25 также относятся к низкоуглеродистым сталям, они пластичны, хорошо свариваются и штампуются. Для увеличения поверхностной прочности этих сталей их цементируют (насыщают поверхность углеродом) и применяют для изготовления деталей небольшого размера, например слабонагруженных зубчатых колес, кулачков и т.д.

Поверхностный слой с покрытием можно упрочнить закалкой в воде с последующим низким отпуском. Сердцевина же из-за низкой прокаливаемости этих сталей практически не упрочняется.

Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45 и 50 в нормализованном состоянии отличаются повышенной прочностью, но меньшей вязкостью и пластичностью. В зависимости от условий работы деталей из этих сталей к ним применяют различные виды термической обработки: нормализацию, улучшение, закалку с низким отпуском, закалку ТВЧ и др. Эти стали применяют для изготовления небольших валов, шатунов, зубчатых колес и деталей, испытывающих циклические нагрузки. В крупногабаритных деталях больших сечений из-за плохой прокаливаемости механические свойства значительно снижаются.

Высокоуглеродистые стали 60, 65, 70, 80 и 85 используют в основном для изготовления пружин, рессор, высокопрочной проволоки и других изделий с высокой упругостью и износостойкостью. Их подвергают закалке и среднему отпуску на структуру троостит.

## **5.5. Обработываемость резанием. Автоматные стали**

Большинство деталей, за исключением получаемых из листа, тонкой проволоки или калиброванных прутков, изготавливают *обра-*

*боткой резанием*, хотя в настоящее время явно намечается тенденция перехода на другие бесстружечные методы изготовления деталей.

Улучшение обрабатываемости стали – основного конструкционного материала – имеет весьма важное практическое значение.

Вопрос о связи обрабатываемости со структурой и составом стали теоретически еще полностью не изучен.

Приблизительно можно считать, что повышение твердости или прочности снижает обрабатываемость (определяемую по скорости резания) и в первом приближении даже мало зависит от состава стали.

Однако при одинаковом значении твердости различия в структуре и составе могут обусловить значительные различия в обрабатываемости.

Большое значение имеет теплопроводность стали. Стали с аустенитной структурой обладают малой теплопроводностью. Выделяющееся при резании тепло мало поглощается изделием, а в основном концентрируется в точках резания и разогревает режущую кромку инструмента, что снижает его стойкость. Поэтому, несмотря на низкую твердость, аустенитные стали обрабатываются плохо.

Размер зерна в стали, не влияя заметно на твердость, существенно влияет на обрабатываемость. Крупнозернистая сталь, обладая пониженной вязкостью, лучше обрабатывается резанием. Пониженная вязкость создает так называемую «обработочную хрупкость», способствует более легкому отделению и получению сыпучей, недлинной стружки.

Относительно влияния состава стали следует отметить, что увеличение содержания углерода в стали вследствие упрочнения приводит к снижению обрабатываемости. Тем не менее очень низкоуглеродистые стали и техническое железо обрабатываются плохо вследствие их большой вязкости и пластичности, кроме того, при их обработке получается длинная трудноудаляемая стружка.

Особое внимание следует обратить на влияние фосфора и серы. Оба этих элемента не только повышают стойкость инструмента, но и способствуют получению обработанной поверхности лучшего качества. Поэтому для изготовления малоответственных деталей применяют так называемые *автоматные стали* – низкоуглеродистые стали с повышенным содержанием S и P. К недостаткам серофосфористых сталей относятся не только пониженная пластичность и вязкость, но и повышенная склонность к коррозии. Кроме серы, улучшают обрабатываемость стали селен и теллур.

Автоматные стали маркируют буквой А (автоматная) и цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (ГОСТ 1414-75). Если автоматная сталь легирована свинцом, то обозначение марки начинается с сочетания букв «АС» (АС14).

Лучше всех обрабатывается серофосфористая сталь А12 (0,08–0,16 % С; 0,7–1,0 % Мп; 0,15–0,35 % Si; 0,08–0,20 % S; 0,08–0,20 % Р). Из нее изготавливают неотчетственные детали массового производства.

### **Контрольные вопросы**

1. Как влияет углерод на физические и механические свойства стали?
2. Как влияют на свойства сталей марганец и кремний?
3. Перечислите вредные примеси в сталях и опишите их влияние на механические свойства сталей.
4. Перечислите факторы, по которым классифицируют углеродистые стали.
5. На какие виды делят стали *по качеству*?
6. На какие группы делят стали *по степени раскисления*?
7. Какие углеродистые стали общего назначения применяют для изготовления сварных конструкций и почему?
8. Как влияет на обрабатываемость стали содержание углерода в ней?
9. Какие химические элементы улучшают обрабатываемость стали?

### **ТЕМА 6. ЧУГУНЫ**

Чугуны – более дешевый материал, чем стали. Содержание углерода в них больше 2,14 %. Они обладают пониженной температурой плавления и хорошими литейными свойствами. За счет этого из чугунов можно делать отливки более сложной формы, чем из сталей. Литейные свойства сплавов тем выше, чем меньше их температурный интервал концентрации. Следовательно, наиболее высокими литейными свойствами обладают сплавы, испытывающие эвтектическое превращение.

Благодаря сочетанию высоких литейных свойств, достаточной прочности, износостойкости, а также относительной дешевизне чугуны широко применяются в машиностроении. Детали машин, полученные из чугунных отливок, значительно дешевле, чем детали, изготовленные обработкой резанием из горячекатаных стальных профилей или из поковок и штамповок. Хорошая жидкотекучесть чугунов и их способность к образованию малой усадочной раковины позволяют получать из них достаточно качественные отливки сложной формы даже при малой толщине стенок.

Значительная часть выплавляемого чугуна переплавляется в сталь по классической схеме *руда–чугун–сталь*. В процессе переплавки из чугуна путем окисления удаляется некоторое количество серы и фосфора.

В зависимости от того, в каком виде и форме присутствует углерод в сплавах, различают *белые, серые, высокопрочные и ковкие чугуны*.

## 6.1. Белые чугуны

Такое название они получили по виду излома, который имеет матово-белый цвет. Весь углерод в этом чугуне находится в связанном состоянии в виде цементита. Фазовые превращения в сплавах протекают согласно диаграмме состояния Fe-C (см. рис. 36). Белые чугуны в зависимости от содержания углерода могут быть доэвтектическими (перлит + ледебурит + цементит вторичный), эвтектическими (ледебурит) и заэвтектическими (ледебурит + цементит первичный). Эти чугуны имеют большую твердость (НВ 450–550) из-за присутствия в них большого количества цементита; как следствие этого, они очень хрупкие и для изготовления деталей машин не используются. Отливки из белого чугуна служат для получения с помощью графитизирующего отжига деталей из ковкого чугуна.

*Отбеленные чугуны-отливки* имеют поверхностные слои (12–30 мм) со структурой белого чугуна, а сердцевина – серого чугуна. Высокая твердость поверхности такой отливки позволяет ей хорошо работать против истирания. Эти свойства отбеленного чугуна применяются для изготовления валков листовых прокатных станков, колес, шаров для мельниц, тормозных колодок и многих других деталей, работающих в условиях износа.

Различают также *половинчатый чугун*, в котором большая часть углерода (~ 0,8 %) находится в виде цементита, а часть – в свободном

виде – в виде графита. Структура такого чугуна – перлит, ледебурит и пластинчатый графит.

## 6.2. Серые чугуны

Такое название чугуны получили по виду излома, который имеет серый цвет. В структуре серого чугуна (как и в структуре высокопрочного и ковкого) практически весь углерод находится в свободном состоянии – в виде графита. В сером чугуне графитовые включения имеют форму пластин.

Кристаллизация графита в сплавах железа с углеродом называется *графитизацией*. Графит может кристаллизоваться из жидкой фазы при затвердевании чугуна и из твердой фазы – аустенита при охлаждении.

Процесс графитизации чугуна подчиняется общим законам кристаллизации и сводится к образованию центров графитизации и к росту образовавшихся зародышей графита. Для образования зародышей графита требуется значительная диффузия атомов углерода. Это медленно протекающий процесс, так как необходима еще самодиффузия атомов железа – отвод этих атомов от фронта кристаллизации графита.

Цементит менее устойчивая фаза, чем графит, и при высокой температуре распадается  $Fe_3C = 3Fe + C$ . Если не создавать специальных условий кристаллизации, из жидкого расплава предпочтительнее выделяется смесь цементита с аустенитом. На процесс графитизации влияет химический состав, скорость охлаждения и наличие нерастворимых включений.

При медленном охлаждении графитизация происходит легче и полнее. Поэтому в тонких сечениях, где охлаждение протекает быстрее, графитизация затруднена.

Поскольку структура чугуна состоит из металлической основы и графита (в виде пластин), то и свойства его будут зависеть от этих двух составляющих.

Графит по сравнению со сталями обладает низкими механическими свойствами и поэтому в некотором приближении можно считать, что места, которые он занимает, – это пустота. Количественное соотношение основы и пустот влияет на механические свойства чугуна, и с увеличением последних свойства резко ухудшаются. Чем более грубы включения графита, тем, следовательно, больше разоб-

щена металлическая основа, что отрицательно сказывается на свойствах чугуна.

Серые чугуны являются сплавами сложного состава, содержащими железо, углерод, кремний, марганец, серу, фосфор. Фосфор частично растворяется в феррите и, кроме того, входит в тройную эвтектику (Fe-C-P) с температурой плавления 950 °С; это существенно улучшает литейные свойства чугуна. Эта эвтектика очень твердая и хрупкая, что увеличивает износостойкость, а хорошие литейные свойства используются и в художественном литье (до 1 % С).

Сера – вредная примесь, снижает механические и литейные свойства чугунов и повышает склонность к образованию трещин.

Кремний входит в состав серых чугунов (1–3 % С) как основной элемент и обладает сильным графитизирующим действием; увеличивает выделение графита при затвердевании и разложении выделившегося цементита.

Марганец (0,2–1,1 % С) положительно влияет на механические свойства чугуна, но затрудняет процесс графитизации или способствует его отбеливанию. Таким образом, можно сказать, что степень графитизации напрямую зависит от количества углерода (2,2–3,7 % С) и кремния (1–3 % С) в чугуне.

По структуре металлической основы серые чугуны разделяют на три вида.

1. Серый перлитный со структурой *перлит* + *графит* (количество связанного углерода составляет  $\approx 0,8$  %).

2. Серый феррито-перлитный со структурой *феррит* + *перлит* + *графит* (количество связанного углерода  $< 0,8$  %).

3. Серый ферритный со структурой *феррит* + *графит* (весь углерод находится в виде графита).

Итак, механические свойства серого чугуна зависят от свойств металлической основы и от количества, формы и размеров графитных включений.

Марка серого чугуна состоит из букв СЧ (серый чугун) и числа, показывающего значение временного сопротивления при растяжении ( $\text{кгс/мм}^2$ ). Показателями механических свойств серых чугунов в соответствии с ГОСТ 1412-85 является прочность при статическом растяжении (табл. 8).

## Механические свойства серых чугунов

Чугун	$\sigma_s$ , МПа	НВ	Структура металлической основы
СЧ 15	150	163...229	Феррит
СЧ 25	250	180...250	Феррит + перлит
СЧ 40	400	207...285	Перлит
СЧ 45	450	229...289	Перлит

Графит способствует измельчению стружки при обработке резанием и оказывает смазывающее действие, что повышает износостойкость чугуна.

Серый чугун широко применяется в автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении. Номенклатура отливок из серого чугуна и их масса разнообразны: от деталей в несколько граммов до 100 т и более.

Ферритные серые чугуны марки СЧ 10, СЧ 15 используются для слабо- и средненагруженных деталей: крышки, фланцы, маховики, суппорты, тормозные барабаны, диски сцепления и т.д.

Феррито-перлитные серые чугуны марки СЧ 20, СЧ 25 применяются для деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках: картеры двигателя, поршни цилиндров, барабаны сцепления, станины станков и др.

Перлитный чугун применяют для отливки станин мощных станков и механизмов. Часто используют перлитные серые модифицированные чугуны, у которых благодаря проведенной модификации чешуйки графита имеют более мелкую, завихренную форму, что увеличивает прочность чугуна. Такие чугуны получают при добавлении в жидкий чугун специальных добавок-модификаторов – ферросилиция или силикокальция. К модифицированным чугунам относятся чугуны СЧ 40 и СЧ 45. Эти марки чугунов применяются для изготовления корпусов насосов, компрессоров и гидроприводов.

Для деталей, работающих при повышенных температурах, применяют легированные серые чугуны, которые содержат хром, никель, молибден и алюминий.

### 6.3. Высокопрочные чугуны

Высокопрочными называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму.

Высокопрочные чугуны получают модифицированием жидкого чугуна небольшими добавками магния. По содержанию остальных элементов высокопрочный чугун не отличается от обычного серого.

Под действием магния графит в процессе кристаллизации принимает не пластинчатую, а шаровидную форму. Шаровидный графит, имеющий минимальную поверхность при данном объеме, значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна, чем пластинчатый графит. Высокопрочные чугуны имеют более высокие механические свойства, не уступающие литой углеродистой стали, сохраняя при этом хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, высокую износостойкость и т.д. Обычный состав чугуна: 2,7–3,7 % С; 1,6–2,7 % Si; 0,5–0,6 % Mn; S ≤ 0,10 % и P ≤ 0,10 %.

Маркируют высокопрочный чугун буквами ВЧ, затем следуют цифры, которые показывают среднее значение временного сопротивления при растяжении –  $\sigma_e$  (кгс/мм<sup>2</sup>). Чугуны ВЧ 50; ВЧ 60; ВЧ 70; ВЧ 80; ВЧ 100; ВЧ 120 имеют перлитную металлическую основу, чугуны ВЧ 45-5 – перлитно-ферритную и ВЧ 38; ВЧ 42 – ферритную.

Из высокопрочных чугунов изготавливают оборудование прокатных станов (прокатные валки весом до 12 т), кузнечно-прессовое оборудование, корпуса паровых турбин, коленчатые валы и другие детали, работающие при циклических нагрузках и в условиях сильного износа.

Иногда для улучшения механических свойств применяют термическую обработку отливок – закалку и отпуск при 500–600 °С; для увеличения пластичности – отжиг, способствующий сфероидизации перлита.

### 6.4. Ковкие чугуны

Ковкими называют чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают в результате специального графитизирующего отжига отливок доэвтектического чугуна. Графит в таких чугунах называют углеродом отжига. Ковкий чугун по сравнению с серым обладает более высокой прочностью, что связано с меньшим влияни-

ем хлопьевидной формы графита на механические свойства металлической основы.

При производстве ковкого чугуна очень важно, чтобы отливки белого чугуна, подвергаемые отжигу, были тонкостенными. В противном случае в сердцевине при кристаллизации будет выделяться пластинчатый графит, и чугун станет непригодным для отжига.

По структуре металлической основы ковкие чугуны бывают ферритными, перлитными и феррито-перлитными.

Для получения ферритных ковких чугунов отливки из белого чугуна загружают в специальные контейнеры и засыпают песком и стальными стружками для защиты от окисления, затем медленно нагревают (20–25 ч) до температуры 950–1000 °С (ниже эвтектической) и выдерживают 10–15 ч (рис. 37, кривая 1). За это время происходит первая стадия графитизации – распад цементита, входящего в состав ледебурита (А + Ц), и установление стабильного равновесия аустенит + графит. В результате распада цементита диффузионным путем образуется хлопьевидный графит (углерод отжига).

Затем отливки охлаждают до температур, соответствующих интервалу эвтектоидного превращения. При охлаждении происходит выделение из аустенита вторичного цементита, его распад и в итоге рост графитных включений. При достижении эвтектоидного интервала температур охлаждение резко замедляют или дают длительную выдержку при температуре несколько ниже этого интервала. В этот период протекает вторая стадия графитизации: распад аустенита с образованием феррито-графитной структуры или распад цементита, входящего в состав перлита, с образованием феррита и графита (в процессе выдержки ниже эвтектоидных температур). После окончания второй стадии графитизации структура чугуна состоит из феррита и хлопьевидного графита.

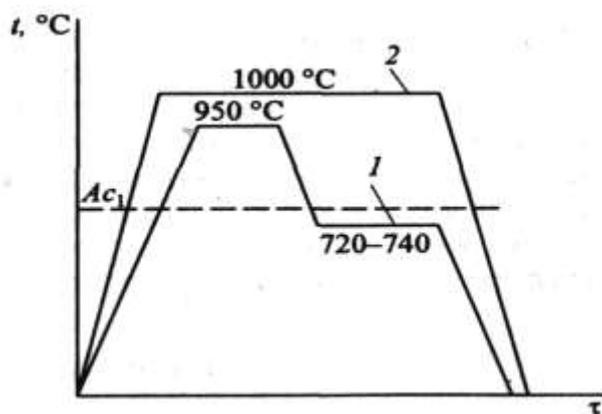


Рис. 37. Схема отжига белого чугуна на ковкий

Перлитный ковкий чугун получают из ваграночного белого чугуна путем отжига в окислительной среде (см. рис. 37, кривая 2). Увеличивается как бы продолжительность первой стадии графитизации, после чего идет непрерывное охлаждение отливок до комнатной температуры и чугун приобретает структуру перлит + углерод отжига.

Полное отсутствие литейных напряжений, которые снимаются за счет длительного отжига, и разобшенность графитовых включений обуславливают высокие механические свойства ковких чугунов.

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и цифрами. Первые цифры марки показывают среднее значение временного сопротивления при растяжении –  $\sigma_g$  (кгс/мм<sup>2</sup>), вторые – относительное удлинение –  $\delta$  (%).

В таблице 9 представлены свойства некоторых ковких чугунов. Из таблицы видно, что перлитные чугуны более прочные, а ферритные – более пластичные.

Таблица 9

Механические свойства ковких чугунов (ГОСТ 1215-79)

Чугун	$\sigma_g$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	Структура металлической основы
КЧ 30-6	300	6	100–163	Феррит
КЧ 37-12	370	12	110–163	Феррит
КЧ 60-3	600	3	200–269	Перлит
КЧ 80-1,5	800	1,5	270–320	Перлит

Отливки из ковких чугунов применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках (картеры редукторов, фланцы, муфты).

## 6.5. Специальные чугуны

К специальным относятся износостойкие, жаростойкие и коррозионно стойкие чугуны.

*Износостойкий* чугун обладает высокой сопротивляемостью изнашиванию. В зависимости от условий работы их делят на фрикционные, для поршневых колец, антифрикционные и отбеленные.

*Фрикционный чугун* имеет высокий коэффициент трения и износостойкость. В качестве фрикционного чугуна служит серый и ковкий чугун с перлитной основой. Никель, хром и молибден и другие

легирующие элементы увеличивают прочность и износостойкость фрикционного чугуна.

*Чугун для поршневых колец* должен сочетать износостойкость с высокой упругостью. Этим требованиям отвечают серые фосфористые чугуны с основой из мелкого пластинчатого перлита.

*Антифрикционные чугуны* предназначены для работы в подшипниковых и иных узлах трения. Эти чугуны должны обладать хорошей прирабатываемостью при трении по металлу. В качестве антифрикционных материалов применяются серые, высокопрочные, ковкие нелегированные и легированные чугуны марок АСЧ-1, АСЧ-2, АСЧ-3, АВЧ-1, АВЧ-2, АКЧ-1, АКЧ-2 и др. (ГОСТ 1585-70).

*Отбеленный чугун* на определенную глубину с поверхности представляет собой белый или половинчатый чугун, а в сердцевине – серый. Такой чугун используется для изготовления деталей, работающих на износ. Отбеленный слой на чугунных отливках получают ускоренным охлаждением их поверхностей, например отливкой в металлические формы.

*Жаростойкие чугуны* хорошо сопротивляются окислению. В качестве жаростойкого применяют чугун с высоким содержанием алюминия (ЖЧЮ-22) или с добавкой хрома (ЖЧХ-1,5; ЖЧХ-30).

*Коррозионно стойкие чугуны* работают в агрессивных средах, их легируют алюминием, хромом, никелем, медью (ЧНХТ, ЧН15Д7Х2 и др.).

### **Контрольные вопросы**

1. В каком виде находится углерод в белых чугунах?
2. Почему ограничено промышленное использование белых чугунов как конструкционных материалов?
3. От чего зависят механические свойства серых чугунов?
4. Для чего проводится модифицирование серых чугунов?
5. Как получают высокопрочные чугуны?
6. Каким способом получают ковкие чугуны?
7. Какие чугуны возможно применять в качестве антифрикционных материалов?
8. Какими элементами легируют жаростойкие и коррозионно-стойкие чугуны?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

**Цель работы.** Детально изучить диаграмму состояния сплавов системы *железо–углерод*.

**Задание:**

1. Изучить литературу по железоуглеродистым сплавам.
2. Вычертить диаграмму состояния сплавов системы *железо–углерод* с указанием структурных составляющих каждой области диаграммы. Назвать все характерные точки и линии диаграммы.
3. Дать определение всем фазам и структурным составляющим железоуглеродистых сплавов с указанием возможного содержания в них углерода. Указать механические свойства (прочность, твердость, пластичность) структурных составляющих.
4. Для сплава заданной концентрации построить кривую охлаждения с применением правила фаз. Описать ход процесса кристаллизации и изменения фазового состава на каждом участке кривой охлаждения.
5. Для сплава в заданной точке диаграммы определить с помощью правила коноды концентрацию и количественное соотношение фаз или структурных составляющих.
6. Пользуясь альбомом микроструктур, нарисовать три схемы микроструктур сплавов по заданию преподавателя.

#### Общие указания

Диаграмма системы *железо–углерод* дает представление о ходе фазовых превращений в процессе кристаллизации сплавов и об их строении и структуре после завершения процесса кристаллизации.

Верхняя часть диаграммы от линии ликвидуса АВСД до линии солидуса АНЕСФ отражает ход первичной кристаллизации сплавов.

Ниже линии солидуса происходит вторичная кристаллизация сплавов. Она вызвана изменением полиморфного состояния железа и изменением растворимости углерода в  $\gamma$ -железе.

Для лучшего усвоения хода всех этих превращений следует изучать диаграмму по отдельным участкам. Прежде всего, нужно изучить ход процесса кристаллизации в верхнем левом углу, где имеет

место перитектическое превращение. Затем уяснить суть процессов первичной кристаллизации при содержании углерода в сплавах до 2,14 % и выше. Также следует изучить ход вторичной кристаллизации. Нужно четко уяснить, какие фазы и структурные составляющие образуются в результате кристаллизация сплавов и в чем существенное различие между фазой и структурной составляющей. Надо уметь давать определение всем структурным составляющим, знать, при каких условиях они образуются и какими свойствами обладают.

### Теоретические сведения

Диаграмма *железо–углерод* (см. рис. 3б) служит основой для уяснения процессов, происходящих при нагревании и охлаждении железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов). В железоуглеродистых сплавах при нагревании и охлаждении получают следующие фазы и структурные составляющие: *феррит, аустенит, цементит, перлит и ледебурит*. В таблице 10 приведены характеристики структурных составляющих железоуглеродистых сплавов.

При анализе диаграммы рассматриваются линии и точки диаграммы (табл. 11 и 12), применяются правила фаз и отрезков.

Выше линии ABCD все сплавы находятся в жидком состоянии, и число степеней свободы, определяемое по правилу фаз,  $s = k - f + 1 = 2 - 1 + 1 = 2$ , что значит, что сплавы можно нагревать и охлаждать, менять их концентрацию, и они остаются жидкими в состоянии равновесия. Между линиями ABCD и ANJESF сплавы двухфазны, состоят из твердой фазы и жидкости, и при этом число степеней свободы  $s = 2 - 2 + 1 = 1$ . Из этого следует, что для сохранения равновесия системы можно менять лишь один фактор равновесия: либо температуру, либо концентрацию. Две фазы и одна степень свободы имеются также во всех других областях диаграммы, кроме аустенитной (NJESG) и двух ферритных (AHN) и (GPQ), где система однофазна и располагает двумя степенями свободы  $s = 2 - 1 + 1 = 2$ . На горизонтальных линиях HJB, ECF и PSK система трехфазна и число степеней свободы  $s = 2 - 3 + 1 = 0$ .

На линии HJB протекает перитектическое превращение  $L + \Phi \rightarrow A$ , в результате которого образуется аустенит.

На линии ECF при охлаждении образуется ледебурит, на линии PSK – перлит.

## Характеристики фаз и структурных составляющих железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов)

Структура	Тип структуры	Содержание углерода, %	Число фаз	Механические свойства			Характеристики структуры
				$\sigma_s$ , кгс / мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	НВ, кгс / мм <sup>2</sup>	
Феррит	Твердый раствор углерода в $\alpha$ -железе	От 0,006 (при 0 °С) до 0,02 (при 727 °С)	1	30	40	80–100	Пластичная, но непрочная
Аустенит	Твердый раствор углерода в $\gamma$ -железе	2,14 (при 1147°С)	1	60	60	180–200	Очень пластичная
Цементит	Химическое соединение железа с углеродом (Fe <sub>3</sub> C)	6,67	1	200	0	800	Очень твердая и хрупкая
Перлит	Физико-химическая смесь феррита и цементита	0,80	2	60	20	200	Средние прочность и пластичность
Ледебурит	Физико-химическая смесь аустенита и цементита	4,30	2	100	1–2	450–500	Твердая и хрупкая

## Фазовые превращения на линиях по диаграмме железо–углерод

Обозначение линий	Фазовые превращения на линиях (при охлаждении)	Перечень фаз	Количество фаз	Число степеней свободы
AB	Начало первичной кристаллизации феррита из жидкости	Жидкость + феррит	2	1
АНJB	Конец первичной кристаллизации феррита из жидкости	Жидкость + феррит	2	1
HJB	Перитектическое превращение $\Phi + L \rightarrow A$	Жидкость + феррит + аустенит	3	0
BC	Начало первичной кристаллизации аустенита из жидкости	Жидкость + аустенит	2	1
JE	Конец первичной кристаллизации аустенита из жидкости	Жидкость + аустенит	2	1
CD	Начало первичной кристаллизации цементита (первичного) из жидкости	Жидкость + цементит	2	1
ECF	Образование ледебурита из жидкости, линия эвтектических превращений	Жидкость + аустенит + цементит	3	0
GS	Начало выделения феррита из аустенита	Аустенит + феррит	2	1
PS	Конец выделения феррита из аустенита и образование перлита из аустенита	Аустенит + феррит + цементит	3	0
PSK	Образование перлита из аустенита	Аустенит + феррит + цементит	3	0
SE	Начало выделения цементита (вторичного)	Аустенит + цементит	2	1
SK	Конец выделения цементита (вторичного) из аустенита и образование перлита из аустенита	Аустенит + феррит + цементит	3	0
PQ	Начало выделения цементита третичного из феррита	Феррит + цементит	2	1

## Фазовые превращения в точках на диаграмме железо–углерод

Точка	Фазовые превращения в точках	Со- держа- ние уг- лерода, %	Соответ- ствующая точкам темпера- тура, °С	Перечень фаз	Коли- чество фаз	Число степеней свободы
1	2	3	4	5	6	7
A	Температура плавления и затвердевания чистого железа	0	1539	Жидкость + кристаллы железа	2	0
B	Температура перитектической реакции	0,5	1499	Жидкость + феррит + аустенит	3	0
C	Плавление и образование ледебурита	4,30	1147	Жидкость + аустенит + цементит	3	0
D	Температура плавления и затвердевания цементита	6,67	1250	Жидкость + цементит (первичный)	2	0
H	Максимальное растворение углерода в высокотемпературном $\alpha$ -железе	0,10	1499	Жидкость + феррит + аустенит	3	0
J	Перитектическая точка	0,16	1499	Жидкость + феррит + аустенит	3	0
N	Превращение $\alpha$ -железа в $\gamma$ -железо или $\gamma$ -железа в $\alpha$ -железо	0	1392	$\alpha$ -железо и $\gamma$ -железо	2	0
E	Максимальное растворение углерода в аустените	2,14	1147	Жидкость + аустенит + цементит	3	0
S	Эвтектоидная точка (образование перлита из аустенита или аустенита из перлита)	0,80	727	Аустенит + феррит + цементит	3	0

1	2	3	4	5	6	7
G	Превращение $\gamma$ -железа в $\alpha$ -железо или $\alpha$ -железа в $\gamma$ -железо	0	911	$\gamma$ -железо и $\alpha$ -железо	2	0
P	Максимальное растворение углерода в $\alpha$ -железе	0,02	727	Аустенит + феррит + цементит (вторичный)	3	0
Q	Минимальное растворение углерода в $\alpha$ -железе	0,006	0	Феррит +цементит (третичный)	2	1
K	Нет фазовых превращений	6,67	727	Цементит первичный	1	-
F	Нет фазовых превращений	6,67	1147	Цементит первичный	1	-
M	Магнитное превращение	0	768	Чистое железо	1	-

Нулевая степень свободы на этих линиях обуславливает строго постоянные температуры при образовании ледебурита (1147 °С) и перлита (727 °С).

Правилом коноды пользуются для определения количественного соотношения жидкой и твердой фаз или двух различных твердых фаз.

### Содержание отчёта

Отчет должен содержать: ответы на контрольные вопросы, диаграмму состояния сплавов *железо–углерод*; описание фаз, структур железоуглеродистых сплавов и их свойств; две кривые охлаждения для стали и чугуна (содержание углерода задает преподаватель); описание на основе этих кривых фазовых превращений, происходящих в сплавах при нагревании и охлаждении, с применением правила фаз и коноды.

### Контрольные вопросы

1. Какие аллотропические формы железа бывают?
2. Как подразделяются группы сплавов по содержанию в них углерода?
3. Что называется сталью?
4. Как делятся стали по содержанию в них углерода?
5. Каковы составляющие структур доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталей и как они выглядят под микроскопом?
6. Что называется чугуном?
7. Чем отличается серый чугун от белого?
8. Какие формы графитных включений бывают в различных чугунах и как они выглядят под микроскопом?
9. Из каких составляющих состоит металлическая основа серых чугунов?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

**Цель работы.** Получить навыки в проведении микроанализа структур углеродистых сталей, определении по ним типа сплава, содержания углерода, примерной марки стали и в практическом применении установленного сплава.

**Приборы и материалы:**

1. Микроскоп металлографический ЛабоМет-1.
2. Набор микрошлифов.
3. Альбом микроструктур.

#### Теоретические сведения

Микроструктура углеродистых сталей в равновесном состоянии, полученная в результате оптимального нагрева и медленного охлаждения, может быть определена по диаграмме состояния сплавов системы *железо–углерод* (см. рис. 36). Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода до 0,02 %, называют *технически чистым железом*. Его структура состоит из светлых зерен феррита с хорошо видными темными границами (рис. 38).

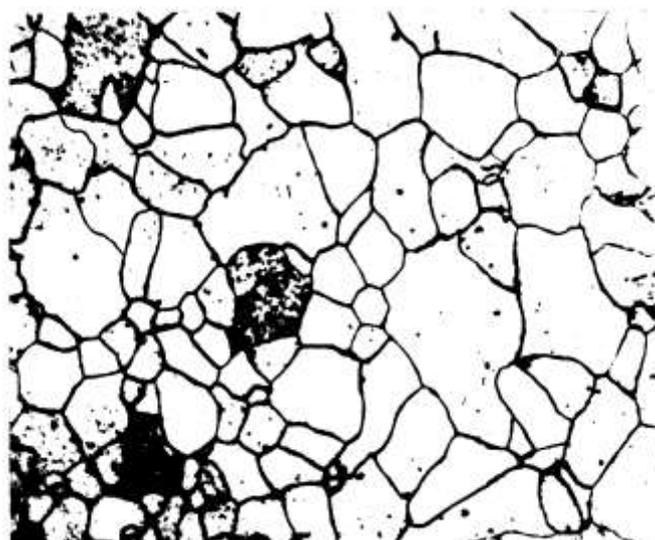


Рис. 38. Микроструктура технического железа (феррит)  $\times 500$

Железоуглеродистые сплавы, содержащие углерода от 0,02 до 2,14 %, называются *сталями*. По структуре в равновесном состоянии стали делятся на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.



Рис. 39. Микроструктура доэвтектоидной стали (0,2 % C)  $\times 200$

*Доэвтектоидные стали* содержат от 0,02 до 0,8 % углерода. Структура этих сталей состоит из светлых зерен феррита и темных зерен перлита (рис. 39). С увеличением содержания углерода уменьшается количество феррита, возрастает количество перлита.



Рис. 40. Микроструктура эвтектоидной стали (перлит пластинчатый)  $\times 2000$

*Эвтектоидная сталь* содержит 0,8 % углерода и состоит только из перлита (физико-химической смеси феррита и цементита), имеющего пластинчатое строение (см. рис. 40).

*Заэвтектоидные стали* содержат от 0,8 до 2,14 % углерода, их структура состоит из перлита и вторичного цементита (рис. 41). При медленном охлаждении вторичный цементит располагается по границам зерен перлита в виде сетки или ручейков белого цвета. Чтобы отличить цементит от феррита, применяют специальный реактив – пикрат натрия, который окрашивает цементит в темный цвет и совершенно не действует на феррит. Выделение вторичного цементита по границам зерен перлита нежелательно, так как такая структура обладает повышенной хрупкостью и плохо обрабатывается резанием. Чем больше содержание углерода, тем более широкой получается цементитная сетка и меньше образуется перлита.



Рис. 41. Микроструктура заэвтектоидной стали (1,2 % С)  $\times 200$

Таким образом, с увеличением содержания углерода в углеродистых сталях, находящихся в равновесном состоянии, меняются их структура и фазовый состав: уменьшается количество феррита (НВ 80–100), увеличивается количество цементита (НВ 800). В соот-

ветствии с этим в сталях возрастают твердость НВ, предел прочности  $\sigma_s$ , уменьшаются пластичность  $\delta$  и ударная вязкость КСУ.

При содержании углерода свыше 1 % предел прочности снижается, что объясняется образованием в структуре стали по границам зерен сплошной цементитной сетки.

По структуре стали, находящейся в равновесном состоянии, можно приближенно определить содержание углерода, а затем установить марку стали. Для этого на микроструктуре, рассматриваемой под микроскопом, ориентировочно определяют площади, занимаемые перлитом, ферритом, цементитом. Принимают содержание углерода в феррите равным нулю, в 100 % перлита – 0,8 %, а в 100 % цементита – 6,67 % С.

Например, пусть в доэвтектоидной стали перлит занимает 25 % всей площади, феррит – 75 %. Тогда содержание углерода в стали можно определить из пропорции:

$$\begin{aligned} 100 \% \text{ перлита} &- 0,8 \% \text{ С,} \\ 25 \% \text{ перлита} &- x \% \text{ С,} \\ \text{откуда } x &= \frac{25 \cdot 0,8}{100} = 0,2 \% \text{ С.} \end{aligned}$$

Такое содержание углерода имеет конструкционная сталь марки 20.

По структуре заэвтектоидной стали не рекомендуется определять содержание углерода, так как с увеличением его содержания мало изменяется площадь, занимаемая цементитом, и можно сделать грубую ошибку в расчете.

### **Порядок выполнения работы**

1. Рассмотреть и изучить микрошлифы под микроскопом, определить структурные составляющие, указать класс стали (доэвтектоидная, эвтектоидная, заэвтектоидная).
2. По структуре подсчитать содержание углерода.
3. Зарисовать схемы микроструктур из альбома.

### **Содержание отчёта**

В отчет необходимо включить диаграмму состояния *железо–углерод* и указать, как влияет увеличение содержания углерода на структуру и механические свойства стали; описать строение и свой-

ства структурных составляющих; напротив зарисованных схем микроструктур указать структурные составляющие, класс стали, содержание углерода, марку стали, механические свойства (НВ,  $\sigma_s$ ,  $\delta$ , KSU – используя справочный материал), применение.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЧУГУНОВ

**Цель работы.** Получить навыки определения по микроструктуре сплава вида чугуна (белый, серый, ковкий, высокопрочный), оценить приближенно его механические свойства и установить область применения.

#### **Приборы и материалы:**

1. Микроскоп металлографический ЛабоМет-1.
2. Набор микрошлифов.
3. Альбом микроструктур.

#### **Теоретические сведения**

По химическому составу чугуны отличаются от сталей более высоким содержанием углерода (более 2,14 %) и постоянных примесей (S, P, Si, Mn). Чугун обладает более низкими механическими свойствами, чем сталь. Однако его хорошие технологические свойства (литейные, обрабатываемость режущим инструментом, износостойкость, антифрикционные свойства и т.д.) делают чугун пригодным для изготовления различных деталей сельскохозяйственных машин.

В зависимости от состояния углерода чугуны подразделяются на две группы: чугуны, в которых весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), и чугуны, в которых весь углерод или большая часть его находится в виде графита.

К первой группе относятся *белые чугуны*. Их структура зависит от содержания углерода и соответствует диаграмме равновесного состояния сплавов системы *железо–углерод* (см. рис. 36). По структуре белые чугуны делятся на следующие.

*Доэвтектические* (2,14–4,3 % C). Структура включает три составляющие: перлит, ледебурит, вторичный цементит (рис. 42).



Рис. 42. Микроструктура доэвтектического чугуна  $\times 200$

Перлит наблюдается под микроскопом в виде темных зерен, цементит – светлых полос, ледеburит – в виде участков с темными точками. Каждый такой участок представляет собой смесь мелких округлых или вытянутых зерен перлита, равномерно расположенных в белой цементитной основе.

*Эвтектический чугун* (4,3 % C) состоит из ледеburита, представляющего собой равномерную физико-химическую смесь перлита с цементитом (рис. 43).

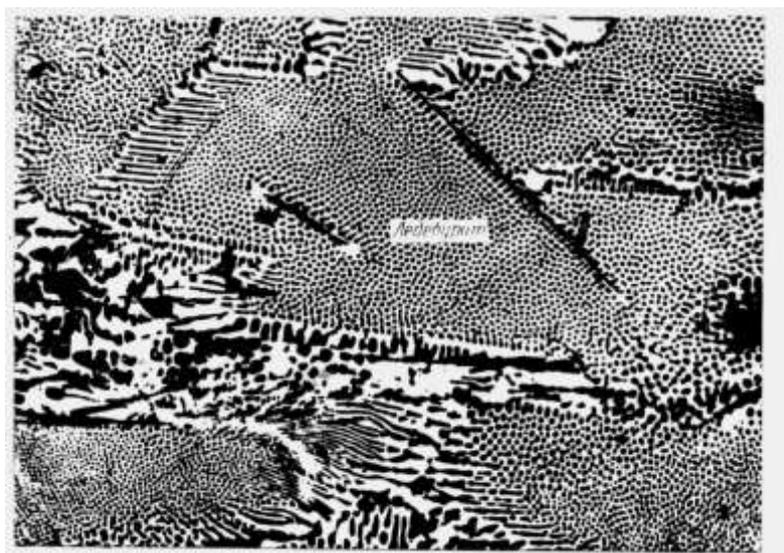


Рис. 43. Микроструктура эвтектического чугуна  $\times 500$

*Заэвтектический чугун* (4,3–6,67 % С) характеризуется двумя структурными составляющими: первичным цементитом (вытянутая форма) и ледебуритом (рис. 44).

Характерная особенность структуры белого чугуна – наличие в ней весьма твердых и малопластичных составляющих: цементита и ледебурита. Получению такой структуры в белых чугунах способствуют повышенное содержание в них марганца, пониженное – кремния и сравнительно быстрое охлаждение. Белые чугуны – очень хрупки и тверды, плохо поддаются обработке режущим инструментом. Поэтому такие чугуны в машиностроении используются редко (дробильные шары шаровых мельниц, звездочки для очистки литья). Они обычно идут на переделку в сталь и для получения ковкого чугуна.



Рис. 44. Микроструктура заэвтектического чугуна  $\times 200$

Ко второй группе чугунов относятся *серые, высокопрочные и ковкие чугуны*. Структура их представляет собой металлическую основу, пронизанную графитовыми включениями.

От структуры металлической основы, которая выявляется после травления шлифа (феррито-перлитная, перлитная и ферритная), зависят такие свойства, как предел прочности при сжатии, твердость, износостойкость.

Такие свойства чугуна, как пластичность, сопротивление растяжению и износостойкость, зависят главным образом от формы, размеров, количества и характера расположения графитовых включений. Прочность графита по сравнению с металлической основой ничтожна, его присутствие равносильно надрезу – пустоте. Поэтому чем равномернее расположены графитовые включения в металлической основе, чем они мельче и их форма ближе к округлой, тем меньше будет разобщена металлическая основа чугуна, и прочностные свойства будут выше. В соответствии с отмеченным качество чугунов оценивается не только структурой металлической основы, но и формой, размером и характером распределения в ней графитовых включений.

В чугунах встречаются три формы графитовых включений: пластинчатая (рис. 45), шаровидная (рис. 46), хлопьевидная (рис. 47).

Пластинчатая форма графита свойственна *серым чугунам* (рис. 45). Такую форму можно рассматривать как трещины (надрезы), создающие концентрацию напряжений в перлитной, феррито-перлитной металлических основах. Получению серых чугунов способствует медленное охлаждение отливок и наличие в них повышенного содержания кремния и пониженного – марганца. Пластинчатая форма графита резко снижает прочностные свойства чугуна.

Повышение механических свойств серых чугунов достигается модифицированием, то есть воздействием на процесс графитизации путем введения в жидкий расплав особых добавок (модификаторов). Модификаторами являются ферросилиций, силикокальций, алюминий. Будучи введенными в жидкий чугун перед его разливкой, модификаторы раскисляют его и образуют в нем тугоплавкие окислы типа  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ , которые, находясь во взвешенном состоянии, служат дополнительными центрами графитизации и способствуют размельчению графита.

Из серых чугунов изготавливают блоки цилиндров, картеры, маховики и др. В автотракторостроении и сельскохозяйственном машиностроении часто применяют следующие марки серых чугунов: СЧ18, СЧ20, СЧ25 (немодифицированные) и СЧ30 и СЧ35 (модифицированные).



Рис. 45. Микроструктура серого перлитного чугуна  $\times 1000$

Шаровидная форма графита свойственна *высокопрочному чугуну*.

Его получают двойным модифицированием серого чугуна: добавкой в жидкий чугун незадолго перед заливкой двух модификаторов – ферросилиция для создания большего количества центров графитизации и магния или церия для получения шаровидной формы графита (рис. 46).

Структура высокопрочного чугуна состоит из ферритной или перлитно-ферритной металлической основы, в которой располагаются графитовые включения в форме шаров. Такая форма графита не нарушает сплошности металлической основы, и это способствует повышению прочности и пластичности. Высокопрочный чугун – хороший заменитель литой стали (применяется для изготовления коленчатых и распределительных валов, гильз цилиндров, автомобильных двигателей). В сельскохозяйственном машиностроении часто применяют высокопрочные чугуны марок ВЧ60, ВЧ45.

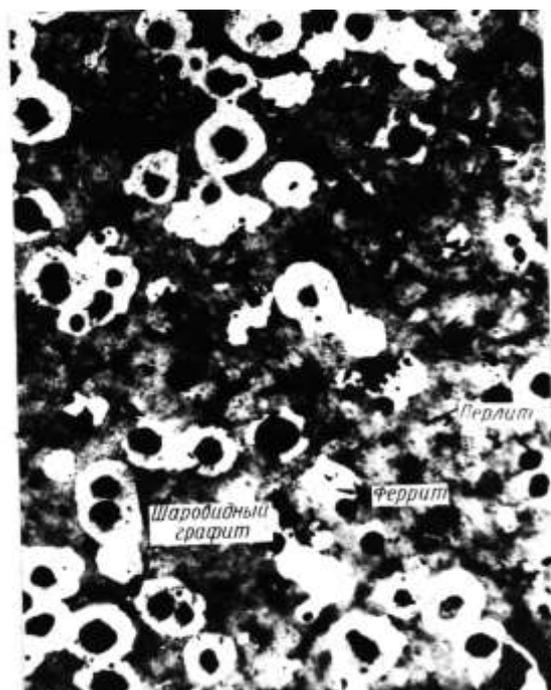


Рис. 46. Микроструктура феррито-перлитного высокопрочного чугуна после модификации лигатурой магния с ферросилицием  $\times 200$

Хлопьевидная форма графита присуща *ковкому* чугуну, который получают специальным графитизирующим отжигом (томлением) белых доэвтектических чугунов, содержащих от 2,2 до 3,2 % С (рис. 47). Такая форма графита способствует повышению пластических свойств – чугун лучше переносит удары, обладает достаточной вязкостью.

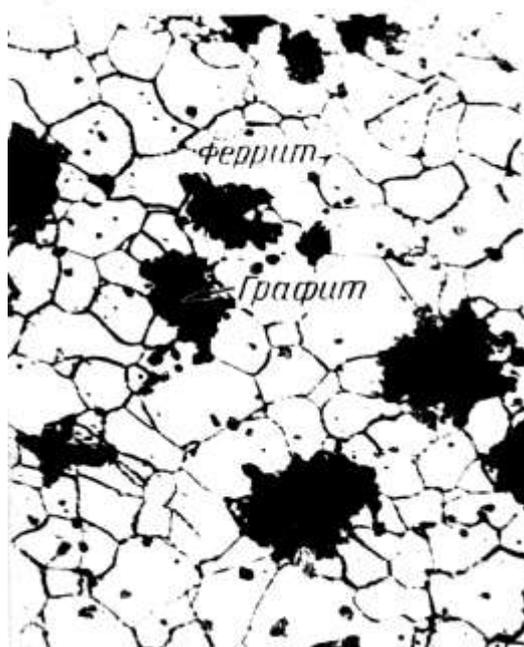


Рис. 47. Микроструктура ферритного ковкого чугуна  $\times 250$

В зависимости от вида отжига белого чугуна металлическая основа может иметь структуры: при одностадийном отжиге – ферритную, при двухстадийном – феррито-перлитную или перлитную.

Очень часто применяют ферритный ковкий чугун, так как он характеризуется повышенной пластичностью.

В автотранспортном и сельскохозяйственном машиностроении применяют ковкие чугуны марок КЧ37-12, КЧ35-10, КЧ50-4. Из них изготавливают картеры редукторов, рулевых механизмов, ступицы колес, педали и др.

### **Порядок выполнения работы**

Для выполнения лабораторной работы необходимо иметь коллекцию микрошлифов, состоящую из нетравленных шлифов серого чугуна (немодифицированного и модифицированного), протравленных шлифов белого, серого, высокопрочного и ковкого чугунов.

1. Изучить под микроскопом микрошлифы и определить структурные составляющие.
2. По структурным составляющим определить наименование чугуна (белый, серый, ковкий, высокопрочный).
3. Определить увеличение микроскопа.
4. Зарисовать схемы микроструктур.

### **Содержание отчёта**

В отчет необходимо включить участок диаграммы состояния сплавов системы *железо–углерод* для чугунов, проанализировать изменение структуры с увеличением содержания углерода. Описать виды чугунов, их структуру, свойства и применение. Рядом с зарисованными схемами микроструктур указать структурные составляющие, наименование чугуна, условия и метод получения, механические свойства (НВ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ , K<sub>SU</sub> – используя справочный материал). Объяснить влияние формы графита на механические свойства чугунов.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ II

1. Количество углерода, содержащегося в чугунах, более:

- A) 0,02 %;
- B) 0,8 %;
- C) 2,14 %;
- D) 4,3 %.

2. Количество углерода, содержащегося в сталях, менее:

- A) 0,02 %;
- B) 0,8 %;
- C) 2,14 %;
- D) 4,3 %.

3. Структурная составляющая, представляющая собой твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе:

- A) аустенит;
- B) перлит;
- C) феррит;
- D) цементит.

4. Структурная составляющая, представляющая собой твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе:

- A) аустенит;
- B) ледебурит;
- C) феррит;
- D) цементит.

5. Структурная составляющая, представляющая собой карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ):

- A) аустенит.
- B) ледебурит.
- C) феррит.
- D) цементит.

6. Структурная составляющая, представляющая собой физико-химическую смесь феррита и цементита:

- A) аустенит;
- B) ледебурит;

- C) перлит;
- D) феррит.

**7. Структурная составляющая, представляющая собой физико-химическую смесь аустенита и цементита:**

- A) аустенит;
- B) ледебурит;
- C) перлит;
- D) феррит.

**8. Участок диаграммы состояния системы сплавов железо–углерод, соответствующий протеканию эвтектоидной реакции:**

- A) область *QPSKL*;
- B) область *SECFK*;
- C) линия *ECF*;
- D) линия *PSK*.

**9. Участок диаграммы состояния системы сплавов железо–углерод, соответствующий протеканию эвтектической реакции:**

- A) линия *ECF*;
- B) область *SECFK*;
- C) область *EJBC*;
- D) линия *PSK*.

**10. Структурная составляющая железуглеродистых сплавов, обладающая при комнатной температуре наибольшей пластичностью:**

- A) аустенит;
- B) перлит;
- C) феррит;
- D) цементит.

**11. Структурная составляющая железуглеродистых сплавов с наибольшей твердостью:**

- A) аустенит;
- B) перлит;
- C) феррит;
- D) цементит.

**12. Количество углерода (C, %), которое содержится в углеродистой заэвтектоидной стали:**

- A)  $0,02 < C < 0,8$ ;
- B)  $4,3 < C < 6,67$ ;
- C)  $2,14 < C < 4,3$ ;
- D)  $0,8 < C < 2,14$ .

**13. Количество углерода (C, %), которое содержится в углеродистой эвтектоидной стали:**

- A)  $0,02 < C < 0,8$ ;
- B)  $4,3 < C < 6,67$ ;
- C)  $0,8$ ;
- D)  $0,8 < C < 2,14$ .

**14. Количество углерода (C, %), которое содержится в углеродистой доэвтектоидной стали:**

- A)  $0,02 < C < 0,8$ ;
- B)  $4,3 < C < 6,67$ ;
- C)  $2,14 < C < 4,3$  ;
- D)  $0,8 < C < 2,14$ .

**15. Структурный состав заэвтектоидной стали при температуре ниже 727 °С:**

- A) ледебурит + первичный цементит;
- B) феррит + третичный цементит;
- C) перлит + вторичный цементит;
- D) феррит + перлит.

**16. Структурный состав доэвтектоидной стали при температуре ниже 727 °С:**

- A) ледебурит + первичный цементит;
- B) феррит + третичный цементит;
- C) перлит + вторичный цементит;
- D) феррит + перлит.

**17. Структурный состав эвтектоидной стали при температуре ниже 727 °С:**

- A) перлит;
- B) феррит + третичный цементит;

- С) перлит + вторичный цементит;
- Д) феррит + перлит.

**18. Изменение механических свойств при увеличении содержания углерода в стали:**

- А) твердость и пластичность увеличиваются;
- В) твердость уменьшается, пластичность – увеличивается;
- С) твердость увеличивается, пластичность – уменьшается;
- Д) твердость и пластичность уменьшаются.

**19. Дополните:**

Структурная составляющая, представляющая собой физико-химическую смесь аустенита и цементита, называется \_\_\_\_\_.

**20. Дополните:**

Структурная составляющая, представляющая собой твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе, называется \_\_\_\_\_.

**21. Дополните:**

Структурная составляющая, представляющая собой карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), называется \_\_\_\_\_.

**22. Дополните:**

Сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14 % С, называются \_\_\_\_\_.

**23. Дополните:**

Сплавы железа с углеродом, содержащие менее 2,14 % С, называются \_\_\_\_\_.

**24. Структурная составляющая, представляющая собой пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе:**

- А) аустенит;
- В) мартенсит;
- С) феррит;
- Д) цементит.

**25. Марка стали, относящейся к заэвтектоидным:**

- А) Ст1кп;
- В) У10А;

- C) 10пс;
- D) А11.

**26. Марка стали, относящейся к доэвтектоидным:**

- A) Ст1кп;
- B) У10А;
- C) 40;
- D) 80.

**27. Марка стали, относящейся к эвтектоидным:**

- A) Ст1кп;
- B) У10А;
- C) 40;
- D) 80.

**28. Основной критерий для разделения сталей по качеству:**

- A) степень раскисления стали;
- B) степень легирования стали;
- C) содержание в стали серы и фосфора;
- D) прочность.

**29. Класс, к которому относится сталь Стбсп:**

- A) высококачественные стали;
- B) особо высококачественные стали;
- C) качественные стали;
- D) стали обыкновенного качества.

**30. Класс, к которому относится сталь 08кп:**

- A) высококачественные стали;
- B) особо высококачественные стали;
- C) качественные стали;
- D) стали обыкновенного качества.

**31. Класс, к которому относится сталь 45:**

- A) высококачественные стали;
- B) особо высококачественные стали;
- C) качественные стали;
- D) стали обыкновенного качества.

**32. Класс, к которому относится сталь А20:**

- А) углеродистые инструментальные стали;
- В) углеродистые высококачественные конструкционные стали;
- С) автоматные стали с высокой обрабатываемостью резанием;
- Д) конструкционная сталь, легированная азотом.

**33. Класс, к которому относится сталь У10А:**

- А) высококачественная углеродистая конструкционная сталь;
- В) высококачественная углеродистая инструментальная сталь;
- С) автоматная сталь;
- Д) конструкционная сталь, легированная азотом.

**34. Изделие, изготавливаемое из сталей марок 65, 70:**

- А) шестерня;
- В) пружина;
- С) сверло;
- Д) шарикоподшипник.

**35. Изделие, изготавливаемое из стали У96:**

- А) шестерня;
- В) пружина;
- С) сверло;
- Д) фреза.

**36. Изделие, изготавливаемое из стали 45:**

- А) вал;
- В) пружина;
- С) сверло;
- Д) фреза.

**37. Примесь, которая вызывает *красноломкость* стали:**

- А) марганец;
- В) водород;
- С) сера;
- Д) фосфор.

**38. Примесь, которая вызывает *хладноломкость* стали:**

- А) марганец;
- В) водород;

- C) сера;
- D) фосфор.

**39. Примесь, которая приводит к образованию в стали флокенов:**

- A) марганец;
- B) водород;
- C) сера;
- D) фосфор.

**40. Среднее содержание углерода в стали 30 (%) составляет:**

- A) 30;
- B) 3;
- C) 0,3;
- D) 0,03.

**41. Углеродистая сталь, в марке которой присутствует индекс «сп»:**

- A) кипящая;
- B) полуспокойная;
- C) спокойная;
- D) легированная.

**42. Углеродистая сталь, в марке которой присутствует индекс «кп»:**

- A) кипящая;
- B) полуспокойная;
- C) спокойная;
- D) легированная.

**43. Углеродистая сталь, в марке которой присутствует индекс «пс»:**

- A) кипящая;
- B) полуспокойная;
- C) спокойная;
- D) легированная.

**44. Среднее содержание углерода в стали 08 кп (%):**

- A) 0,08;

- В) 0,8;
- С) 8;
- Д) углерод в стали отсутствует.

45. Среднее содержание углерода в стали У13 (%):

- А) 0,13;
- В) 1,3;
- С) 13;
- Д) углерод в стали отсутствует.

46. Сталь обыкновенного качества:

- А) 40ХН;
- В) У7А;
- С) сталь 30;
- Д) Ст2пс.

47. Дополните:

Содержание углерода в стали 30 составляет около \_\_\_\_\_ %.

48. Дополните:

Содержание углерода в стали У13 составляет около \_\_\_\_\_ %.

49. Установите соответствие примеси стали ее влиянию на свойства стали:

*Примесь:*

- 1) сера;
- 2) марганец.

*Влияние на свойства:*

- А) увеличивает хрупкость при низких температурах;
- В) раскисляет вредные примеси;
- С) вызывает краснеломкость.

1 – \_\_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_\_.

50. Установите соответствие класса стали по назначению её марке:

*Класс:*

- 1) конструкционная качественная;
- 2) инструментальная.

*Марка:*

- А) БСт6;
- В) 45;
- С) У10.

1 – \_\_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_\_.

**51. Установите соответствие класса стали по химическому составу её марке:**

*Класс:*

- 1) низкоуглеродистая;
- 2) среднеуглеродистая.

*Марка:*

- A) 10;
- B) 45;
- C) У10.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**52. Установите соответствие класса стали по качеству её марке:**

*Класс:*

- 1) общего назначения;
- 2) высококачественная.

*Марка:*

- A) Ст5;
- B) 45;
- C) У10А.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**53. Установите правильную последовательность марок сталей, соответствующую возрастанию их твердости:**

- A) 10кп;
- B) У13А;
- C) 30;
- D) У10.

**54. Форма графита, который находится в белом чугуна:**

- A) хлопьевидная;
- B) в белом чугуна графита нет;
- C) шаровидная;
- D) пластинчатая.

**55. Форма графита, который находится в сером чугуна:**

- A) хлопьевидная;
- B) в белом чугуна графита нет;
- C) шаровидная;
- D) пластинчатая.

**56. Форма графита, который находится в ковком чугуна:**

- A) хлопьевидная;
- B) в белом чугуна графита нет;
- C) шаровидная;
- D) пластинчатая.

**57. Форма графита, который находится в высокопрочном чугуна:**

- A) хлопьевидная;
- B) в белом чугуна графита нет;
- C) шаровидная;
- D) пластинчатая.

**58. Вид чугуна (серого, ковкого, высокопрочного) определяют:**

- A) по размеру графитных включений;
- B) характеру металлической основы;
- C) форме графитных включений;
- D) количеству графитных включений.

**59. Форма графита в чугуна марки КЧ35-10:**

- A) пластинчатая;
- B) хлопьевидная;
- C) в этом чугуна графита нет;
- D) шаровидная.

**60. Форма графита в чугуна СЧ40:**

- A) пластинчатая;
- B) хлопьевидная;
- C) в этом чугуна графита нет;
- D) шаровидная.

**61. Форма графита в чугуна ВЧ40-12:**

- A) пластинчатая;
- B) хлопьевидная;
- C) в этом чугуна графита нет;
- D) шаровидная.

**62. Число 10 в марке сплава КЧ35-10:**

- A) относительное удлинение, %;
- B) ударная вязкость, кДж/м<sup>2</sup>;
- C) временное сопротивление (предел прочности), кг/мм<sup>2</sup>;
- D) предел текучести, МПа.

**63. Число 40 в марке сплава СЧ40:**

- A) предел текучести, МПа;

- В) предел прочности при изгибе, кг/мм<sup>2</sup>;
- С) ударная вязкость, кДж/м<sup>2</sup>;
- Д) временное сопротивление (предел прочности при растяжении), кг/ мм<sup>2</sup>.

**64. Обозначение высокопрочного чугуна:**

- А) КЧ30-5;
- В) СЧ35;
- С) ВЧ50-2;
- Д) ЖЧЮ-22.

**65. Обозначение ковкого чугуна:**

- А) КЧ30-5;
- В) СЧ35;
- С) ВЧ50-2;
- Д) ЖЧЮ-22.

**66. Обозначение серого чугуна:**

- А) КЧ30-5;
- В) СЧ35;
- С) ВЧ50-2;
- Д) ЖЧЮ-22.

**67. Чугун, который получают путем модифицирования жидкого расплава магнием или церием:**

- А) серый;
- В) белый;
- С) высокопрочный;
- Д) ковкий.

**68. Чугун, который получают путем специального графитизирующего отжига отливок доэвтектического чугуна:**

- А) серый;
- В) белый;
- С) высокопрочный;
- Д) ковкий.

**69. Сплав, который лучше использовать для изготовления блока цилиндров тракторов:**

- A) серый чугун;
- B) ковкий чугун;
- C) сталь;
- D) высокопрочный чугун.

**70. Вид углерода в белых чугунах при комнатной температуре:**

- A) хлопьевидный графит;
- B) глобулярный графит;
- C) цементит;
- D) пластинчатый графит.

**71. Цель модификации чугуна при выплавке:**

- A) повышение коррозионной стойкости;
- B) изменение структуры основы;
- C) измельчение зерна;
- D) изменение формы графитовых включений.

**72. Отличие белых чугунов от серых:**

- A) наличие аустенитной фазы;
- B) наличие в структуре химически связанного углерода в виде цементита;
- C) высокие пластичность и вязкость;
- D) ферритная структура основы.

**73. Дополните:**

Чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму, называются \_\_\_\_\_.

**74. Дополните:**

Чугуны, в которых графит имеет пластинчатую форму, называются \_\_\_\_\_.

**75. Дополните:**

Значение относительного удлинения  $\delta$  (%) в чугуне ВЧ 50-2, составляет \_\_\_\_\_.

**76. Установите соответствие вида чугуна его марке:**

- |                    |               |
|--------------------|---------------|
| <i>Вид чугуна:</i> | <i>Марка:</i> |
| 1) высокопрочный;  | A) СЧ35;      |

2) ковкий.

В) КЧ30-5;

С) ВЧ50-5.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**77. Установите соответствие марки чугуна форме графита в его структуре:**

*Марка:*

1) СЧ35;

2) КЧ30-5.

*Форма графита:*

А) шаровидная;

В) пластинчатая;

С) хлопьевидная.

# ГЛАВА III. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

## ТЕМА 7. ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

### 7.1. Превращения переохлажденного аустенита

Как было сказано выше, равновесные превращения железоуглеродистых сплавов, описываемых диаграммой *железо-углерод*, происходят при непрерывном и медленном охлаждении (или нагреве).

С повышением скорости охлаждения сплава снижаются критические точки превращения и увеличивается степень переохлаждения аустенита (рис. 48).

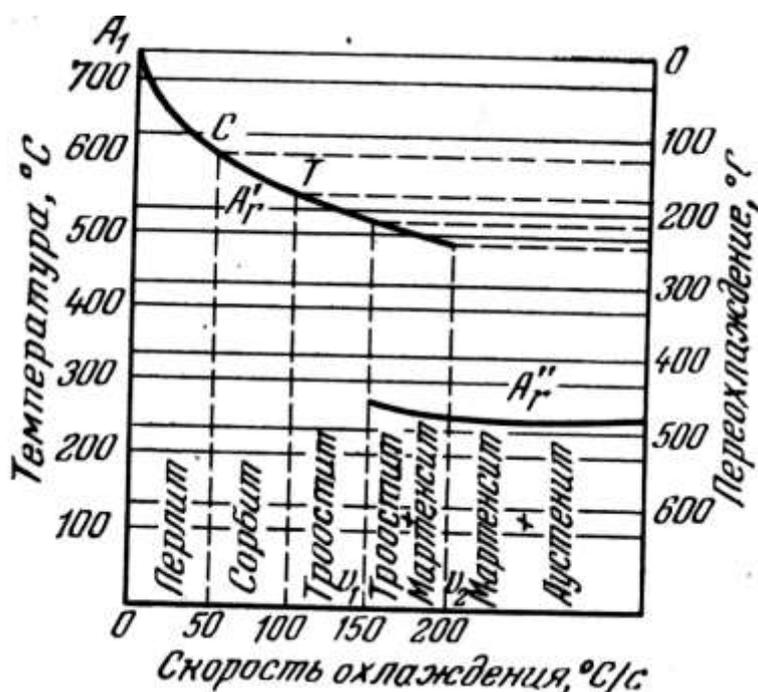


Рис. 48. Влияние скорости охлаждения на снижение критических точек превращения аустенита и на структуру

При скорости охлаждения 150 град/с критическая точка  $A_{r1}$  снижается с 727 до 500 °C. Аустенит распадается на механическую смесь феррита и цементита, и чем ниже температура распада аустенита, тем более дисперсны пластинки цементита в феррите. В зависимости от дисперсности цементита образуются структуры *перлит* ( $A_{r1}$  выше 600 °C), *сорбит* ( $A_{r1}$  от 600 до 550 °C), *троостит* ( $A_{r1}$  от

550 до 500 °С). Переход от одной структуры к другой происходит постепенно. Перлит имеет сравнительно крупные включения цементита в феррите, сорбит – мелкие. В троостите мелкодисперсную смесь можно рассмотреть только при увеличении в 20000 раз и выше. С повышением степени дисперсности смеси увеличивается прочность, твердость и снижается пластичность стали (табл. 13).

Таблица 13

Изменение свойств сплава в зависимости от структуры (0,8 % С)

Структура	Твердость НВ, МН/м <sup>2</sup>	Прочность $\sigma_s$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Степень дисперсности, 10 <sup>-3</sup> мм
Перлит	2000	686	12	0,7
Сорбит	3000	1176	5	0,25
Троостит	4000	1470	3	0,1
Мартенсит	6000	1764	0	-

При больших степенях переохлаждения (230 °С) весь углерод, растворенный в  $\gamma$ -железе, остается в решетке  $\alpha$ -железа. Это происходит в условиях, когда скорость диффузии углерода очень мала (бездиффузионное превращение). Так как  $\alpha$ -железо максимально растворяет 0,02 % С, а в исходной фазе – аустените может содержаться до 2,14 % С, то образуется пересыщенный твердый раствор в  $\alpha$ -железе, который называется *мартенсит*.

Мартенсит характеризуется очень высокой твердостью НВ 5500–6500, МН/м<sup>2</sup>, износостойкостью и хрупкостью. Это объясняется тем, что при образовании пересыщенного твердого раствора кристаллическая решетка  $\alpha$ -железа сильно искажается, к тому же увеличение объема при превращении аустенита в мартенсит приводит к фазовому наклепу, измельчению блочной структуры и росту внутренних напряжений.

Изменение структуры металла в зависимости от степени переохлаждения аустенита используют при термической обработке для получения требуемых эксплуатационных и технологических свойств деталей машин.

## 7.2. Изотермические превращения аустенита

Превращение аустенита можно наблюдать при охлаждении сплава ниже  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выдержке при этой температуре в печи или в ванне с жидким расплавом. В начальный период (от долей секунд до нескольких суток) аустенит не претерпевает никаких превращений (это так называемый инкубационный период), затем он быстро превращается в структуру, соответствующую степени его переохлаждения. Дальнейшая выдержка не вызывает никаких изменений в структуре. Такие превращения в аустените называются *изотермическими*. Для описания кинетики превращения переохлажденного аустенита на диаграмму (рис. 49) наносят точки начала  $H$  и конца  $K$  изотермических превращений. Соединяя соответствующие точки, получают S-образные кривые начала и конца превращений. Слева от кривой начала изотермических превращений находится зона инкубационного периода,  $H_1$  и  $K_1$  – начало и конец распада аустенита в перлит,  $H_2$  и  $K_2$  – в сорбит,  $H_3$  и  $K_3$  – в троостит. Линия  $M_H$  ( $\approx 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) соответствует началу, а  $M_K$  – концу мартенситного превращения. Наименьшая скорость охлаждения, при которой получается мартенситная структура, называется критической и обозначается  $v_{кр}$ .

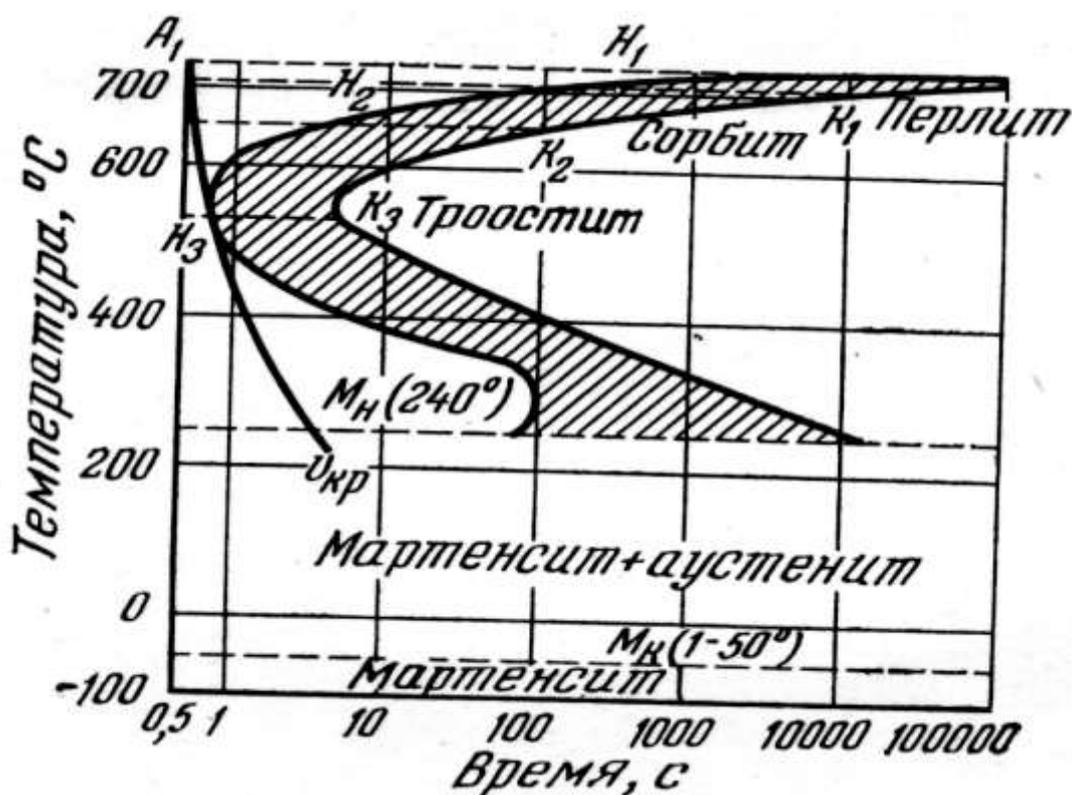


Рис. 49. Диаграмма изотермического превращения аустенита в эвтектоидной стали

### 7.3. Термическая обработка стали

*Термической* называют обработку, связанную с нагревом и охлаждением металла с целью изменения его структуры и свойств.

Температурные режимы термообработки сталей связаны с диаграммой Fe-Fe<sub>3</sub>C. Равновесные температуры, отвечающие положению линий *PSK*, *GS* и *SE* диаграммы, обозначают  $A_1$ ,  $A_3$  и  $A_m$  соответственно. При нагреве равновесные температуры превращений обозначают: перлита в аустенит –  $A_{c1}$ ; превращений, связанных с получением однофазной аустенитной структуры, –  $A_{c3}$  (для доэвтектоидных сталей),  $A_{cm}$  (для заэвтектоидных). При обычных скоростях нагрева неравновесные температуры на 30–50 °С выше соответствующих равновесных.

В зависимости от склонности аустенитного зерна при нагреве к росту различают *наследственно крупнозернистые* (зерно склонно к росту) и *наследственно мелкозернистые* (зерно не склонно к росту) стали. Свойства стали, возникшие в результате той или иной обработки, определяются реально образовавшимся зерном – действительным зерном. Наследственная зернистость должна учитываться при назначении режимов обработки, влияющей на размер получаемого действительного зерна, например при закалке, отжиге.

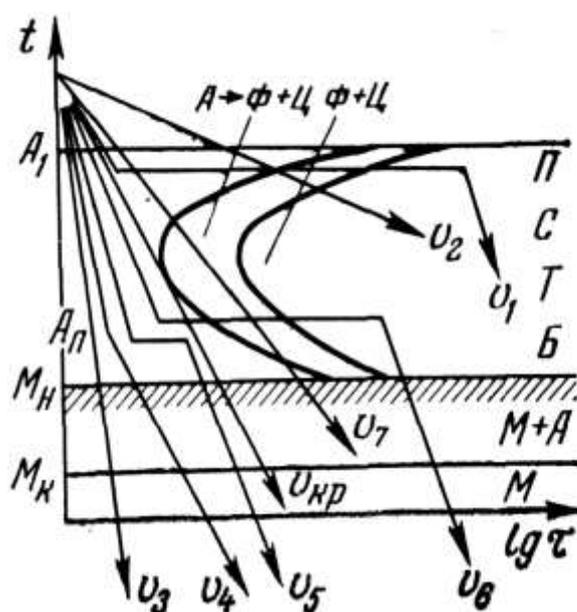


Рис. 50. Скорости охлаждения при термической обработке:

- $v_1$  – изотермический отжиг;  $v_2$  – нормализация;
- $v_3$  – закалка в одной среде;  $v_4$  – закалка в двух средах;
- $v_5$  – ступенчатая закалка;  $v_6$  – изотермическая закалка;
- $v_7$  – неполная закалка;  $v_{кр}$  – критическая скорость закалки

Охлаждение стали при термической обработке производят с различной скоростью (см. рис. 50). При этом аустенит будет претерпевать превращения в зависимости от степени переохлаждения, что определяет вид термической обработки.

Основными видами термической обработки сталей являются отжиг (первого и второго рода), нормализация, закалка, отпуск (рис. 51).

#### 7.4. Отжиг и нормализация

*Отжиг* состоит в нагреве металла, выдержке и последующем медленном охлаждении (вместе с печью). Отжиг приближает металл к равновесию.

Отжиг первого рода проводят для получения более равновесной, чем исходная, структуры, не связывая эту цель с наличием или отсутствием фазовой перекристаллизации. Примерами отжига первого рода являются рекристаллизационный отжиг, диффузионный отжиг.

При рекристаллизационном отжиге деформационно упрочненный металл нагревают несколько выше температурного порога рекристаллизации (рис. 51).

В результате отжига материал приобретает такие же механические свойства, какие он имел до деформации.

Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг проводят при нагреве до высоких температур ( $0,8-0,9 T_{пл}$ ), предполагающих интенсивную диффузию атомов. Такому отжигу подвергают, например, отливки для устранения дендритной ликвации (гомогенизации сплава).

При отжиге второго рода непременно протекает, хотя бы частичная, фазовая перекристаллизация. К отжигу второго рода относятся неполный отжиг, полный отжиг.

При неполном отжиге нагрев ведут до температуры  $A_{c1}$  (ниже  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$ ). Происходит частичная перекристаллизация сплава (меняется перлитная составляющая). Чаще неполный отжиг применяют для заэвтектоидных сталей (сфероидизирующий отжиг). В результате неполного отжига цементит приобретает округленную или зернистую форму. Неполный отжиг снижает твердость и улучшает обрабатываемость инструментальных сталей.

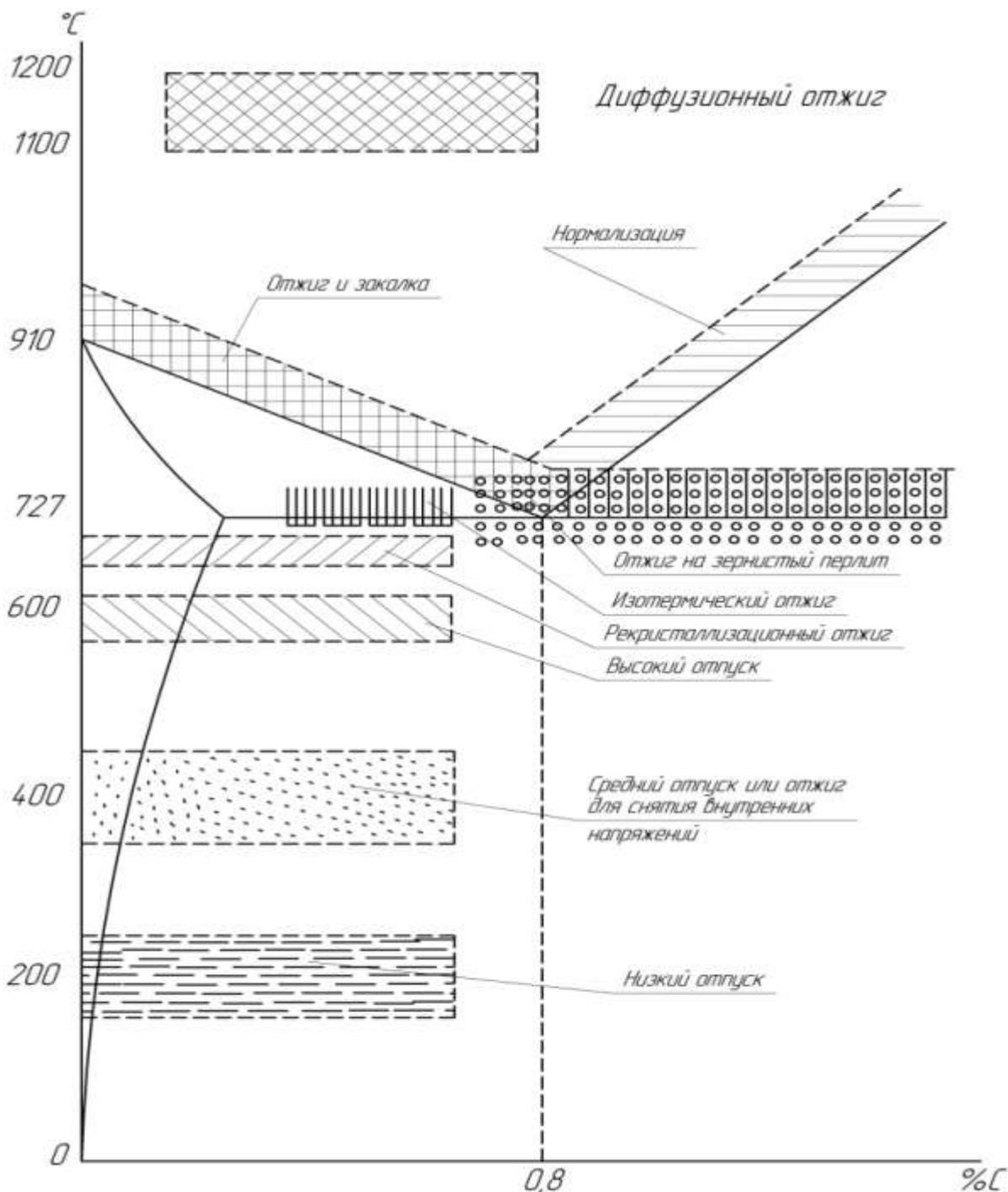


Рис. 51. Температура нагрева стали при различных видах термической обработки

При полном отжиге доэвтектоидную сталь нагревают до  $A_{c3}$ . Происходит полная перекристаллизация сплава. В результате полного отжига получается равновесная, свободная от внутренних напряжений, мягкая и вязкая структура.

При *нормализации* сталь нагревают до аустенитного состояния (на 30–50 °С выше линии  $GSE$ ), выдерживают и охлаждают на воздухе. После нормализации сталь приобретает мелкозернистую и одно-

родную структуру. Нормализацией снимают внутренние напряжения, повышают механические свойства сталей. Для низкоуглеродистой стали нормализация может заменить отжиг, а для средне- и высокоуглеродистой стали – закалку с высоким отпускком. Она является экономичной и производительной операцией и широко распространена в машиностроении.

## 7.5. Закалка

*Закалка* состоит в нагреве сплавов выше температур фазовых превращений и последующем быстром охлаждении с целью сохранения неустойчивых (метастабильных) структур, появление которых вызывает повышение твердости и прочности.

Применительно к сталям нагрев при закалке обычно ведут до температуры  $A_{c3}$  (доэвтектоидные стали) и  $A_{c1}$  (заэвтектоидные стали). Если нагрев ведется до температур  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$ , то такая закалка называется полной, если до  $A_{c1}$  – неполной.

Для доэвтектоидной стали наивысшую твердость получают при полной закалке. Неполная закалка, вследствие наличия мягкого феррита в структуре стали, не может обеспечить получения высокой твердости.

Для заэвтектоидной стали наилучшие результаты получают при неполной закалке, так как после охлаждения образуется структура мартенсита с включениями вторичного цементита, который повышает твердость и износостойкость стали. Полная закалка для этих сталей (нагрев выше линии SE) вызывает перегрев и лишние термические напряжения, а твердость даже снижается за счет растворения цементита и наличия остаточного аустенита.

Нагрев стали проводят в печах или в ваннах с расплавленными солями. Нагревательная среда оказывает большое влияние на состояние поверхностного слоя детали. При нагреве в печи поверхностный слой стали окисляется и обезуглераживается. Для предотвращения этого нагрев желательно проводить в искусственно создаваемой защитной атмосфере.

В зависимости от скорости охлаждения существуют два принципиально различных способа закалки – закалка на ферритно-цементитные смеси и закалка на мартенсит. При охлаждении со скоростью ниже критической, то есть такой минимальной скорости, которая необходима для образования мартенсита, возникают структуры

перлитного типа (перлит, сорбит, троостит, бейнит). Сорбит и троостит отличаются от перлита и друг от друга степенью дисперсности (троостит дисперснее сорбита, а последний – перлита). Чем структура дисперснее, тем выше ее механические свойства.

Охлаждение со скоростью выше критической ведет к превращению аустенита в мартенсит. Суть превращения состоит в перестройке кристаллической решетки аустенита (ГЦК) в решетку феррита (ОЦК). При этом углерод, растворенный в аустените, оказывается полностью в решетке феррита. Таким образом, мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в феррите. Кристаллическая решетка мартенсита – тетрагональная (искаженная решетка феррита с увеличенным параметром  $c$ ).

Если при полной закалке (полном отжиге) охлаждение нагретой заготовки ведут на спокойном воздухе, то такая термическая обработка называется *нормализацией*.

Большинство легирующих элементов, растворенных в аустените, повышают его временную устойчивость, сдвигая С-образные кривые изотермического превращения аустенита вправо по координатной оси времени. При этом критическая скорость закалки уменьшается (в сталях мартенситного типа этого уменьшения оказывается достаточно, чтобы уже при нормализации получить мартенситную структуру).

Мартенситное превращение не захватывает всю аустенитную структуру. Часть аустенита сохраняется в закаленной стали. Такой аустенит называют остаточным. Количество остаточного аустенита определяется режимами термической обработки и зависит от температур начала и конца мартенситного превращения.

Мартенсит – самая твердая структура, образующаяся при термообработке сталей. Чем больше в нем углерода, тем он тверже.

Температура начала мартенситного превращения ( $M_n$  на рис. 50) не зависит от скорости охлаждения, но определяется составом сплава. Углерод и большинство легирующих элементов сдвигают точки начала и конца мартенситного ( $M_k$  на рис. 50) превращения к более низким температурам.

Мартенсит – термодинамически неустойчивая структура. Нагрев, повышая подвижность атомов, приводит к образованию более устойчивых структур (троостита, сорбита, перлита). С повышением температуры снижается твердость и возрастает пластичность сплава.

Охлаждение при закалке производят в различных средах: воде, растворах солей в воде, минеральном масле, на спокойном воздухе. Наивысшей охлаждающей способностью обладают солевые растворы и вода. Охлаждение в масле происходит значительно медленнее. Охлаждающая среда оказывает влияние на *закаливаемость* и *прокаливаемость* стали данной марки.

*Закаливаемость* – это способность металла повышать твердость при закалке. *Прокаливаемость* – это глубина, на которую распространяется закаленная область. При сквозной прокаливаемости свойства материала однородны и достаточно высоки по всему сечению. Количественно прокаливаемость оценивается критическим диаметром, под которым понимают наибольший диаметр прутка, прокаливающегося насквозь (в центре возникает полумартенситная структура, состоящая на 50 % из троостита и на 50 % из мартенсита) в данном охладителе. Чем больше скорость теплоотвода (охлаждения), тем на большую глубину прокаливается изделие. Поэтому критический диаметр при охлаждении в воде больше, чем в масле, и тем более больше, чем на воздухе. Особенно сильно увеличивают прокаливаемость сталей легирующие элементы (кроме кобальта), растворенные в аустените. Критический диаметр зависит от критической скорости закалки. Чем скорость меньше, тем больше диаметр.

В практике используют различные способы закалки в зависимости от требуемых свойств изделия и марки стали. Они отличаются друг от друга процессом охлаждения.

*Закалка в одном охладителе* – наиболее простой способ охлаждения и применяется для деталей несложной формы. Нагретую деталь погружают в закалочную жидкость, где она остается до полного охлаждения. Для углеродистых сталей диаметром более 5 мм закалочной средой служит вода, а для деталей меньших размеров – масло.

*Закалка в двух средах* применяется для деталей более сложной формы. Нагретую деталь вначале охлаждают в воде, а затем переносят в масло. При этом мартенситный интервал проходят при сравнительно медленном охлаждении. Обычно этот способ используют при закалке инструментов.

*Закалка с самоотпуском* проводится в одном охладителе и прерывается, когда сердцевина имеет еще значительное количество тепла. За счет этого тепла поверхностные слои нагреваются, и их вязкость повышается. Такую закалку применяют для ударного инструмента (зубила, керны, кузнечный инструмент и др.).

*Ступенчатая закалка* выполняется при охлаждении нагретой детали в охладителе, имеющем температуру на 30–50 °С выше  $M_n$ , и выдержке для выравнивания температуры по всему сечению изделия. Время выдержки должно быть меньше времени устойчивости аустенита при этой температуре. После выдержки (в расплаве солей или металлов) деталь охлаждают медленнее, что способствует уменьшению закалочных напряжений. Этот способ применяется для закалки изделий диаметром 10–30 мм.

*Изотермическая закалка* отличается от ступенчатой выдержкой в закалочной среде до окончания превращения аустенита. В результате изотермического распада аустенита образуется структура бейнит, сталь обладает меньшей твердостью и повышенной вязкостью.

В ряде случаев применяют закалку, при которой высокому нагреву подвергают лишь поверхностный слой материала (*поверхностная закалка*). В результате поверхностной закалки изделие приобретает высокую поверхностную твердость, сердцевина же остается вязкой. Широко применяют закалку с индукционным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ). Чем выше частота тока, тем тоньше слой, в котором индуцируются токи, и тем тоньше окажется закаленный слой.

Преимущества закалки ТВЧ: высокая производительность, минимальные коробления, возможность регулирования глубины закаленного слоя и полной автоматизации процесса.

*Пламенная поверхностная закалка* выполняется при нагревании поверхности детали пламенем газовых или кислородно-ацетиленовых горелок. Данный метод применяют главным образом для закалки изделий с большой поверхностью, при индивидуальном производстве или ремонте. Толщина закаленного слоя достигает 2–4 мм.

## 7.6. Отпуск

Термическая обработка, состоящая в нагреве закаленной стали до температуры ниже  $A_{c1}$ , выдержке и последующем охлаждении с произвольной скоростью, называется *отпуском*. Отпуск стали выполняется после закалки для частичного или полного устранения внутренних напряжений, повышения вязкости и пластичности, уменьшения ее твердости и хрупкости. Чем выше нагрев, тем в большей степени структура приближается к равновесной. Различают три вида отпуска: низкий ( $t = 150\text{--}250$  °С), средний ( $t = 350\text{--}450$  °С) и высокий ( $t = 500\text{--}680$  °С).

При *низком отпуске* закаленную сталь нагревают до температур 150–200 °С. При этих температурах в отдельных участках мартенсита выделяются тончайшие пластины карбидов железа. Однако при указанной температуре кристаллы не растут. Скорость диффузии мала и концентрация не успевает выравняться. После соответствующей выдержки и охлаждения в детали получают структуру *отпущенного мартенсита*, при этом частично снимаются внутренние напряжения. Низкий отпуск применяют для инструментальных сталей и деталей, которые должны сохранить поверхностную твердость после закалки.

При *среднем отпуске* сталь нагревают до 350–400 °С. Скорость диффузии увеличивается, и весь избыточный углерод выделяется из  $\gamma$ -решетки, карбидные частички обособляются и начинают расти. Образующаяся мелкозернистая смесь феррита и цементита называется трооститом отпуска.

После такого отпуска в изделиях получается сочетание сравнительно высокой твердости (HRC 40–50) и прочности с хорошей упругостью и вязкостью. Среднему отпуску подвергают пружины, рессоры, ударные инструменты.

При *высоком отпуске* сталь нагревают до температур 500–680 °С. При этой температуре частички карбида растут и коагулируются. Такая структура называется сорбитом отпуска. Высокий отпуск применяют для деталей машин, работающих при знакопеременных и ударных нагрузках.

Сочетание закалки и высокого отпуска называют *улучшением*, а стали, предназначенные для такой обработки (среднеуглеродистые стали), – улучшаемыми.

В некоторых случаях нагрев при отпуске заменяют длительной выдержкой при нормальной температуре. Такая обработка называется *старением*. Если старение проводят с небольшим нагревом, то его называют искусственным.

Обычно при среднем отпуске образуется трооститная структура, при высоком – сорбитная. От одноименных структур закалки троостит и сорбит отпуска отличается тем, что цементитные частицы в них имеют зернистую форму (в структурах закалки – пластинчатую).

К термической обработке примыкает так называемая *термомеханическая обработка* сплавов. Термомеханической обработкой (ТМО) называют процесс изменения строения и свойств сплава за счет сочетания пластической деформации и термической обработки. При этом фазовые превращения в сплаве происходят под влиянием

предварительного наклепа промежуточной метастабильной структуры (аустенита или мартенсита). ТМО повышает прочностные характеристики стали при незначительном снижении пластичности и ударной вязкости. В зависимости от температуры, при которой деформируют деталь, различают высокотемпературную (ВТМО) и низкотемпературную (НТМО) термомеханическую обработку.

### Контрольные вопросы

1. Как увеличивается прочность, твердость и снижается пластичность стали с изменением дисперсности феррито-цементитных смесей?
2. Что обозначают символы  $M_n$  и  $M_k$  на линиях диаграммы изотермического распада аустенита?
3. Что такое мартенсит?
4. Какую кристаллическую решетку имеет мартенсит?
5. Какова цель термической обработки сплавов?
6. Перечислите виды отжига.
7. Какова цель отжига?
8. Как изменяется структура стали после нормализации?
9. Какой вид закалки рекомендован для доэвтектоидных сталей, а какой – для заэвтектоидных и почему?
10. Что такое критическая скорость охлаждения при закалке?
11. В каких охлаждающих средах можно проводить закалку углеродистых и легированных сталей?
12. Дайте определение *закаливаемости* и *прокаливаемости* сталей.
13. Какой вид закалки рекомендуется проводить для получения высокой твердости поверхностного слоя с сохранением вязкой сердцевины? Какова технология этого вида закалки?
14. Какова цель отпуска закаленных сталей?
15. Перечислите виды отпуска и различия технологии их проведения.
16. Что такое *старение* стали?
17. Что такое термомеханическая обработка сплавов? Как изменяются механические свойства сплавов при ее проведении?

## ТЕМА 8. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Химико-термической обработкой (ХТО) называют процесс изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя сплавов. При этом повышается поверхностная твердость, износостойкость, усталостная прочность, жаростойкость и коррозионная стойкость деталей.

В основе ХТО лежат процессы диссоциации, абсорбции и диффузии.

*Диссоциация* связана с получением насыщающего элемента в активном атомарном состоянии. *Абсорбция* – накопление поверхностью детали атомов насыщающего элемента. В результате *диффузии* происходит перемещение атомов в глубь изделия.

К химико-термической обработке относятся цементация, азотирование, цианирование и диффузионная металлизация.

### 8.1. Цементация стали

*Цементацией* называется процесс насыщения стали углеродом для получения детали с твердой поверхностью и вязкой сердцевиной. Цементируют обычно изделия, работающие одновременно на истирание и удар, изготовленные из углеродистой и легированной стали с содержанием углерода 0,15–0,35 % С.

При цементации деталь нагревают в углеродсодержащих веществах до аустенитного состояния (880–1000 °С) и выдерживают длительное время, чтобы произошла диффузия углерода с поверхности в глубь изделия. Насыщают поверхностный слой до 0,8–1,2 % С на глубину до 3 мм. Средняя скорость цементации – 0,1 мм/ч.

После цементации поверхностный слой приобретает структуру эвтектоидной и заэвтектоидной стали. Необходимое упрочнение слоя достигается последующей закалкой и низким отпуском. После термообработки поверхностный слой изделия состоит из высокоуглеродистого мартенсита, сердцевина – из низкоуглеродистого вязкого мартенсита (при достаточной прокаливаемости) или сохраняет ферритно-перлитную структуру доэвтектоидной стали.

Вещества, применяемые для науглероживания, называются карбюризаторами. В зависимости от вида применяемого карбюризатора различают газовую и твердую цементацию.

*Газовая цементация* – наиболее производительный и прогрессивный метод науглероживания стали. Детали нагревают в герметичных печах в атмосфере углеродсодержащих газов (метан, природный газ, углекислый газ). При высокой температуре происходит диссоциация углерода ( $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ ;  $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ ) и процесс насыщения аустенита атомарным углеродом.

Твердая цементация – старый метод ХТО. Детали упаковывают в металлические ящики, пересыпая их твердым карбюризатором – смесью древесного угля с активаторами ( $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) и нагревают в печи. При температуре цементации углекислые соли легко распадаются с выделением углекислого газа  $\text{BaCO}_3 \rightarrow \text{BaO} + \text{CO}_2$ . Углекислый газ, вступая в реакцию с твердым углем карбюризатора, образует окись углерода  $\text{CO}_2 + \text{C}_{\text{уг}} \rightarrow 2\text{CO}$ . Окись углерода в присутствии железа разлагается на атомарный углерод и двуокись углерода  $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ . Выделившийся атомарный углерод растворяется в аустените и диффундирует в глубь изделия.

Цементация твердым карбюризатором по сравнению с газовой требует больше времени, трудоемка и плохо поддается автоматизации. Однако простота осуществления делает данный метод доступным в условиях ремонтного производства.

## 8.2. Азотирование стали

Азотированием называют процесс насыщения поверхностного слоя стали азотом с целью повышения твердости, износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости изделия. Этот процесс основан на способности железа при определенных условиях поглощать и растворять в себе атомарный азот. Азотированию подвергают легированную сталь, содержащую хром, молибден, алюминий, вольфрам. Повышение твердости и коррозионной устойчивости изделия достигается благодаря образованию в его поверхностном слое измельченных нитридов – химических соединений азота с металлом. Азотирование проводят в специальных герметичных печах при 500–520 °С, в атмосфере аммиака, который при нагреве диссоциирует по реакции  $2\text{NH}_3 = 2\text{N} + 6\text{H}$ .

Атомарный азот поглощается поверхностью и диффундирует в глубь детали, образуя твердые растворы и химические соединения – нитриды ( $\text{AlN}$ ,  $\text{MoN}$  и др.).

Глубина азотированного слоя 0,3–0,6 мм, при этом твердость поверхностного слоя достигает HV 10000–12000 МН/м<sup>2</sup>. Скорость азотирования составляет около 0,01 мм за час выдержки.

Азотирование проводят после закалки, высокого отпуска и окончательной механической обработки.

Азотирование имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией: обеспечивает более высокую твердость, которая сохраняется при более высоких температурах (600–650 °С); повышает предел усталости. Однако азотированный слой отличается значительной хрупкостью.

Азотированию подвергают шейки валов, клапаны, шестерни, шаблоны и др. В пищевом машиностроении применяют азотирование чаще всего для того, чтобы получить коррозионно стойкий поверхностный слой, при этом не преследуется цель повышения его твердости. Такому азотированию могут подвергаться изделия из обычной углеродистой стали. Это так называемое антикоррозионное азотирование. Оно осуществляется обычно на глубину 0,02–0,04 мм при более высоких температурах и значительно меньших выдержках.

При антикоррозионном азотировании высокоуглеродистых сталей совмещают процесс азотирования и закалки. После выдержки при температуре азотирования изделия закаливают в воде или масле, а затем отпускают.

### 8.3. Цианирование стали

Цианированием называют процесс одновременного насыщения поверхности стали углеродом и азотом с целью повышения твердости, износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости. Этот вид ХТО занимает промежуточное место между цементацией и азотированием. Совместная диффузия углерода и азота происходит быстрее, чем каждого элемента в отдельности.

Цианирование бывает высокотемпературным (при 800–950 °С) и низкотемпературным (при 540–560 °С).

*При высокотемпературном цианировании* поверхность насыщается до 0,8–1,2 % С и 0,2–0,3 % N на глубину 1–2 мм за 5–6 часов. После цианирования изделие подвергают закалке и низкому отпуску. В отличие от цементации при этом повышается и коррозионная стойкость изделия.

*При низкотемпературном цианировании* поверхность насыщают главным образом азотом на глубину 0,01–0,03 мм (выдержка до одного часа). Процесс применяют для обработки инструмента из быстрорежущей стали, прошедшей термическую обработку. При этом значительно повышается стойкость режущего инструмента.

Цианирование проводят в жидких или газовых средах.

*Жидкое цианирование* выполняют в ваннах с раствором цианистых солей (NaCN, KCN, Ca(CN)<sub>2</sub> и др.). При температуре протекания процесса эти соли разлагаются, выделяя активные атомы С и N, которые диффундируют в металл. Цианистые соли очень ядовиты, что является недостатком жидкого цианирования.

*Газовое цианирование* (нитроцементацию) проводят в смеси науглероживающих и азотирующих газов (углеродсодержащие газы и аммиак).

#### **8.4. Диффузионная металлизация**

Диффузионной металлизацией называется процесс поверхностного насыщения слоя стали различными металлами с целью повышения износостойкости, коррозионной стойкости и жаростойкости изделия. Наибольшее применение получили процессы алитирования, борирования, силицирования, диффузионного хромирования.

*Алитирование* (насыщение алюминием) применяют главным образом для повышения окалиностойкости деталей из низкоуглеродистых сталей, работающих при повышенной температуре (газоотводные трубы двигателей, камеры и т.д.). Толщина алитированного слоя достигает 0,4 мм за 6 часов. Высокая окалиностойкость объясняется образованием на поверхности прочной пленки окиси алюминия.

*Борирование* (насыщение бором) применяют для повышения твердости, износостойкости, теплостойкости и коррозионной стойкости изделия. На поверхности образуется слой толщиной до 0,2 мм (при выдержке 6–8 часов), состоящий из боридов железа и твердого раствора бора в феррите. Твердость борированного слоя на углеродистой стали достигает HV 20000 (Мн/м<sup>2</sup>).

*Силицирование* (насыщение кремнием) применяют для повышения жаростойкости, коррозионной стойкости, сопротивления износу. Процесс насыщения кремнием протекает при 1000–1200 °С, время выдержки 2–12 часов, толщина диффузионного слоя достигает 1 мм.

*Хромирование* (насыщение хромом) применяют для повышения кислотостойкости и коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей и для увеличения твердости и износостойкости средне- и высокоуглеродистой стали. Процесс хромирования ведут в течение 6–12 часов при 1000–1500 °С, твердость полученного слоя достигает HV 20000 Мн/м<sup>2</sup>.

В промышленности хромирование применяют для упрочнения лопаток газовых турбин, деталей форсунок, насосов, поршневых колец, режущего инструмента и т.д.

Как и при других видах ХТО, 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 летучее соединение хлора с металлом (AlCl<sub>3</sub>; CrCl<sub>2</sub>; SiCl<sub>4</sub> и т.д.), которое в результате контакта с металлической поверхностью диссоциирует с образованием свободных атомов.

Жидкую диффузионную металлизацию проводят погружением детали в расплавленный металл.

Газовую диффузионную металлизацию проводят в газовых средах, являющихся хлоридами различных металлов.

Диффузионная металлизация является дорогостоящим процессом. Только особые свойства слоя и возможность экономии легирующих элементов обуславливают применение этого метода в промышленности.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите цели химико-термической обработки сплавов.
2. Какие химические процессы лежат в основе ХТО?
3. Что такое диссоциация?
4. Что такое диффузия?
5. Какие свойства приобретает сталь после ее цементации?
6. Какие стали подвергают цементации?
7. Какую термическую обработку необходимо проводить после цементации стали?
8. Какие стали подвергают азотированию и в каких целях?
9. Как осуществляют процесс азотирования?

10. Какая термическая обработка сопровождает процесс азотирования?
11. Какие детали подвергают азотированию?
12. Что такое цианирование стали?
13. В чем преимущества и недостатки цианирования по сравнению с цементацией и азотированием?
14. В каких средах проводят твердую, жидкую и газовую диффузионную металлизацию?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9**

### **ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

**Цель работы.** Ознакомиться с оборудованием и методикой термической обработки углеродистых сталей, изучить изменение структуры и свойств углеродистой стали в результате термической обработки.

#### **Оборудование, инструменты и материалы**

1. Шахтная электрическая печь.
2. Металлографический микроскоп ЛабоМет-1.
3. Твердомер HBRV-187,5.
4. Клещи.
5. Закалочная среда.
6. Образцы углеродистой стали.
7. Альбом с фотографиями микроструктур.
8. Стенды и плакаты.

#### **Краткие теоретические сведения**

Термической обработкой стали называется технологический процесс, состоящий из ее нагрева до определенной температуры, выдержки при этой температуре и последующего охлаждения с заданной скоростью. При термической обработке получают необходимые свойства стали, изменяя ее структуру без изменения химического состава.

## Отжиг стали

Отжигом стали называют термическую обработку, при которой доэвтектоидную сталь нагревают выше критической точки  $A_{c3}$ , а заэвтектоидную – выше  $A_{c1}$  на 30–50 °С (см. рис. 51) и после выдержки медленно охлаждают в печи. При этом получают наиболее равновесные структуры: феррит с перлитом, перлит и перлит с цементитом. Основное назначение отжига – перекристаллизация зерна стали, снижение твердости и снятие внутренних напряжений.

## Нормализация стали

Нормализацией стали называют нагрев доэвтектоидных сталей выше критической точки  $A_{c3}$ , эвтектоидных и заэвтектоидных сталей – выше критической точки  $A_{c1}$  на 30–50 °С с непродолжительной выдержкой и последующим охлаждением на воздухе. После нормализации углеродистые стали имеют ту же структуру, что и при отжиге, но перлитные смеси получаются более дисперсными, так как распад аустенита происходит при больших степенях переохлаждения. Цель нормализации – перекристаллизация зерна стали, снятие внутренних напряжений, подготовка стали к дальнейшей пластической деформации, механической или термической обработке. Нормализация – дешевый и простой вид термической обработки углеродистых сталей, содержащих менее 0,5–0,6 % С, при подготовке их к обработке резанием может заменить отжиг. В заэвтектоидных сталях нормализация с температурой выше  $A_{cm}$  предназначена для устранения цементитной сетки.

## Закалка стали

Закалкой стали называется термическая обработка, состоящая из нагрева доэвтектоидных сталей выше критической точки  $A_{c3}$ , эвтектоидных и заэвтектоидных сталей выше  $A_{c1}$  на 30–50 °С, выдержки при данной температуре и последующего охлаждения со скоростью, больше критической, то есть минимальной скоростью охлаждения, обеспечивающей превращение переохлажденного аустенита в мартенсит. При скорости охлаждения больше критической углерод не успевает выделиться из кристаллической решетки (в соответствии с ее перестройкой из  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо), в результате чего образуется однофазный пе-

ресыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе, игольчатая структура, которая получила название мартенсита (рис. 52).

При этом наблюдаются значительные искажения пространственной решетки, создается высокая плотность дислокаций, в стали накапливается значительная внутренняя потенциальная энергия. Сталь приобретает высокую твердость, но ее пластичность при этом снижается.



Рис. 52. Микроструктура закаленной стали (мартенсит),  $\times 500$

### Выбор режимов термической обработки стали

Выбор режимов сводится к определению температуры нагрева стали, времени нагрева в печи, к выбору охлаждающей среды (скорости охлаждения).

Температура нагрева стали под *отжиг, нормализацию и полную закалку* ( $T_{т.о}$ ) определяется:

для доэвтектоидных сталей из выражения

$$T_{т.о} = A_{с3} + (30-50), \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (16)$$

для эвтектоидной и заэвтектоидных сталей, а также при *неполной закалке* из выражения

$$T_{т.о} = A_{с1} + (30-50) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (17)$$

Значения  $A_{c3}$ ,  $A_{c1}$  и  $A_{cm}$  определяются по диаграмме состояния Fe–C в зависимости от содержания углерода в сталях.

Время нагрева стали при отжиге, нормализации и закалке складывается из времени прогрева образцов до заданной температуры и времени выдержки при этой температуре.

Время на прогрев 1 мм толщины образца приводится в таблице 14.

Время выдержки после достижения установленной температуры берется равным 1–2 мин.

Время нагрева при термообработке ( $\tau_n$ ) определяется из выражения

$$\tau_n = \tau_{\text{прогр.}} + \tau_{\text{выд.}} = \tau_{\text{уд.}} \cdot d + \tau_{\text{выд.}}, \quad (18)$$

где  $\tau_{\text{уд}}$  – удельное время, приходящееся на единицу размера образца;

$d$  – диаметр образца, мм;

$\tau_{\text{выд}}$  – время выдержки в печи;  $\tau_{\text{выд}} = 1\text{--}2$  мин.

Таблица 14

Ориентировочная продолжительность  
нагрева изделий в электропечи

Температура нагрева, °C	Форма изделия в сечении		
	Круг	Квадрат	Пластина
	Продолжительность нагрева в минутах		
	на 1 мм диаметра	на 1 мм толщины	на 1 мм толщины
600	2,0	3,0	4,0
700	1,5	2,2	3,0
800	1,0	1,5	2,0
900	0,8	1,2	1,6
1000	0,4	0,6	0,8

**Выбор скорости охлаждения**

Скорость охлаждения стали определяется в основном получением требуемой структуры. При отжиге сталь охлаждается медленно, вместе с печью. При нормализации сталь охлаждается на спокойном воздухе. При закалке скорость охлаждения должна быть больше, и поэтому прибегают к использованию жидкостей. Охлаждающая способность основных закалочных сред приведена в таблице 15.

## Характеристика закалочных сред

Охлаждающие среды	Скорость охлаждения, °С/с, в интервале	
	от $T_{\text{зак}}$ до $M_{\text{H}}$	от $M_{\text{H}}$ до 20 °С
Вода при $t = 20$ °С	600	200
Вода при $t = 28$ °С	500	200
10 % раствор NaCl при $t = 18$ °С	1100	300
Минеральное масло	120	30
Расплавленные соли при $t = 300$ °С	150	–
Спокойный воздух	3	1

### Пример расчета скорости охлаждения образца стали марки 45

*Решение:* для стали 45 по диаграмме Fe–C определяем температуру нагрева для закалки  $A_{c3}$ , которая составляет 830–860 °С. Температуру в точках  $M_{\text{H}}$  и  $M_{\text{K}}$  определяем по графику зависимости положения этих точек от концентрации углерода в стали (рис. 53).

$$M_{\text{H}} = 320 \text{ °С}; M_{\text{K}} = 90 \text{ °С}.$$

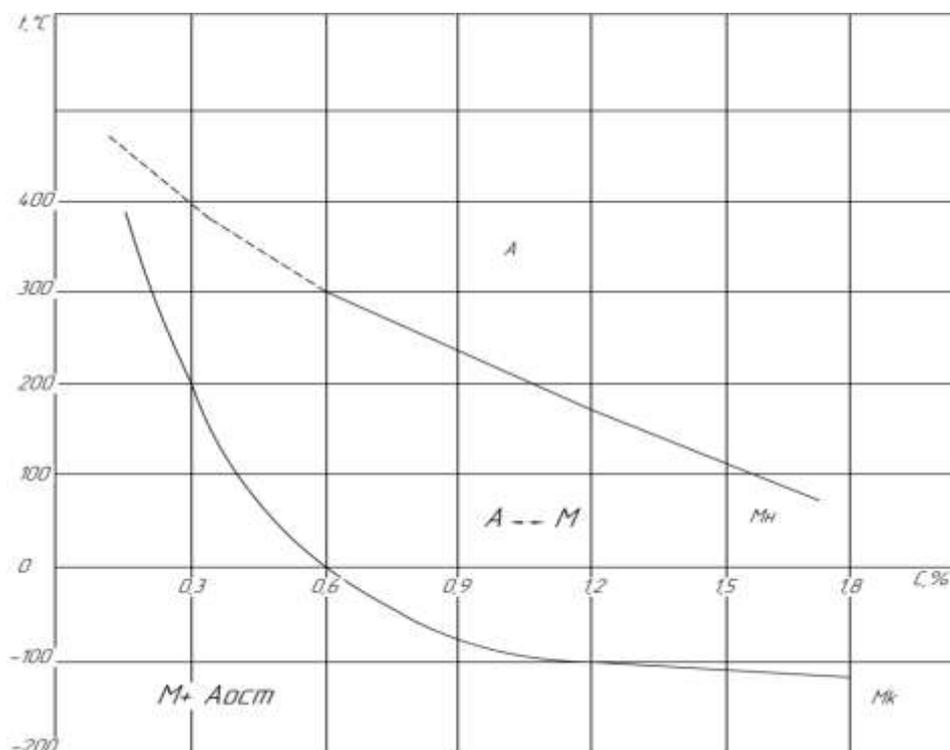


Рис. 53. Влияние содержания углерода на температуру начала ( $M_{\text{H}}$ ) и конца ( $M_{\text{K}}$ ) мартенситного превращения

Выделяем два температурных диапазона:

I – от  $T_{\text{зак}}$  до  $M_{\text{H}}$  (от 850 °C до 320 °C);

II – от  $M_{\text{H}}$  до  $t_{\text{комн.}}$  (от 320 °C до 20 °C).

В качестве охлаждающей среды выбираем воду при  $t = 20$  °C.

Для данной охлаждающей среды время охлаждения в первом температурном диапазоне равно

$$\frac{850 - 320}{600} = \frac{530}{600} = 0,9 \text{ с,}$$

где 600 °C/с – скорость охлаждения (табл. 15).

Время охлаждения во втором температурном диапазоне равно

$$\frac{320 - 20}{200} = \frac{300}{200} = 1,5 \text{ с.}$$

Если при нанесении на С-образную диаграмму кривой охлаждения последняя пересечет С-образную кривую начала распада аустенита, то расчет производят заново для более интенсивной охлаждающей среды.

Режим термообработки отображается графиком в координатах температура–время (рис. 54).

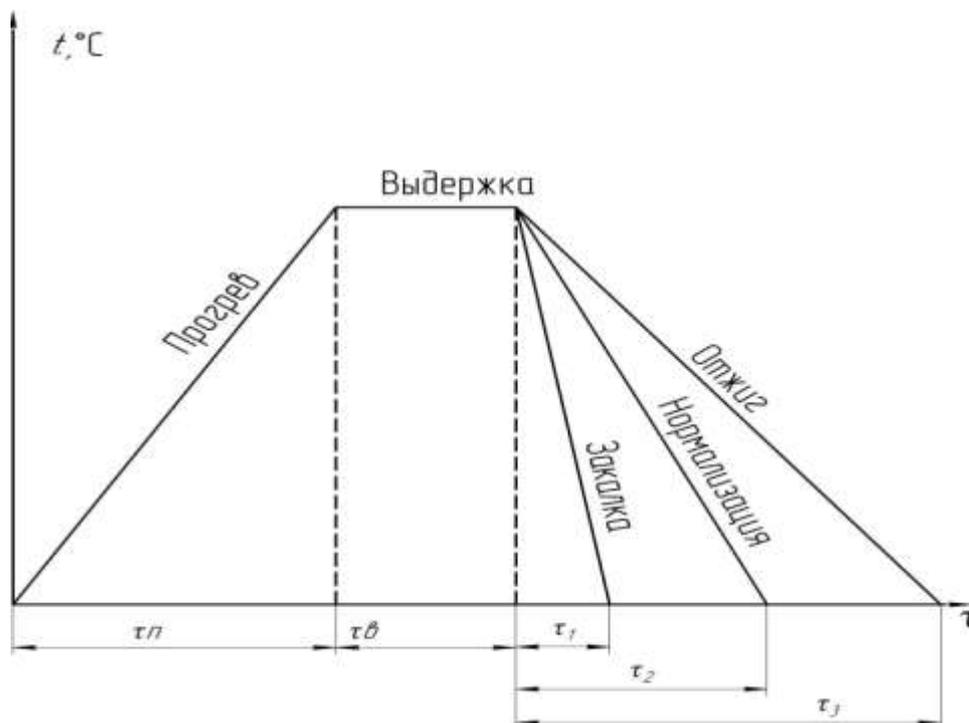


Рис. 54. График различных видов термической обработки:

$\tau_{\text{п}}$  – время прогрева;  $\tau_{\text{в}}$  – время выдержки;  $\tau_1$  – время охлаждения при закалке;  $\tau_2$  – время охлаждения при нормализации;  $\tau_3$  – время охлаждения при отжиге

## Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя образцы стали, напильником и наждачной бумагой зачистить их поверхности и штангенциркулем измерить размеры образцов, записав их в протокол (табл. 16).

2. Измерить твердость полученных и подготовленных образцов до термической обработки на одном из приборов Бринелля или Роквелла, данные занести в протокол.

3. Определить по справочникам или по диаграмме Fe–C параметры режима термической обработки образцов.

4. Загрузить образцы в печь и после заданной выдержки последовательно поместить в охлаждающую среду.

5. После полного охлаждения измерить твердость образцов на одном из приборов. Полученные результаты сравнить с данными, предшествующими термообработке.

## Содержание отчёта

В отчет необходимо включить: описание видов термообработки и их практическое применение; участок диаграммы состояния *железо–углерод* для сталей и указать на ней область оптимальных температур нагрева для термической обработки; протокол результатов испытаний; график термической обработки в координатах *температура – время*; вывод, указав влияние скорости охлаждения и температуры закалки на твердость стали; чертеж структуры образцов стали до и после закалки.

## Контрольные вопросы

1. Что называется термической обработкой?
2. Какие операции термической обработки применяются?
3. Что такое отжиг, нормализация и закалка?
4. Чем отличаются полная и неполная закалка?
5. Что называется критической скоростью закалки?
6. Как осуществляется изотермическая закалка и когда она применяется?
7. Какие среды при закалке наиболее часто применяются? Назовите их характеристики.
8. Как влияет скорость охлаждения при закалке на структуру и свойства стали?
9. Что называется мартенситом? Его свойства.
10. Какие дефекты возникают в стали при закалке и как их устраняют?

## Протокол проведения термической обработки углеродистых сталей

Номер образца	Размер образца (диаметр или толщина), мм	Марка стали	Температура нагрева, °С			Время нагрева, мин	Твердость стали, HRC			
			Отжиг	Нормализация	Закалка		до термической обработки	после отжига	после нормализации	после закалки

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

### ОТПУСК ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ

**Цель работы.** Изучить технологию отпуска и его влияние на структуру и свойства стали.

**Оборудование, инструменты, материалы:**

1. Шахтная электрическая печь.
2. Твердомер HBRV-187,5.
3. Микроскоп марки ЛабоМет-1.
4. Набор образцов стали.
5. Клещи.
6. Альбом микроструктур.
7. Стенды, плакаты.

#### Общие указания

При подготовке к лабораторной работе необходимо хорошо уяснить назначение отпуска в технологическом процессе термообработки стальных изделий.

Поскольку эта операция является завершающей, а разновидностей отпуска существует три (низкий, средний, высокий) с широким интервалом температур от 150 до 650 °С, то студенты должны хорошо уяснить виды отпуска и уметь правильно ориентироваться в назначении каждого вида отпуска и в степени их влияния на структуру и свойства стали.

#### Теоретические сведения

Для закаленной стали характерны высокая твердость, низкие ударная вязкость, пластичность и предел упругости, высокие внутренние напряжения. Такая сталь малопригодна для использования. Для улучшения ее свойств в практике прибегают к дополнительной операции термообработки – отпуску, заключающемуся в нагреве закаленной стали до температуры ниже  $A_{c1}$  с последующим охлаждением стали на спокойном воздухе (см. рис. 51).

При отпуске изменяются структура закаленной стали и ее свойства: повышается ударная вязкость, предел упругости, пластичность, снижаются внутренние напряжения и твердость.

В зависимости от температуры нагрева различают следующие виды отпуска: низкий, средний и высокий.

*Низкий отпуск* – закаленные изделия нагревают и выдерживают в течение заданного времени в интервале температур 150–200 °С. Структура закаленной стали до отпуска состоит из тетрагонального мартенсита и остаточного аустенита, причем остаточный аустенит характерен для высокоуглеродистых сталей. В процессе низкого отпуска атомы углерода диффундируют из решетки тетрагонального мартенсита и образуют высокодисперсный карбид железа. Концентрация углерода в решетке мартенсита постепенно снижается, что приводит к снижению тетрагональности мартенсита. При этом образуется *мартенсит отпуска*, представляющий собой совокупность пересыщенного твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе и высокодисперсного, не отделившегося от него карбида железа. Остаточный аустенит, если он есть, обнаруживается на шлифе в виде светлых полей между темными иглами мартенсита. Такая структура обеспечивает почти ту же твердость и износостойкость, как и после закалки, но при этом снижаются остаточные напряжения, повышаются ударная вязкость и пластичность.

Низкому отпуску подвергают режущий и измерительный инструмент, а также детали машин, подвергнутые поверхностной закалке, или закаленные после цементации или цианирования.

*Средний отпуск* – закаленные изделия нагревают и выдерживают в течение определенного времени при температурах 350–500 °С. В указанном интервале температур завершается диффузионное превращение остаточного аустенита в отпущенный мартенсит, карбиды полностью обособляются от решетки мартенсита, укрупняется карбидно-ферритная смесь и наблюдается дальнейшее снижение твердости. Завершается диффузия углерода из мартенсита и уменьшаются остаточные напряжения. Структура среднеотпущенной стали состоит из *троостита отпуска*, представляющего собой мелкодисперсную смесь феррита с цементитом (рис. 55).

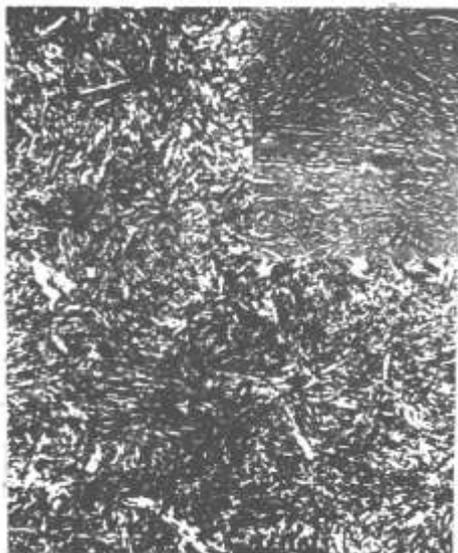


Рис. 55. Микроструктура троостита отпуска  $\times 1000$

В результате среднего отпуска сталь приобретает повышенную прочность и упругость при твердости НВ 450–500. Среднему отпуску подвергают закаленные изделия, которые должны иметь максимальные упругие свойства при относительно высокой твердости: пружины, рессоры, ударный инструмент – зубила, штампы и т.д.

*Высокий отпуск* – закаленные изделия нагревают в течение заданного времени в интервале температур 500–650 °С.

Процесс сопровождается укрупнением и округлением цементитных частиц в ферритной основе. С укрупнением цементита понижается твердость до НВ 250–300, внутренние напряжения, а пластичность и ударная вязкость значительно возрастают. В результате высокого отпуска получается структура, называемая *сорбитом отпуска* (рис. 56).

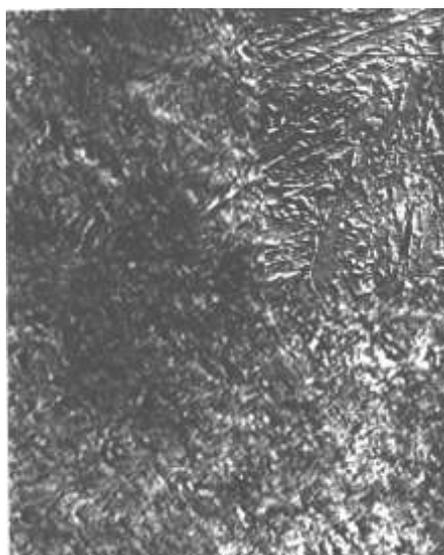


Рис. 56. Микроструктура сорбита отпуска  $\times 1000$

Высокому отпуску подвергают детали, испытывающие ударные и знакопеременные нагрузки: шатуны двигателей, полуоси, оси автомобилей и тракторов, болты, пальцы, валы и многие другие детали.

Закалку и последующий высокий отпуск называют *улучшением стали*.

Выбор вида, а следовательно, и температуры отпуска осуществляют исходя из конкретных условий работы изделия: повышенный износ, статическая или динамическая нагруженность, наличие ударных перегрузок и т.д.

Процедура нагрева образцов стали при отпуске более продолжительная, так как температура при отпуске значительно ниже закалочной, а все механизмы превращений носят диффузионный характер.

Время нагрева ( $\tau_n$ ) образцов определяется из выражения

$$\tau_n = \tau_{\text{прогр}} + \tau_{\text{выд}} = \tau_{\text{уд}} \cdot d + \tau_{\text{выд}}, \quad (19)$$

где  $\tau_{\text{уд}}$  – время, требующееся на прогрев 1 мм размера образца, мин;

$d$  – размер образца (диаметр, толщина), мм;

$\tau_{\text{выд}}$  – время выдержки образца в печи (обычно принимается равным 2–3 ч).

Время на прогрев 1 мм толщины образца приводится в таблице 17.

Охлаждение при отпуске осуществляется на спокойном воздухе. Извлеченные из печи образцы помещаются на металлическую подставку и охлаждаются до комнатной температуры. Время охлаждения фиксируется по часам и заносится в отчет, а затем используется для построения графика отпуска.

Режим отпуска отображается на графике в координатах *температура–время* (рис. 57).

При отпуске изменяются структура закаленной стали и ее свойства: повышается ударная вязкость, предел упругости, пластичность, снижаются внутренние напряжения и твердость. Отпущенная сталь по сравнению с неотпущенной менее напряжена и хрупка.

Ориентировочная продолжительность нагрева изделий  
в электропечи

Температура нагрева, °С	Форма изделия в сечении		
	Круг	Квадрат	Пластина
	Продолжительность нагрева в минутах		
	на 1 мм диаметра	на 1 мм толщины	на 1 мм толщины
600	2,0	3,0	4,0
400	3,0	4,0	5,0
200	4,0	5,0	6,0

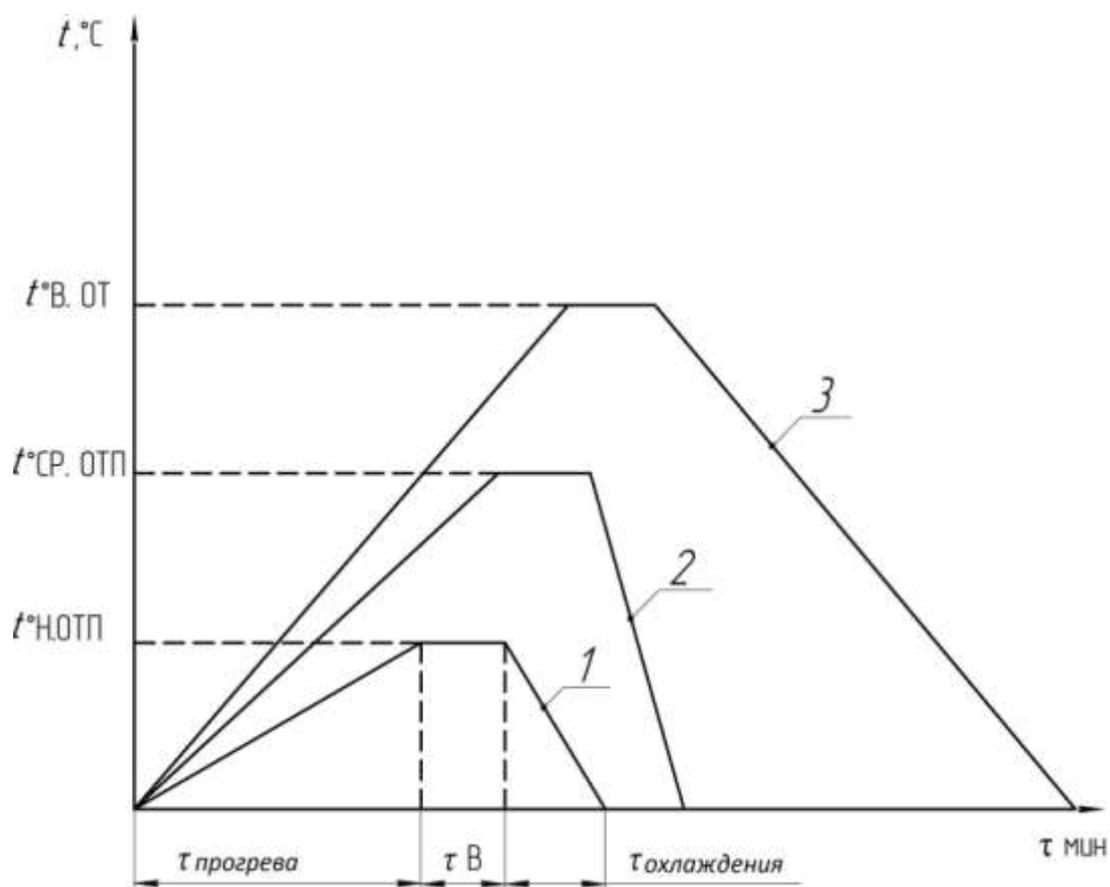


Рис. 57. График отпуски стали:

1 — низкий отпуск; 2 — средний отпуск; 3 — высокий отпуск

### Порядок выполнения работы

1. Рассчитать режимы отпуски для закаленных ранее образцов.

2. Образцы поместить в печь и нагреть, фиксируя время нагрева при отпуске.

3. По окончании нагрева извлечь образцы и остудить на спокойном воздухе до комнатной температуры.

4. После охлаждения измерить твердость образцов.

### **Содержание отчета**

В отчете дается определение отпуска, указываются основные виды отпуска, их влияние на структуру и механические свойства закаленной и затем отпущенной стали. Следует указать назначение основных видов отпуска (в процессе домашней подготовки к выполнению лабораторной работы).

Приводится характеристика образцов стали перед отпуском – марка стали, твердость после закалки, структура. Даются условия отпуска каждого образца, их твердость после отпуска и указывается структура стали. Строится график твердости отпускаемой стали в зависимости от температуры отпуска и график отпуска. В выводах по работе устанавливается влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства стали.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется отпуском стали?
2. Для чего предназначен отпуск?
3. В чем отличие структур закаленных и отпущенных сталей?
4. Как выбирают температуру под отпуск стали?
5. Что такое мартенсит отпуска?
6. Какие детали и изделия подвергают низкому отпуску?
7. Какие детали и изделия подвергают среднему отпуску?
8. Какие детали и изделия подвергают высокому отпуску?
9. Что называется сорбитом? Его свойства.
10. Что называется трооститом? Его свойства.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ III

1. Структурная составляющая, представляющая собой пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе:

- A) аустенит;
- B) мартенсит;
- C) феррит;
- D) цементит.

2. Термическая обработка стали, состоящая в нагреве ее до аустенитного состояния, выдержке и последующем быстром охлаждении:

- A) отжиг;
- B) полная закалка;
- C) неполная закалка;
- D) нормализация.

3. Температура, с которой проводят закалку углеродистых заэвтектоидных сталей:

- A) на 30–50 °C выше  $A_m$ ;
- B) на 30–50 °C ниже линии  $ECF$  диаграммы Fe–C;
- C) на 30–50 °C выше эвтектической температуры;
- D) на 30–50 °C выше  $A_1$ .

4. Температура закалки стали 50 составляет:

- A) 600–620 °C;
- B) 810–830 °C;
- C) 740–760 °C ;
- D) 1030–1050 °C.

5. Температура закалки стали У12 составляет:

- A) 760–780 °C;
- B) 600–620 °C;
- C) 1030–1050 °C;
- D) 820–840 °C.

6. Закаливаемость:

- A) глубина проникновения закаленной зоны;
- B) процесс образования мартенсита;

- С) способность металла быстро прогреваться на всю глубину;
- Д) способность металла повышать твердость при закалке.

**7. Термическая обработка, состоящая в нагреве закалённой стали ниже  $A_1$ , выдержке и последующем охлаждении на воздухе:**

- А) отжиг;
- В) закалка;
- С) отпуск;
- Д) нормализация.

**8. Вид отпуска, при котором закаленное изделие приобретает наибольшую пластичность:**

- А) низкий отпуск;
- В) высокий отпуск;
- С) пластичность стали является ее природной характеристикой и не зависит от вида отпуска;
- Д) средний отпуск.

**9. Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска:**

- А) нормализация;
- В) улучшение;
- С) сфероидизация;
- Д) полная закалка.

**10. Термическая обработка стали, состоящая в нагреве ее до аустенитного состояния, выдержке и последующем охлаждении вместе с печью:**

- А) неполный отжиг;
- В) полный отжиг;
- С) рекристаллизационный отжиг;
- Д) низкий отжиг.

**11. Термическая обработка стали, состоящая в нагреве ее до аустенитного состояния и последующего охлаждения на спокойном воздухе:**

- А) истинная закалка;
- В) улучшение;
- С) неполный отжиг;
- Д) нормализация.

**12. Изделие, для которого рекомендованы закалка и средний отпуск:**

- A) сверло;
- B) метчик;
- C) вал;
- D) пружина.

**13. Изделие, для которого рекомендованы закалка и низкий отпуск:**

- A) сверло;
- B) рессора;
- C) вал;
- D) пружина.

**14. Изделие, для которого рекомендованы закалка и высокий отпуск:**

- A) сверло;
- B) рессора;
- C) вал;
- D) пружина.

**15. Операции термообработки вновь изготовленной шпильки головки блока:**

- A) высокий отпуск;
- B) закалка;
- C) отжиг;
- D) закалка и высокий отпуск.

**16. Сталь, которая не упрочняется при закалке:**

- A) 20;
- B) 45;
- C) 65;
- D) У12.

**17. Кристаллическая решетка, которую имеет мартенсит:**

- A) кубическая;
- B) ГПУ;
- C) тетрагональная;
- D) ГЦК.

**18. Критическая скорость охлаждения при закалке:**

- A) максимальная скорость охлаждения, при которой еще протекает распад аустенита на структуры перлитного типа;
- B) минимальная скорость охлаждения, необходимая для получения мартенситной структуры;
- C) минимальная скорость охлаждения, необходимая для фиксации аустенитной структуры;
- D) минимальная скорость охлаждения, необходимая для закалки изделия по всему сечению.

**19. Линия диаграммы состояния *железо-углерод*, на которой расположены критические точки  $A_m$ :**

- A) PSK;
- B) SE;
- C) ECF;
- D) GS.

**20. Линия диаграммы состояния *железо-углерод*, на которой расположены критические точки  $A_3$ :**

- A) PSK;
- B) SE;
- C) ECF;
- D) GS.

**21. Линия диаграммы состояния *железо-углерод*, на которой расположены критические точки  $A_1$ :**

- A) PSK;
- B) SE;
- C) ECF;
- D) GS.

**22. Структурный состав, который приобретает доэвтектоидная сталь после закалки от температуры выше  $A_{c1}$ , но ниже  $A_{c3}$ :**

- A) мартенсит + вторичный цементит;
- B) мартенсит + феррит;
- C) феррит + перлит;
- D) перлит + вторичный цементит.

**23. Фактор, не позволяющий применять неполную закалку для доэвтектоидных сталей (в отличие от заэвтектоидных):**

- А) образуется мартенсит с малой степенью пересыщения углеродом;
- В) образуются структуры немартенситного типа (сорбит, троостит);
- С) изделие прокаливается на недостаточную глубину;
- Д) в структуре, наряду с мартенситом, остаются включения феррита.

**24. Влияние температуры отпуска на твердость изделий из углеродистой стали:**

- А) влияние температуры отпуска на твердость неоднозначно;
- В) чем выше температура нагрева, тем выше твердость;
- С) чем выше температура нагрева, тем ниже твердость;
- Д) твердость не зависит от температуры.

**25. Улучшение стали:**

- А) закалка на мартенсит и последующий высокий отпуск на сорбит;
- В) отжиг на перлит;
- С) закалка на троостит;
- Д) закалка на мартенсит и низкий отпуск.

**26. Операция термической обработки, которую проводят для уменьшения количества остаточного аустенита в углеродистых сталях после закалки:**

- А) гомогенизирующий отжиг;
- В) обработка холодом;
- С) низкий отпуск;
- Д) высокий отпуск.

**27. Операция термической обработки, которую используют для устранения крупнозернистой структуры стали:**

- А) нормализация;
- В) гомогенизирующий отжиг;
- С) улучшение;
- Д) закалка.

**28. Фактор, который влияет на закаливаемость стали:**

- A) степень раскисления;
- B) содержание примесей;
- C) содержание углерода;
- D) содержание легирующих примесей.

**29. Структурная составляющая, в которую превращается мартенсит при среднем отпуске углеродистых сталей:**

- A) сорбит отпуска;
- B) перлит отпуска;
- C) мартенсит отпуска;
- D) троостит отпуска.

**30. Температуры, при которых проводят неполный отжиг заэвтектоидных сталей:**

- A) 750–780 °С;
- B) 660–680 °С;
- C) 160–180 °С;
- D) 1100–1200 °С.

**31. Операция термической обработки, которую используют для получения зернистого перлита в структуре заэвтектоидных сталей:**

- A) неполный отжиг;
- B) нормализация;
- C) полный отжиг;
- D) гомогенизирующий отжиг

**32. Феррито-цементитная смесь, которая обладает наибольшей твердостью:**

- A) сорбит;
- B) зернистый перлит;
- C) пластинчатый перлит;
- D) троостит.

**33. Установите соответствие вида отпуска температуре нагрева:**

*Вид отпуска:*

- 1) низкий;
- 2) средний.

*Температура нагрева:*

- A) 150–200 °С;
- B) 300–400 °С;

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

С) 500–600 °С.

**34. Установите соответствие вида отпуска температуре нагрева:**

*Вид отпуска:*

*Температура нагрева:*

1) высокий;

А) 150–200 °С;

2) средний.

В) 300–400 °С;

С) 500–600 °С.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**35. Дополните:**

Структура, представляющая собой пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе, называется \_\_\_\_\_.

**36. Дополните:**

Термическая обработка, состоящая в нагреве закалённой стали ниже  $A_1$ , выдержке и последующем охлаждении на воздухе, называется \_\_\_\_\_.

**37. Дополните:**

Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется \_\_\_\_\_.

**38. Дополните:**

Термическая обработка стали, состоящая в нагреве ее до аустенитного состояния и последующего охлаждения на спокойном воздухе, называется \_\_\_\_\_.

**39. Установите правильную последовательность:**

Укажите структурные составляющие в порядке убывания их твердости:

А) феррит;

В) мартенсит;

С) сорбит;

Д) троостит.

**40. Конечная цель цементации стали:**

А) создание мелкозернистой структуры сердцевины;

В) повышение содержания углерода в стали;

- С) получение в изделии твердого поверхностного слоя при сохранении вязкой сердцевины;
- Д) увеличение пластичности поверхностного слоя.

**41. Обработка, состоящая в насыщении поверхности стали одновременно азотом и углеродом:**

- А) азотирование;
- В) улучшение;
- С) цианирование (нитроцементация);
- Д) модифицирование.

**42. Стали, которые подвергаются цементации:**

- А) высокоуглеродистые (более 0,7 % С);
- В) высоколегированные;
- С) низкоуглеродистые (0,1–0,25 % С);
- Д) среднеуглеродистые (0,3–0,5 % С).

**43. Обработка, которая применяется для упрочнения вала, изготовленного из стали 18ХГТ:**

- А) объемная закалка;
- В) цементация, закалка, низкий отпуск;
- С) закалка токами высокой частоты;
- Д) ступенчатая закалка.

**44. Стали, которые подвергаются цементации:**

- А) 40ХНЗМА, 30ХГСА;
- В) Х12М1, У10;
- С) 15ХФ, 20;
- Д) 65, ШХ15.

**45. Стали, которые подвергаются азотированию:**

- А) 40ХНЗМА, 30ХГСА;
- В) Х12М1, У10;
- С) 15ХФ, 20;
- Д) 65, ШХ15.

**46. Обработка, состоящая в насыщении поверхности стали азотом:**

- А) азотирование;

- В) улучшение;
- С) цианирование (нитроцементация);
- Д) модифицирование.

**47. Обработка, состоящая в насыщении поверхности стали углеродом:**

- А) азотирование;
- В) улучшение;
- С) цианирование (нитроцементация);
- Д) цементация.

**48. Обработка, состоящая в насыщении поверхности стали алюминием:**

- А) алитирование;
- В) хромирование;
- С) борирование;
- Д) силицирование.

**49. Обработка, состоящая в насыщении поверхности стали кремнием:**

- А) алитирование;
- В) хромирование;
- С) борирование;
- Д) силицирование.

**50. Карбюризатор:**

- А) вещество, служащее источником углерода при цементации;
- В) карбид легирующих элементов;
- С) устройство для получения топливовоздушной среды;
- Д) металлический ящик с науглераживающим веществом.

**51. Химико-термическая обработка металлов:**

- А) обработка поверхности металла химически активными веществами с целью удаления с поверхности оксидных пленок;
- В) корректировка химического состава стали в процессе выплавки путем введения в расплав легирующих элементов;
- С) обработка, проводимая для повышения механических свойств;
- Д) термическая обработка металлов в химически активной среде, изменяющая состав и свойства поверхностного слоя изделия.

**52. Операции, которые проводят после цементации детали:**

- A) закалка и низкий отпуск;
- B) закалка и высокий отпуск;
- C) нормализация и отжиг;
- D) дополнительная термообработка.

**53. Цель азотирования:**

- A) получение мелкозернистой структуры сердцевины;
- B) увеличение пластичности поверхностного слоя;
- C) повышение окалиностойкости;
- D) повышение твердости, износостойкости, коррозионной стойкости поверхностного слоя.

**54. Дополните:**

Процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом называется \_\_\_\_\_.

**55. Дополните:**

Поверхностное насыщение стали хромом называется \_\_\_\_\_.

**56. Последовательность операций при цементации деталей:**

- A) закалка;
- B) цементация;
- C) низкий отпуск.

**57. Последовательность операций при азотировании деталей:**

- A) механическая обработка для получения окончательного размера;
- B) азотирование;
- C) защита участков, не подлежащих азотированию;
- D) доводка деталей;
- E) предварительная термическая.

## ГЛАВА IV. МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### ТЕМА 9. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

Легированными называют стали, в которые для получения требуемых свойств специально вводят легирующие элементы (л.э.).

Легированием улучшают механические и изменяют физические, химические и технологические свойства. Это происходит в результате действия л.э. на аллотропические свойства железа.

Все л.э. по влиянию на температуру аллотропических превращений железа можно разделить на две группы.

Первая группа: Ni, Mn, C, N, Cu и др. – увеличивают устойчивость аустенита, то есть повышают точку  $A_4$  и понижают точку  $A_3$

Вторая группа: Si, Cr, Al, Mo, W, V, Ti, B и др. – увеличивают устойчивость феррита, то есть понижают точку  $A_4$  и повышают точку  $A_3$ .

Свыше определенного количества элементов первой группы  $\gamma$ -состояние является стабильным от комнатной температуры до температуры плавления. Такие стали называют *аустенитными*. При содержании в сплаве элементов второй группы стабильным будет  $\alpha$ -состояние. Такие стали называют *ферритными*.

В отличие от других железоуглеродистых сплавов аустенитные и ферритные стали не имеют превращений при нагревании и охлаждении.

Влияют легирующие элементы и на положение точек  $M_n$  и  $M_k$  (начала и конца мартенситного превращения). Большинство л.э. снижают температуру начала мартенситного превращения  $M_n$  и, следовательно, увеличивают количество остаточного аустенита (за исключением Al, Co, Si).

В легированных сталях легирующие элементы могут растворяться в феррите, аустените и цементите или образовывать специальные карбиды.

Легирующие элементы, расположенные в периодической системе правее железа (никель, кремний, медь, кобальт и т.д.), не образуют карбидов, они только растворяются в феррите или аустените; элементы, расположенные левее (титан, ванадий, хром, марганец, цирконий, ниобий, молибден, вольфрам), частично растворяются в феррите или аустените и образуют карбиды. Чем дальше удален элемент от железа, тем устойчивее его карбиды и тем труднее они диссоциируют и

растворяются в аустените. Небольшие присадки карбидообразующих элементов растворяются в цементите, образуя легированный цементит  $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ ,  $(\text{Fe,W})_3\text{C}$  и т.д. При увеличении содержания элемента образуются специальные карбиды:  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{VC}$  и др. Все карбиды обладают высокой твердостью, наличие их в структуре особенно важно для инструментальных и износостойких сталей.

В конструкционных сталях основными л.э. являются хром, никель, кремний и марганец.

*Никель* увеличивает пластичность и вязкость стали, снижает температуру порога хладноломкости, повышает прокаливаемость.

*Хром* повышает жаростойкость, коррозионную стойкость и прокаливаемость стали, увеличивает ее электрическое сопротивление и уменьшает коэффициент линейного расширения.

*Кремний* широко используется при выплавке стали как раскислитель. Легирование кремнием углеродистых и хромистых сталей увеличивает их жаростойкость.

*Марганец*, подобно никелю, снижает критическую скорость охлаждения, но в отличие от последнего уменьшает и вязкость феррита. Марганец часто служит заменителем никеля, так как дешевле его.

*Вольфрам, молибден, ванадий, титан, бор и другие* вводят в сталь совместно с хромом, никелем и марганцем для дополнительного улучшения ее свойств.

*Молибден и вольфрам* повышают прокаливаемость стали (особенно в присутствии никеля), способствуют измельчению зерна и подавлению отпускной хрупкости. Легирование стали *молибденом* приводит к значительному улучшению ее механических свойств после цементации и нитроцементации.

Ванадий, титан, ниобий и цирконий только в небольших количествах (до 0,15 %) улучшают свойства стали (измельчают зерно, снижают порог хладноломкости). При большом количестве они вызывают снижение прокаливаемости и сопротивление стали хрупкому разрушению.

Добавки бора являются полезными (повышают прокаливаемость и прочность) только при микролегировании им (0,001–0,005 %). При повышении содержания бора он выделяется по границам зерен в виде боридов, сильно охрупчивая сталь.

## 9.1. Классификация и маркировка легированных сталей

Легированные стали могут быть классифицированы по четырем признакам.

*По составу* легированные стали подразделяют на низколегированные (до 3 % л.э.), среднелегированные (от 3 до 10 % л.э.) и высоколегированные (свыше 10 % л.э.). Соответственно легирующим элементам стали получают названия: никелевые, хромистые, хромоникелевые и т.д.

*По назначению* стали подразделяют на *конструкционные* (например, цементуемые, улучшаемые), *инструментальные* и *с особыми свойствами*. К последним относят пружинные, автоматные, шарикоподшипниковые, износостойкие, жаростойкие, жаропрочные, электротехнические, коррозионно стойкие и другие стали.

*По равновесной структуре (в отожженном состоянии)* легированные стали делятся:

- на доэвтектоидные стали, имеющие в структуре избыточный феррит;
- эвтектоидные стали, имеющие перлитную структуру;
- заэвтектоидные стали, имеющие в структуре избыточные (вторичные) карбиды;
- ледебуритные стали, имеющие в структуре первичные карбиды, выделившиеся из жидкой стали. В литом виде карбиды совместно с аустенитом образуют эвтектику – ледебурит, который при ковке или прокатке разбивается на обособленные карбиды и аустенит.

В соответствии с диаграммой Fe–C доэвтектоидные углеродистые стали содержат менее 0,8 % C, эвтектоидные – 0,8 % C, заэвтектоидные 0,8–2,14 %C.

Большинство л.э. сдвигает точки S и E (см. рис. 36) в сторону меньшего содержания углерода (влево), поэтому граница между доэвтектоидными и заэвтектоидными сталями лежит при меньшем содержании C, чем в углеродистых.

Ледебуритные стали по структуре могут быть отнесены к белым чугунам, но их причисляют к сталям с учетом меньшего, чем у чугунов, содержания углерода (< 2 % вследствие сдвига точек SE влево) и возможности подвергать их пластической деформации.

*По структуре после охлаждения на воздухе легированные стали подразделяют на пять классов: перлитные, мартенситные, аустенитные, ферритные и карбидные.*

Для обозначения марок стали разработана система, принятая в ГОСТах. Обозначение марки включает в себя цифры и буквы, указывающие на примерный состав стали. Каждый легирующий элемент обозначается буквой: А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, К – кобальт, Н – никель, М – молибден, П – фосфор, Р – бор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий, Ч – редкоземельные элементы, Ю – алюминий. Первые две цифры в обозначении показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента (например, 12ХНЗА). У высокоуглеродистых инструментальных сталей – в десятых долях процента. Следующие после буквы цифры указывают примерное содержание (в целых процентах) соответствующего легирующего элемента (при содержании 1–1,5 % и менее цифра отсутствует, например 30ХГС). Высококачественные стали обозначаются буквой А, а особовысококачественные – буквой Ш, помещенными в конце марки (30ХГСА, 30ХГСШ). Если буква А расположена в середине марки (14Г2АФ), то это свидетельствует о том, что сталь легирована азотом. При обозначении автоматных сталей с повышенной обрабатываемостью резанием буква А ставится в начале марки (А20, А40Г). Если автоматная сталь легирована свинцом, то обозначение марки начинается с сочетания букв АС (АС35Г2, где число 35 обозначает среднее содержание углерода в сотых долях процента). В начале обозначения марки быстрорежущих сталей стоит буква Р, за которой следует цифра, показывающая концентрацию вольфрама (Р18, Р6М5). Маркировка шарикоподшипниковой стали начинается с буквы Ш (ШХ15, где 15 – среднее содержание хрома в сотых долях процента).

## **9.2. Конструкционные стали**

*Конструкционная сталь* – это сталь, применяемая для изготовления машин, строительных конструкций и других сооружений.

Конструкционная сталь должна обладать целым комплексом высоких механических свойств. Материал, идущий на изготовление деталей, подвергающихся большим нагрузкам, должен хорошо сопротивляться таким нагрузкам и наряду с высокой прочностью обладать вязкостью, чтобы сопротивляться динамическим и ударным воздей-

ствиям. Другими словами, материал должен обладать *прочностью и надежностью*.

В деталях, испытывающих знакопеременные нагрузки, металл должен обладать высоким сопротивлением усталости, а трущиеся детали – сопротивлением износу. Во многих случаях требуется хорошее сопротивление коррозии, ползучести и другим постоянным воздействиям. Это значит, что детали должны быть *долговечными*.

Таким образом, конструкционная сталь должна быть прочным, надежным и долговечным материалом.

Эффективным способом повышения механических характеристик стали является совместное воздействие термической обработки и легирования.

Конструкционные стали подразделяют на *цементуемые* (подвергаемые цементации) и *улучшаемые* (подвергаемые закалке и высокому отпуску).

### Цементуемые стали

Для цементации (нитроцементации) применяют стали с низким содержанием углерода (0,1–0,25 % С), с тем, чтобы после цементации, закалки и низкого отпуска получить твердый поверхностный слой и вязкую сердцевину. Твердость поверхности после такой обработки будет около HRC60, а сердцевины – порядка HR С15–30.

Цементуемые стали подразделяют на три группы:

1. Углеродистые стали с неупрочняемой сердцевиной (углеродистые стали слабо прокаливаются).
2. Низколегированные стали со слабоупрочняемой сердцевиной.
3. Относительно высоколегированные стали с сердцевиной, сильно упрочняемой при термической обработке. Стали этой группы иногда называют высокопрочными цементуемыми сталями. К ним относят также стали со сравнительно невысоким содержанием легирующих элементов, но с повышенным содержанием углерода (0,25–0,30 % С).

Рассмотрим наиболее распространенные конструкционные цементуемые стали:

*Хромистые стали.* Хром – сравнительно дешевый элемент, широко используется для легирования стали. В конструкционных сталях он частично растворен в феррите, частично в цементите, образуя карбид  $(Fe,Cr)_3C$ . В хромистых сталях при закалке с охлаждением в масле, вы-

полняемой после цементации, сердцевина изделия имеет бейнитную структуру, вследствие чего хромистые стали по сравнению с углеродистыми обладают более высокими прочностными свойствами при несколько меньшей пластичности в сердцевине и лучшей прочностью цементованного слоя. Примеры хромистых сталей – 15X, 20X.

*Хромованадиевые стали.* Легирование хромистой стали 0,1–0,2 % V улучшает ее механические свойства: в сердцевине детали  $\sigma_s = 750\text{--}800$  МПа;  $\delta = 13$  %;  $\psi = 50$  %. Кроме того, хромованадиевые стали менее склонны к перегреву. Из-за малой прокаливаемости их используют только для сравнительно небольших изделий (поршневые пальцы, распределительные валики и т.д.).

*Хромоникелевые стали.* Эти стали применяются для изготовления крупных деталей ответственного назначения, испытывающих в эксплуатации значительные динамические нагрузки.

Одновременное легирование хромом и никелем повышает прокаливаемость, прочность, пластичность и вязкость сердцевины и цементованного слоя. Закалка – с охлаждением в масле, иногда и на воздухе. Примеры описываемых сталей – 12XНЗА, 20XНЗА.

Легирование хромоникелевых сталей вольфрамом (или молибденом) дополнительно повышает устойчивость переохлажденного аустенита, а следовательно, и прокаливаемость. Из сталей 18X2Н4МА и 18X2Н4ВА изготавливают крупные тяжело нагруженные детали.

*Хромомарганцевые стали.* Марганец – дешевый элемент, применяется как заменитель в стали никеля. Как и хром, марганец растворяется в феррите и цементите. Повышая устойчивость аустенита, марганец снижает  $v_{кр}$  и повышает прокаливаемость стали.

Хромомарганцевые стали применяют во многих случаях вместо дорогих хромоникелевых, однако эти стали менее устойчивы против перегрева и имеют меньшую вязкость. Введение небольшого количества титана уменьшает склонность хромомарганцевых сталей к перегреву.

*Хромомарганцевоникелевые стали.* Повышение прокаливаемости и прочности хромомарганцевых сталей достигается дополнительным легированием их никелем.

*Стали, легированные бором.* Для цементации используют стали, содержащие 0,01–0,05 % бора. Бор повышает устойчивость переохлажденного аустенита и поэтому увеличивает прокаливаемость стали.

В промышленности для деталей, работающих в условиях износа при трении, применяют стали 20ХГР. Дополнительное легирование стали никелем повышает ее прокаливаемость, пластичность и вязкость.

## Улучшаемые стали

Улучшаемые стали содержат 0,3–0,4 % С и разное количество легирующих элементов (Cr, Ni, Mo, W, Mn, Si) в сумме не более 3–5 % и часто около 0,1 % измельчителей зерна (V, Ti, Nb, Zr).

Обычная термическая обработка этих сталей – закалка с 820–880 °С в масле (крупные детали охлаждают в воде) и высокий отпуск при 500–600 °С. При такой обработке структура стали – сорбит отпуска.

Чем больше в стали легирующих элементов, тем больше ее прокаливаемость. Чем больше сечение детали, тем более легированную сталь следует выбирать.

Существует несколько типов улучшаемых сталей.

*Хромистые стали 30Х, 38Х, 40Х, 50Х.* С увеличением содержания углерода возрастает прочность, но понижается пластичность и вязкость.

Прокаливаемость хромистых сталей невелика.

Сталь 30Х рекомендуется для изготовления деталей небольших размеров (оси, валики, рычаги, болты, гайки). Стали 38Х и 40Х обладают повышенной прочностью, их применяют для коленчатых валов, осей, шестерен; а стали 45Х и 50Х – для изделий, работающих на износ без значительных ударных нагрузок (крупные шестерни).

Введение бора (0,002–0,005 %) повышает прокаливаемость, но несколько повышает предел хладноломкости (стали 35ХР, 40ХР).

Введение 0,1–0,2 % ванадия (40ХФА) повышает механические свойства хромистых сталей (вязкость). Эти стали применяют для изделий, работающих при повышенных динамических нагрузках (шатуны, шестерни).

*Хромомарганцевые стали.* Совместное легирование хромом и марганцем позволяет получить стали с достаточно высокой прочностью и прокаливаемостью. Стали 40ХГ и 40ХГР применяют для изготовления деталей сечением 30–40 мм. Однако хромомарганцевые стали имеют пониженную вязкость, повышенный порог хладноломкости (от +20 до -60 °С). Для уменьшения склонности стали к перегреву в нее добавляют титан.

*Хромокремнемарганцевые стали – хромансил – стали 20ХГС, 25ХГС и 30ХГС* обладают высокой прочностью и хорошей свариваемостью. Их применяют в виде листов и труб для ответственных сварных конструкций.

*Хромоникелевые стали* отличаются высокой прокаливаемостью, хорошей прочностью и вязкостью. Для тяжело нагруженных деталей с диаметром сечения до 70 мм используют хромоникелевые стали 40ХН, 45ХН и 50ХН, обладающие высокими механическими свойствами.

*Хромоникелемолибденовые стали.* Для предотвращения отпускной хрупкости стали дополнительно легируют молибденом (40ХН2МА) или вольфрамом.

*Хромоникелемолибденованадиевые стали.* Нередко в хромоникелевую сталь кроме молибдена (вольфрама) добавляют ванадий, который способствует получению мелкозернистой структуры (38ХН3МФ, 36Х2Н2МФА). Эти стали обладают высокой прочностью, пластичностью и вязкостью, низким порогом хладноломкости. Этому способствует высокое содержание никеля. Молибден, присутствуя в стали, повышает ее теплостойкость. Эти стали можно использовать при 400–450 °С.

### **9.3. Инструментальные и штамповочные стали и сплавы**

Эти материалы предназначены для изготовления режущего, измерительного инструмента и штампов.

#### **Стали для режущего инструмента**

Важнейшее свойство, которым должны обладать эти стали, это *красностойкость (теплостойкость)*, то есть способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продолжительном нагреве; не разрушаться при ударных воздействиях; иметь высокую износостойкость в условиях сухого трения. Удовлетворяют этим требованиям троосто-мартенситная (для ударных инструментов), мартенситная и мартенситная с мелкими карбидами структуры.

Инструментальные стали классифицируют по теплостойкости: нетеплостойкие, полутеплостойкие и теплостойкие (быстрорежущие).

К *нетеплостойким* сталям относятся углеродистые и низколегированные инструментальные стали марок У7-У13, У7А-У13А, 7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, 11Х, 13Х и др.

Из сталей У7, У7А, 7ХФ изготавливают инструмент для обработки дерева (пилы, долота) и ударный инструмент (зубила, крейцмейсели,

керны). Стали У9-У13, 9ХФ, 11Х, 13Х используют для изготовления сверл, метчиков, плашек, разверток, напильников, ножовочных полотен.

Необходимые режущие свойства инструмент получает после закалки и отпуска. Для доэвтектоидных сталей назначают полную закалку, для эвтектоидных и заэвтектоидных – неполную, охлаждают в масле или воде.

Температуру отпуска выбирают в зависимости от назначения инструмента. Для ударного инструмента назначают средний отпуск с НРС 50–55 с целью увеличения вязкости стали. Инструменты, требующие максимальной твердости и износостойкости режущей кромки, отпускают при 150–200 °С для снятия внутренних напряжений.

К *полутеплостойким* сталям относятся легированные инструментальные стали марок Х, 9ХС, ХВГ, 9ХВГ, 9Х5ВФ с содержанием до 5 % легирующих элементов. Из них изготавливают ударный и режущий инструмент (ножи для холодной резки металлов, пилы, сверла, метчики, шаберы и др.).

Термическая обработка данных сталей заключается в закалке при 800–850 °С в масле и низкого отпуска при 150–200 °С до НРС 60–65. Для ударных инструментов для увеличения вязкости повышают температуру отпуска до 300 °С.

*Быстрорежущие (теплостойкие)* стали представляют собой высоколегированные инструментальные сплавы ледебуритного класса. Для повышения структурной однородности литую сталь подвергают горячей обработке давлением, дробящей сетку эвтектики. В структуре прокованной и отожженной стали просматриваются крупные первичные карбиды – осколки ледебуритной эвтектики, мелкие вторичные карбиды, выделившиеся в литой стали из аустенита при охлаждении сплава в интервале температур между эвтектическим и эвтектоидным превращениями, и очень мелкие эвтектоидные карбиды, входящие в сорбитный фон.

Высокая теплостойкость (красностойкость) быстрорежущих сталей достигается термической обработкой с получением высоколегированного мартенсита, способного сопротивляться отпуску вплоть до 600–650 °С и, следовательно, сохранять до этих температур высокую твердость, прочность, износостойкость. Степень легированности мартенсита определяется составом исходного аустенита. Чем выше температура нагрева, тем больше легирующих элементов (W, Mo, V), входящих в состав вторичных карбидов, растворяется в аустените. Поэтому быстрорежущие стали нагревают при закалке до 1200–

1300 °С. Первичные карбиды в аустените не растворяются, но сдерживают рост аустенитных зерен, блокируя их границы. Быстрорежущие стали обладают весьма низкой теплопроводностью, поэтому их нагрев до температуры закалки ведут ступенчато с одной-двумя температурными остановками, что позволяет предупредить появление трещин. Высокая легированность аустенита предопределяет довольно низкие температуры начала и конца мартенситного превращения, обуславливающие, в свою очередь, сохранение при закалке значительных количеств (более 30 %) остаточного аустенита, понижающего режущие свойства стали. Уменьшение содержания остаточного аустенита достигается двух-трехкратным высоким отпуском.

При отпуске из остаточного аустенита выделяются карбиды легирующих элементов, что влечет за собой повышение температуры мартенситного превращения, и при охлаждении аустенит превращается в мартенсит. Для уменьшения количества остаточного аустенита иногда закаленную сталь охлаждают в область отрицательных температур (-80 °С), что также способствует увеличению количества мартенсита.

Быстрорежущую сталь применяют для изготовления режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания.

## **Твердые сплавы**

Инструменты, изготовленные из твердых сплавов, имеют рабочую температуру резания 800–1000 °С, тогда как для инструмента из быстрорежущей стали разогрев режущей кромки выше 650 °С недопустим.

Значит, имея инструмент из твердых сплавов, можно работать на более высоких скоростях резания, чем с инструментом из быстрорежущей стали, хотя при меньшей подаче.

В настоящее время для скоростного резания металлов применяют инструмент, оснащенный твердыми сплавами.

*Твердые сплавы* – это инструментальные материалы, изготавливаемые методом порошковой металлургии, состоящие из частиц карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC), объединенных металлическим связующим компонентом (кобальтом). Твердые сплавы обладают высокой твердостью (до 90–92 HRA), износостойкостью, красностойкостью (900–1100 °С).

Существуют сплавы следующих групп: вольфрамовые, титано-вольфрамовые и титанотанталовольфрамовые.

*Вольфрамовые* сплавы, например ВК2, ВК8, ВК15, ВК25, состоят из карбидов вольфрама и металлического кобальта (число, стоящее в марке сплава после буквы К, указывает на процентное содержание кобальта). Чем больше в сплаве карбида вольфрама, тем сплав тверже, но тем более он хрупок. Вязкость сплава, дающая возможность воспринимать ударные нагрузки, обеспечивается кобальтом. Сплав ВК2, содержащий всего 2 % кобальта, обладает весьма низкой вязкостью. Им можно вести лишь чистовую обработку, не сопровождающуюся динамическими нагрузками. Твердость же и износостойкость сплава настолько высоки, что позволяют обрабатывать закаленные стали. Сплав ВК8 более вязок, но менее тверд, менее износостоек и красностоек.

*Титановольфрамовые* сплавы, например Т5К10, Т15К6, Т3ОК4, изготавливают из карбидов титана, карбидов вольфрама и металлического кобальта. В марке сплава число, стоящее после буквы Т, указывает на содержание в шихте сплава карбида титана в процентах; число, стоящее после К, – содержание кобальта. Содержание карбида вольфрама определяют по разности. Так, в шихте твердого сплава Т5К10 содержится 5 % TiC, 10 % Co и 85 % WC. Карбид титана обладает еще более высокой твердостью, чем карбид вольфрама. Чем больше в сплаве TiC (точнее твердого раствора карбида вольфрама в карбиде титана), тем большей твердостью и износостойкостью обладает сплав. Наиболее тверд сплав Т3ОК4. Сплавы с большим содержанием кобальта (Т15К6, Т5К10) менее тверды, но обладают большей эксплуатационной прочностью. Применяют титановольфрамовые сплавы главным образом для обработки сталей.

*Титанотанталовольфрамовые* сплавы изготавливают из карбидов титана, карбидов тантала, карбидов вольфрама и металлического кобальта. Например, шихта сплава ТТ7К12 содержит 7 % карбидов титана и тантала, 8 % карбида вольфрама и 12 % кобальта. Применяют титанотанталовольфрамовые сплавы для черновой (например, сплав ТТ7К12) и чистовой (например, сплав ТТ8К6) обработки труднообрабатываемых материалов (жаропрочных сталей, титановых сплавов и др.).

## Штамповый инструмент

Штамповые стали предназначены для изготовления штампового инструмента (штампов, матриц и т.д.), служащего при холодной и горячей обработке металлов давлением.

*Штампы для холодного деформирования* работают на износ и воспринимают ударные нагрузки, поэтому они должны обладать высокой износостойкостью, прочностью, вязкостью, сопротивлением деформации. Предпочтительной для инструмента будет трооститная структура. Для изготовления штампов применяют углеродистую инструментальную сталь марок У10, У11, У12 и легированные стали марок Х, Х9, ХГ, 9ХС, Х12М.

Для повышения износостойкости инструмента применяют низкотемпературное цианирование.

Если штамповый инструмент испытывает ударные нагрузки, то для его изготовления применяют стали, обладающие большей вязкостью – 4ХС4, 4ХВС, 5ХНМ, 5ХГМ и др. Для штампов, работающих в условиях износа и высокого давления, применяют легированные стали большой прокаливаемости – Х12, Х12Ф, ХГЗСВ и др.

*Штампы для горячего деформирования* работают на износ и удар в более сложных условиях при высокой температуре. Они дополнительно обладают жаропрочностью, минимальной отпускной хрупкостью, хорошей теплопроводностью, предпочтительной для штампов является сорбитная структура. Инструмент для горячего деформирования изготавливают из легированной стали марок 5ХНМ, 5ХНВ, 3Х2В8, 4Х5В2ФС и др. Нужные свойства они получают после закалки и отпуска до 500–670 °С.

## Измерительный инструмент

Измерительный инструмент должен сохранять свою форму и размеры продолжительное время, иметь высокую твердость, износостойкость и минимальный коэффициент линейного расширения. Этими свойствами обладает мартенситная структура.

Для измерительного инструмента используют углеродистые и легированные стали марок У8-У12, Х, Х9, ХГ, цементируемые и азотируемые стали марок 15, 20, 38ХМЮА и др. После закалки инструмент подвергают стабилизирующему низкому отпуску, старению (нагрев до 120–170 °С и выдержка 10–30 часов).

## 9.4. Стали с особыми свойствами

### Коррозионно стойкие стали

*Коррозией* называется процесс разрушения металла и сплава под действием окружающей среды. Коррозия приводит к сокращению срока службы изделия и невозвратимым потерям металла. Различают химическую и электрохимическую коррозию.

*Химическая коррозия* происходит в результате окисления металла в газовой среде.

*Электрохимическая коррозия* возникает при взаимодействии металла с электролитом.

Электролитами могут быть водные растворы солей, кислот и щелочей. Для процесса электрохимической коррозии необходимо наличие разности потенциалов на поверхности соприкосновения металла с электролитом. Способность металла к растворению в электролитах характеризуется электродным потенциалом (В). Его определяют по отношению к водородному потенциалу, принятому за нуль. Потенциалы элементов располагаются в такой последовательности:

Au	Ag	Cu	H	Pb	Ni	Fe	Cr	Zn	Ti	Al
+1,5	+0,79	+0,34	0	-0,12	-0,22	-0,44	-0,51	-0,76	-1,21	-1,66

Металлы, расположенные после водорода, имеют бо́льшую растворимость с увеличением отрицательного потенциала. Металлы с положительным потенциалом отличаются слабой растворимостью.

*Атмосферная коррозия* совмещает в себе особенности химической и электрохимической коррозии. При конденсации влаги на поверхности изделия возникает электрохимический процесс. Углекислый, сернистый и другие газы, пыль ускоряют коррозионное разрушение металла.

Коррозия зависит от химического состава и строения металла. Однофазные сплавы более устойчивы к электрохимической коррозии, так как зерна имеют одинаковый электродный потенциал. Коррозионная стойкость увеличивается с повышением класса шероховатости поверхности изделия, различные пороки и дефекты на поверхности детали, трещины, царапины служат очагами начала коррозии.

От коррозии металл предохраняют легированием, защитными пленками, металлическими и неметаллическими покрытиями, электрохимическими методами и др.

*Легированием* достигается образование на поверхности изделия защитной пленки или получение однофазной структуры. Например, при легировании стали хромом на поверхности изделия образуется плотная пленка окиси хрома, которая предохраняет металл от коррозии.

*Защитные пленки* могут образовываться в естественных или искусственных условиях. Обычно это окисные пленки. Широкое распространение в промышленности нашли процессы окислирования и анодирования поверхности изделия.

*Окислирование* – это химическая обработка металла в сильных окислительных средах. Черные металлы для окислирования обрабатываются в расплавленных азотнокислых солях или в концентрированном растворе едкого натра с добавкой азотнокислого натрия. При этом детали покрываются магнитной закисью-окисью железа ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), и поверхность приобретает синий или черный цвет (воронение). Можно деталь смазать минеральным маслом и нагреть до 500–600 °С.

Окислирование меди и ее сплавов производят в растворе персульфата калия и едкого натра.

*Анодирование* – это электрохимический процесс образования окисной пленки на поверхности изделия. Анодируют детали из алюминия и его сплавов электролитической обработкой в серной кислоте. Анодом служат детали, а катодом свинцовые пластины. В процессе анодирования выделяющийся на поверхности изделия кислород окисляет металл. Для повышения окисных свойств окисной пленки ее покрывают эмалями или лаками.

Железоуглеродистые сплавы получают достаточную коррозионную стойкость после покрытия пленкой, состоящей из фосфорнокислых солей марганца и железа. Такой процесс называется *фосфатированием*.

*Металлические покрытия* широко используются для защиты поверхности детали от коррозии. Если металл покрытия расположен по электродному потенциалу левее металла изделия, то такое покрытие называют катодным, правее – анодным.

При разрушении *катодного покрытия* происходит коррозия всего изделия. Поэтому такие покрытия должны быть сплошными и прочными. *Анодные покрытия* предохраняют изделия от коррозии и при наличии оголенных участков (в этом случае разрушаться будет

металл покрытия), так как образуются короткозамкнутые элементы и основной металл играет роль катода, а покрытие – анода.

В промышленности широкое применение имеют покрытия изделий цинком, оловом, кадмием, алюминием, хромом и другими металлами.

Для железоуглеродистых сплавов хром, цинк и кадмий являются анодными покрытиями, а олово, медь и никель – катодными.

*Неметаллические покрытия* для защиты металлов от коррозии имеют самое широкое применение в производстве и быту. К ним относят покрытия эмалями, лаками и красками, резиной, пластическими массами, смазками и др.

*Стеклоэмали* по химическому составу представляют нерастворимые силикаты или боросиликаты щелочных или щелочноземельных соединений свинца, алюминия, цинка и других металлов. Добавляя различные соединения (окислы олова, сурьмы, титана и др.), окрашивают эмали в различные цвета. Эмали применяют для покрытия химической и пищевой посуды, санитарной техники, труб и т.д., что позволяет заменить дорогостоящие легированные стали.

В основу *лакокрасочных покрытий* входят пленкообразователи и растворители (которые после нанесения улетучиваются). Пленкообразующими элементами служат растительные масла, природные и синтетические смолы, эфиры, целлюлозы, каучук. Их растворы в органических растворителях (скипидаре, бензине, уайт-спирите, толуоле, этиловом и бутиловом спиртах и др.) называются лаками.

Для эластичности пленки в лакокрасочные материалы добавляют пластификаторы: сложные эфиры, полихлорвинил, касторовое масло и др. Цвет лакокрасочные материалы приобретают за счет введения различных красителей – пигментов (охры, сурика железного, ультрамарина, окиси хрома и др.).

Находят применение *покрытия пленочными материалами*. Для этого используют поливинилхлоридные, полиэтиленовые, полиамидные и другие пленки.

*Резиновые покрытия* (гуммирование) – облицовка поверхности изделия каландрированной смесью, которую прикатывают или вулканизуют.

*Защитные смазки* обычно используются для защиты деталей от коррозии при транспортировке и длительном хранении, обычно это минеральное масло, парафин, церезин и др.

**Нержавеющая сталь.** Сталь, стойкую против атмосферной коррозии, называют нержавеющей. Нержавеющие стали имеют однофазную структуру: аустенит, феррит или мартенсит. При этом не протекает электрохимическая коррозия, возникающая за счет двух и более фаз с разными электродными потенциалами. Однофазная структура получается легированием стали и термической обработкой. Высокой коррозионной стойкостью обладают хромистые и хромоникелевые стали.

В *хромистых сталях* (08X13, 12X13, 15X25Т, 30X13 и др.) коррозионная стойкость повышается в результате растворения хрома в железе и образования на поверхности защитной пленки окисла  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (при содержании хрома более 12,5 %). Углерод в этих сталях способствует получению двухфазной структуры и обедняет твердый раствор хромом, понижая коррозионные свойства.

Хромистые стали подвергают закалке с 1000–1100 °С и отпуску. Для сталей ферритного класса (08X13, 12X13) отпуск проводят при 700–750 °С. Они обладают повышенной пластичностью и используются для изготовления деталей, воспринимающих ударные нагрузки (турбинные лопатки, предметы домашнего обихода и т.д.). Для сталей мартенситного класса (30X13, 40X13) отпуск проводят при 200–250 °С. Их используют для изготовления изделий, от которых требуется высокая твердость и прочность (измерительный и медицинский инструмент и т.д.).

*Хромоникелевые стали* (12X18Н9Т, 17X18Н9, 04X18Н10 и др.) относятся к нержавеющей сталям аустенитного класса. Структура аустенита получается после закалки при 1050 °С в воде. Эти стали хорошо поддаются обработке давлением, сварке. Возможно упрочнение хромоникелевых сталей холодной пластической деформацией. Из них изготавливают детали для химической, нефтяной и пищевой промышленности.

### **Жаропрочные стали**

Жаропрочные стали обладают способностью сопротивляться пластической деформации и разрушению при высокой температуре. Различают две группы таких сталей: теплопрочные, работающие до 350–500 °С, и жаропрочные, работающие свыше 600 °С. К теплопрочным относятся легированные стали перлитного и ферритного класса. Жаропрочные стали бывают перлитного и аустенитного клас-

са. К перлитным относят котельные стали (15ХГС, 12ХМ, 15ХМФ и др.) и сильхромы. Аустенитные жаропрочные стали используют для изготовления паровых котлов высокого давления, лопаток турбин, соплового аппарата реактивных двигателей и других деталей.

### **Жаростойкие стали**

Жаростойкие стали сопротивляются газовой коррозии при высоких температурах длительное время. Для этой цели сталь легируют хромом, алюминием, кремнием, которые образуют на поверхности изделия плотные окислы  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Все нержавеющие стали и некоторые жаропрочные являются жаростойкими.

### **Износостойкие стали**

Износостойкими называют стали, сопротивляющиеся изнашиванию в абразивной среде. К ним относят графитизированные и высокомарганцовистые стали. Графитизированные стали марок ЭИ293, ЭИ336 содержат до 1,75 % С и 1,6 % Si. Углерод после графитизирующего отжига выделяется в виде графита. Структура таких сталей состоит из перлита и мелких округленных графитовых включений. Графитизированную сталь применяют для изготовления штампов, коленчатых валов и других изделий.

Высокомарганцовистые стали имеют структуру аустенита. Из них изготавливают звенья гусеницы трактора, зубья ковшей экскаваторов и другие детали.

В процессе работы на поверхности образуется наклепанная структура, и аустенит превращается в мартенсит. Это резко повышает твердость и износостойкость стали.

### **Рессорно-пружинные стали**

Работа пружин, рессор и тому подобных деталей характеризуется тем, что в них используют только упругие свойства стали. Большая суммарная величина упругой деформации пружины (рессоры) определяется ее конструкцией – числом и диаметром витков, длиной пружины. Поскольку возникновение пластической деформации в пружине не допускается, то от материала подобных изделий не требуется высокой ударной вязкости и высокой пластичности. Главное требо-

вание состоит в том, чтобы сталь имела высокий предел упругости (текучести). Это достигается закалкой с 800–850 °С в масле с последующим средним отпуском (400–450 °С) на твердость HRC 35–45.

Стали для пружин и рессор обычно легируют кремнием и марганцем иногда в сочетании с другими элементами (хром, ванадий). Введение кремния задерживает распад мартенсита при отпуске. Кремний и марганец упрочняют феррит и увеличивают прокаливаемость стали.

Пружины из углеродистых, марганцевых, кремнистых сталей работают при температурах не более 200 °С. При нагреве до 200 °С используют тяжелонагруженные пружины ответственного назначения из стали 50ХФА, а при более высоких температурах – из более теплостойких сталей: до 500 °С – из стали 3Х2В8Ф, до 600 °С – из стали Р18. Для работы в агрессивных средах пружины изготавливают из хромистых коррозионно стойких сталей типа 40Х13, 95Х18 и др.

### **Шарикоподшипниковая сталь**

Шарикоподшипниковая сталь прежде всего должна обладать высокой твердостью, поэтому применяют высокоуглеродистые стали типа инструментальной (иногда низкоуглеродистые в цементованном состоянии). Чтобы шарикоподшипниковая сталь легко принимала закалку (то есть имела низкую  $v_{\text{крит.}}$ ) и в качестве закалочной среды для нее можно было бы применять масло, сталь легируют (обычно хромом).

Сталь ШХ4 обычно используют для изготовления шариков диаметром 13,5 мм и роликов до 10 мм; ШХ15 – шариков диаметром 22,5 мм, роликов – 15 мм; ШХ15СГ – шариков диаметром до 30 мм. При изготовлении роликов большего диаметра применяют сталь ШХ20СГ. Подшипники, используемые для работы в агрессивных средах, изготавливают из нержавеющей стали 95Х18.

Долговечность сферических подшипников в значительной мере определяется отклонением от сферической формы, приводящим к биениям. Эти отклонения тщательно контролируются.

К сталям предъявляют высокое требование по неметаллическим включениям, так как они вызывают преждевременное усталостное разрушение.

Термическая обработка деталей шарикоподшипника (шарики, ролики, кольца) состоит из двух основных операций: закалка с 830–840 °С

с последующим отпуском (150–160 °С), что обеспечивает твердость не ниже HRC 62. Структура – мелкоигльчатый отпущенный мартенсит с равномерно распределенными избыточными карбидами.

### **Контрольные вопросы**

1. Как влияют легирующие элементы на механические свойства и прокаливаемость легированных сталей?
2. По каким признакам классифицируют легированные стали?
3. Какие легированные стали относятся к сталям с особыми свойствами?
4. Какие требования по свойствам предъявляют конструкционным сталям и почему?
5. Перечислите легированные стали, относящиеся к конструкционным цементуемым.
6. Перечислите легированные стали, относящиеся к конструкционным улучшаемым.
7. Какую термическую обработку назначают для цементуемых сталей, а какую – для улучшаемых?
8. Что такое красностойкость материала?
9. Где применяют быстрорежущую сталь?
10. Каким методом изготавливают твердые сплавы? Каков их состав?
11. Какой легирующий элемент вводят в сталь для повышения ее износостойкости?
12. Какова термическая обработка рессорно-пружинных сталей?

### **9.5. Применение железуглеродистых и легированных сталей и сплавов в сельскохозяйственном машиностроении**

Железуглеродистые сплавы и легированные стали являются основными конструкционными материалами для изготовления деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин.

*Стали с пониженным содержанием углерода (0,1–0,25 % С)* имеют высокую пластичность, хорошо сопротивляются ударным нагрузкам. Эти стали практически не закаляются, поэтому для повышения твердости их следует цементировать, а затем проводить термическую обработку.

*Среднеуглеродистые стали* (0,3–0,6 % С) хорошо упрочняются после термической обработки по всему объему. Закалка и высокий отпуск существенно улучшают комплекс механических свойств этих сталей. Добавление хрома и никеля повышает прокаливаемость стали, ее прочность и коррозионную прочность.

*Высокоуглеродистые стали* (0,6–0,7 % С) часто с добавками марганца и кремния, обладают высокой прочностью. В этих сталях преобладает структура перлита, поэтому ее упрочнение закалкой значительно увеличивает твердость и износостойкость металла. Структуры троостита и сорбита, полученные после термической обработки, повышают в этих сталях предел упругости.

*Легированные стали* Х9С2, Х10СМ, 40СХ10МА и другие обладают жаропрочностью и коррозионной стойкостью.

*Шарикоподшипниковые стали* марок ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ и другие после термической обработки приобретают высокую прочность, твердость и способность сопротивляться усталостному выкрашиванию

*Высоколегированная сталь* Г13Л, содержащая 1,0–1,4 % С и 11–14 % Мп, после закалки имеет структуру аустенита. При работе в условиях истирания с ударными воздействиями эта сталь приобретает высокую износостойкость (поверхность детали подвергается наклепу). На истирание хорошо работают графитизированные стали. Включения графита, выполняя роль смазки, предотвращают схватывание металла при трении.

*Серые, ковкие и высокопрочные чугуны* имеют более низкие механические свойства, чем стали. Наличие в их структуре графита придает чугунам малую чувствительность к надрезам и способность поглощать вибрации. Высокие литейные свойства позволяют отливать из чугунов сложные по конфигурации изделия. Ковкие и высокопрочные чугуны способны воспринимать ударные нагрузки. Для повышения износостойкости чугуны упрочняют закалкой. В некоторых случаях используют чугунные детали с отбеленной поверхностью. Хромирование и другие диффузионные покрытия увеличивают твердость, коррозионную стойкость и улучшают прирабатываемость чугунов.

## Выбор материала и способа упрочнения в зависимости от характера работы детали

Обоснованный выбор материала и способа упрочнения детали определяет ее работоспособность, долговечность и надежность в эксплуатации.

Материал необходимо выбирать в зависимости от условий работы детали. При этом надо учитывать характер и величину приложенной нагрузки, температурный режим, свойства агрессивных сред, вид трения и износа и другие факторы.

Металл следует выбирать с учетом экономических факторов. Детали, которые должны иметь высокую износостойкость при сравнительно невысокой прочности, можно изготавливать из цементируемых малоуглеродистых сталей, стоимость которых в 1,2–1,3 раза ниже стоимости хромистых цементируемых сталей и в 2,0–2,5 раза – хромоникелевых сталей. К наиболее дешевым относятся среднеуглеродистые стали. Легирующие добавки увеличивают их стоимость.

Материал после упрочнения должен иметь требуемую прочность, твердость, пластичность, вязкость, необходимые для надежной и длительной работы. Одновременно следует учитывать технологические свойства материала (штампуемость, обрабатываемость резанием, свариваемость и т.п.).

Ниже приводятся рекомендации по выбору материала и способа упрочнения в зависимости от характера работы деталей сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей.

*Детали, работающие в условиях абразивного воздействия почвы.* В абразивной среде работают лемехи плугов, лапы культиваторов, диски сеялок и луцильников, ножи бульдозеров и скреперов, звенья гусениц и другие детали.

Абразивные частицы почвы срезают металл детали и интенсивно изнашивают и затупляют режущую кромку. Указанные детали в эксплуатации могут подвергаться ударным нагрузкам.

Сопротивляются изнашиванию в абразивной среде лучше те материалы, которые имеют высокую твердость и прочность.

Для деталей, работающих на изнашивание и выполняющих функцию режущего элемента, *предпочтительна структура мартенсита* на поверхности рабочей части. Для их изготовления выбирают стали марок 55, 60, 65, 70, 65Г, 70Г, для лемеха – Л53, Л65 и другие.

Термическая обработка – закалка режущей кромки (обычно токами высокой частоты) и низкий отпуск (HRC 55–60) для снятия внутренних напряжений.

Для изготовления деталей, воспринимающих большие ударные нагрузки при высоком удельном давлении, *предпочтительна аустенитная структура*, которая в поверхностном слое в процессе работы изделия наклепывается и частично превращается в мартенсит. Такие детали изготавливают из аустенитной стали марки Г13. Термическая обработка – закалка в воде.

*Детали, работающие в условиях знакопеременных нагрузок.* Переменную нагрузку в работе воспринимают шатуны, шатунные болты, валы и другие детали. Периодические нагрузки от сил давления газов и инерции движущихся масс, вызывающие переменные напряжения, могут привести к усталостному излому детали. Поэтому металл должен иметь высокий предел усталостной прочности.

Для деталей, испытывающих в работе знакопеременные нагрузки, *предпочтительна структура зернистого сорбита*. Для их изготовления выбирают стали марок 40, 45, 50, 40Х, 45Х, 40ХН и др. Добавки легирующих элементов повышают предел усталостной прочности металла.

Структуру зернистого сорбита получают закалкой и высоким отпуском стали до твердости НВ 180–220. Для менее ответственных деталей можно ограничиться нормализацией.

*Детали, работающие в условиях трения скольжения.* В таких условиях работает большая группа деталей: коленчатые и кулачковые валы, шестерни, оси катков, гильзы и т.д. При работе в условиях жидкостного трения детали испытывают окислительный и тепловой износ. В процессе работы в смазку попадают абразивные частицы, которые способствуют износу трущихся частей. изнашиванию при трении лучше сопротивляются материалы, имеющие мартенситную структуру. Легирующие элементы (хром, никель) снижают окислительный износ и повышают прочность деталей.

Для деталей, работающих в условиях жидкостного трения и испытывающих знакопеременную нагрузку, выбирают стали марок 40, 45, 40Х, 45Х, 40ХН и др. Необходимые свойства детали приобретают, если их поверхностный слой имеет структуру мартенсита, а сердцевина – сорбита. Такое сочетание структур получают закалкой, высоким отпуском стали, последующей поверхностной закалкой (обычно

ТВЧ) и низким отпуском до твердости HRC 45–50. Возможен режим нормализации и последующей закалки ТВЧ.

Для деталей, работающих в условиях жидкостного трения и испытывающих ударную нагрузку (поршневой палец), выбирают малоуглеродистые стали марок 20, 30, 20X, 25X, 18ХГТ и др. Высокую твердость и износостойкость поверхностного слоя деталь приобретает после цементации и последующей закалки и низкого отпуска до твердости HRC 55–65. В этом случае сердцевина сохраняет пластичную структуру малоуглеродистой стали и деталь выдерживает ударные нагрузки без разрушения.

Детали, работающие на трение при повышенной температуре (гильзы двигателей), изготавливают из серых, высокопрочных и легированных чугунов перлитной основы марок СЧ21, СЧ24, СЧ28, ВЧ45-5 и других и азотируемых сталей 35ХМЮА, 38ХМЮА. Рабочие поверхности деталей закалывают ТВЧ или азотируют.

В условиях сухого трения скольжения работают режущие сегменты сенокосилок и другие детали.

*Детали, работающие в агрессивной среде при высокой температуре.* К таким деталям относятся выпускные и впускные клапаны, коллекторы двигателей внутреннего сгорания и другие детали. Клапаны испытывают динамические нагрузки, омываются горючими газами, движущимися с большими скоростями. При таких условиях происходит изнашивание и пригорание тарелки клапана и износ других соприкасающихся частей детали.

Сопротивляются изнашиванию в агрессивных средах при повышенной температуре стали, легированные кремнием, хромом, молибденом, – 40Х9С2, Х10СМ, 40СХ10МА, 40Х и др.

Для получения высокой твердости детали закалывают и отпускают до твердости HRC 55–60 с целью получения *мартенситной структуры*. Для выхлопных коллекторов используют серые и легированные чугуны марок СЧ24, СЧ28, ВЧ45-4 без термической обработки.

*Детали, работающие в условиях упругой деформации.* К таким деталям относятся пружины, рессоры, шайбы пружинные и др. При работе в деталях могут появиться усталостные трещины, приводящие к потере упругости. Рессорно-пружинные стали должны обладать высоким пределом упругости, выносливостью, достаточной вязкостью. Структуры троостита и сорбита обеспечивают сочетание этих свойств. Для изготовления пружин и рессор рекомендуются стали марок 50, 55, 60, 60Г, 65Г, 55Х, 55С2 и др. Марганец, кремний, хром и другие элементы

улучшают упругие свойства стали и увеличивают прочность пружин и рессор. Структуру троостита и сорбита получают закалкой изделия в масле и средним отпуском до твердости HRC 40–45.

*Детали, работающие в условиях сложных нагрузок*

*Подшипники качения.* Подшипники качения в работе воспринимают сложные по характеру нагрузки. Металл разрушается за счет работы сил трения качения и скольжения, усталостного разрушения, окислительного и теплового износа и т.д.

Металл для изготовления подшипников должен обладать высокой прочностью, выносливостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью. Предпочтительна для подшипников *троостомартенситная структура*. Для шариков, роликов и обойм подшипников качения рекомендуют легированную сталь марок ШХ6, ШХ9, ШХ15 и др. Термическая обработка – закалка и отпуск до твердости HRC 45–55.

*Корпусные детали и рамы.* К корпусным деталям относятся блоки цилиндров, картера, корпуса коробок передач и др. Данные детали должны быть прочными, гасить вибрацию движущихся частей механизма. Обычно корпусные детали имеют сложную форму, поэтому их изготавливают литьем. Сплавы, которые применяют для этих деталей, должны иметь высокие литейные свойства.

Для изготовления корпусных деталей применяют серые чугуны марок СЧ15, СЧ18, СЧ21, СЧ28 и др. Рамы обычно изготавливают из стали марок Ст 3, Ст 4. Они должны иметь определенную прочность и сохранять свою форму и размеры на весь период эксплуатации механизма. Металл используется в состоянии поставки без термической обработки.

*Детали, изготовленные глубокой вытяжкой.* Глубокой вытяжкой из листового металла изготавливают кабины автомобилей и тракторов, фары, картеры и другие детали. Для этих целей используют листовую сталь марок 05кп, 08кп, 10 и др. Структура металла должна быть ферритной с однородными по размеру зернами. Листовой материал на металлургических заводах в процессе изготовления проходит отжиг или нормализацию для получения пластичной ферритной структуры.

В таблице 18 приведены рекомендации по применению железоуглеродистых сплавов в зависимости от характера работы деталей.

Применение железоуглеродистых и легированных сплавов  
в зависимости от характера работы деталей

Характер работы детали	Наименование детали	Основные виды повреждения в эксплуатации	Предпочтительная структура	Материал для изготовления детали	Способ упрочнения
1	2	3	4	5	6
Абразивное воздействие и давление почвы	Лемехи плугов, лапы культиваторов, диски сеялок и луцильников. Звенья гусениц, зубья ковшей экскаваторов	Изнашивание, затупление режущих кромок	Мартенсит на рабочей кромке  Аустенит	Л53, Л65, 65, 70, 65Г, 70Г	Закалка и отпуск, наплавка на лезвие твердого сплава (сормайт). Закалка в воде
Переменные напряжения	Шатун, шатунный болт	Усталостные изломы, деформация	Сорбит зернистый	40,45, 35Х, 40Х, 45Х, 40ХН	Закалка и высокий отпуск
Трение скольжения	Коленвал, валы	Изнашивание, овальность, деформация	Рабочая поверхность – мартенсит. Сердцевина – сорбит	40, 45, 40Х, 45Х	Закалка и высокий отпуск (нормализация) с последующей закалкой ТВЧ и низким отпуском
Трение скольжения	Гильзы двигателей внутреннего сгорания	Изнашивание, овальность, деформация	Мартенсит и графит	СЧ24, СЧ28, СЧ32, ВЧ45-6, специальные чугуны, 35ХМЮА, 38ХМЮА	Закалка и отпуск.  Хромирование, азотирование

1	2	3	4	5	6
Трение скольжения и удар	Поршневой палец, кулачковый валик, шестерни коробок передач	Изнашивание, поломка зубьев	Мартенсит на рабочей поверхности	15, 20, 25, 15Х, 20Х, 25Х, 18ХГТ, 20ХГНР, 30ХГТ	Цементация, нитроцементация с последующей закалкой и отпуском
Трение скольжения и удар	Поршневое кольцо	Изнашивание, поломка, снижение упругости	Перлит, карбиды и графит	СЧ18, СЧ21, СЧ28, специальные легированные чугуны	Хромирование
Сухое трение скольжения	Режущие сегменты сенокосилок, пальцы гусениц	Изнашивание, затупление	Мартенсит	Сталь Х12М, 65, 70, 65Г, 70Г	Закалка и отпуск
Упругая деформация	Пружины, рессоры	Потеря упругости, усталостные изломы	Троостит, сорбит	50, 55, 60, 65, 60Г, 65Г, 55Х	Закалка и отпуск, поверхностный наклеп
Подшипники качения	Шарики, ролики, внутренние и наружные кольца	Изнашивание, усталостное выкрашивание	Троостомартенсит	ШХ10, ШХ15, ШХ15СГ	Закалка и отпуск
Агрессивная среда при высокой температуре	Клапаны двигателей внутреннего сгорания	Изнашивание, пригорание	Мартенсит	Для выпускных клапанов 40Х9С2, Х10СМ, 40СХ10МА. Для впускных клапанов 40, 40Х, 40ХН, 40Х9С2	Закалка и отпуск

## ТЕМА 10. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

В практике сельскохозяйственного и автотракторного машиностроения широкое применение нашли сплавы на основе цветных металлов – меди и алюминия. Цветные металлы и сплавы можно обрабатывать давлением, резанием и сваривать. Для изменения их свойств применяют термическую обработку. Детали из цветных металлов и сплавов изготавливают литьем и пластическим деформированием. Применение цветных металлов необходимо экономически оправдывать, так как они дороги и дефицитны по сравнению с черными металлами.

### 10.1. Алюминий и его сплавы

*Алюминий* – легкий металл (плотность  $2700 \text{ кг/м}^3$ ) белого цвета с гранцентрированной кристаллической решеткой. Температура плавления  $Al$   $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . По сравнению с железом, у которого плотность  $7800 \text{ кг/м}^3$ , а  $t_{пл} = 1536 \text{ }^\circ\text{C}$ , алюминий имеет почти в три раза более низкую плотность, вследствие чего этот металл и его сплавы широко применяют там, где малая плотность и большая удельная прочность ( $\sigma_s/\rho$ ) имеют важное значение.

Характерные свойства алюминия – высокая пластичность и малая прочность. Прокатанный и отожженный алюминий высокой чистоты имеет следующие механические свойства:  $\sigma_s = 58 \text{ МПа}$ ;  $HB25$ ;  $\psi = 85 \text{ } \%$ ;  $\delta = 40 \text{ } \%$ . Алюминий не имеет аллотропических модификаций, обладает высокой электро- и теплопроводностью, высокой химической активностью и одновременно исключительной коррозионной стойкостью, объясняемой образованием на поверхности тонкой прочной беспористой оксидной пленки  $Al_2O_3$ , надежно защищающей металл от дальнейшего окисления. Чем чище алюминий и чем он более свободен от различных примесей, тем выше его коррозионная устойчивость.

Наиболее чистый алюминий – алюминий особой чистоты, содержит  $99,999 \text{ } \%$   $Al$ , а сумма всех примесей составляет не более  $0,001 \text{ } \%$ . Его применяют преимущественно для лабораторных опытов. В промышленности в зависимости от требований применяют алюминий высокой чистоты ( $99,995\text{--}99,95 \text{ } \%$   $Al$ ) и технической чистоты ( $99,85\text{--}99,0 \text{ } \%$   $Al$ ).

Сплавы на основе алюминия обладают малой плотностью, высокими удельными механическими свойствами, высокой коррозионной стойкостью, свариваемостью и т.д.

Алюминиевые сплавы классифицируют на *деформируемые* (в их структуре отсутствует эвтектика), *литейные* (сплавы с эвтектикой), *неупрочняемые термической обработкой* (нагрев таких сплавов не сопровождается фазовыми превращениями в твердом состоянии), *упрочняемые термической обработкой* (сплавы с твердофазными превращениями). Кроме того, сплавы подразделяют на жаропрочные, высокопрочные, ковочные, сплавы для заклепок и т.д.

*Деформируемыми сплавами*, неупрочняемыми термообработкой, являются сплавы на основе системы Al-Mg (*магналии*), например AMg2, AMg3, AMg6; сплавы системы Al-Mn, например AMц (табл. 19).

Таблица 19

Типичные механические свойства некоторых деформируемых  
алюминиевых сплавов после закалки и старения

Сплав	Содержание элементов (по массе), %					$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\epsilon}$	$\delta$ , %
	Cu	Mg	Mn	Si	Другие			
<i>Дуралюмины</i>								
Д1	3,8–4,8	0,4–0,8	0,4–0,8	0,7	–	250	410	15
Д16	3,8–4,5	1,2–1,8	0,3...0,9	0,5	–	380	520	11
<i>Сплав авиаль</i>								
АВ	0,2–0,6	0,45–0,9	0,15–0,35	0,5–1,2	–	120	220	22
<i>Высокопрочные алюминиевые сплавы</i>								
В95	1,4–2,0	1,8–2,0	0,2–0,6	0,5	5–7 Zn; 0,1–0,2 Cr	540	580	8
В96	2,2–2,8	2,5–3,2	0,2–0,5	–	8–9 Zn	630	670	7
<i>Ковочные алюминиевые сплавы</i>								
АК6	1,8–2,6	0,4–0,8	0,4–0,8	0,7–1,2	–	300	420	13
АК8	3,9–4,8	0,4–1,0	0,4–1,0	0,6–1,2	–	380	480	12
<i>Жаропрочные алюминиевые сплавы</i>								
АК4-1	1,9–2,5	1,4–1,8	–	0,35	0,8–1,5 Fe; 1,0–1,5 Ni; 0,02–0,1 Ti	80	430	13
Д20	6–7	–	0,4–0,8	0,3	0,1–0,2 Ti; ~ 0,27 Zr	250	400	12

Важнейшими деформируемыми сплавами, упрочняемыми термической обработкой, являются:

- сплавы на основе системы Al-Cu-Mg (*дюралюмины*), например Д1, Д16, ВД17, Д18, Д19, В65 (сплав ВД17 – жаропрочный, Д18 и В65 – сплавы для заклепок);

- сплавы на основе системы Al-Mg-Si (*авиали*), например АВ, АД31, АД35;

- ковочные сплавы на основе системы Al-Mg-Si-Cu, например, АК6, АК8; на основе системы Al-Cu-Mg с добавками Fe и Ni, например АК4-1 (сплав жаропрочный);

- высокопрочные сплавы на основе системы Al-Zn-Mg-Cu, например В93, В95, В96Ц.

Эти сплавы хорошо обрабатываются давлением (штамповкой в холодном состоянии, гибкой и т.д.). Их широко применяют в строительных конструкциях, при изготовлении баков для бензина, трубопроводов и т.д. Из дюралюмина Д16 также изготавливают обшивки, силовые каркасы, кузова грузовых автомобилей. Дюралюмин, изготавливаемый в листах, для защиты от коррозии подвергают плакированию, то есть покрытию тонким слоем алюминия высокой чистоты. Толщина слоя составляет 4 % от толщины листа.

Термическое упрочнение алюминиевых сплавов достигается закалкой и последующим старением. Обосновать режимы термообработки таких сплавов, как дюралюмины, можно в первом приближении, рассматривая их как сплавы системы Al-Cu (в дюралюминах медь главный легирующий элемент). Свежезакаленные сплавы имеют довольно низкую твердость и прочность, высокую пластичность. При длительном пребывании закаленного сплава при нормальной температуре (естественное старение) или при сравнительно непродолжительном нагреве (искусственное старение) атомы легирующих элементов (в сплавах системы Al-Cu – атомы меди), расположенные в свежезакаленном сплаве случайно, собираются в определенных местах кристаллической решетки, образуя участки повышенной концентрации – зоны Гинье-Престона. В результате естественного старения образуются зоны толщиной 0,5–1 нм и протяженностью 3–6 нм (их называют зоны ГП-1), вызывая упрочнение сплава.

Если естественно состаренный сплав подвергнуть кратковременному нагреву до 250–270 °С, то зоны ГП растворятся и сплав возвращается в свежезакаленное состояние с характерными для него свойствами (низкой твердостью и высокой пластичностью). Это яв-

ление получило название *возврат*. После возврата сплав может быть вновь упрочнен при естественном или искусственном старении.

При искусственном старении зоны Гинье-Престона укрупняются, достигая 1–4 по толщине и 20–30 нм по протяженности (зоны ГП-2). Концентрация меди в них приближается к стехиометрическому соотношению в соединении  $\text{CuAl}_2$ . Дальнейшее развитие процессов искусственного старения приводит к образованию метастабильных когерентно связанных с твердым раствором, а затем стабильных, обособленных от раствора фаз. Скорость искусственного старения зависит от температуры. Повышение температуры ускоряет процесс. Однако в сплавах системы Al-Cu с 3–5 % меди получаемая при этом максимальная прочность тем ниже, чем выше температура старения. Наибольшее упрочнение получают при естественном старении в результате образования зон ГП-1.

Для повышения прочности дуралюмины подвергаются закалке с 500 °С в воде и старению. Процесс естественного старения длится 4–5 суток. Отжигают дуралюмины при 340–370 °С.

Не всегда максимум прочности достигается естественным старением, более того, во многих высокопрочных сплавах (В93, В95 и др.) естественное старение не протекает вообще (упрочнения при длительной выдержке при нормальной температуре не происходит). Термическая обработка этих сплавов состоит в закалке с 510–520 °С в воде и искусственного старения при 120–140 °С.

Состояние деформируемых сплавов, отражающее термическое и термомеханическое воздействие, имеет обозначения: М – мягкий, отожженный; Т – закаленный и естественно состаренный; Т1 – закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность; Н – нагартованный (деформация 1–7 %); Н1 или НН – усиленно нагартованный; ТН – закаленный, естественно состаренный и нагартованный. Например, АК6Т1 – обозначение закаленного и искусственно состаренного деформируемого (ковочного) алюминиевого сплава АК6, АМг2Н1106 – обозначение усиленно нагартованного деформируемого неупрочняемого термической обработкой сплава АМг2.

*Литейными сплавами* являются сплавы на основе систем Al-Si (силумины), например АК12 (АЛ2), АК7 (АЛ9); Al-Cu, например АЛ19, АЛ33; Al-Mg, например АЛ8, АМгЮ (АЛ27). Механические свойства некоторых литейных сплавов алюминия приведены в таблице 20.

В соответствии с новой цифровой системой маркировки Al сплавов единица, стоящая в начале марки, характеризует основу

сплава – алюминий. Вторая цифра обозначает основной легирующий элемент или группу элементов. Третья или третья и вторая цифры те же, что и в старой маркировке. Нечетное число или ноль, стоящие на четвертом месте, обозначают деформируемый сплав. У литейных сплавов четвертая цифра четная. При такой маркировке сплав Д16, например, обозначается 1160.

Таблица 20

Механические свойства некоторых литейных  
алюминиевых сплавов

Сплав	Содержание ( по массе), %					$\sigma_6$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
	Mg	Si	Mn	Cu	другие			
<i>Сплавы Al–Si (силумины)</i>								
АЛ2	–	11–13	–	–	–	180	90	5
АЛ4	0,17–0,3	0–10,5	0,25–0,5	–	–	180	140	2
АЛ9	0,2–0,4	6–8	–	–	–	220	160	3
<i>Сплавы Al–Cu</i>								
АЛ7	–	–	–	4–5	–	240	160	7
АЛ19	–	–	0,6–1,0	4,5– 5,3	0,25–0,45 Ti	320	180	9
<i>Сплавы Al–Mg</i>								
АЛ8	9,5–11,5	–	–	–	–	350	170	10
АЛ27	0,5–11,5	–	–	–	до 0,15 Ti до 0,2 Zr до 0,15 Be	360	180	18
<i>Жаропрочные сплавы</i>								
АЛ1	1,3–1,8	–	–	3,8– 4,5	1,8–2,3Ni 0,2–0,3Cr	260 220	200 180	0,6 1,2
АЛ20	0,7–1,2	1,5–2,0	0,2–0,3	3,6– 4,5	1,3–1,5Fe до 0,1 Ti	300 230	230 180	0,8 0,8
АЛ21	0,8–1,3	–	0,2–0,3	4,6– 6,0	2,6–3,6Ni 0,1–0,3Cr	210 220	– 200	1,2 1,5

Чистота сплавов по контролируемым примесям (Fe, Si и др.) обозначается буквами: пч (практически чистый), ч (чистый), оч (очень чистый), стоящими после марки сплава, например АМг5оч.

Литейные алюминиевые сплавы применяют для изготовления деталей машин и приборов литьем. Они имеют хорошие литейные свойства: высокую жидкотекучесть в расплавленном состоянии, вы-

сокие механические свойства. Кроме того, они хорошо обрабатываются резанием.

*Сплавы Al–Si* называют *силуминами*. Их маркируют буквами АЛ и порядковой цифрой: АЛ2, АЛ4, АЛ9 и т.д.

В сплаве АЛ2 (11–13 % Si) кремний при затвердевании сплава выделяется в виде крупных кристаллов игольчатой формы. Это снижает механические свойства сплава. Для измельчения структуры и устранения избыточных кристаллов кремния силумины модифицируют натрием (0,05–0,08 % Na). В структуре вместо избыточного кремния появляются кристаллы  $\alpha$ -раствора, а эвтектика приобретает более тонкое строение и состоит из мелких кристаллов Si и  $\alpha$ -твердого раствора. В процессе затвердевания кристаллы кремния обволакиваются пленкой силицида натрия ( $\text{Na}_2\text{Si}$ ), которая затрудняет их рост. Сплавы АЛ2 подвергают отжигу при 300 °С в течение 5–10 ч для снятия внутренних напряжений.

*Сплавы Al–С* (АЛ7, АЛ19) обладают высокими механическими свойствами, хорошей обрабатываемостью резанием, однако имеют низкие литейные свойства (большая усадка, склонность к образованию горячих трещин и т.д.). Сплавы подвергают закалке при 535–545 °С с охлаждением в горячей воде и искусственному старению (2–3 ч) при 175 °С. Упрочнение происходит вследствие выделения частиц  $\text{CuAl}_2$  и  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ .

*Сплавы Al–Mg* (АЛ8, АЛ27) имеют низкие литейные свойства, но хорошую коррозионную стойкость и обрабатываемость резанием. Эти сплавы применяют для отливок, работающих во влажной атмосфере. Термическая обработка заключается в закалке при 430 °С в течение 12–20 ч (для растворения частиц  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  в  $\alpha$ -твердом растворе) и охлаждении в масле.

*Жаропрочные сплавы* АЛ1, АЛ20 применяют для изготовления поршней, головок цилиндров и других деталей, работающих при 275–300 °С. Структура сплава АЛ1 состоит из  $\alpha$ -твердого раствора, содержащего Cu, Mg, Ni, и избыточных фаз  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  и  $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ .

Поршни подвергают закалке при 525 °С и старению при 290 °С.

## 10.2. Медь и ее сплавы

*Медь* – металл красноватого цвета с гранцентрированной кристаллической решеткой. Плотность Cu равна 8890 кг/м<sup>3</sup>. При 1083 °С медь плавится.

По свойствам медь близка к серебру и золоту. Последние на воздухе не окисляются и поэтому называются благородными металлами. Медь окисляется слабо, поэтому ее называют полублагородным металлом.

Чистая медь имеет ряд ценных технических свойств. Благодаря высокой пластичности, высокой электро- и теплопроводности, малой окисляемости этот металл широко используется в промышленности.

Высокая электропроводность меди обуславливает ее преимущественное применение в электротехнике как проводникового металла. Все примеси уменьшают электропроводность меди. Наклеп также понижает электропроводность меди. Поэтому, если провода не должны быть особо прочными, то применяют отожженную медь. Для подвесных же проводов (где требуется прочность) применяют нагартованную медь или медь с небольшими добавками активных упрочнителей (например, с добавкой 1 % Cd).

Механические свойства чистой меди приведены в таблице 21.

*Таблица 21*

Механические свойства чистой меди

Состояние	$\sigma_s$ , МПа	$\delta$ , %
Литая	150–2	15–25
Прокатанная и отожженная	250–270	40–50
Нагартованная	400–450	1–2

Путем электролиза удастся получить медь весьма высокой чистоты. Для научных целей можно приготовить медь 99,999 %-й чистоты, но техническая медь обычной чистоты содержит 0,1–0,5 % примесей (табл. 22).

*Таблица 22*

Состав технической меди (ГОСТ 859-78), %

Марка	Cu	Примеси (не более)			Марка	Cu	Примеси (не более)		
		Bi	Pb	$\Sigma_{\text{прим}}$			Bi	Pb	$\Sigma_{\text{прим}}$
M000	99,99	0,0005	0,001	0,01	M2	99,7	0,002	0,01	0,3
M1	99,9	0,001	0,005	0,1	M3	99,5	0,003	0,05	0,5

В технике наряду с чистой медью широко используются ее сплавы. Наибольшее распространение получили сплавы меди с цинком, называемые *латунями*, и сплавы с другими элементами (Sn, Si, Al, Be и т.д.), получившие название *бронзы*.

*Латуни* обладают высокими механическими и технологическими свойствами и имеют высокую коррозионную стойкость. В системе *медь–цинк* (рис. 58) образуются шесть твердых растворов:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\eta$ . При содержании цинка до 39 % латунь имеет структуру однофазного  $\alpha$ -твердого раствора цинка в меди. Такие латуни обладают высокой пластичностью, хорошо деформируются при низких и высоких температурах. Однако в интервале 200–600 °С появляется хрупкость, связанная с образованием в примесях свинца, сурьмы, висмута хрупких межкристаллитных прослоек. С повышением температуры эти прослойки растворяются, и пластичность латуни увеличивается. Чем больше в  $\alpha$ -латуни цинка, тем выше прочность и пластичность сплава.

При содержании цинка свыше 39 % в структуре латуни появляется  $\beta'$ -фаза – упорядоченный твердый раствор на базе электронного соединения CuZn. Двухфазные ( $\alpha + \beta'$ ) латуни имеют повышенную прочность и твердость, меньшую пластичность. Выше 700 °С, когда структура становится однофазной и  $\beta$ -фаза имеет неупорядоченное расположение атомов, пластичность латуни увеличивается.

При концентрации Zn более 45 % сплав становится однофазным твердым раствором  $\beta$ .

Практическое применение в технике имеют латуни с содержанием цинка до 43 %.

При холодной обработке давлением латуни получают значительный наклеп, который снимается рекристаллизационным отжигом. Для получения мелкого зерна в  $\alpha$ -латунях температуру отжига назначают в пределах 350–450 °С. Латуни, содержащие 20 % цинка, склонны к растрескиванию при вылеживании во влажной атмосфере (особенно содержащей следы аммиака). Это происходит в результате коррозии по границам зерен.

Кроме основных компонентов (Cu и Zn), латунь может содержать легирующие элементы (Al, Fe, Pb, Sn и т.д.). Олово, марганец и алюминий увеличивают прочность и коррозионную стойкость латуни; кремний улучшает ее литейные свойства.

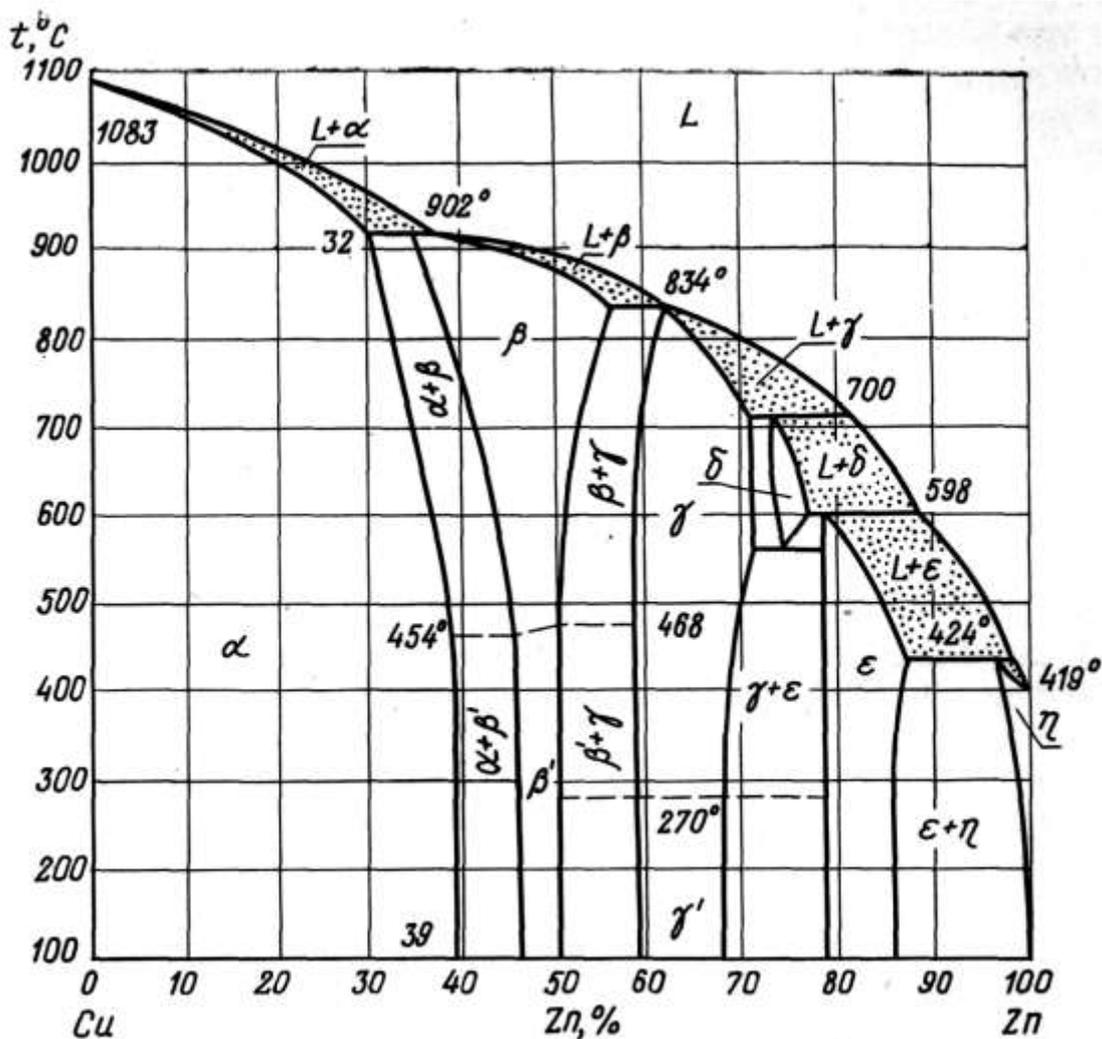


Рис. 58. Диаграмма состояния Cu–Zn

Деформируемые латуни маркируют буквой Л и следующими за ней обозначениями легирующих элементов, если таковые имеются. Затем следуют группы чисел, первое из которых указывает на концентрацию меди, а каждое из последующих – на содержание соответствующего легирующего элемента. Концентрация цинка определяется по разности. Например, сплав Л62 содержит 62 % Cu и 38 % Zn; ЛАН59-3-2 содержит 59 % Cu, 3 % Al, 2 % Ni и 36 % Zn.

В марках литейных латуней в явной форме указывается содержание цинка (содержание меди определяют по разности). Числа, соответствующие процентной концентрации цинка и легирующих элементов, следуют непосредственно за буквенными символами. Например, сплав ЛЦ40МцЗА содержит 40 % Zn, 3% Mn, 1 % Al и 56 % Cu.

Латуни применяют для изготовления лент, труб, полос, проволоки, гаек, шестерен, подшипников скольжения, втулок, прокладок, коррозионно стойких в воде деталей и т.д.

*Бронзы* в зависимости от легирующего элемента бывают оловянистые, алюминиевые, кремнистые, бариллиевые и т.д. Они обладают хорошими литейными свойствами. Некоторые бронзы имеют высокую пластичность и коррозионную стойкость.

Принципы маркировки *бронз* в общем близки с маркировкой латуней. Различия состоят в том, что на первом месте в марке пишут не Л, а Бр, кроме того, ни в деформируемых, ни в литейных сплавах не указывают в явной форме концентрацию меди, имея в виду, что она всегда является основой сплава. Например, сплав БрОЦС 4-4-17 – деформируемая бронза, содержащая 4 % Sn, 4 % Zn, 17 % Pb, основа сплава – медь; сплав БрОЗЦ12С5 – литейная бронза, содержащая 3 % Sn, 12 % Zn, 5 % Pb, основа сплава Cu.

*Оловянистые бронзы* (БрОЦСН 3-7-5-1, БрОЦС 3-7-5 и др.) обладают хорошими металлическими, антифрикционными и технологическими свойствами, а также коррозионной стойкостью. Они имеют высокие литейные свойства, хорошо воспринимают пайку и сварку, не дают искры при ударах, немагнитны и морозостойки.

*Алюминиевые бронзы* (БрАЖ 9-4, БрАЖМц 10-3-1.5 и др.) обладают хорошими технологическими и механическими свойствами и не содержат дефицитных элементов. Бронзы, содержащие более 10 % Al, можно подвергать закалке (нагрев до 900 °С и охлаждение в воде) для увеличения твердости и прочности. Из алюминиевых бронз изготавливают зубчатые колёса, сальники, втулки, детали турбин и т.д.

*Кремнистые бронзы* (БрКМц3-1, БрКН1-3 и др.) обладают высокой пластичностью и хорошими литейными свойствами. Их применяют в качестве заменителей оловянистых бронз. Эти бронзы упрочняют термической обработкой – закалкой с 850–875 °С в воде и последующим отпуском – старением при 410–475 °С. Из кремнистых бронз изготавливают втулки, пружины и другие детали.

*Бериллиевые бронзы* (БрБ2) обладают высокой прочностью, коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью. Их используют в приборостроении для изготовления ответственных пружин, мембран и других деталей. Для получения нужных свойств бронзу подвергают закалке с 780 °С в воде и старению при 300 °С в течение 3 часов.

### **10.3. Титан и его сплавы**

*Титан* существует в двух аллотропических модификациях. Ниже 882 °С существует  $\alpha$ -титан, обладающий ГПУ кристаллической

решеткой. При более высоких температурах вплоть до температуры плавления (1665 °С) Ti существует в модификации  $\beta$  с ОЦК решеткой. Титан может быть отнесен как к тугоплавким металлам (температура плавления выше, чем у Fe), так и к легким (плотность Ti – 4500 кг/м<sup>3</sup>). По химической стойкости он не уступает коррозионно-стойким (нержавеющим) сталям, а в ряде случаев превосходит их.

*Титановые сплавы* наиболее широко применяют в авиации и ракетной технике для изготовления деталей, работающих при температурах 250–550 °С, когда легкие алюминиевые сплавы уже не могут работать, а стали и никелевые сплавы уступают им по удельной прочности.

Для повышения прочности титановые сплавы легируют марганцем, железом, алюминием, молибденом, хромом, ванадием, оловом и другими элементами. Элементы, расширяющие область существования  $\alpha$ -модификации титана и повышающие температуру  $\alpha \rightarrow \beta$  перехода, называют  $\alpha$ -стабилизаторами. Важнейшим элементом этой группы является Al. Элементы, расширяющие область существования  $\beta$ -модификации титана и снижающие температуру полиморфного превращения, называют  $\beta$ -стабилизаторами. Важнейшими из них являются Mo, V, Cr, Mn, Fe, Ni и др. Способность  $\beta$ -фазы к переохлаждению лежит в основе термической обработки титановых сплавов.

Элементы, практически не влияющие на температуру полиморфного превращения, называют нейтральными. Наибольшее практическое значение из них имеют Sn и Zr.

По структуре в отожженном состоянии титановые сплавы подразделяют на пять групп:  $\alpha$ -сплавы (BT1-0, BT5 и др.); псевдо  $\alpha$ -сплавы (OT4, BT4, BT18 и др.); ( $\alpha + \beta$ )-сплавы (BT6, BT3-1, BT22 и др.); псевдо  $\beta$ -сплавы (BT15, TC6 и др.);  $\beta$ -сплавы (4201 и др.).

Титановые сплавы можно упрочнять термической обработкой в печах с защитной атмосферой.

#### **10.4. Антифрикционные сплавы**

*Сплавы цветных металлов* широко применяются в качестве антифрикционных (подшипниковых) материалов. Они обладают гетерогенной структурой, состоящей из мягкой основы с равномерно распределенными включениями твердых частиц (баббиты, ряд сплавов на основе меди, цинковые антифрикционные сплавы) или из твердой

основы и мягких включений (свинцовистая бронза, оловянистый алюминий).

*Баббиты*, например Б83, Б16, БКА, – сплавы на основе олова (Б83) или свинца (Б16 – с добавкой Sn, БКА – безоловянистый). Применяют баббиты для изготовления вкладышей подшипников скольжения быстроходных тяжелонагруженных машин (Б83, Б88), автомобильных моторов (Б16), подшипников вагонов (БКА, БК2).

Широкое применение имеют оловянистые баббиты Б83 (11 % Sb, 6 % Cu, 83 % Sn). Структура оловянистых баббитов состоит из твердого скелета игл  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  и вязкой основы тройной эвтектики – твердого раствора сурьмы и меди в олове и частиц  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  и SnSb. Вал во время работы изнашивает вязкую основу сплава и опирается на выступающие твердые частицы. Это способствует удержанию смазки во впадинах подшипника.

*Алюминиевые подшипниковые сплавы*, например АО9-2, АО20-1, работают в условиях высокой энергонапряженности (при высоких давлениях и скоростях скольжения).

Несколько уступает по антифрикционным свойствам алюминиевым сплавам свинцовистая бронза БрСЗО. Бронзу БрО5Ц5С5, латунь ЛЦ16К4 и др. применяют в качестве антифрикционных материалов при невысоких скоростях скольжения (1–3 м/с).

### Контрольные вопросы

1. Как влияют примеси на электропроводность меди?
2. Как маркируются деформируемые латуни?
3. Какими механическими, физическими и технологическими свойствами обладают бронзы?
4. Где в пищевом машиностроении применяют алюминий и его сплав?
5. Какими методами обрабатываются деформируемые алюминиевые сплавы? Назовите примеры таких сплавов.
6. Назовите группы алюминиевых сплавов.
7. Какой термической обработке подвергают дюралюмины?
8. Из каких компонентов состоит сплав *силумин*?
9. Какие свойства титановых сплавов делают их перспективными для применения в пищевой промышленности?
10. Какие сплавы цветных металлов применяют в качестве антифрикционных?

## **ТЕМА 11. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **11.1. Электротехнические материалы**

В машиностроении применяют специальные электротехнические материалы: электроизоляционные, магнитные, проводниковые, полупроводниковые и другие. Для их эффективного применения нужна информация о параметрах электрических, магнитных и других специфических свойств.

**Электропроводность** – свойство материалов проводить электрический ток, обусловленное наличием в них подвижных заряженных частиц – электронов.

Природу электропроводности твердых материалов объясняет зонная теория, согласно которой энергетический спектр электронов состоит из чередующихся зон разрешенных и запрещенных энергий. В нормальном состоянии электроны могут иметь только определенные значения энергии, то есть занимать разрешенные энергетические уровни (валентную зону). Пустые или частично заполненные более высокие энергетические уровни образуют зону проводимости. Электроны, возбуждаясь, то есть приобретая добавочную энергию, например при нагревании материалов, могут переходить в зону проводимости. Если валентная зона и зона проводимости перекрываются, то при незначительном возбуждении электроны будут перемещаться от одних атомов к другим. Материалы такого типа – проводники – обладают высокой электропроводностью. Электропроводность диэлектриков очень мала, так как переход заметного числа электронов в зону проводимости – случайное явление, обусловленное, например, дефектами структуры.

**Электрическое сопротивление** – свойство материалов как проводников противодействовать электрическому току.

Все вещества, помещенные во внешнее магнитное поле, намагничиваются. **Намагничивание** связано с наличием магнитных моментов у частиц вещества.

Характеристикой намагничивания материалов служит *намагниченность*, равная суммарному магнитному моменту атомов в единичном объеме материала.

Величина, характеризующая связь намагниченности с магнитным полем в материале, называется *магнитной восприимчивостью*.

В зависимости от знака и значения магнитной восприимчивости материалы делят:

- на диамагнетики;
- парамагнетики;
- ферромагнетики.

**Диамагнетизм** – свойство материалов намагничиваться во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном полю. Диамагнетизм присущ всем веществам.

*Диамагнетики* обладают отрицательной магнитной восприимчивостью. Во внешнем магнитном поле они намагничиваются против поля. В отсутствие внешнего магнитного поля диамагнетики немагнитны.

*Парамагнетики* обладают положительной магнитной восприимчивостью. Они слабо намагничиваются по направлению поля, а в отсутствие поля – немагнитны.

*Ферромагнетики* характеризуются большим значением магнитной восприимчивости и ее зависимостью от напряженности поля и температуры. Они обладают самопроизвольной намагничиваемостью даже в отсутствие внешнего намагничивающего поля.

*Антиферромагнетики* – материалы, намагниченность которых в отсутствие магнитного поля равна нулю.

Магнитная восприимчивость, как правило, существенно зависит от температуры: у парамагнетиков – уменьшается при нагревании, у ферромагнетиков – увеличивается скачком.

*Проводниковые* материалы классифицируют в зависимости от удельного электрического сопротивления на металлы и сплавы высокой проводимости, криопроводники и сверхпроводники, сплавы с повышенным электросопротивлением.

Среди *металлов высокой электрической проводимости* широко распространены медь (удельное электросопротивление  $\rho = 0,017$  мкОм • м), алюминий ( $\rho = 0,028$  мкОм • м) и железо ( $\rho = 0,098$  мкОм • м). Имеют практическое значение также серебро ( $\rho = 0,006$  мкОм • м) и золото ( $\rho = 0,022$  мкОм • м).

Электрические и механические характеристики *меди* в значительной степени определяются наличием примесей и напряженностью структуры металла. Наименьшим электрическим сопротивлением обладает чистая медь. Любые примеси снижают ее электропроводность. Деформационное упрочнение ухудшает проводниковые свойства меди, но увеличивает ее механическую прочность. Хо-

*Лоднотянутая (твердая) медь* – МТ применяется в основном там, где необходимы, наряду с достаточной электрической проводимостью ( $\rho = 0,018$  мкОм • м), прочность, твердость, высокое сопротивление истирающим нагрузкам (например, контактные провода, коллекторные пластины электрических машин). *Отожженная (мягкая) медь* – ММ имеет высокую электрическую проводимость ( $\rho$  не более 0,01724 мкОм • м) и применяется в виде проволок для изготовления токопроводящих жил кабелей, обмоточных и монтажных проводов, в производстве волноводов и т.д.

*Алюминий* как проводниковый материал занимает второе место после меди. Для электротехнических целей используют специальные марки алюминия А5Е (общее содержание примесей 0,5 %) и А7Е (примесей 0,3 %), в которых содержание железа и кремния находится в определенном соотношении, а концентрация Ti, V, Cr и Mn снижена до тысячных долей процента. Удельное электрическое сопротивление проводникового алюминия не более 0,0289 мкОм • м.

*Железо* значительно уступает меди и алюминию по электрической проводимости, но оно обладает более высокими механическими характеристиками. В качестве проводникового материала железо (низкоуглеродистые стали) применяют в тех случаях, когда прочностные свойства имеют решающее значение, например для рельсов подвижного состава с электрической тягой.

Широкое применение стальная проволока находит в воздушных линиях связи и электропередачах небольших мощностей, а также в качестве сердечников в биметаллических сталеалюминевых или сталемедных проводах для повышения их прочности на разрыв. Для постоянного тока применяют проволоку из железа армко (углерода не более 0,03%).

*Свинец* широко применяют для изготовления защитных оболочек кабелей, легкоплавких вставок предохранителей, защитных экранов в рентгеновских установках и пластин в кислотных аккумуляторах.

*Платина и серебро* обладают высокой пластичностью и коррозионной стойкостью. Из них можно изготовить проволоку диаметром 0,002 мм. Платиновая проволока применяется для изготовления электронагревательных элементов лабораторных печей, для изготовления термопар. Из серебра и платины изготавливают контакты для включающих аппаратов малой мощности (реле и др.).

*Вольфрам и молибден* используют для изготовления спиралей накаливания, поддерживающих крючков, петель, катодов в электро-

вакуумных приборах, а также размыкающих контактов в электрических аппаратах.

*Ртуть* сохраняет свое жидкое состояние до  $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Она стойка к окислению. Ртуть применяют в качестве жидких контактов в специальных реле, выключателях и ртутных выпрямителях.

К *криопроводникам* относятся материалы, приобретающие при глубоком охлаждении (ниже  $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) высокую электрическую проводимость, но не переходящие в сверхпроводниковое состояние. Одним из таких материалов является алюминий особой чистоты А999 (99,999 % А1). При температуре жидкого азота минус  $195,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  удельное электрическое сопротивление составляет около  $0,003\text{ мкОм} \cdot \text{м}$ , а при температуре жидкого водорода минус  $252,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  – около  $0,00005\text{ мкОм} \cdot \text{м}$ .

К *сплавам с повышенным удельным электрическим сопротивлением* (не менее  $0,3\text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ) относятся медноникелевые сплавы: манганин (МНМц 3-12), константан (МНМц 40-1,5); сплавы на основе никеля: нихромы (Х20Н80, Х15Н60); на железной основе: фехраль (Х13Ю4), хромель (ОХ23Ю5) и др.

*Манганин* – сплав на основе Cu, легированный 3 % Ni и 12 % Mn, обладает стабильным удельным электрическим сопротивлением в интервале температур от  $-100$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Низкое значение термоЭДС в паре с медью и высокая стабильность электросопротивления во времени позволяют широко использовать манганин при изготовлении резисторов и электроизмерительных приборов высоких классов точности.

*Константан* (около 40 % Ni и 1,5 % Mn, основа – Cu) по стойкости к нагреву превосходит манганин, что позволяет использовать его в реостатах и электронагревательных приборах, работающих при температуре до  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Высокая термоэлектродвижущая сила константана в паре с медью и железом исключает возможность применения его в электроизмерительных приборах, однако она позволяет применять константан при изготовлении термопар.

Сплавы высокого электросопротивления (нихромы, фехраль, хромель и др.) применяют для изготовления нагревательных элементов электрических приборов и печей. Рабочие температуры таких сплавов  $900\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Диэлектриками* называют материалы, основным электрическим свойством которых является способность поляризоваться в электрическом поле. В диэлектриках электрические заряды прочно связаны с

атомами, молекулами или ионами и в электрическом поле лишь несколько смещаются относительно положения равновесия. Происходит разделение центров положительного и отрицательного зарядов, т.е. поляризация. Для диэлектриков характерно высокое сопротивление прохождению постоянного электрического тока. Мерой поляризуемости диэлектрика является *относительная диэлектрическая проницаемость*, равная отношению емкости конденсатора с диэлектриком к емкости такого же конденсатора с вакуумом. Важнейшей характеристикой диэлектрических материалов является *электрическая прочность*. При превышении в объеме диэлектрика некоторой критической величины напряженности электрического поля происходит пробой (под напряженностью электрического поля понимают отношение приложенного к диэлектрику напряжения к расстоянию между подводящими напряжением электродами). Значение напряжения в момент пробоя называют пробивным напряжением, а достигнутую к этому моменту напряженность – электрической прочностью.

В приборостроении в ряде случаев требуются материалы с минимальным или заданным по величине температурным коэффициентом линейного расширения, материалы с малым температурным коэффициентом модуля упругости и др. Сплавы, имеющие подобные свойства, принадлежат системе Fe-Ni.

Минимальное значение температурного коэффициента линейного расширения ( $1,5 \cdot 10^{-6}$ ) в интервале температур от  $-60$  до  $+100$  °C имеет сплав с 36 % никеля – 36Н, называемый *инвар*. Малое значение температурного коэффициента линейного расширения сплавов инварного типа имеет ферромагнитную природу и связано с большой *магнитострикцией*, т.е. изменением размеров ферромагнетика при его намагничивании. Размеры изделий инварного сплава определяются двумя составляющими: нормальной, зависящей от энергии связи между атомами, и магнитострикционным увеличением размера, вызванным внутренним магнитным полем ферромагнетика. С увеличением температуры размер любого тела растет вследствие ослабления межатомных связей, но в сплавах инварного типа этот рост компенсируется уменьшением магнитострикционной составляющей, поскольку увеличение тепловых колебаний атомов влечет за собой снижение намагниченности, а следовательно, и магнитострикции.

Частичная замена в инваре никеля на кобальт и дополнительное легирование медью уменьшает коэффициент линейного расширения сплава в том же температурном интервале до  $1,0 \cdot 10^{-6}$  (32НКД – су-

*перинвар*). Сплав 29НК (*ко-вар*) имеет такой же коэффициент, как термостойкое стекло, вольфрам и молибден. У сплава 47НД (*платинит*) коэффициент линейного расширения такой же, как у обычного стекла и у платины.

Сплавы с малым температурным коэффициентом модуля упругости называют элинварными, например 36НХ (*элинвар*), 42НХТЮ, 44НХТЮ.

*Ферромагнитные* материалы в зависимости от конфигурации их петли магнитного гистерезиса подразделяют на магнитотвердые и магнитомягкие.

*Магнитотвердые* сплавы используют для изготовления постоянных магнитов. Они имеют широкую петлю гистерезиса с большой коэрцитивной (размагничивающей) силой  $H_c > 4$  кА/м и обладают значительной магнитной энергией, пропорциональной величинам  $H_c$  и остаточной магнитной индукции  $B_r$ .

Увеличение коэрцитивной силы магнитотвердых сталей достигается получением неоднородной напряженной структуры, представленной высокоуглеродистым мартенситом с высокой плотностью дефектов строения.

Для постоянных магнитов небольшой мощности могут быть использованы углеродистые инструментальные стали У10А, У11А. Чаще применяют высокоуглеродистые стали, легированные хромом и кобальтом (ЕХЗ, ЕХ5К5 и др.). Легирующие элементы увеличивают прокаливаемость стали, повышают ее коэрцитивную силу и магнитную энергию. Широкое применение получили литые сплавы типа алнико, например ЮНДК15, ЮНДК40Т8АА, обладающие значительно большей коэрцитивной силой и магнитной энергией, чем легированные стали. В качестве материалов постоянных магнитов применяют сплавы системы Fe-Ni-Al, сплавы на основе РЗМ (Sc, La, Y), получаемые методом порошковой металлургии.

Из *магнитомягких* сплавов изготавливают электромагниты, магнитопроводы электрических машин, трансформаторов, электрических приборов и аппаратов. Основные требования, предъявляемые к магнитомягким материалам, – низкая коэрцитивная сила (узкая петля гистерезиса), высокая магнитная проницаемость, высокая индукция насыщения, малые потери на вихревые токи и перемагничивание. Низкие значения  $H_c$  и высокая магнитная проницаемость достигаются в ферромагнетиках при однофазной, близкой к равновесию структуре с минимумом внутренних напряжений.

Магнитомягким материалом является, например, техническое железо. Оно обладает достаточно высокой начальной и максимальной магнитной проницаемостью ( $\mu_0 = 0,3$  и  $\mu_{\max} = 9$  мГн/м) и низкой коэрцитивной силой ( $H_c = 64$  А/м). Недостатком железа является низкое удельное электросопротивление ( $\rho$  не более  $0,1$  мкОм • м), обуславливающее значительные тепловые потери, связанные с вихревыми токами, возникающими при перемагничивании. Поэтому применение технического железа ограничено устройствами, работающими на постоянном токе.

Наиболее широкое распространение в качестве магнитомягких материалов, работающих в полях промышленной частоты (низкочастотные поля), получили кремнийсодержащие (электротехнические) стали. Основное назначение кремния – увеличение удельного электросопротивления стали и, следовательно, сокращение потерь при перемагничивании. Дальнейшее уменьшение тепловых потерь достигается изготовлением магнитопроводов (роторов и статоров двигателей, сердечников трансформаторов и т.д.) из набора тонколистовых деталей с прослойкой изоляции (полимеров, оксидов).

*Электротехнические* стали маркируют четырехзначными числами. Первая цифра характеризует вид и структуру проката: 1 – горячекатаная изотропная сталь, 2 – холоднокатаная изотропная, 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой. Вторая цифра указывает на содержание кремния: 0 – менее 0,4 %, 1 – от 0,4 до 0,8 %, 2 – от 0,8 до 1,8 %, ... 5 – от 3,8 до 4,8 %. Третья цифра определяет тепловые потери при определенных значениях индукции  $B_r$  и частоты. Например, единица указывает, что потери нормированы при  $B_r = 1,5$  Тл и  $f = 50$  Гц. Четвертая цифра – код числового значения нормируемого параметра. Чем цифра больше, тем потери меньше.

В радиотехнике и телефонии для достижения больших значений индукции в слабых магнитных полях для магнитопроводов применяют железоникелевые сплавы – *пермаллои*, содержащие 45–83 % Ni и отличающиеся высокой магнитной проницаемостью. К пермаллоям относятся, например, сплавы 45Н, 50Н (низконикелевые); 79НМ, 81НМА (высоконикелевые). Пермаллои применяют при частотах до 25 кГц. Наряду с пермаллоями применяют литейные сплавы системы Fe-Al-Si (*альсиферы*). Обладающие свойствами, близкими к пермаллоям, альсиферы не содержат дорогостоящих легирующих элементов, но они менее технологичны.

Для работы в высокочастотных полях в качестве магнитопроводов применяют магнитодиэлектрики и ферриты. *Магнитодиэлектрики* представляют собой композиционные материалы, состоящие из конгломерата тонкодисперсных низкокоэрцитивных частиц, например размолотого альсифера, скрепленных прослойками органического или неорганического диэлектрика. Высокое удельное электросопротивление магнитодиэлектрика обуславливает малые потери на вихревые токи и определяет возможность его применения в высокочастотной проводной связи, радиоэлектронике и т.д.

*Ферриты* представляют собой материалы, состоящие из оксидов Fe, Zn, Mg, Ni, получаемые методом порошковой металлургии. Ферриты широко применяют в устройствах, работающих в слабых полях на низких и высоких радиочастотах.

*Немагнитные стали и чугуны.* Стали аустенитного класса с высоким содержанием никеля и марганца и чугуны с содержанием 2,6–3,2 % C; 2,5–3,3 % Si; 5,0–7,5 % Mn и 9–12 % Ni немагнитны. Изделия из этих материалов применяются в электрических машинах в качестве немагнитных деталей.

## 11.2. Пластические массы

### Общая характеристика пластмасс

*Пластмассами* называют искусственные материалы на основе природных или синтетических полимеров, способные принимать заданную форму при нагревании под давлением и устойчиво сохранять ее после охлаждения.

Основным компонентом пластмасс, обеспечивающим работу всей композиции как единого целого, являются *связующие вещества* – *полимерные материалы*, или смолы, представляющие собой высокомолекулярные соединения, молекулы которых (макромолекулы) состоят из большого числа (нескольких тысяч) мономерных звеньев.

Полимеры получают в результате синтеза из низкомолекулярных соединений методами полимеризации или поликонденсации.

Наиболее многочисленную группу соединений составляют *органические* полимеры, например полиолефины, фторопласты, полиамиды, полиимиды, фенолформальдегидные смолы, полисилоксаны, эпоксидные смолы.

Основу *неорганических* полимерных материалов составляют соединения  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др. Представителями таких полимеров являются силикатные стекла, керамика, асбест, слюда.

Свойства полимерных материалов определяются как их химическим составом, так и строением макромолекул.

Присутствие в основных молекулярных цепях атомов других, кроме углерода, элементов сообщает полимеру те или иные специфические свойства. Например, фосфор и хлор повышают огнестойкость, атомы серы увеличивают газонепроницаемость, кислород способствует повышению эластичности, фтор обеспечивает высокую химическую стойкость пластмасс.

По строению различают следующие основные типы макромолекул: линейные, разветвленные, ленточные, пространственные.

Полимерные материалы с ленточной или разветвленной структурой макромолекул высокоэластичны. Линейные полимеры представляют собой цепи, длина которых в сотни и тысячи раз превышает размеры поперечного сечения. Разветвленные полимеры имеют боковые ответвления. И линейные, и разветвленные полимеры обладают *термопластичностью*, то есть способностью обратимо размягчаться при нагреве и затвердевать при охлаждении без участия химических реакций. Такие материалы называют *термопластами*. Процесс *размягчение – затвердевание* может протекать многократно.

Полимеры с пространственными макромолекулами имеют повышенную тепловую и химическую стойкость. Пространственные полимеры имеют химические связи между линейными цепями макромолекул. Образование подобной структуры и связанное с ним необратимое затвердевание материала протекает при участии химических реакций. Такие полимеры, а также пластмассы на их основе называют *термореактивными (реактопласты)*. Перевести однажды затвердевшую термореактивную смолу в вязкотекучее или высокоэластичное состояние нельзя. Пространственной (редкосетчатой) структурой обладают также резины – продукт вулканизации природного или синтетического полимера – каучука.

В зависимости от химического состава, строения макромолекул, надмолекулярной структуры (степени кристалличности) полимеры по электрическим и физическим свойствам могут быть *полярными* и *неполярными*. У полярной молекулы пространственные положения центров тяжести положительного и отрицательного зарядов не совпадают. У неполярной молекулы скрепляющее ее электронное облако

распределяется равномерно и центры тяжести разноименных зарядов находятся в одной точке. Полярные полимеры обладают повышенной жесткостью и теплостойкостью, высокой адгезионной способностью, пониженной морозостойкостью. Неполярные – являются высококачественными и высокочастотными диэлектриками. Их свойства мало изменяются при понижении температуры. Они отличаются высокой морозостойкостью.

Наряду со связующим веществом большинство пластмасс содержат *наполнители и добавки*, улучшающие их технологические и эксплуатационные свойства.

*Наполнители* придают пластмассовым изделиям высокую прочность, химическую стойкость, теплостойкость, улучшают диэлектрические качества, снижают (повышают) плотность, повышают фрикционные (антифрикционные) свойства и т.д. Наполнители могут быть как органическими, так и неорганическими веществами.

По структуре наполнители бывают порошкообразными, волокнистыми, листовыми и газообразными. Пластмассы с ориентированным волокнистым наполнителем и с листовым наполнителем (слоистые пластмассы) обладают ярко выраженной анизотропией механических свойств.

По виду наполнителей различают пластмассы ненаполненные, или простые, и наполненные. К последним относятся материалы с наполнителями: порошкообразными (пресс-порошки и литьевые пластмассы); волокнистыми (волокниты, асбоволокниты, стекловолокниты); листовыми (гетинаксы, текстолиты, асботекстолиты, древесно-слоистые пластики (ДСП, стеклотекстолиты); газообразными (пено- и поропласты).

По назначению пластмассы подразделяют на ряд групп: конструкционные, электроизоляционные, химически стойкие, фрикционные, тепло- и звукоизоляционные, светотехнические и др.

*Конструкционные пластмассы* характеризуются высокими механическими свойствами. К ним относятся, например, ударопрочный полистирол, фенопласты, стеклопластики (стекловолокниты, стеклотекстолиты), используемые в нагруженных узлах и деталях конструкций. Стеклопластики на основе эпоксидных смол обладают высокими прочностными свойствами, на основе кремнийорганических смол (полисилоксанов) – высокой теплостойкостью.

*Электроизоляционные пластмассы* являются хорошими диэлектриками. Их (полиэтилены высокого (ПЭВД) и низкого (ПЭНД) дав-

ления, полистирол, фторопласты (фторопласт-3 и фторопласт-4), гетинакс, текстолит) используют при изготовлении электроизолирующих и диэлектрических деталей, пленок, шлангов, изолирующих покрытий на металлах и т.д.

*Химически стойкие пластмассы*, например фторопласт-4, полиэтилен, поливинилхлорид (винипласт), асболокниты, способны сопротивляться действию влаги и различных химических соединений. Из них изготавливают химическую аппаратуру, емкости, трубы, химически стойкие покрытия на металлах и др.

*Фрикционные пластмассы* обладают в условиях сухого трения высоким коэффициентом трения и высокой износостойкостью. К ним относятся, например, асболокниты, асботекстолиты, асбокаучуковые материалы. Такие пластмассы работают в узлах, передающих кинетическую энергию (например, фрикционные диски муфт сцепления) или рассеивающих ее (например, накладки, колодки тормозных устройств).

*Антифрикционные пластмассы* имеют малый коэффициент трения и высокую износостойкость. В эту группу входят пластмассы, работающие в узлах трения. Высокими антифрикционными свойствами обладают, например, фторопласт-4, полиамиды (капрон), лавсан, текстолиты, древесно-слоистые пластики. Из пластмасс изготавливают вкладыши подшипников скольжения, зубчатые колеса и другие детали, образующие пары трения. Зубчатые колеса из текстолита работают бесшумно при частотах вращения до 30000 об/мин, шестерни из ДСП могут передавать значительные нагрузки, сравнимые с деталями из цветных металлов.

*Тепло- и звукоизоляционные пластмассы*, например пенополистирол, пенополиуретан, пенополиэпоксид, пенополисилоксан, обладают низким коэффициентом теплопроводности, высокой звукопоглощающей способностью. Их используют для теплоизоляции холодильников, труб; тепло- и звукоизоляции кабин и др. Пластмассы применяют также в качестве легкого заполнителя силовых элементов конструкций; для изготовления труднозатопляемых изделий.

*Светотехнические и оптические пластмассы* применяют для изготовления оптических деталей и арматуры осветителей. Они стойки к воздействию света и обладают высокими оптическими свойствами. Например, полиметилметакрилат (органическое стекло) применяют для остекления автомобилей, судов, самолетов, для изготовления

рассеивателей и других светотехнических изделий; из полистирола изготавливают прозрачные колпаки приборов, часовые стекла и т.п.

*Декоративные пластмассы*, например гетинакс, применяют для отделки (облицовки) мебели, салонов автобусов, самолетов, кабин судов, пассажирских железнодорожных вагонов, вагонов метро и др.

Достоинством всех пластических масс является сравнительная легкость и небольшая трудоемкость их переработки в изделия. Существует несколько способов получения изделий из пластмасс: экструзией, литьем, прессованием, вальцеванием и др.

## Термопластичные пластмассы

Широко применяются термопластичные пластмассы на основе полиэтилена, полипропилена, фторопластов, полистирола, поливинилхлорида, полиамидов и других полимеров.

*Полиэтилен* имеет линейное строение макромолекул  $[-CH_2-CH_2]_n$  и является продуктом полимеризации этилена. По структуре относится к кристаллическим полимерам. Свойства полиэтилена зависят от условий полимеризации. В процессе полимеризации при температуре 200–300 °С и давлении  $(1-3,5) \cdot 10^4$  МПа получают полиэтилен высокого давления, имеющий низкую плотность – 0,918–0,930 г/см<sup>3</sup>. Его называют *полиэтиленом высокого давления*, или *полиэтиленом низкой плотности*. При полимеризации полиэтилена при температуре около 80 °С и давлении ниже 200 МПа получают *полиэтилен низкого давления*, или *высокой плотности* – 0,946–0,970 г/см<sup>3</sup>. Чем больше плотность и степень кристалличности полиэтилена, тем выше его прочность, модуль упругости и теплостойкость. Полиэтилен высокой плотности имеет степень кристалличности 75–95 %, а низкой плотности – 50–60 %. Температура плавления изменяется от 105 до 130 °С. Изделия из полиэтилена высокого давления могут использоваться до температуры 60 °С, а из полиэтилена низкого давления – до 100 °С. Полиэтилен обладает морозостойкостью до температуры -60 °С.

Полиэтилен имеет высокие диэлектрические свойства. Он химически стоек к действию водных растворов кислот и щелочей. Устойчив при воздействии концентрированных серной, соляной и плавиковой кислот. Концентрированная азотная и другие сильные кислоты разрушают его. Полиэтилен нетоксичен, легко сваривается и паяется, технологичен. Изделия из него получают литьем под давлением, экструзией с последующим выдуванием, штамповкой, центробежным

литьем. Полиэтилен недорог, сочетает высокую прочность с пластичностью. Его недостаток – склонность к старению под действием ультрафиолетовых лучей.

Полиэтилен применяют для изоляции, электропроводов и кабелей, для пропитки тканей, бумаги, древесины. Являясь экологически безвредным, он применяется в медицине, жилищном строительстве, в продовольственном машиностроении и для производства товаров народного потребления, а также для защиты металлов от коррозии и в качестве заменителя стекла. Полиэтиленовые трубы могут работать при температуре до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , они не подвержены почвенной коррозии. Из полиэтилена изготавливают крышки подшипников, бесшумные в работе шестерни, клапаны, уплотнительные прокладки, детали вентиляторов и насосов, гайки, шайбы, полые изделия вместимостью до 200 л, тару для хранения и транспортировки кислот и щелочей, трубы, уголки, швеллеры, вентили, краны, протезы и т.д.

*Полипропилен* является продуктом полимеризации пропилена. Имеет следующую химическую формулу:  $[-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-]_n$ . Технологический процесс производства подобен получению полиэтилена низкого давления.

По сравнению с полиэтиленом имеет более высокие прочность, жесткость и ударную вязкость. Разрушающее напряжение полипропилена при растяжении составляет 25–40 МПа, максимальная температура эксплуатации без нагрузки  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Его недостатком является невысокая морозостойкость – до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Полипропилен перерабатывается штамповкой, литьем под давлением, пневматическим и вакуумным прессованием. Его можно сваривать, напылять на металл, ткань, картон. Он легко подвергается механической обработке на токарных, фрезерных, сверлильных станках. Отходы при производстве полипропилена и отработавшие изделия из него используют для повторной переработки. Полипропилен применяется для антикоррозионного покрытия резервуаров, труб и арматуры трубопроводов, электроизоляционных деталей, а также для изготовления деталей, используемых при работе в агрессивных средах.

Из полипропилена изготавливают корпуса аккумуляторов, прокладки, трубы, фланцы, водонапорную арматуру, пленки, пленочные покрытия бумаги и картона, корпуса воздушных фильтров, конденсаторы, вставки демпфирующих глушителей, зубчатые и червячные колеса, ролики, подшипники скольжения, фильтры масляных и воздуш-

ных систем, уплотнения, детали приборов и автоматов точной механики, кулачковые механизмы, детали холодильников.

*Фторопласты* являются модифицированными полимерами этиленового ряда. Они имеют прочность при растяжении 15–35 МПа, при изгибе – 10–15 МПа, относительное удлинение при разрыве 250–350 %. Наиболее широкое распространение получили фторопласт-3 и фторопласт-4.

*Фторопласт-3*, или полифторхлорэтилен, характеризуется высокими электроизоляционными свойствами, хорошей химической стойкостью и теплостойкостью, охрупчивается при температурах ниже -120 °С. Его применяют в качестве оптического материала, для изготовления электроизоляционных деталей, работающих при высоких температурах, коррозионностойких труб, мембран и других изделий.

*Фторопласт-4*, или политетрафторэтилен, больше известен под названием *тефлон*. Характеризуется высокой плотностью 2,1–2,3 г/см<sup>3</sup>, низким коэффициентом трения, хорошими электроизоляционными и диэлектрическими свойствами, высокой коррозионной стойкостью, термо- и морозостойкостью. Рабочий интервал температур находится в интервале от -269 до 250 °С. Пленка из него не охрупчивается даже в среде жидкого гелия. По химической стойкости фторопласт-4 превосходит все известные материалы, включая золото и платину. Он стоек к воздействию всех минеральных и органических щелочей, кислот, органических растворителей, не набухает в воде, не смачивается жидкостями и вязкотекучими средами пищевых производств (тестом, патокой, вареньем и т.д.). При температуре до 260 °С невзрывоопасен, негорюч, при непосредственном контакте не оказывает влияния на организм человека. Разрушается только под действием расплавленных щелочных металлов и элементарного фтора. Имея низкий коэффициент трения, используется для изготовления подшипников скольжения без смазки. Для уменьшения износа подшипников во фторопласт вводят 15–30 % наполнителя (графита, дисульфита молибдена, стеклянного волокна и др.). Недостатками фторопласта-4 являются низкая твердость, склонность к ползучести и отслоению его частиц при контактных напряжениях.

Фторопласты широко применяются для изготовления стойких покрытий, пленок, волокон, подшипников, кранов, мембран, насосов, коррозионно стойких конструкций, тепло- и морозостойких деталей (втулки, пластины, диски, прокладки, сальники, клапаны), для обли-

цовки внутренней поверхности различных низкотемпературных емкостей.

*Полистирол* относится к числу наиболее известных и широко применяемых пластмасс. Его макромолекула имеет следующую формулу:  $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-]$ .

Это твердый, жесткий, бесцветный, прозрачный, аморфный полимер, легко окрашиваемый в различные цвета. Обладает высокой водостойкостью, хорошей химической стойкостью в растворах солей, кислот и щелочей. По сравнению с другими термопластами имеет более высокую стойкость к радиации. Недостатками полистирола являются повышенная хрупкость при ударных нагрузках, склонность к старению, невысокая тепло- и морозостойкость. Интервал рабочих температур от  $-40$  до  $65$  °С.

Полистирол применяют для изготовления деталей радио- и электроаппаратуры, предметов домашнего обихода, детских игрушек, трубок для изоляции проводов, пленок для изоляции электрических кабелей и конденсаторов, открытых емкостей (лотки, тарелки и др.), прокладок, втулок. Из ударопрочного полистирола, который представляет собой механическую смесь полистирола с каучуком, изготавливают крупногабаритные детали холодильников.

*Пластмассы на основе поливинилхлорида*, имеющего формулу  $[-\text{CH}_2-\text{CHCl}-]_n$ , обладают хорошими электроизоляционными свойствами. Они устойчивы к воздействию химикатов, не поддерживают горения, атмосферо-, водо-, масло- и бензостойки.

Винипласты – непластифицированные поливинилхлориды. Винипласты имеют высокую механическую прочность и упругость, но сравнительно малую пластичность. Устойчивы к воздействию почти всех минеральных кислот, щелочей и растворов солей. Их недостатками являются склонность к ползучести, низкая ударная вязкость, малая теплостойкость, резкая зависимость от температуры.

Винипласт выпускается в виде листов, прутков, труб. Хорошо обрабатывается на металло- и деревообрабатывающих станках. Он формуется, гнется, выдавливается и выдувается, поддается сварке и склеиванию. Пленочный винипласт при нагреве склеивается с металлом и бетоном. Его применяют для упаковки лекарств и пищевых продуктов, для изготовления обложек книг и папок, деталей машин и аппаратов, непосредственно контактирующих с пищевыми средами. Из винипласта изготавливают: трубы для транспортировки воды, холодного молока, агрессивных жидкостей и газов, тару для молока и

молочных продуктов, коррозионно стойкие емкости, детали вентиляционных воздухопроводов, теплообменников, шланги вакуумпроводов, вибропоглощающие материалы в машиностроении, водо-, бензо- и антифрикционные трубки, прокладки, соединительные муфты, клапаны и т.д.

*Пластикат* – это поливинилхлорид, пластифицированный различными веществами. Введение пластификаторов не только улучшает пластичность, но и повышает морозостойкость. В промышленности выпускают пленочный пластикат в виде гранул, лент или трубок. Пластикат получают экструзией и вальцеванием. Он обладает хорошей стойкостью к старению. Пленочный пластикат эластичен, влагонепроницаем, негорюч, имеет хорошие диэлектрические свойства, стоек к действию бензина и различных масел. При температурах ниже  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  становится хрупким. Широко используется для изоляции кабелей, изготовления труб и других изделий.

*Полиамиды* включают в себя группу известных термопластичных пластмасс – нейлон, капрон и др. Макромолекула полиамида состоит из амидной  $-\text{NH}-\text{CO}-$  и метиленовой  $-\text{CH}_2-$  групп. Имеет общий вид  $[-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)-]_n$ , где число метиленовых групп повторяется от 2 до 100 раз. Ориентированные полиамиды характеризуются высокой прочностью на растяжение, составляющей более 400 МПа, ударопрочностью, способностью к поглощению вибрационных нагрузок. Подшипники и трущиеся детали из полиамидов способны работать с самосмазыванием, поэтому их можно использовать в пищевой промышленности в тех случаях, когда применение смазок вредно и нежелательно. Полиамиды используют для изготовления конструкционных и электроизоляционных изделий, работающих при температурах от  $-60$  до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это зубчатые передачи, уплотнительные устройства, втулки, муфты, подшипники скольжения, лопасти винтов, стойкие к действию щелочей, масел, жиров и углеводородов, технические изделия и товары культурно-бытового назначения, антифрикционные покрытия металлов.

*Полиуретаны* являются ценными термопластичными полимерами. Они содержат уретановую группу  $[-\text{NH}-\text{COO}-]_n$ . Характеризуются высоким модулем упругости, износостойкостью, низким коэффициентом трения, стойкостью к вибрациям, масло-, бензо- и атмосферостойкостью. Изделия из полиуретана можно использовать при понижении температуры до  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Волокна из полиуретана малогигро-

скопичны и имеют высокую химическую стойкость. Их используют для изготовления изоляции, фильтровальных и парашютных тканей.

*Стекло органическое (плексиглас)* обычно состоит из полиметакрилата, имеющего структурную формулу  $[-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)-]_n$ . Оно обладает хорошими диэлектрическими свойствами и стойкостью к старению в естественных условиях. Органическое стекло оптически прозрачно. Его светопрозрачность составляет около 92 %. Оно пропускает до 92 % ультрафиолетовых лучей и большую часть инфракрасных лучей. Имеет низкую плотность, устойчиво к воздействию разбавленных кислот и щелочей, углеводородного топлива и смазок. Под действием внешних сил в органическом стекле образуются трещины. Для повышения его стойкости против растрескивания полимер подвергают растяжению в нагретом до 140–150 °С состоянии в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в результате чего ударная вязкость увеличивается в 7–10 раз. Его недостаток – низкая поверхностная твердость.

*Поликарбонат* – полимер, выпускаемый под названием *дифлон*. Характеризуется низкой водопоглощаемостью и газопроницаемостью, хорошими диэлектрическими свойствами, высокой жесткостью, теплостойкостью и химической стойкостью, не имеет запаха и вкуса, физиологически безвреден, бесцветен, прозрачен, хорошо окрашивается. Устойчив к световому старению и действию окислителей даже при нагреве до 120 °С. Является одним из наиболее ударопрочных термопластов, что позволяет использовать его в качестве конструкционного материала, заменяющего металлы. Из поликарбоната изготавливают шестерни, подшипники, корпуса, крышки, клапаны и другие детали, сосуды и детали трубопроводов для транспортировки фруктовых соков, молока, вин; может использоваться в технике низких температур для работы в среде жидких газов.

Физико-механические свойства поликарбонатов улучшаются при введении в них армирующих волокон. Армированные поликарбонаты «Эстеран» применяются в производстве ответственных деталей машин, например подшипников качения, кулачков и т.д. Они сохраняют свои свойства и эксплуатационную надежность в интервале температур от -200 до 110 °С, а также в вакууме.

### **Терморреактивные пластмассы**

Терморреактивные пластмассы отличаются от термопластов повышенной теплостойкостью, практически полным отсутствием пол-

зучести под нагрузкой при обычных температурах, постоянством физико-механических свойств в интервале температур их эксплуатации. Основу любого реактопласта составляет химически затвердевающая терморезактивная смола, являющаяся связующим веществом. Кроме того, в состав реактопластов входят наполнители, пластификаторы, отвердители, ускорители или замедлители и растворители. Наполнителями могут быть порошковые, волокнистые и гибкие листовые материалы.

В качестве порошковых наполнителей используют молотый кварц, тальк, графит, древесную муку, целлюлозу. К пластмассам с порошковым наполнителем относятся *фенопласты* и *аминопласты*.

*Фенопласты* (бакелиты, фенолоформальдегидные смолы) являются термоупрочняемыми пластмассами. Неупрочненные смолы – новолаки и резола – получают при поликонденсации фенола с формальдегидом. *Новолачные смолы* получают в присутствии кислого катализатора, когда отношение фенола к формальдегиду меньше единицы. Эти смолы способны отверждаться при нагреве только в присутствии отвердителя. Технология производства таких смол более проста, чем резольных смол. Этим объясняется их наибольшее распространение.

*Резольные смолы* получают в присутствии щелочного катализатора при отношении фенола к формальдегиду, равном единице или большем ее. Эти смолы при нагревании отверждаются без введения в них отвердителя.

Упрочненные фенолоформальдегидные смолы чаще называются *бакелитами*. Эта пластмасса механически хорошо обрабатывается инструментами для обработки металла и может подвергаться полированию. Бакелит из новолака имеет большую термостойкость (100–150 °С), чем бакелит из резола, но худшие диэлектрические свойства.

Бакелит трудногорюч, а после извлечения из пламени сразу гаснет. Горящий бакелит дает желтый цвет пламени, коптящего в зависимости от вида наполнителя. Остаток, извлеченный из пламени, твердый, разбухший, потрескавшийся и обугленный. В процессе горения выделяются фенол и формальдегид с характерным запахом.

Бакелит стоек к воздействию разбавленных кислот и щелочей, а также большинства органических растворителей. Для склеивания треснувших бакелитовых изделий можно применять нитроцеллюлозные клеи или жидкие фенольные смолы.

Из бакелита изготавливают галантерейные изделия (пуговицы, пепельницы), электротехнические элементы (вилки, розетки), корпуса радио- и телефонных аппаратов, детали стиральных машин, защитные шлемы, корпуса аккумуляторов, плиты, лаки, клеи.

*Аминопласты* являются термоупрочняемыми пластмассами. При нагреве или в присутствии кислотных катализаторов они способны к упрочнению за счет образования пространственной сетчатой структуры.

Упрочненные аминопласты твердые и жесткие. Их можно полировать и механически обрабатывать металлорежущими инструментами. Они имеют хорошие электроизоляционные свойства, легко окрашиваются.

Теплостойкость упрочненных аминопластов около 100–120 °С. Образец, внесенный в огонь, начинает гореть не ранее чем через минуту. Извлеченный из пламени, он не гаснет, но горит медленно. В действительности горят наполнители, сама смола негорюча.

Упрочненные аминопласты стойки к воздействию воды, кислот (в том числе серной и азотной), щелочей и органических растворителей.

Реактопласты с *волокнистыми наполнителями* представляют собой композиции, состоящие из связующего (смолы) и волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка (волокниты), асбеста (асбоволокниты), стекловолокна (стекловолокниты).

Прочность *волокнитов* при сжатии равна не менее 1200 МПа, ударная вязкость 9 Дж/см<sup>2</sup>, причем механические свойства зависят от длины волокна.

Волокниты применяют для изготовления деталей с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, работающих на изгиб и кручение (втулок, шкивов, маховиков и др.). Хорошие антифрикционные свойства позволяют использовать волокниты для изготовления фланцев, кулачков, шестерен, направляющих втулок.

*Асбоволокниты* обладают хорошими фрикционными (тормозными) свойствами и теплостойкостью, но по водостойкости и диэлектрической проницаемости уступают пластмассам с порошковыми наполнителями.

*Стекловолокниты* негорючи, устойчивы к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойки, имеют стабильные размеры, высокие физико-механические характеристики и применяются для изготовления деталей высокого класса точности и сложной конфигура-

ции. Могут работать при температурах 60–200 °С, имеют прочность при разрыве до 500 МПа, а при сжатии – около 1300 МПа.

Стекловолокниты некоторых марок применяются для изготовления силовых электротехнических деталей в машиностроении, а также крупногабаритных изделий простых форм (кузовов автомашин, лодок, корпусов приборов и т.п.).

В качестве связующих смол волокнитов и стекловолокнитов применяются полиэфировые и эпоксидные смолы.

*Полиэстры* являются полимерами, полученными из ряда кислот и высокогидроксильных спиртов путем поликонденсации. Перед отверждением смола имеет вид густого сиропа золотистого цвета. Отверждение проводят в форме при комнатной температуре после добавления небольших количеств модификаторов. Механические свойства отвержденного продукта зависят от строения исходной смолы и способа ее отверждения. Изделие может быть гибким, эластичным или твердым и хрупким. Твердые изделия можно подвергать механической обработке, а также полировать.

Термическая стойкость под напряжением отвержденных смол колеблется в пределах 55–60 °С, а без нагрузки превышает 150 °С. Образец из полиэфировой смолы со стеклотканью, помещенный в пламя, горит очень плохо. После извлечения из пламени чаще всего гаснет. После сгорания остается обугленный скелет стекловолокна.

Отвержденные полиэстры нерастворимы в органических кислотах, в ацетоне легко растрескиваются.

Из полиэстров, упрочненных стекловолокном, изготавливают спасательные лодки, части автомобилей, мебель, корпуса планеров и вертолетов, гофрированные плиты для крыш, плафоны для ламп, мачты для антенн, лыжи и палки, удочки, защитные каски и т.п.

Неотвержденные *эпоксидные смолы* получают реакцией поликонденсации эпоксида с гидроксидом фенола. Характерная черта эпоксидных смол – хорошая прилипаемость почти ко всем пластмассам, металлам. Они имеют высокие механические и электрические свойства.

Термостойкость под напряжением колеблется в зависимости от вида упрочнителя в пределах 55–120 °С, а без нагрузки превышает 150 °С. Упрочненная эпоксидная смола трудно загорается, после чего начинает коптить с сильным запахом во время горения.

Эпоксидные смолы служат для изготовления лаков, клеев, а также ламинатов.

Большую группу реактопластов составляют *слоистые пластмассы*, которые содержат листовые наполнители, уложенные слоями. В качестве наполнителей для слоистых пластиков используют материалы органического (бумага, хлопчатобумажные ткани, древесный шпон, ткани из синтетических волокон) и неорганического (асбестовая бумага, картон, ткань, стеклянная ткань, ткань из кварцевых или кремнеземных волокон) происхождения. В зависимости от вида наполнителя различают следующие слоистые пластики: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, древесно-слоистые пластики. Связующими при производстве слоистых пластиков служат фенолоформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические и некоторые другие смолы.

Свойства слоистых пластиков зависят от соотношения компонентов (наполнителя и связующего), характера подготовки наполнителя, режимов прессования и термообработки и других технологических факторов. Благодаря слоистому расположению армирующего наполнителя слоистые пластики обладают анизотропией механических, физических и диэлектрических свойств.

Механические свойства слоистых пластиков определяются прежде всего видом используемого наполнителя. Механическая прочность и другие физико-химические свойства слоистых пластиков зависят от способа ориентации и толщины листов-наполнителей, от их удельной прочности в различных направлениях, от типа и метода пропитки.

Наибольшей механической прочностью обладают слоистые пластики на основе стеклянной ткани или стеклянных жгутов. Эти материалы, а также слоистые пластики на основе асбоволокнистых наполнителей имеют более высокую теплостойкость по сравнению с теплостойкостью пластиков на основе органических наполнителей.

Физические и диэлектрические свойства слоистых пластиков зависят в основном от типа используемого полимерного связующего.

Пластик на основе бумаги – *гетинакс*. Гетинакс устойчив к воздействию жиров и минеральных масел, слабо реагирует с уксусной, соляной, фосфорной кислотами, но против действия сильных кислот и горячих щелочей нестойк. Он имеет плотность 1,3–1,4 г/см<sup>3</sup>; разрушающее напряжение при растяжении – 80 МПа, при сжатии – 130–250 МПа; ударную вязкость (перпендикулярно слоям) 8–15 Дж/см<sup>2</sup>.

Гетинакс используют в качестве электроизоляционного материала, длительно работающего при температурах от -65 до 105 °С, а также как конструкционный и декоративный материал. Из него изго-

тавливают панели, щитки, прокладки, крышки, шайбы, малонагруженные изделия и т.д.

*Древесно-слоистые пластики (ДСП).* Этот материал обычно изготавливают в форме плит или тонких листов. Их получают горячим прессованием лущеного древесного шпона, пропитанного полимерным связующим. При производстве ДСП чаще всего используют березовый или буковый шпон, в качестве связующего – водно-спиртовые растворы полимеров. Древесно-слоистые пластики выпускают различных марок и маркируют ДСП-А, ДСП-Б, ДСП-В и т.д. Они различаются направлением волокон шпона в различных слоях. В ДСП-А – во всех слоях волокна шпона расположены параллельно (иногда четыре слоя с параллельным расположением волокон чередуются с одним слоем, повернутым на 20–25°). В ДСП-Б расположение слоев смешанное. Через каждые 5–20 слоев с параллельным расположением волокон укладывают слой, повернутый на 90°. В ДСП-В осуществляется звездообразная укладка слоев, при которой соседние слои волокон смещают на 30°. Максимальной прочностью в продольном направлении ( $\sigma_{\parallel} = 280$  МПа) обладает ДСП-А. ДСП-Б имеет прочность, одинаковую во взаимно перпендикулярных направлениях (140 МПа), а для ДСП-Г – механические свойства одинаковы по всем направлениям. ДСП обладают хорошими антифрикционными свойствами. В некоторых случаях они заменяют высокооловянистую бронзу, баббит, текстолит. Химическая стойкость ДСП не очень высока, но выше, чем у обычной древесины. Теплостойкость ДСП достигает 140 °С. Их недостатком является набухание, обусловленное поглощением воды.

Пластики на основе хлопчатобумажных тканей – *текстолиты*. Прочность текстолитов тем выше, чем тоньше ткань (при одном и том же содержании связующего). Для листов шифона прочность будет больше, чем для саржи или бязи. Водостойкость и химическая стойкость возрастают при повышении доли связующего полимера.

Текстолиты используют для изготовления различных конструктивных деталей, электроизоляционного материала, вкладышей подшипников, прокладок, герметизирующих фланцевые соединения, шестерен, прокладочных колец. Подшипники из текстолита не требуют специальной смазки. Для смазки можно использовать воду или водную эмульсию. Для снижения коэффициента истираемости подшипников и повышения теплопроводности в текстолит добавляют графит. Температура эксплуатации изделий из текстолита от -60 до 60 °С.

Текстолитовые детали могут работать не только в воздушной среде, но и в масле, керосине или бензине и т.д. Текстолит производят в виде листов, плит, стержней и трубок.

*Стеклотекстолитами* называют слоистые пластики на основе тканых стекловолоконистых материалов. Они характеризуются высокой тепло- и хладостойкостью, стойкостью к действию окислителей и других химически активных реагентов, высокими механическими свойствами.

Свойства стеклотекстолитов в значительной степени зависят от типа вязки стеклянной ткани (применяют три типа переплетения: гарнитуровое, сатиновое и саржевое). Более высокими свойствами обладают стеклотекстолиты на основе сатиновой стеклоткани. Такие стеклотекстолиты могут длительное время работать при температуре 200 °С и кратковременно при 300 °С. Плотность стеклотекстолитов 1,6–1,7 г/см<sup>3</sup>, разрушающее напряжение при растяжении не менее 130 МПа. Стеклотекстолиты хорошо обрабатываются на станках, а также склеиваются.

Стеклотекстолиты применяют для изготовления крупногабаритных изделий, электроизоляционных деталей, длительное время работающих при температуре 200 °С и кратковременно – при 250 °С. Стеклопластики являются конструкционными материалами, применяемыми для изготовления ситовых изделий в различных отраслях техники.

В числе различных синтетических материалов широкое распространение получили так называемые *газонаполненные пластики*. Эти материалы разделяются на *пенопласты* и *поропласты*. У пенопластов микроскопические ячейки, наполненные газом, не сообщаются между собой, и плотность таких материалов, как правило, менее 300 кг/м<sup>3</sup>. Ячейки у поропластов сообщаются между собой, и их плотность более 300 кг/м<sup>3</sup>. Пено- и поропласты выпускают на основе полистиролов, поливинилхлорида и различных эфирных полимеров.

Пенопласт применяют в качестве теплоизоляционного слоя в конструкциях судовых трюмов, кузовов автофургонов, холодильных камер на объектах мясо-молочной и рыбной промышленности.

*Пенополистирол* получают из эмульсионного полимера прессовым и беспрессовым методами. Пенополистирол применяют для теплоизоляции холодильников и торгового оборудования. Для производства изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, обычно используют суспензионный полистирол. При получении пенополисти-

рола прессовым методом (пенополистирол марок ПС-1 и ПС-4) используют эмульсионный тонкодисперсный полистирол, смешивают его с порообразующим компонентом, прессуют, а затем вспенивают в специальных обогреваемых камерах. Если же пенополистирол получается беспрессовым методом из блочно-суспензионного стирола, он называется *стиропор*. Его полимеризацию проводят при температуре 70 °С с непрерывным перемешиванием. Пенополистирол имеет структуру застывшей пены. Он устойчив к действию влаги, агрессивных минеральных сред (кроме концентрированной азотной кислоты). Пенополистирол, полученный беспрессовым методом, обладает более высокой химической стойкостью. Устойчив он также и в биологическом отношении – не гниет, не подвергается воздействию грибков и бактерий, не повреждается грызунами.

Прочность пенополистирола зависит от размера, формы и прочности стенок пор. Механические свойства беспрессового пенополистирола ниже, чем прессового.

Пенополистиролы могут работать при температурах до 60–75 °С. Недостатком пенополистирола является присутствие в нем горючего порообразователя, например изопентана. Уменьшить или вовсе устранить эту опасность удастся путем введения антипиренов, например оксида сурьмы. Пенополистирол применяется в различных отраслях промышленности как термо- и звукоизоляционный материал. Коэффициент теплопроводности пенополистирола близок к теплопроводности воздуха и равен 0,0326 Вт/(м·К). Из-за хороших амортизационных свойств и малой плотности пенополистирол используют в качестве упаковочного материала.

В последнее время в промышленности начинают все шире использовать *армированные* газонаполненные пластмассы, что позволяет сочетать малую плотность с высокой прочностью, т.е. повышать удельную прочность. Газонаполненные пластмассы армируют листами металла или листами более прочных, газонаполненных пластмасс. Составные изделия из термореактивных пластмасс изготавливают склеиванием и механическим соединением.

Коррозионно стойкие армированные пластмассы работают при температурах от -269 до 150 °С, от глубокого вакуума до давления 20 МПа, в широком диапазоне жидких и газовых агрессивных сред. В качестве коррозионно стойких связующих используют ненасыщенные полиэфирные, эпоксидные, фенольные и фурановые смолы. Для обеспечения работоспособности в агрессивных средах чаще всего ис-

пользуют многослойную структуру. Она может иметь несколько разновидностей: 1) наружный и внутренний слои в виде обогащенных смолой композиций или термопласта, обеспечивающих коррозионную стойкость и герметичность изделий; 2) конструкционные слои, на 50–70 % состоящие из армирующего материала и обеспечивающие необходимую прочность изделий.

Широко используются бипластмассы – стеклопластики, лакированные термопластом. Они обладают высокой коррозионной стойкостью, которая определяется свойствами термопласта.

### 11.3. Резина

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

Резина состоит из смеси каучука (основа), наполнителя (сажа, оксид кремния, оксид титана, мел, барит, тальк), мягчителя (канифоль, вазелин), противостарителя (парафин, воск) и элементов вулканизации (сера, оксид цинка).

Физико-механические свойства резины обусловлены составом резиновой смеси. Они зависят от типа каучука и вводимых в резину добавок. Каучуки бывают натуральные (НК) и синтетические (СК). Натуральный каучук получают коагуляцией латекса (млечного сока) каучуконосных деревьев, растущих в Бразилии, Юго-Восточной Азии, на Малайском архипелаге, а синтетические каучуки (бутадиеновые, бутадиен-стирольные и др.) – методами полимеризации. Впервые синтез бутадиенового каучука из этилового спирта был осуществлен в 1921 г. русским ученым С.В. Лебедевым. Позднее были разработаны методы получения синтетических каучуков из более дешевого сырья, например из нефти и ацетилена.

В процессе вулканизации резиновая смесь из термопластичного состояния переходит в терморезистентное состояние. В результате вулканизации каучук, имеющий линейную структуру, превращается в материал с сетчатой структурой – резину.

С увеличением содержания вулканизатора (серы) сетчатая структура резины становится более частой и менее эластичной. При максимальном насыщении серой (до 30–50 %) получают твердую резину (эбонит), при насыщении серой до 10–15 % – полутвердую ре-

зину. Обычно в резине содержится 5–8 % серы. Для ускорения вулканизации вводят ускорители (например, оксид цинка).

Некоторые синтетические каучуки (например, хлоропреновый) могут вулканизироваться только путем нагрева, без использования вулканизатора.

Этому способствует наличие в каучуке полярных групп, но и в этом случае образуется *характерная сетчатая структура*.

Для повышения прочности и износостойкости резин в них вводят поверхностно-активные вещества, а также наполнители. В качестве пластификаторов используют стеариновую и олеиновую кислоты, минеральные масла и парафин. Для снижения температуры вулканизации и удешевления резины вводят так называемые регенераторы – продукты специальной обработки резины, бывшей в употреблении.

Введение этих компонентов позволяет существенно менять специальные свойства резины, увеличивая ее износо-, морозо-, масло- и бензостойкость. Резиновые изделия часто армируют тканью или металлической сеткой. Для улучшения адгезии металлической арматуры к резине на поверхность металла наносят клеевую пленку.

Резина имеет высокие эластические свойства, высокие упругость и сопротивляемость разрыву. Обладает малой плотностью, отрицательным температурным коэффициентом линейного расширения, высокой стойкостью против истирания, газо- и водонепроницаемостью, химической стойкостью, хорошими электроизоляционными свойствами, малым удельным весом и др. Резина имеет высокие фрикционные свойства без использования смазки. При водяной смазке, наоборот, обладает антифрикционными свойствами. Недостатком резины является старение.

В зависимости от условий эксплуатации различают резины общего и специального назначения.

Резины *общего назначения* применяют для изготовления камер и шин, ремней, транспортных лент, рукавов, изоляции кабелей и проводов, товаров народного потребления и др.

Резины *специального назначения* делятся на бензостойкие, морозостойкие, теплостойкие, стойкие к действию агрессивных сред. Нижней границей рабочих температур резин специального назначения является температура до  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , резин общего назначения – от  $-35$  до  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Резиновые материалы используют для амортизации, демпфирования, уплотнения, герметизации, химической защиты деталей машин, при производстве тары для хранения масла и горючего,

различных трубопроводов (шлангов), для изготовления покрышек и камер колес автотранспорта, декоративных изделий и т.д.

В последнее время остро стоит вопрос об очистке территорий наших городов от свалок старой резиновой продукции, которая в ходе длительного, иногда десятков лет хранения, выделяет в атмосферу и в землю значительное количество вредных химических соединений.

На автопредприятиях страны, шиноремонтных заводах, в портах находятся десятки миллионов вышедших из строя автомобильных шин. Их утилизация практически не осуществляется, поскольку при сжигании в атмосферу выделяется значительное количество экологически вредных веществ и соединений, а при механической утилизации стоимость превосходит допустимые величины. В то же время продукт вторичной переработки шин – резиновая крошка различной дисперсности применяется в различных отраслях техники – при строительстве дорог, в качестве тепло- и звукоизоляторов и т.д. Особенно широко резиновая крошка используется в странах Западной Европы и Юго-Восточной Азии, где она в основном получается методом механического измельчения.

#### 11.4. Стекло

Стекло – это однородное аморфное вещество, полученное при затвердевании расплава оксидов. В составе стекла могут присутствовать оксиды трех типов: *стеклообразующие, модифицирующие и промежуточные*. Стеклообразующими являются оксиды кремния, бора, фосфора, германия, мышьяка. К модифицирующим оксидам, введение которых понижает температуру плавления стекла и существенно меняет его свойства, относятся оксиды щелочных (Na, K) и щелочноземельных (Ca, Mg, Ba) металлов. Промежуточными являются оксиды алюминия, свинца, титана, железа. Они могут замещать часть стеклообразующих оксидов. Стеклообразующий каркас представляет собой непрерывную пространственную решетку, в узлах которой расположены ионы, атомы или группировки атомов (рис. 59). Химический состав стекла можно изменять в широких пределах. Поэтому и свойства стекла могут быть различными.

По *химическому составу* в зависимости от природы стеклообразующих оксидов различают *силикатное, алюмосиликатное, боросиликатное, алюмоборосиликатное* и другие виды стекла.

В зависимости от *содержания модификаторов* стекло может быть *щелочным* и *бесщелочным*.

По *назначению* различают *бытовое* (стеклотара, посуда), *строительное* (оконное, стеклоблоки) и *техническое* (оптическое, электротехническое, химическое и др.) стекло.

Структура и свойства стекла определяются его химическим составом, условиями варки, охлаждения и обработки.

Стекло – термопластичный материал. При нагреве оно постепенно размягчается и переходит в жидкость. Плавление происходит в некотором температурном интервале, величина которого зависит от химического состава стекла. Ниже температуры стеклования  $T_c$  оно приобретает хрупкость. Для обычного силикатного стекла  $T_c = 425–600$  °С. Выше температуры плавления стекло становится жидкостью. При этих температурах стекломасса перерабатывается в изделия.

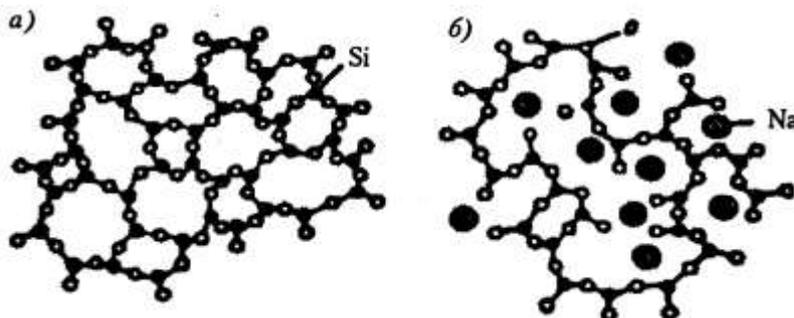


Рис. 59. Схема непрерывной структурной сетки стекла:  
а – кварцевого; б – натрийсиликатного

Плотность стекла составляет от 2,2 до 8,0 г/см<sup>3</sup>. Стекло высокой плотности содержит значительные количества оксидов свинца и бария.

Стекло – жесткий, твердый, но очень хрупкий материал. Стекло хорошо сопротивляется сжатию, но характеризуется низким временным сопротивлением при испытаниях на растяжение (30–90 МПа) и изгиб (50–150 МПа). Более прочным является бесщелочное и кварцевое стекло.

Механические свойства стекла повышаются при термической и химической обработке. Термическая закалка стекла состоит в нагреве до температур, близких к точке размягчения, и быстром равномерном охлаждении поверхности в потоке воздуха или в масле. При этом в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия, и прочность стекла возрастает в 2–4 раза. Для изготовления приборов, работаю-

щих при повышенном давлении, применяют бесосколочное стекло – триплекс.

Триплекс представляет собой комбинированное стекло, состоящее из двух и более закаленных слоев, склеенных прозрачной эластичной пленкой. Его химическая обработка состоит в травлении поверхностного слоя раствором плавиковой кислоты с уничтожением поверхностных дефектов. Еще больший эффект достигается при комбинированной химико-термической обработке.

Важнейшим свойством стекла является прозрачность в диапазоне длин волн видимого света. Обычное листовое стекло пропускает до 90 %, а отражает около 8 % и поглощает около 1 % видимого света. Ультрафиолетовые лучи почти полностью поглощаются оконным стеклом.

Стекло имеет высокую химическую стойкость в агрессивных средах (за исключением плавиковой кислоты и щелочей). Вода постепенно разрушает стекло вследствие образования щелочных растворов. Чем выше температура и концентрация щелочных оксидов в стекле, тем сильнее проявляется действие воды. Стекло является техническим материалом, широко используемым в разных областях техники, строительства и коммунального хозяйства. Это объясняется благоприятным сочетанием физико-химических и механических свойств, возможностью изменять эти свойства в широких пределах в зависимости от состава стекла и способов термического воздействия, а также способностью стекла легко поддаваться разным способам горячей и холодной обработки.

*Кварцевое стекло*, состоящее практически из чистого кремнезема (99 %  $\text{SiO}_2$ ), в зависимости от способа получения бывает двух типов: оптически прозрачное и непрозрачное. Кварцевое стекло отличается от всех известных стекол высокими физико-химическими свойствами: высокой теплостойкостью (1400 °С), низким температурным коэффициентом линейного расширения, высокой термической (выдерживает перепад температур 800–1000 °С) и химической стойкостью, особенно к действию кислот (кроме плавиковой) и воды. Оно имеет высокие диэлектрические характеристики, прозрачно в видимой, ультрафиолетовой и частично инфракрасной областях света. Кварцевое стекло, обладающее высокой термической и химической стойкостью в сочетании с низким температурным коэффициентом линейного расширения, применяется для изготовления тиглей, термопар, электровакуумных изделий, химически стойкой тары, труб,

лабораторной посуды. Для защиты деталей от коррозии при температурах до 500–600 °С в машиностроении применяют стеклоэмали.

*Пеностекло* получают вспениванием жидкой стекольной массы при высокой температуре за счет введения газовыделяющих твердых веществ – измельченного известняка, мела, угля. Оно имеет малую плотность, низкую теплопроводность и характеризуется высоким звукопоглощением. Пеностекло – негорючий, термостойкий и химически стойкий материал.

*Ситаллы* – стеклокристаллические материалы получают из стекла путем его полной или частичной кристаллизации. Название «ситаллы» образовано из слов «стекло» и «кристаллы». Ситаллы иногда называют стеклокерамикой. Содержание кристаллической фазы в ситаллах может составлять до 95 %. Размер кристаллов обычно не превышает 1–2 мкм.

Ситаллы – плотные, непрозрачные, газонепроницаемые, жесткие и твердые материалы. Их механическая прочность в 2–3 раза выше, чем прочность стекла. Эти материалы хорошо сопротивляются абразивному износу. Сочетание низкого температурного коэффициента линейного расширения и высокой механической прочности придает им высокую термостойкость. Ситаллы характеризуются высокой химической стойкостью к действию кислот и щелочей и не подвержены коррозии при нагреве до высоких температур. Они совершенно не поглощают влагу.

Благодаря сочетанию легкости, прочности, твердости и технологичности ситаллы находят широкое применение в машиностроении. Из них изготавливают подшипники скольжения, работающие без смазки при температуре до 550 °С, поршни и детали выхлопа двигателей внутреннего сгорания, химическую аппаратуру, фильтры для вытягивания синтетических волокон, рабочие колеса и лопасти насосов, перекачивающих агрессивные жидкости с абразивами. Ситаллы используют в качестве жаро- и износостойких эмалей для защиты металлических деталей. Ситалловые эмали могут работать при температурах до 800–900 °С.

## **11.5. Композиционные материалы**

*Композиционные материалы* – сложные материалы, состоящие из нерастворимых или малорастворимых друг в друге компонентов,

сильно отличающихся по свойствам и разделенных в матрице ярко выраженной границей.

Свойства композиционных материалов зависят от свойств компонентов и характера связи между ними. В таких материалах проявляются достоинства каждого из компонентов, а также положительные свойства, которыми каждый из компонентов в отдельности не обладает.

*Основа (матрица)* композиционного материала может быть металлической (композиционные материалы на металлической основе) и неметаллической (композиционные материалы на неметаллической основе). В качестве металлической основы широко применяют алюминий, магний, никель, титан, сталь. Неметаллическая основа может быть полимерной, углеродной, керамической.

Матрица объединяет все компоненты композиционного материала в единое целое. От свойств матричного материала зависят такие эксплуатационные свойства композиции, как рабочая температура, сопротивление воздействию окружающей среды, сопротивление усталостному разрушению.

В матрице равномерно распределены компоненты, наполняющие и упрочняющие композиционный материал, – *упрочнитель и армирующие материалы*. Упрочняющие компоненты должны обладать высокой прочностью, твердостью, модулем упругости. По этим характеристикам они должны значительно превосходить материал матрицы. По геометрическим параметрам армирующие материалы могут быть нуль-мерными, одномерными и двумерными.

Материалы, армированные нуль-мерными упрочнителями, называют *дисперсно-упрочненными*. В качестве дисперсных частиц чаще используют тугоплавкие оксиды, карбиды, нитриды, бориды ( $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , SiC, BN и др.). Изготавливают дисперсно-упрочненные материалы с металлической матрицей главным образом методом порошковой металлургии. При работе дисперсно-упрочненных материалов основную нагрузку воспринимает матрица. Дисперсные частицы, эффективно тормозя движение дислокаций, препятствуют развитию пластической деформации и таким образом упрочняют композиционный материал. Степень упрочнения определяется дисперсностью частиц и расстоянием между ними. Большое упрочнение достигается при размере частиц 0,01–0,1 мкм и расстоянии между ними 0,05–0,5 мкм.

Среди дисперсно-упрочненных материалов широкое распространение получили, например, спеченные алюминиевые пудры (САП) –

материалы с алюминиевой матрицей, упрочненные чешуйками  $Al_2O_3$ . Содержание оксида в САП находится, в зависимости от марки, в пределах 6–18 %. САП обладают прочностью до 400 МПа (САП-3), низкой плотностью, высокой коррозионной стойкостью.

Из САП выпускают полуфабрикаты в виде листов, профилей, труб, фольги. Детали из САП работают при 300–500 °С, и чаще это лопатки компрессоров, лопатки вентиляторов и турбин, поршневые штоки.

Наиболее высокую жаропрочность имеют материалы на основе никеля с 2–3 % двуокиси тория (ВДУ-1) или двуокиси гафния (ВДУ-2). Сплавы ВДУ-2, ВДУ-3 выпускают в виде труб, прутков, листов, проволоки, фольги. Их применяют главным образом в авиационном двигателестроении.

Материалы с одномерными или одномерными и нуль-мерными наполнителями называют *волокнистыми композиционными материалами*. Упрочнителями в них могут быть проволока из металлов и сплавов (Мо, W, В, Та, высокопрочная сталь), волокна или нитевидные кристаллы чистых элементов и тугоплавких соединений (С, В, SiC,  $Al_2O_3$ , борсик – волокна бора с выращенными на них в целях улучшения сцепления с матрицей кристаллами карбида кремния и др.). В качестве матричных материалов могут выступать полимеры (эпоксидные, фенолформальдегидные, полиамидные и другие смолы), керамические и углеродистые материалы, металлы (Al, Mg, Ti, Ni и др.). Например, материалы с алюминиевой матрицей армируют стальной проволокой (материалы КАС), борным волокном (материалы ВКА), углеродным волокном (материалы ВКУ).

При растяжении композиционного материала вдоль направления армирования нагрузку в основном воспринимают волокна, матрица же служит средой для передачи усилия. Чем больше соотношение  $E_B/E_M$  ( $E_B$  – модуль упругости волокна  $E_M$  – модуль упругости материала матрицы) и чем выше объемное содержание волокон, тем большая доля нагрузки приходится на волокна.

Временное сопротивление композиционного материала, в общем, тем выше, чем больше в нем упрочняющего компонента. Однако при очень малых (< 5 %) и очень больших (> 80 %) содержаниях волокна наблюдается обратная зависимость.

## 11.6. Вспомогательные материалы

Надежная работа оборудования обеспечивается вспомогательными материалами – лакокрасочными материалами, клеями, смазочными веществами, кожей, текстильными, бумажными материалами и др.

Для обеспечения коррозионной стойкости металлических и неметаллических деталей применяют лакокрасочные материалы.

*Лакокрасочные материалы* представляют собой многокомпонентные составы, которые в жидком состоянии наносятся на поверхность изделий и высыхают с образованием пленок. Эти пленки удерживаются *адгезией* (взаимодействием пленки и материала). Высохшие пленки называются *лакокрасочными покрытиями*. Как правило, покрытия делают многослойными.

Лакокрасочные материалы, в зависимости от состава и назначения классифицируют на *основные* (лаки, краски, грунтовки и шпатлевки) и *вспомогательные* (растворители, разбавители или разжижители, смывки, составы для подготовки поверхностей к окрашиванию и др.).

Современное обозначение основных лакокрасочных материалов состоит из пяти групп знаков:

- 1-я группа – название материала полным словом (эмаль, грунт и т.п.);
- 2-я группа – условное обозначение типа пленкообразователя;
- 3-я группа – основное назначение материала;
- 4-я группа – порядковый номер, присвоенный данному материалу, из одной, двух или трех цифр;
- 5-я группа – цвет материала.

Условные обозначения пленкообразователей следующие: глифта-левых – ГФ; пентафта-левых – ПФ; меламинных – МЛ; мочевиных – МЧ; фенольных – ФЛ; фенолалкидных – ФА; эпоксидных – ЭП; эпоксифирных – ЭФ; алкидно- и масляно-стирольных – МС; полиэфирных – ПЭ; полиуретановых – УР; акриловых – АК; сополимерно-акриловых – АС; нитроцеллюлозных – НЦ; этилцеллюлозных – ЭЦ; перхлорвиниловых – ХВ; сополимерно-винилхлоридных – ХС; кремнийорганических – КО; дифинилацетиленовых – ВН; каучуковых – КЧ; полиамидных – АД; фторопластовых – ФП; поливинилацетальных – ВЛ; битумных – БТ; канифольных – КФ; масляных – МА.

Внутри перечисленных групп лакокрасочные материалы классифицируют по преимущественному назначению материала.

Условные обозначения лакокрасочных материалов следующие: атмосферостойких – 1; ограниченно атмосферостойких – 2; водостой-

ких – 4; специальных – 5; маслобензостойких – 6; химически стойких – 7; термостойких – 8; электроизоляционных – 9; грунтовок – 0; шпатлевок – 00.

В результате марка лакокрасочного материала (ГОСТ 9825-73) указывает химическую природу пленкообразователя этого материала и его назначение. Например, эмаль КО-198 – эмаль кремнийорганическая, атмосферостойкая с регистрационным номером 98; ЭП-0026 – эпоксидная шпатлевка с регистрационным номером 26.

В зависимости от назначения лакокрасочные материалы подразделяют на краски, эмали, лаки, грунтовки и шпатлевки (табл. 23).

Таблица 23

Деление по виду основных лакокрасочных материалов  
(ГОСТ 9825-73)

Вид	Определение
Лак	Раствор пленкообразующих веществ в органических растворителях или в воде, образующий после высыхания твердую прозрачную однородную пленку
Краска	Суспензия пигмента или смеси пигментов с наполнителями в олифе, масле, эмульсии, латексе, образующая после высыхания непрозрачную однородную пленку
Порошковая краска	Сухая композиция пленкообразующего вещества с пигментами и наполнителями, образующая после сплавления, охлаждения и отверждения твердую непрозрачную пленку
Эмаль	Суспензия пигмента или смеси пигментов с наполнителями в лаке, образующая после высыхания непрозрачную твердую пленку с различным блеском и фактурой поверхности
Грунтовка	Суспензия пигмента или смеси пигментов с наполнителями в связующем веществе, образующая после высыхания непрозрачную однородную пленку с хорошей адгезией к подложке и покрывным слоям
Шпатлевка	Густая, вязкая масса, состоящая из смеси пигментов с наполнителями в связующем веществе, предназначенная для заполнения неровностей и сглаживания окрашиваемой поверхности

Системой лакокрасочного покрытия называют сочетание слоев материалов, последовательно нанесенных на защищаемую поверхность (рис. 60).

Толщина покрытия зависит от типа и свойства наносимого лакокрасочного материала, его вязкости, процесса нанесения, степени агрессивности среды и других условий эксплуатации, свойств металла и сложности его поверхности, возможности нанесения определенным способом и назначения.

Обычно толщина однослойной пленки правильно нанесенной эмали при температуре 18–22 °С составляет 25–30 мкм, нагретой до 40–60 °С – 15–20 мкм.

Для жестких условий эксплуатации значение минимальной общей толщины эпоксидного и винилового покрытий принимается равной 250–300 мкм, алкидного и полиуретанового 200–250 мкм, кремнийорганического 80–120 мкм. Для мягких условий толщина может быть уменьшена на 10–12 %.

Лакокрасочным материалам присущи определенные физические (плотность, теплопроводность, атмосферостойкость и др.), механические (прочность, твердость, эластичность, истираемость и др.), химические (кислото-щелочестойкость, токсичность и др.) свойства.

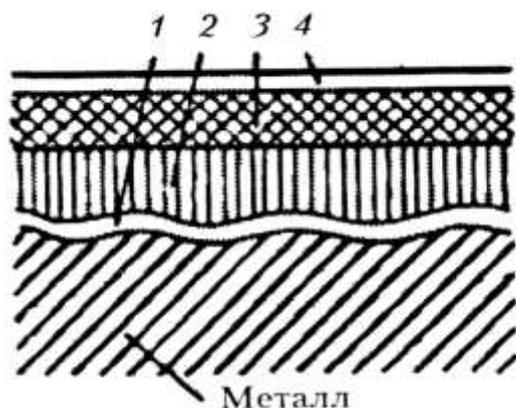


Рис. 60. Схема системы лакокрасочного покрытия:  
1 – грунт; 2 – шпатлевка; 3 – эмаль; 4 – покрывной лак

*Растворителями* лакокрасочных материалов служат скипидар, уайт-спирит, ацетон, спирты. Растворители подбирают в зависимости от пленкообразующего вещества: для масел используют скипидар и уайт-спирит; для смол – спирты, ацетон и ароматические углеводороды типа бензола и толуола, для эфиров целлюлозы – ацетон.

*Клеями* называются сложные вещества на основе полимеров, способные при затвердевании образовывать прочные пленки, хорошо прилипающие к различным материалам. По сравнению с другими видами соединений (клепкой, сваркой, механическим креплением)

клеевые соединения имеют ряд преимуществ. Работоспособность клеевых соединений зависит прежде всего от адгезии (прочности сцепления клеевой пленки со склеиваемой поверхностью) и когезии (прочности собственно клеевого слоя).

Клеи позволяют соединять разнородные материалы (металл, керамику, пластмассу, дерево) в различных сочетаниях. Клеевые швы атмосферостойки, не подвержены коррозии, позволяют обеспечивать герметичность соединений. Масса конструкции при клеевой сборке почти не увеличивается, отсутствуют снижающие прочность и являющиеся концентраторами напряжений отверстия под болты, заклепки, гвозди. Во многих случаях полиуретановая клеевая пленка газонепроницаемая, масло-, бензо- и водостойкая. Она обладает высокой адгезией и морозостойкостью, поэтому полиуретановые клеи используются также в качестве герметиков.

Для склеивания резиновых изделий, а также металла с резиной, применяются резиновые (каучуковые) клеи 88, Б-10, КР-5-18.

Резиновый клей удобен для употребления тем, что он вулканизируется на холоде и это клеевое соединение обладает удовлетворительной прочностью и мало набухает в масле и бензине.

К числу наиболее распространенных *герметиков* для металлических изделий относится тиоколовый каучук (тиокол). Он вулканизируется при комнатной температуре. Вулканизаторами обычно являются соединения на марганцевой основе. Отвержденная пленка масло-, водо- и бензостойкая, выдерживает длительное время при контакте с кислородом воздуха и сохраняет высокую прочность при температуре до 130 °С.

Существенным недостатком тиоколового каучука является низкая адгезия к металлу, поэтому при его использовании требуется создавать подложку для резинового клея. Этот недостаток отсутствует у жидкого тиокола (герметик ВТУ Р).

Для герметизации техники, работающей при температуре 150–250 °С и не соприкасающейся с маслами и топливом, применяются полисилоксаны с отвердителями, которые обеспечивают их отверждение при комнатной температуре (кремний- и оловоорганические соединения). Существенным недостатком этих герметиков является малая адгезия к металлу, даже в случае нанесения специального подслоя.

Для отсеков оборудования, работающих при температуре 150–250 °С и соприкасающихся с маслом и топливом, применяются фторорганические герметики.

Полисилоксановые и фторорганические герметизирующие пленки не разрушаются при длительном воздействии на них кислорода и озона. Они сохраняют эластичность при температуре до -60 °С; имеют высокую водостойкость.

Технологически удобны для использования в качестве герметиков растворы фенолоформальдегидных смол, совмещенных с нитрильным каучуком, например марки ВГК-18. Этот герметик не нужно вулканизировать. Он обладает удовлетворительной адгезией к металлическим поверхностям, а герметизирующая пленка сохраняет прочность до 100 °С, обеспечивает достаточную прочность и обладает масло- и бензостойкостью.

На основе жидких полиуретановых, карбоксилатных, фторированных каучуков разработан способ герметизации вакуумированных узлов (пропускных) при низких температурах. В радиотехнике применяют галлиевые клеи (клеи-припой). Соединение, полученное с помощью такого клея, имеет хорошую тепло- и электропроводность, достаточно высокую прочность и эксплуатационную стабильность в интервале температур 196–800 °С.

Склеиваемые поверхности должны быть механически очищены, например, наждачной бумагой, пескоструйной обработкой и обезжирены спиртом или ацетоном. Толщина пленки клея должна составлять 0,1–0,6 мм. Меньшая толщина грозит нарушением сплошности пленки, большая – уменьшением прочности соединения.

*Смазочные вещества* применяют для увеличения срока службы трущихся частей машин и снижения коэффициента трения. Коэффициент «сухого» трения характеризует сопротивление движению несмазанных поверхностей. Его величина зависит от качества обработки контактирующих изделий и обычно составляет 0,01–0,50. Наличие смазки снижает этот коэффициент до 0,001–0,002.

Смазочные вещества подразделяют на минеральные, растительные и животные масла. Смазочные вещества должны обеспечивать и скольжение, и теплоотвод.

*Кожа* используется для различного рода прокладок, уплотнительных колец, тормозных муфт и приводных ремней. Особенности кожи являются пористость и высокая механическая прочность. Они обладают высокой воздухо-, паро- и водопроницаемостью и низ-

кой теплопроводностью. Хорошо работают в условиях многократных изгибов.

*Текстильные материалы* – пряжу, вату, ленты, шнуры, веревки, войлок и другие материалы – широко используют в промышленности. Вата с переплетениями из силикатного стекла применяется для теплозвукоизоляции, амортизирующих подушек и т.д. Войлок используют в качестве уплотнительных прокладок, для фильтров, амортизаторов и других изделий.

*Бумажные материалы и картон* применяют для электроизоляции и в качестве упаковочных материалов.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое пластмассы?
2. Каково строение макромолекул полимерных материалов?
3. В чем заключается разница в строении и свойствах между термопластичными и терморезистивными материалами?
4. В чем назначение наполнителей в пластмассах?
5. На какие группы подразделяют пластмассы по назначению?
6. Перечислите термопластичные пластмассы, применяемые в сельскохозяйственном машиностроении.
7. Какими методами изготавливают детали из термопластичных пластмасс?
8. Перечислите термопластичные пластмассы, применяемые в сельскохозяйственном машиностроении.
9. Из каких составляющих состоит резина?
10. Какое вещество применяется в качестве вулканизатора при изготовлении резины?
11. Какими физическими, химическими, механическими свойствами обладает резина?
12. Назовите область применения древесины в пищевых производствах.
13. Какими достоинствами и недостатками обладает древесина?
14. Как можно повысить долговечность древесины?
15. Какие составляющие входят в состав стекла?
16. По каким признакам классифицируют стекло?
17. В чем заключается термическая закалка стекла и как меняются его свойства после термической обработки?

18. Перечислите названия вспомогательных материалов, применяемых на предприятиях сельскохозяйственных производств.

19. В чем заключается подготовка поверхности материала к склеиванию?

20. Что такое композиционные материалы?

21. Какие материалы могут применяться в качестве основы композиционных материалов?

22. Какие вещества применяются в качестве армирующих компонентов в композиционных материалах?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

### ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

**Цели работы.** Изучить микроструктуру легированных сталей различных структурных классов; установить связь между их структурой, термообработкой и свойствами.

#### **Оборудование, инструменты, материалы**

1. Твердомер HBRV-187,5.
2. Микроскоп марки ЛабоМет-1.
3. Набор микрошлифов легированных сталей.
4. Альбом микроструктур.

#### **Теоретические сведения**

Многие детали машин работают в условиях высоких скоростей, больших давлений, повышенных температур, агрессивных сред (кислот, щелочей, разъедающих газов и т.п.). Такие условия работы требуют применения материалов высокой прочности и пластичности, износостойкости, жаропрочности, коррозионностойкости. Этими свойствами обладают легированные стали, содержащие, помимо постоянных примесей, один или несколько так называемых легирующих элементов: никель, хром, вольфрам, молибден, ванадий, титан и др.

*По содержанию легирующих элементов* легированные стали делятся на низко-, средне и высоколегированные с соответствующим содержанием легирующих элементов: до 3 %, от 3 до 10 % и более 10 %.

*По назначению* легированные стали бывают конструкционными, инструментальными и с особыми свойствами.



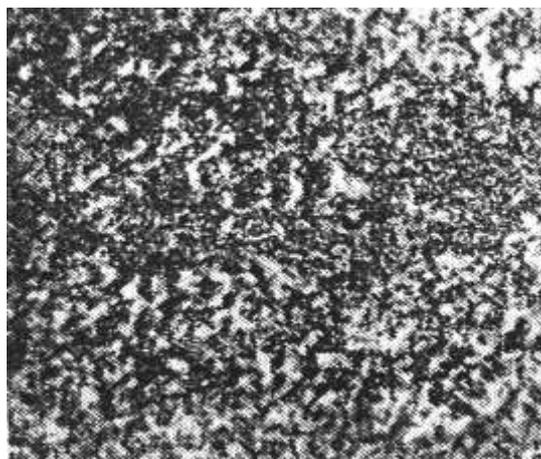


Рис. 62. Микроструктура стали марки 60С2  
после закалки и отпуска  $\times 500$

Для обеспечения требуемых свойств (сохранения в течение длительного времени высоких упругих значений) ее подвергают закалке при температуре от 820–840 °С в масле и отпуску при температуре от 350–400 °С на троостит (рис. 62).

*Сталь шарикоподшипниковая* марки ШХ15 (0,95–1,05 % С; 1,3–1,65 % Cr и 1,5–2 % Si) работает в условиях поверхностного износа и высоких контактных напряжений (усталостных). Для обеспечения требуемых свойств она закаливается от температуры 830–850 °С в масле, отпускается при 140–160 °С на мартенсит. На рисунке 63 показана структура закаленной стали с мелкоигольчатым мартенситом и равномерно распределенными карбидами хрома.

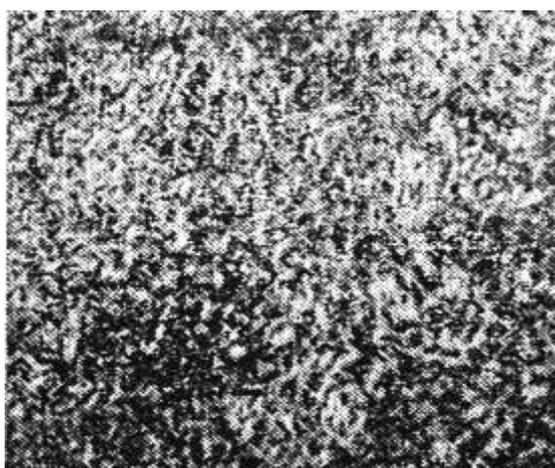


Рис. 63. Микроструктура стали марки ШХ15  
после закалки  $\times 500$

## Сталь инструментальная (карбидного класса)

Сталь быстрорежущая марки P18 (0,7–0,8 % C; 3,8–4,4 % Cr; 17,5–19 % W и 1–1,4 % V) работает в условиях разогрева режущей кромки до 600 °С. Микроструктура такой стали в литом состоянии состоит из темного сорбитообразного перлита, светлых карбидов и «скелетного» вида ледебуритной эвтектики (рис. 64).



Рис. 64. Микроструктура литой быстрорежущей стали марки P18 × 500

Последующая ковка или прокатка разрушает эвтектику. Термообработка такой стали состоит из отжига, закалки и трехкратного отпуска (рис. 65).

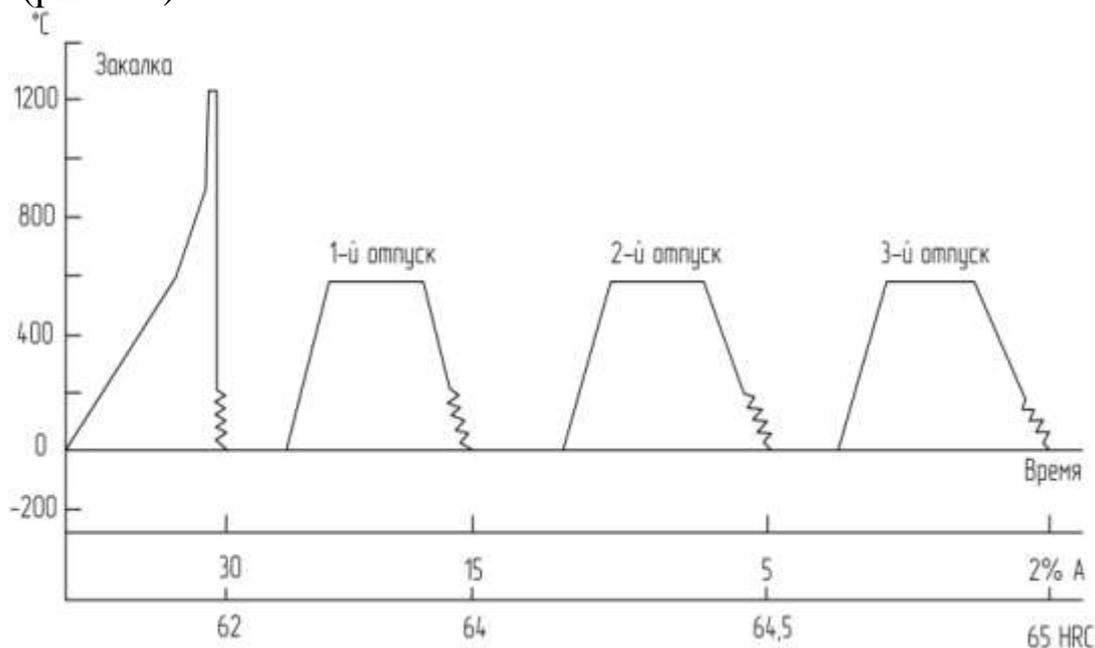


Рис. 65. Схема закалки и отпуска быстрорежущей стали марки P18

После отжига структура состоит из темного цвета сорбитообразного перлита, светлых крупных, первичных карбидов, выделившихся из жидкости при кристаллизации, мелких светлых вторичных карбидов, выделившихся из аустенита (рис. 66). Из-за низкой теплопроводности нагрев быстрорежущей стали Р18 до 850 °С проводят медленно, а затем до 1280 °С быстро, во избежание окисления и обезуглероживания.

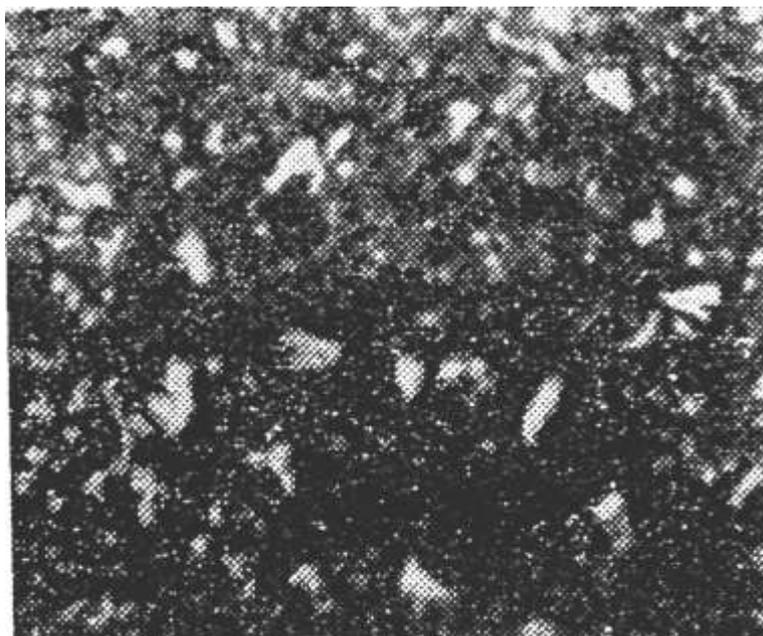
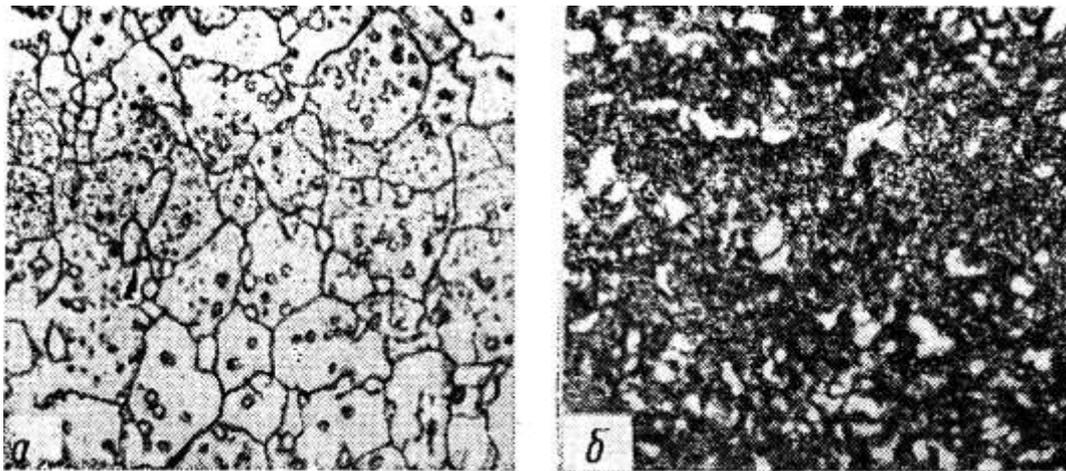


Рис. 66. Микроструктура ковальной и отожженной быстрорежущей стали марки Р18  $\times 500$

После закалки стали в масле получается структура (рис. 67, а), состоящая из мартенсита (50 %), остаточного аустенита (30 %) и карбидов (20 %). Но под микроскопом мартенсит не виден. После закалки сталь имеет твердость HRC 60–62.

Для устранения остаточного аустенита, имеющего пониженную теплопроводность и твердость и ухудшающего тем самым режущую способность инструмента, закаленную сталь подвергают трехкратному отпуску при 560 °С с часовой выдержкой. После отпуска структура стали состоит из игольчатого мартенсита и светлых карбидов (рис. 67, б). Количество остаточного аустенита уменьшается до 2 %, а твердость повышается до HRC 65.



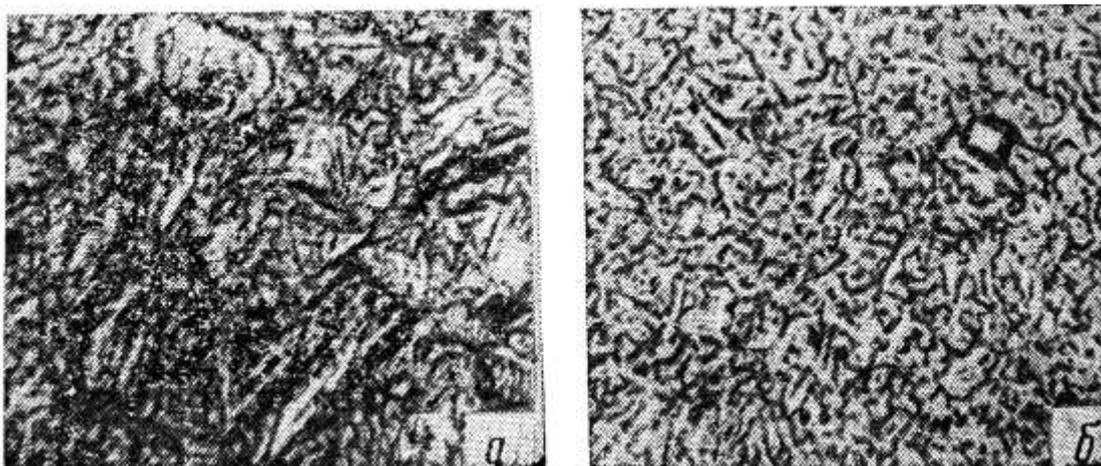
а

б

Рис. 67. Микроструктура быстрорежущей стали марки P18:  
а – после закалки  $\times 500$ ; б – после закалки и отпуска  $\times 500$

### Стали с особыми свойствами

*Нержавеющая сталь мартенситного класса* марки 30X13 (0,26–0,35 % С; 12–14 % Cr) работает в слабоагрессивных средах (водных растворах солей, азотной и некоторых органических кислотах). Нагревается при закалке до 1050–1100 °С в масле и отпускается (в зависимости от эксплуатационных условий работы детали) при 200 °С на мартенсит (рис. 68, а) или при 700 °С на сорбит (рис. 68, б). В низкоотпущенном состоянии сталь применяется для изготовления игл карбюраторов, пружин и др., а в высокоотпущенном – валов, зубчатых колес, болтов и др.



а

б

Рис. 68. Микроструктура стали марки 30X13:  
а – после закалки и отпуска при 200 °С  $\times 500$ ;  
б – после закалки и отпуска при 700 °С  $\times 500$

*Нержавеющая сталь аустенитного класса* марки 12X18Н9Т (0,12 % С; 17–19 % Cr; 8–10 % Ni и до 1 % Ti) работает в средах повышенной агрессивности (муравьиная, уксусная, щавелевая и другие кислоты). Для предотвращения выпадения из твердого раствора стали карбидов хрома, сохранения в ней однофазной структуры и высокоантикоррозионных свойств эта сталь закаливается в воде от 1050–1100 °С. После заковки сталь имеет структуру аустенита с линиями сдвига (рис. 69). Эту сталь применяют для трубопроводов, обшивок, различных емкостей и др.

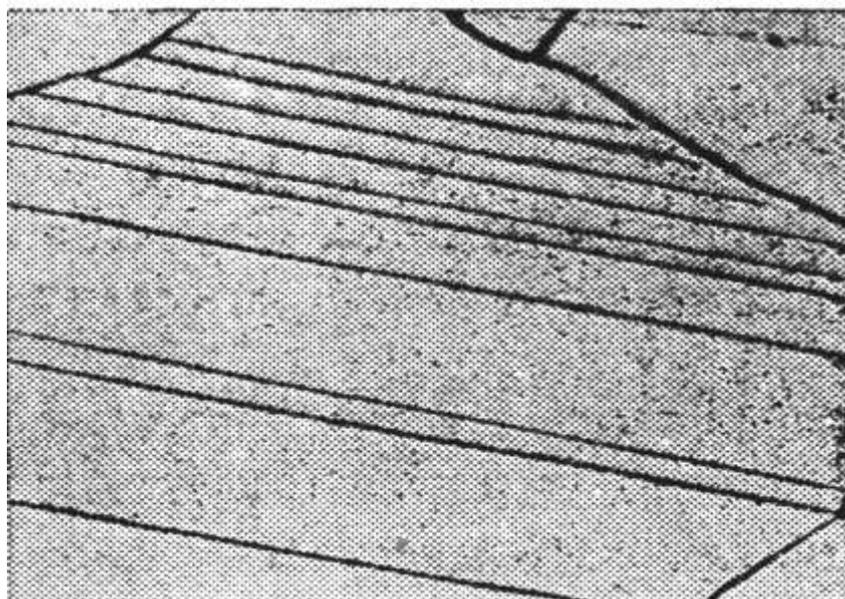


Рис. 69. Микроструктура стали марки 12X18Н9 после заковки от 1100 °С × 500

*Жаропрочная и жаростойкая сталь аустенитного класса* марки 45X14Н14В2М (0,45 % С; 14 % Cr; 14 % Ni; 2,0–2,5 % W; 0,2–0,4 % Mo) работает в условиях высоких температур (до 1000 °С), сохраняет длительное время жаропрочность и жаростойкость без образования заметных остаточных деформаций. После заковки в воде от 1050–1100 °С сталь имеет структуру аустенита (рис. 70, а).

После заковки и старения при 750 °С структура стали состоит из аустенита и карбидов (рис. 70, б). Сталь применяется для изготовления клапанов мощных двигателей, трубопроводов и др.



а



б

Рис. 70. Микроструктура стали марки 45X14N14B2M:  
а – после закалки в воде от 1050–1100 °С × 500;  
б – после старения при 750 °С × 500

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить микроструктуры легированных сталей различных структурных классов.
2. Зарисовать их схемы, указав увеличение микроскопа.
3. Для каждой марки стали указать структурные составляющие, химический состав, термообработку, механические свойства и применение.

### **Содержание отчёта**

В отчет необходимо включить классификацию легированных сталей по назначению, содержанию легирующих элементов, структуре в нормализованном состоянии; схемы микроструктур, их описание; применение изучаемых сталей, ответы на контрольные вопросы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое легированные стали?
2. Как влияют легирующие элементы на свойства стали?
3. Как классифицируются легированные стали по содержанию легирующих элементов, назначению, структуре после нормализации?
4. Что такое улучшение стали?

5. Какой элемент в первую очередь обеспечивает коррозионную стойкость стали?
6. Как проводится термическая обработка быстрорежущих сталей?
7. Какой термической обработкой упрочняются аустенитные жаропрочные стали?
8. Какими эксплуатационными свойствами должны обладать рессорно-пружинные и шарикоподшипниковые стали?
9. Как маркируются конструкционные легированные стали?
10. Как маркируются шарикоподшипниковые стали?
11. Как маркируются быстрорежущие стали?
12. Что такое жаростойкость?
13. Что такое жаропрочность?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12**

### **ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

**Цель работы.** Изучить микроструктуры цветных металлов и сплавов, установить связь между структурой, свойствами и применением.

#### **Оборудование, инструменты, материалы**

1. Микроскоп марки ЛабоМет-1.
2. Набор микрошлифов цветных металлов и сплавов.
3. Альбом микроструктур.

#### **Теоретические сведения**

Цветные металлы и сплавы имеют широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства.

Чистые цветные металлы обладают рядом специфических свойств. Так, медь отличается высокой электропроводностью, алюминий и магний – малой плотностью, свинец – пластичностью, олово, свинец, цинк – низкой температурой плавления. Чистые металлы, за исключением меди, алюминия, кремния, германия и некоторых других, применяются редко вследствие того, что они обладают невысокими механическими свойствами. Поэтому цветные металлы широко

применяются в промышленности в виде составляющих элементов сплавов. Сплавление одних цветных металлов с другими с образованием сплавов в ряде случаев значительно улучшает их ценные свойства.

Ниже приводится краткая характеристика ряда наиболее распространенных цветных металлов и сплавов, которые часто применяются в авто-, тракторо-, сельхозмашиностроении и ремонтном производстве.

*Медь марки М1* содержит до 0,1 % примесей, обладает высокой электропроводностью и применяется для проводников электрического тока. На рисунке 71 показана микроструктура деформированной меди после отжига. Видны крупные светлые зерна меди с темными границами и следы пластической деформации (прокатка) в виде линий сдвига и двойников.

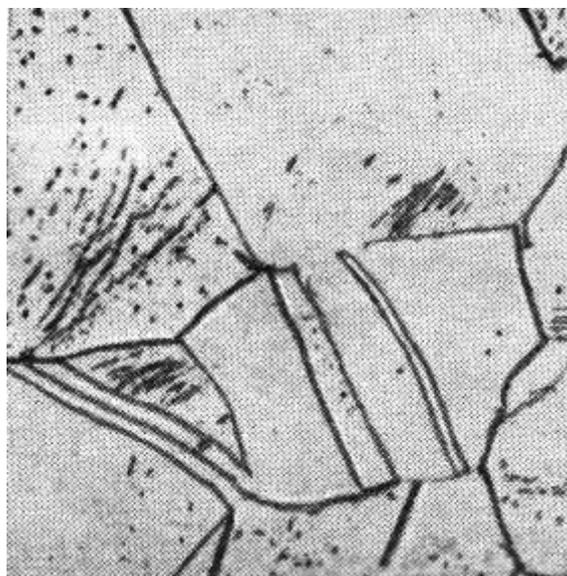


Рис. 71. Микроструктура деформированной и отожженной меди  $\times 200$

*Латунь марки Л68* (68 % Cu, остальное – цинк) обладает высокой пластичностью, коррозионной стойкостью и используется чаще для изготовления изделий прокаткой и штамповкой (проволока, листы, трубы, поплавки карбюраторов двигателей, бачки радиаторов и др.). На рисунке 72 приведена микроструктура деформированной однофазной  $\alpha$ -латуни марки Л68 после отжига. На ней видны темные линии сдвига и двойников. Зерна пластичной  $\alpha$ -фазы (твердого раствора цинка в меди) вследствие анизотропии травятся на разную глубину и поэтому имеют неодинаковую окраску.

Латунь марки ЛС59-1 (59 % Cu; 1 % Pb, остальное – цинк) обладает хорошей обрабатываемостью резанием, применяется в виде цветного литья, а также изделий, изготовляемых прокаткой или прессованием (листы, прутки, трубы, втулки, гайки, жиклеры, тройники, пробки и др.). Микроструктура литой латуни (рис. 73) состоит из светлых зерен пластичной  $\alpha$ -фазы и темных зерен твердой и хрупкой  $\beta$ -фазы.



Рис. 72. Микроструктура латуни марки Л68 после деформирования и отжига  $\times 250$

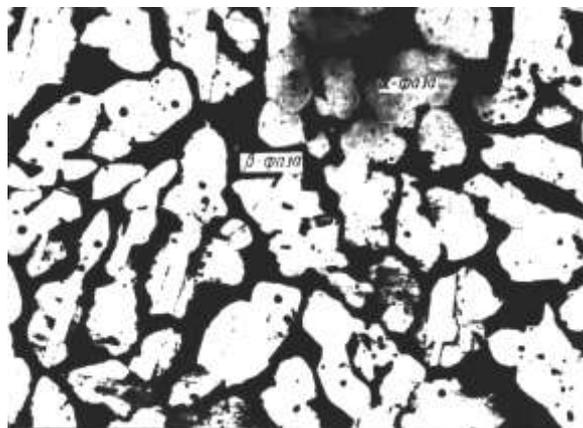


Рис. 73. Микроструктура литой латуни марки ЛС59-1  $\times 200$

Бронза марки БрО10 (10 % Sn, остальное – медь) обладает хорошими литейными свойствами и поэтому применяется для цветного сложного фасонного литья арматуры и др. Микроструктура оловянистой бронзы (рис. 74) состоит из неоднородного твердого  $\alpha$ -раствора (твердого раствора олова в меди) и эвтектоида  $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ .

Темные участки неоднородного  $\alpha$ -раствора богаты медью, светлые – оловом, в эвтектоиде на светлом голубом фоне соединения

$Cu_{31}Sn_8$  видны темные точечные включения  $\alpha$ -фазы. Из бронзы БрО10 изготавливают подшипники скольжения и детали арматуры.

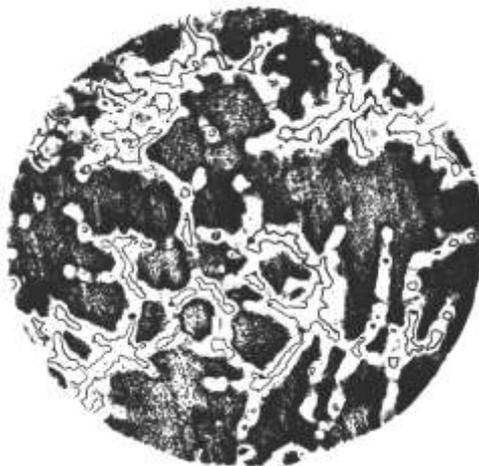


Рис. 74. Микроструктура литой оловянистой бронзы марки БрО10  $\times 100$

*Силумин марки АК12* (10–13 % Si, остальное – алюминий) обладает коррозионной стойкостью и хорошими литейными свойствами, применяется для литья (крышки, кожухи, корпуса водяных насосов, барабаны и др.). При отсутствии модифицирования заэвтектический сплав, содержащий 12 % Si, имеет структуру, состоящую из эвтектики ( $\alpha + Si$ ) грубого строения и темных крупных игл кремния (рис. 75), снижающих пластические свойства сплава. Фаза  $\alpha$  представляет собой твердый раствор кремния в алюминии.

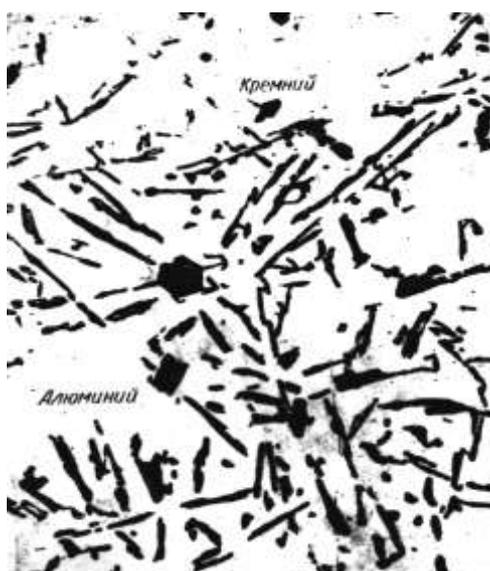


Рис. 75. Микроструктура литейного алюминиевого сплава марки АЛ2 до модифицирования  $\times 200$

Модифицирование сплава натрием резко меняет характер кристаллизации силумина. На рисунке 76 приведена диаграмма состояния сплавов *алюминий–кремний*. Пунктиром показано смещение линий на этой диаграмме после модифицирования. В этом случае заэвтекктический сплав (12 % Si) становится доэвтекктическим (эвтекктическая точка сдвигается вправо до 14 % Si, а эвтекктическая линия, соответствующая 574 °С, смещается вниз до 563 °С).

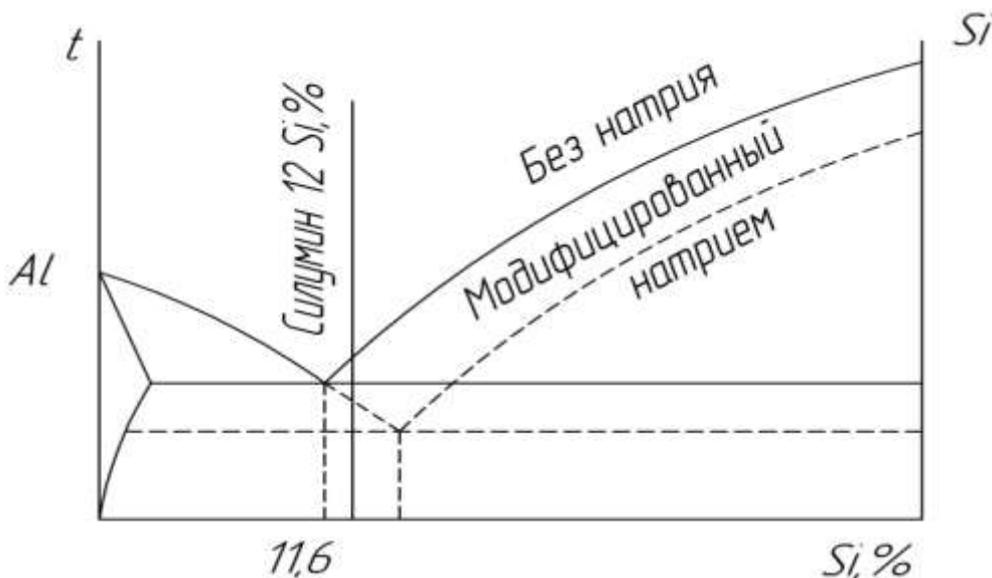


Рис. 76. Диаграмма сплавов *алюминий–кремний*

Поэтому в структуре после модифицирования обнаруживаются светлые зерна пластичной  $\alpha$ -фазы и темная мелкокристаллическая эвтектика. Модифицирование значительно улучшает пластичность и прочность силумина.

*Дуралюмин марки Д16* (3,8–4,8 % Cu; 0,6 % Mg; 0,6 % Mn; менее 0,7 % Si; остальное – алюминий) обладает достаточной прочностью и пластичностью, посредством прокатки или штамповки из него изготовляют листы, прутки, трубы и др.

Для получения требуемых свойств дуралюмин закаливают в воде от 510 °С и затем подвергают старению при 18–20 °С в течение нескольких суток. После старения структура дуралюмина Д16 состоит из светлых зерен перенасыщенного твердого раствора (рис. 77), представляющего собой твердый раствор меди в алюминии. Упрочняющие сплав продукты, образуемые при старении, под микроскопом не видны.

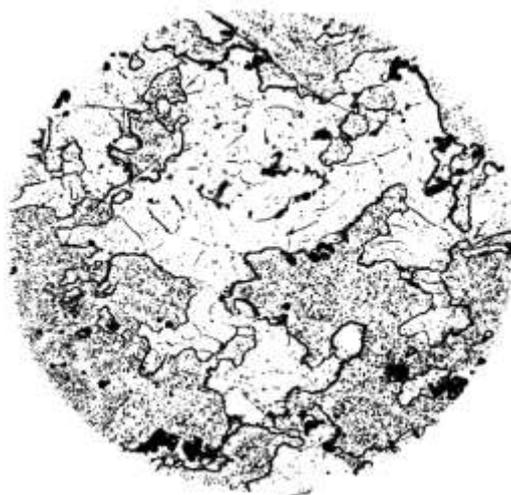


Рис. 77. Микроструктура деформированного алюминиевого сплава марки Д16 после закалки в воде и естественного старения  $\times 200$

*Подшипниковый сплав баббит марки Б83 (83 % Sn; 11 % Sb; 6 % Cu) обладает высокими антифрикционными свойствами, применяется для заливки подшипников скольжения машин ответственного назначения (турбины, компрессоры, дизели и др.). Структура сплава состоит из темной пластичной основы  $\alpha$ -фазы (твердого раствора сурьмы в меди и олове), светлых твердых частиц крупных кубических кристаллов SnSb и мелких игл или звезд кристаллов  $Cu_3Sn$  (рис. 78).*

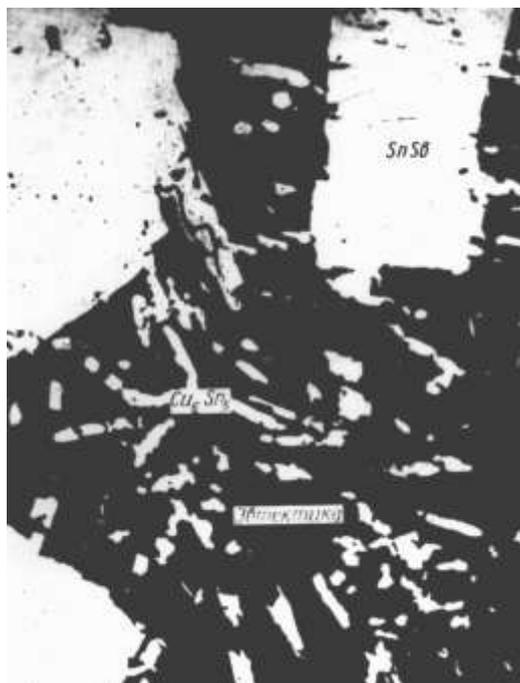


Рис. 78. Микроструктура оловянистого баббита марки Б83  $\times 100$

## Порядок выполнения работы

1. Рассмотреть под микроскопом и зарисовать схемы микроструктур изучаемых цветных металлов и сплавов.
2. Записать марку, химический состав, термообработку, названия зарисованных микроструктурных составляющих, количество фаз, увеличение микроскопа, свойства и применение изучаемых сплавов.

## Содержание отчета

В отчет необходимо включить схемы и описания изучаемых микроструктур цветных металлов и сплавов; диаграмму состояния сплавов *алюминий–кремний*; пояснить сущность модифицирования силуминов и старения дуралюминов.

## Контрольные вопросы

1. Как называют основные группы сплавов меди?
2. Какими свойствами обладают латуни и бронзы?
3. Как влияют особенности структуры бронзы на ее применение?
4. Какими свойствами обладают силумины и дуралюмины?
5. Каковы области применения медных и алюминиевых сплавов?
6. Какова цель модифицирования силуминов?
7. Для чего проводится старение дуралюминов?
8. Какова взаимосвязь структуры и свойств баббитов?

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ IV

1. **Легирующий элемент, обозначаемый буквой «С» в марке стали:**

- A) кобальт;
- B) кремний;
- C) селен;
- D) свинец.

2. **Легирующий элемент, обозначаемый буквой «Г» в марке стали:**

- A) молибден;
- B) марганец;
- C) медь;
- D) вольфрам.

3. **Легирующий элемент, обозначаемый буквой «Н» в марке стали:**

- A) натрий;
- B) никель;
- C) хром;
- D) ниобий.

4. **Химический состав стали 20ХНЗА;**

A) ~ 0,2 % С; не более 1,5 % Cr; 3 % Ni. Сталь высококачественная;

- B) ~ 2 % С; не более 1,5 % Cr и Ni; ~ 3 % Ni;
- C) ~ 0,02 % С; ~ 3 % Ni и ~ по 1 % Cr и Ni;
- D) ~ 20 % С; не более 1,5 % Cr и около 3 % Ni.

5. **Среднее содержание углерода (%) в стали 20ХНЗА;**

- A) 0,02;
- B) 0,20;
- C) 2,00;
- D) 20,00.

6. **Содержание углерода в улучшаемых сталях (%):**

- A) 0,6–0,8;
- B) 0,3–0,5;

- C) 0,8–1,0;
- D) 1,0–1,5/

**7. Содержание углерода в цементуемых сталях (%):**

- A) 0,6–0,8;
- B) 0,3–0,5;
- C) 0,8–1,0;
- D) 0,1–0,25.

**8. Сталь, относящаяся к классу конструкционных:**

- A) P18;
- B) 45ХН;
- C) ШХ15;
- D) 60СГ.

**9. Среднее содержание углерода (%) в стали 9ХС:**

- A) 0,09;
- B) 0,90;
- C) 9,00;
- D) в этой стали углерода нет.

**10. Сталь, относящаяся к классу инструментальных:**

- A) P18;
- B) 45ХН;
- C) ШХ15;
- D) 60СГ.

**11. Красностойкость быстрорежущих сталей:**

- A) устойчивость против высокотемпературной коррозии;
- B) способность сталей к пластической деформации при высоких температурах;
- C) способность сталей противостоять отпуску;
- D) способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продолжительном нагреве.

**12. Инструментальные стали:**

- A) 38ХН3МФ, 65Г;
- B) 40ХН2МА, А22;
- C) P9, У10;
- D) ШХ15, 40Х.

**13. Технологический метод, применяемый для получения твердых сплавов:**

А) обработка сверхвысоким давлением в сочетании с высоким нагревом;

В) порошковая металлургия;

С) литье с последующей термической обработкой;

Д) термомеханическая обработка.

**14. Сталь, относящаяся к классу шарико-подшипниковых:**

А) P18;

В) 45ХН;

С) ШХ15;

Д) 60СГ.

**15. Сталь, относящаяся к классу рессорно-пружинных:**

А) P18;

В) 45ХН;

С) ШХ15;

Д) 60С2А.

**16. Сталь, относящаяся к классу пружинных:**

А) P18;

В) 45ХН;

С) ШХ15;

Д) 60СГ.

**17. Сталь, относящаяся к классу коррозионно стойких:**

А) P18;

В) 45ХН;

С) ШХ15;

Д) 12Х13.

**18. Жаростойкость металла (сплава):**

А) сопротивление часто чередующимся нагреву и охлаждению;

В) сопротивление коррозионному воздействию газа при высоких температурах;

С) способность сохранять структуру мартенсита при высоких температурах;

D) способность длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при повышенных температурах.

**19. Жаропрочность металла (сплава):**

- A) сохранение структуры мартенсита при высоких температурах;
- B) сопротивление коррозионному воздействию газа при высоких температурах;
- C) сопротивление деформированию и разрушению при повышенных температурах;
- D) сопротивление часто чередующимся нагреву и охлаждению.

**20. Кобальт в твердом сплаве играет роль:**

- A) связующего компонента, увеличивает вязкость сплава;
- B) увеличивает износостойкость сплава;
- C) увеличивает твердость сплава;
- D) увеличивает красностойкость сплава.

**21. Карбид вольфрама (WC), входящий в состав твердых сплавов, обеспечивает:**

- A) вязкость сплава;
- B) твердость сплава;
- C) прочность сплава;
- D) упругость сплава.

**22. Название и химический состав T15K6:**

- A) сталь, содержит более 1 % углерода, 15 % титана, 6 % кобальта;
- B) медный сплав, содержит 15 % тантала, 6 % кремния, остальное – медь;
- C) алюминиевый сплав, состав устанавливается по ГОСТу;
- D) твердый сплав, содержит 15 % карбида титана, 6 % кобальта, 79 % карбида вольфрама.

**23. Свойство, которым должны обладать материалы, устойчивые к абразивному изнашиванию:**

- A) вязкая матрица;
- B) высокая твердость поверхностного слоя;
- C) неустойчивость к циклическим нагрузкам;
- D) высокая прокаливаемость.

**24. Сплав, который рекомендуется для изготовления шестерни:**

- A) ВЧ120;
- B) Ст5;
- C) 40Х9С2М;
- D) 20ХН.

**25. Содержание вольфрама (W) и ванадия (V) (%) в быстрорежущей стали P18K5Ф2;**

- A) в этой стали вольфрама нет, V = 5 %;
- B) W = 2 %, V = 18 %;
- C) W = 18 %, V = 2 %;
- D) W = 18 %, V = 5 %.

**26. Детали и конструкции, которые изготавливают из сталей марок 50Г, 50С2, 60С2ХФА;**

- A) пружины и рессоры;
- B) кузова автомобилей;
- C) зубчатые колеса;
- D) режущий инструмент.

**27. Сталь, легированная марганцем;**

- A) У7А;
- B) 40ХНМА;
- C) P18;
- D) 18Г2АФ.

**28. Установите соответствие детали материалу для изготовления этой детали:**

*Деталь:*

- 1) шестерня коробки передач;
- 2) коленчатый вал двигателя.

*Материал детали:*

- A) СЧ35;
- B) 18ХГТ;
- C) ВЧ60.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**29. Установите соответствие детали материалу для изготовления этой детали:**

*Деталь:*

- 1) подшипник качения;

*Материал детали:*

- A) СЧ35;

2) рессора.

В) 55СГ;

С) ШХ15.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

30. **Установите соответствие** детали материалу для изготовления этой детали:

*Деталь:*

*Материал детали:*

1) лемех плуга;

А) Р6М5;

2) фреза.

В) 67Г;

С) ШХ15.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

31. **Дополните:**

Число 18 в марке стали Р18 обозначает содержание (%) легирующего элемента \_\_\_\_\_.

32. **Установите правильную последовательность марок сталей и сплавов, соответствующую возрастанию их красностойкости:**

А) 9ХС;

В) У9;

С) Р6М5;

Д) Т5К10.

33. **Установите соответствие легирующего элемента его обозначению в марках легированных сталей:**

*Легирующий элемент:*

*Его обозначение:*

1) кремний;

А) С;

2) никель.

В) Н;

С) К.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

34. **Дополните:**

Способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продолжительном нагреве называется \_\_\_\_\_.

35. **Дополните:**

Сопротивление металлов (сплавов) коррозионному воздействию газа при высоких температурах называется \_\_\_\_\_.

**36. Дополните:**

Сопротивление деформированию и разрушению металлов (сплавов) при повышенных температурах называется \_\_\_\_\_.

**37. Дополните:**

Среднее содержание углерода (%) в стали 9ХС составляет \_\_\_\_.

**38. Дополните:**

Среднее содержание углерода (%) в стали 20ХН3А составляет \_.

**39. Свойства, которые характеризуют медь:**

А) низкая  $t_{пл}$  (651 °С), низкая электропроводность, низкая плотность (1740 кг/м<sup>3</sup>);

В) низкая  $t_{пл}$  (327 °С), низкая электропроводность, высокая плотность (11 600 кг/м<sup>3</sup>);

С) высокая  $t_{пл}$  (1083 °С), высокая электропроводность, высокая плотность (8940 кг/м<sup>3</sup>);

Д) высокая  $t_{пл}$  (1665 °С), низкая электропроводность, низкая плотность (4500 кг/м<sup>3</sup>).

**40. Латунь – это сплав:**

А) меди с цинком;

В) железа с никелем;

С) меди с оловом;

Д) алюминия с кремнием.

**41. Название и химический состав сплава марки Л62:**

А) литейная сталь, содержащая 0,62 % С;

В) литейный алюминиевый сплав, содержащий 62 % А1;

С) латунь, содержащая 62 % Сu;

Д) сплав бронзы с медью, содержащий 62 % бронзы.

**42. Сплавы меди с другими элементами, в числе которых, но только наряду с другими, может быть и цинк:**

А) бронзы;

В) латуни;

С) инвары;

Д) баббиты.

**43. Сплав, относящийся к бронзам:**

- A) Л70;
- B) Д16;
- C) БрАЖ 9-4;
- D) ВТ5.

**44. Класс, к которому относится бронза марки БрОЦ 4-3:**

- A) кремнистая;
- B) бериллиевая;
- C) оловянная;
- D) алюминиевая.

**45. Название и химический состав сплава марки Д16:**

- A) баббит, содержащий 16 % олова;
- B) латунь, содержащая 16 % цинка;
- C) сталь, содержащая 16 % меди;
- D) деформируемый алюминиевый сплав, упрочняемый термообработкой – дуралюмин. Состав устанавливают по стандарту.

**46. Сплав, относящийся к силуминам:**

- A) АЛ4;
- B) Д16;
- C) Л70;
- D) БрОФ 6,5-0,15.

**47. Литейный сплав системы Al-S:**

- A) дуралюмин;
- B) латунь;
- C) бронза;
- D) силумин.

**48. Сплав, относящийся к дуралюминам:**

- A) АЛ4;
- B) Д16;
- C) Л70;
- D) БрОФ 6,5-0,15.

**49. Элементы, образующие сплав, называемый дуралюмином:**

- A) алюминий, медь, магний и марганец;
- B) медь и цинк;
- C) алюминий и кремний;
- D) медь и другие элементы.

**50. Элементы, образующие сплав, называемый силумином:**

- A) алюминий, медь, магний и марганец;
- B) медь и цинк;
- C) алюминий и кремний;
- D) медь и другие элементы.

**51. Способ упрочнения изделия из сплава Д16:**

- A) закалка и отпуск;
- B) закалка и старение;
- C) закалка;
- D) старение.

**52. Сплав, относящийся к высокопрочным алюминиевым сплавам:**

- A) АЛ4;
- B) Д16;
- C) Л70;
- D) В95.

**53. Баббит:**

- A) латунь с двухфазной структурой;
- B) литейный алюминиевый сплав;
- C) антифрикционный сплав;
- D) деформируемый алюминиевый сплав.

**54. Сплав, относящийся к антифрикционным сплавам:**

- A) АЛ4;
- B) Д16;
- C) Л70;
- D) Б83.

**55. Установите соответствие марки сплава основному компоненту сплава:**

*Марка сплава:*

- 1) Л70;
- 2) Д16.

*Основной компонент сплава:*

- А) титан;
- В) алюминий;
- С) медь.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**56. Установите соответствие названия сплава его марке:**

*Название сплава:*

- 1) латунь;
- 2) силумин.

*Марка сплава:*

- А) АЛ9;
- В) Д16;
- С) ЛС74-3.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**57. Дополните:**

Силумин – это сплав алюминия и \_\_\_\_\_.

**58. Дополните:**

Сплав меди и цинка называется \_\_\_\_\_.

**59. Установите соответствие марки сплава основному компоненту сплава:**

*Марка сплава:*

- 1) В95;
- 2) БрОЦ 4-3.

*Основной компонент сплава:*

- А) магний;
- В) алюминий;
- С) медь.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**60. Установите соответствие названия сплава его марке:**

*Название сплава:*

- 1) дуралюмин;
- 2) баббит.

*Марка сплава:*

- А) АЛ4;
- В) Д1;
- С) Б83.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**61. Дополните:**

Сплав меди с оловом и свинцом называется \_\_\_\_\_.

**62. Нихром – это материал:**

- A) жаростойкий сплав на основе никеля;
- B) диэлектрический материал;
- C) железоникелевый сплав с высокой магнитной проницаемостью;
- D) высокохромистый инструментальный материал.

**63. Назначение нихрома:**

- A) для изготовления нагревательных элементов;
- B) для изготовления электроизоляторов;
- C) в слаботочной технике;
- D) для изготовления штампового инструмента.

**64. Диэлектрики – это материалы:**

- A) поляризующиеся в электрическом поле;
- B) с обратной зависимостью электросопротивления от температуры;
- C) с неметаллическими межатомными связями;
- D) с аморфной структурой.

**65. Класс электротехнических материалов, к которым относят медь:**

- A) диэлектрические материалы;
- B) полупроводниковые материалы;
- C) проводниковые материалы;
- D) магнитные материалы.

**66. Класс материалов, к которым относят пластмассы:**

- A) диэлектрические материалы;
- B) полупроводниковые материалы;
- C) проводниковые материалы;
- D) магнитные материалы.

**67. Класс электротехнических материалов, к которым относят кремний:**

- A) диэлектрические материалы;
- B) полупроводниковые материалы;
- C) проводниковые материалы;
- D) магнитные материалы.

**68. Класс электротехнических материалов, к которым относят электротехническую сталь:**

- A) диэлектрические материалы;
- B) полупроводниковые материалы;
- C) проводниковые материалы;
- D) магнитные материалы.

**69. Материалы, из которых изготавливают статоры и роторы электродвигателей:**

- A) нержавеющей хромоникелевые стали;
- B) магнитно-мягкие материалы;
- C) магнитно-твердые материалы;
- D) трансформаторные стали.

**70. Материалы, которые применяются для изоляции токопроводящих частей:**

- A) диэлектрические материалы;
- B) полупроводниковые материалы;
- C) проводниковые материалы;
- D) магнитные материалы.

**71. Структура, которой обладают ферромагнитные материалы:**

- A) синтетическая;
- B) мартенситная;
- C) доменная;
- D) кристаллическая.

**72. Материал, который относится к термореактивным полимерам:**

- A) полистирол;
- B) поливинилхлорид;
- C) эпоксидная смола;
- D) полиэтилен.

**73. Электротехнические материалы, называемые ферритами:**

- A) твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -Fe;
- B) полупроводники;

- С) проводники;
- Д) магнитные материалы.

**74. Материал, который относится к термопластичным полимерам:**

- А) латунь;
- В) эпоксидная смола;
- С) фенолоформальдегидная смола;
- Д) полиэтилен.

**75. Структура, которую имеют макромолекулы резины:**

- А) редкосетчатая;
- В) разветвленная;
- С) линейная;
- Д) лестничная.

**76. Материал, изготавливаемый на основе полимеров:**

- А) стекло;
- В) сталь;
- С) пластмасса;
- Д) керамика.

**77. Характерная особенность термопластичных полимерных материалов:**

- А) обратимо затвердевают в результате охлаждения без участия химических реакций;
- В) имеют редкосетчатую структуру макромолекул;
- С) формуется при повышенных температурах;
- Д) необратимо затвердевают в результате химических реакций.

**78. Характерная особенность термореактивных полимерных материалов:**

- А) в их состав включены наполнители;
- В) обратимо затвердевают в результате охлаждения без участия химических реакций;
- С) имеют линейную или разветвленную структуру макромолекул;
- Д) необратимо затвердевают в результате химических реакций.

**79. Обозначение полиэтилена низкой плотности:**

- A) ПЭВП;
- B) ПЭНП;
- C) ПП;
- D) ПС;

**80. Установите соответствие класса материала его названию:**

*Класс материала:*

- 1) проводник;
- 2) диэлектрик.

*Название материала:*

- A) резина;
- B) кремний;
- C) медь.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**81. Установите соответствие класса материала его названию:**

*Класс материала:*

- 1) проводник;
- 2) полупроводник.

*Название материала:*

- A) резина;
- B) кремний;
- C) медь.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**82. Установите соответствие вида полимера его названию:**

*Вид полимера:*

- 1) термопласт;
- 2) реактопласт.

*Название полимера:*

- A) полиэтилен;
- B) эпоксидная смола;
- C) резина.

1 – \_\_\_\_; 2 – \_\_\_\_.

**83. Дополните:**

Материал, изготавливаемый на основе полимеров, – это \_\_\_\_.

**84. Установите правильную последовательность проводниковых металлов, соответствующую возрастанию их электропроводности:**

- A) алюминий;
- B) железо;
- C) медь;
- D) серебро.

## ИНДИВИДУАЛЬНОЕ РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

### «РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ»

Индивидуальное расчетное задание «Разработка технологического процесса термической обработки детали» выполняется с целью более глубокого усвоения теоретического курса «Материаловедение». В ходе выполнения задания студенты должны научиться пользоваться специальной справочной литературой, практически освоить методику разработки технологического процесса термической обработки деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин. Результатом проделанной работы является заполнение технологической карты термической обработки детали.

#### Задание

Разработать технологический процесс термической обработки детали .....

Марка стали .....

Операции термической обработки .....

Твердость после термической обработки .....

#### *Порядок выполнения задания*

1. Расшифровать марку заданной стали (табл. 25), описать ее микроструктуру, механические свойства в состоянии поставки, указать группу стали по назначению.

2. Описать характер влияния постоянных примесей (углерода, марганца, кремния, серы, фосфора, кислорода, азота и водорода) на свойства стали. При наличии легирующих элементов описать их влияние на положение критических точек  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{cm}$ , рост зерна аустенита, закаливаемость и прокаливаемость, на положение точек  $M_H$  и  $M_K$ , на количество остаточного аустенита и на отпуск.

3. Назначить режим операций термообработки деталей.

4. Описать микроструктуру и механические свойства материала детали после обработки.

5. Построить график термической обработки детали в координатах *температура–время*.

Данные расчета свести в технологическую карту по прилагаемому образцу.

### *Методика выполнения задания*

Разработку технологии термообработки заданной детали следует начинать с оценки особенностей свойств исходной стали, способа изготовления заготовки и условий работы детали. Ответы должны быть конкретными и выполнены строго в соответствии с порядком выполнения задания.

При выполнении 1-го пункта задания в расшифровке марки заданной стали указать содержание ее основных элементов, назвать и зарисовать микроструктуру исходной стали (в состоянии поставки), указать механические свойства (твердость, предел прочности при растяжении, пластичность и ударную вязкость), отметить их особенности в связи с предполагаемым назначением.

При выполнении 2-го пункта задания дать анализ влияния постоянных примесей и легирующих добавок на свойства стали, технологию ее термообработки и полученные результаты.

Температуру критических точек  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{cm}$  для заданной углеродистой стали определить по диаграмме состояния *железо–углерод* или справочным данным, а для легированной стали – только по справочным данным.

При оценке влияния состава стали на рост зерна аустенита отметить склонность ее к перегреву и дать рекомендации по режиму нагрева заданной стали (медленно или быстро).

Особое внимание следует обратить на анализ закаливаемости и прокаливаемости предлагаемой стали, так как от них зависят ее конечные свойства (твердость, глубина закалки и др.). В зависимости от закаливаемости стали по справочным данным или по диаграмме изотермического превращения аустенита выбрать соответствующую охлаждающую закалочную среду. При этом следует отметить склонность рассматриваемой стали к образованию в ней после закалки повышенных внутренних напряжений и трещин.

По справочным данным или диаграмме превращения переохлажденного аустенита при охлаждении определить положение точек начала и конца мартенситного превращения  $M_n$  и  $M_k$ , а затем оценить возможность получения в стали после закалки остаточного аустенита и его влияние на конечные свойства. При наличии остаточного аустенита указать способ его устранения.

При оценке влияния состава закаленной стали на превращения при отпуске определить степень этого влияния и вид отпуска. Если в заданной стали несколько легирующих элементов, оказывающих взаимно противоположное влияние на превращения, то оценку следует дать приближенно по средним величинам их влияния.

Ответы на 3-й и 4-й пункты задания даются на основании анализа, проведенного в 1-м и 2-м пунктах.

В 3-м пункте задания назначается режим каждой операции и термообработки. С использованием данных, приведенных во втором пункте, а также справочных источников указывается температура нагрева и структура, получающаяся при этом. Температуру нагрева детали для химико-термической обработки выбирают по справочным данным в зависимости от ее вида.

Нужно указать, какая охлаждающая среда должна быть использована после предварительной термообработки (отжига, нормализации, цианирования), после отпуска, определить время охлаждения.

Описать микроструктуру стали после окончательной термообработки, зарисовать ее и указать особенности механических свойств стали (твердость, прочность, пластичность и ударная вязкость).

Все результаты расчетов необходимо свести в технологическую карту по прилагаемому образцу (табл. 24). Закончить задание необходимо построением графика термической обработки, включая и предварительную термообработку.

В конце выполненного задания студент должен привести список использованной литературы.

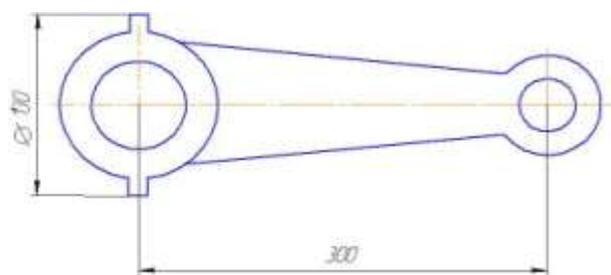
Примерный перечень вариантов индивидуального задания приведен в таблице 25.

Некоторые сведения о составе, свойствах, режимах термической обработки представлены в таблицах 26–39.

## Технологическая карта термической обработки детали

Эскиз детали		Красноярский ГАУ	Кафедра «Общеинженерные дисциплины»			
		Наименование детали:				
		Материал:				
		Габариты детали:				
		Технические условия:				
		Режим нагрева и охлаждения				
		Нагревательная печь	Время на- грева и вы- держки	Охлаждающая среда	Твердость HRC или HB	
Номер операции	Наименование операции					
Составил студент:	Группа	Дата		Работу принял:	Дата	

## Перечень вариантов индивидуального задания



Шатун

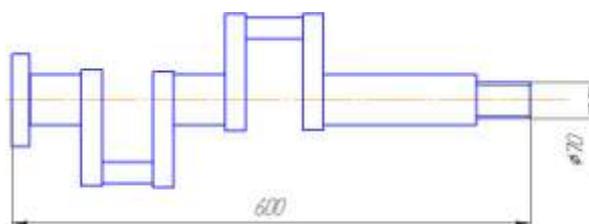
Но- мер п/п	Марка стали	Термическая обработка	Твердость после оконча- тельной термообра- ботки
1	2	3	4
1	45	Нормализация, закалка, отпуск	217-289НВ
2	40Х	Закалка, отпуск	217-289НВ
3	45Х	Нормализация, закалка, отпуск	217-289НВ
4	45	Закалка, отпуск	217-289НВ
5	33ХС	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-185НВ
6	35	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-185НВ
7	40	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ
8	18ХНВА	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ



Шток

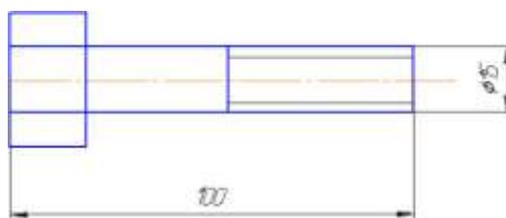
1	2	3	4
9	40	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ
10	35ХГС	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ

1	2	3	4
11	35СГ	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ
12	40Х	Закалка, отпуск	229-185НВ
13	45	Закалка, отпуск	217-289НВ
14	45	Закалка, отпуск	207-255НВ
15	25	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-185НВ
16	35	Нормализация, закалка, высокий отпуск	185-229НВ
17	18ХНВА	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ
18	27СГ	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ



Коленчатый вал

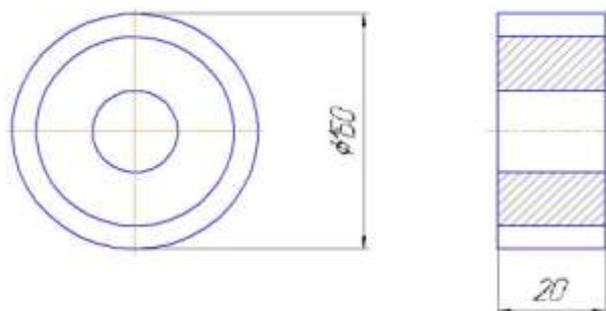
1	2	3	4
19	35	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
20	40	Нормализация, закалка, отпуск	HRC 50
21	45	Нормализация, закалка, отпуск	HRC 50
22	18ХНВА	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
23	40Х	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
24	45Г2	Нормализация, закалка, отпуск	HRC 50
25	40ХМ	Нормализация, закалка, отпуск	HRC 50
26	25	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
27	40ХМ	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
28	45	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ



Шатунный болт

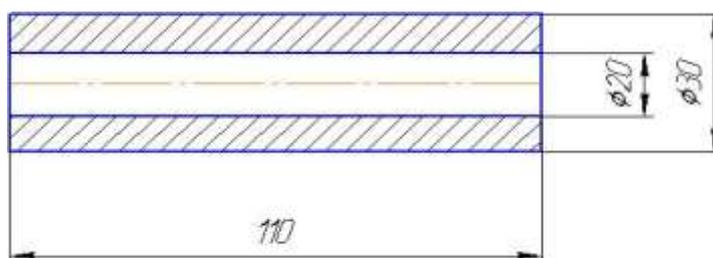
1	2	3	4
29	25	Нормализация, закалка, отпуск	229-185НВ
30	30ХН3	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ

1	2	3	4
31	37ХНЗ	Нормализация, закалка, высокий отпуск	285-229НВ
32	40	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-185НВ
33	40Х	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-185НВ
34	33ХС	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
35	35ХГС	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
36	27СГ	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
37	35СГ	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ
38	18ХНВА	Нормализация, закалка, высокий отпуск	229-285НВ



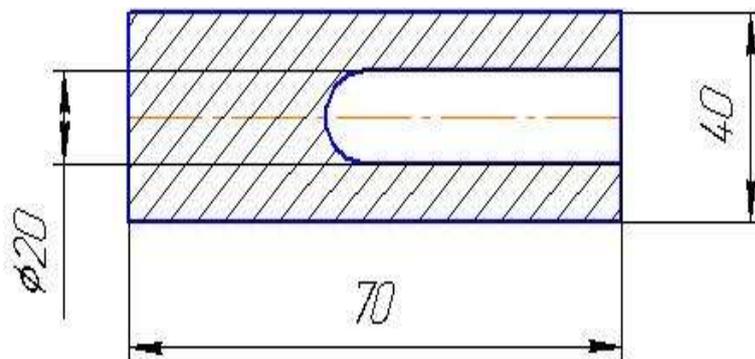
Шестерня

1	2	3	4
39	40	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ
40	40	Поверхностная закалка, отпуск	HRC 50
41	45	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ
42	45	Поверхностная закалка, отпуск	HRC 50
43	50	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ
44	50	Поверхностная закалка, высокий отпуск	HRC 50
45	45Г2	Закалка, высокий отпуск	229-185НВ
46	45Г2	Поверхностная закалка, отпуск	HRC 50
47	30	Закалка, высокий отпуск	229-185НВ
48	30ХС	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ
49	35	Закалка, высокий отпуск	229-185НВ



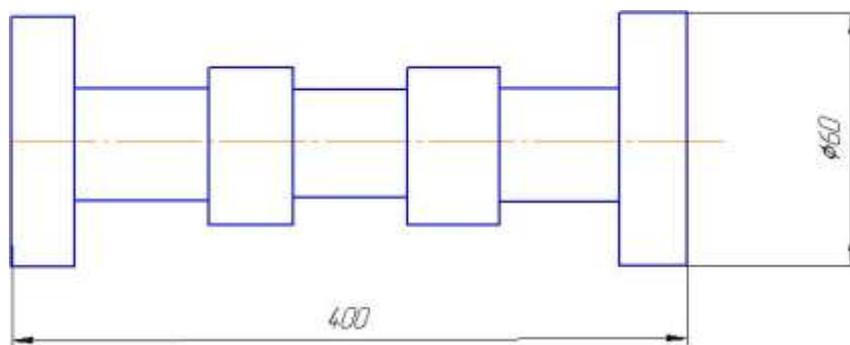
Поршневой палец

1	2	3	4
50	15X	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 53
51	20X	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 53
52	12ХН2	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56
53	12ХН3	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56
54	18ХНВ А	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56



Толкатель

1	2	3	4
55	15X	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 53
56	20X	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 53
57	12ХН2	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56
58	12ХН3	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56
59	18ХНВ А	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56



Распределительный вал

1	2	3	4
60	15X	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 53
61	20X	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 53

1	2	3	4
62	12ХН2	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56
63	12ХН3	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56
64	18ХНВА	Цементация, нормализация, низкий отпуск	HRC 56



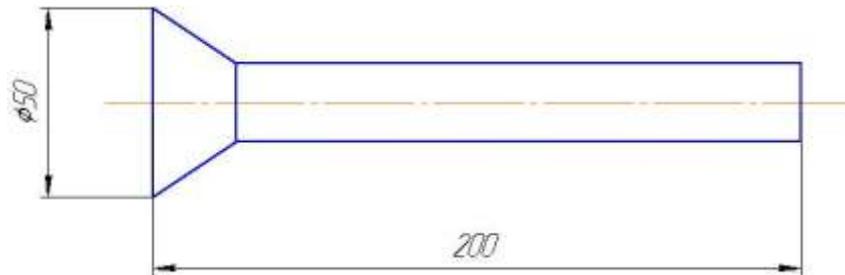
Цилиндр

1	2	3	4
65	35НЮА	Предварительное улучшение, нитрирование	Поверхность 750-1000НВ Сердцевина 285-289НВ
66	35ХМЮА	Предварительное улучшение, нитрирование	Поверхность 750-1000НВ Сердцевина 285-289НВ
67	40ХЮА	Предварительное улучшение, нитрирование	Поверхность 750-1000НВ Сердцевина 285-289НВ



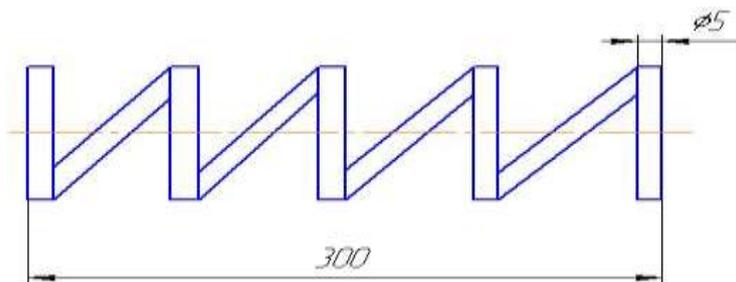
Выпускной клапан

1	2	3	4
68	X9C2	Закалка, высокий отпуск	280НВ
69	2X18Н9	Закалка, высокий отпуск	160-200НВ



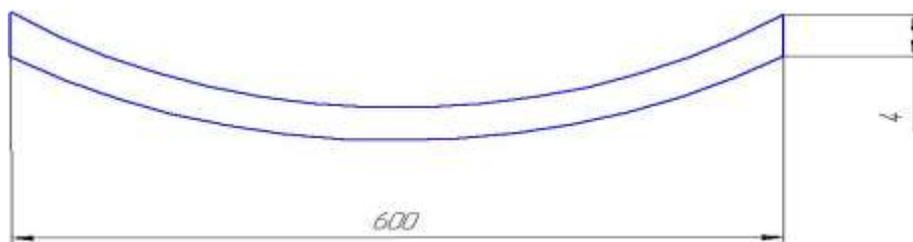
Впускной клапан

1	2	3	4
70	30	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ
71	40	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ
72	30ХНВ	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ
73	30ХВ	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ
74	33ХС	Закалка, высокий отпуск	285-229НВ



Пружины проволочные

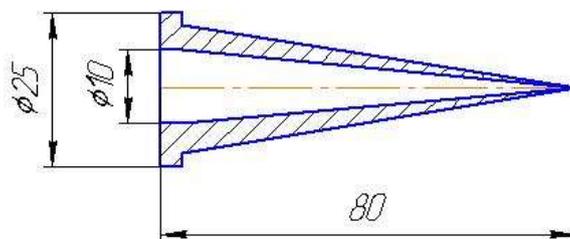
1	2	3	4
75	60Г	Закалка, отпуск	HRC > 40
76	60С2	Закалка, отпуск	HRC > 40
77	65Г	Закалка, отпуск	HRC > 40



Рессора

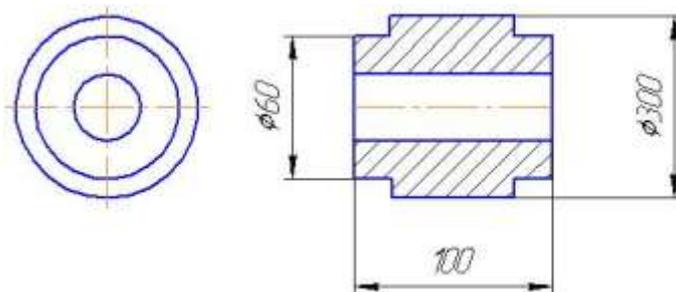
1	2	3	4
78	50С2	Изотермическая закалка, отпуск	HRC > 40
79	55С2	Изотермическая закалка, отпуск	HRC > 40

1	2	3	4
80	55ГС	Закалка, отпуск	HRC > 40
81	60СГ	Закалка, отпуск	HRC > 40
82	55СГ	Закалка, отпуск	HRC > 40
83	55ХГ	Закалка, отпуск	HRC > 40



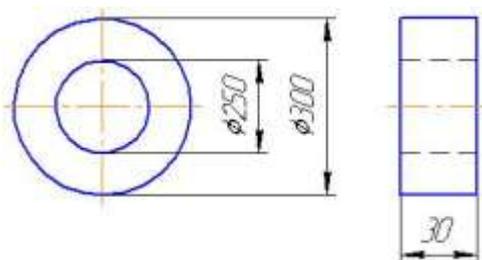
Корпус форсунки

1	2	3	4
84	50	Закалка, отпуск	174-229НВ
85	60	Закалка, отпуск	180-230НВ



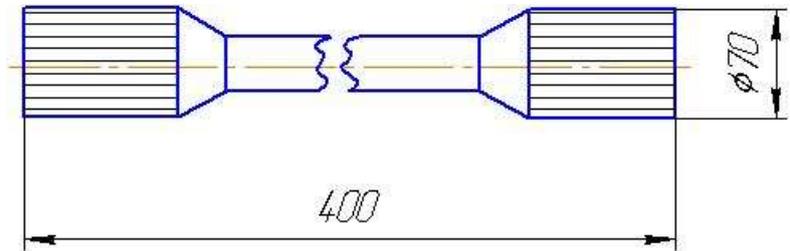
Колесо

1	2	3	4
86	40	Закалка, отпуск	HRC > 40
87	45	Закалка, отпуск	HRC > 45



Венец маховика

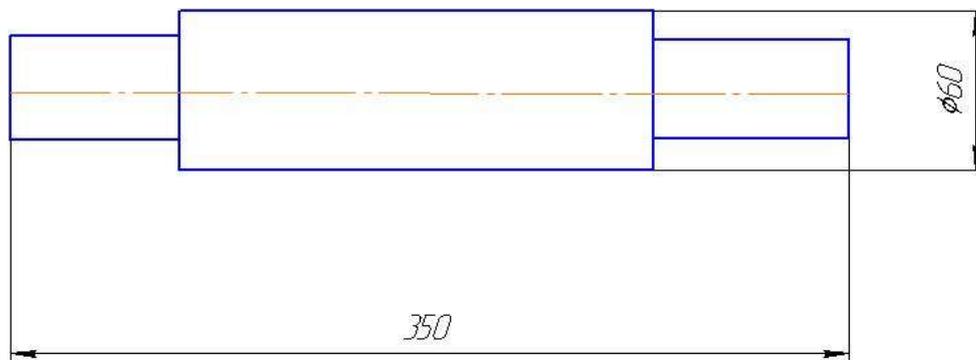
Продолжение табл. 25

1	2	3	4
88	50	Нормализация, закалка, отпуск	174-229НВ
89	55	Нормализация, закалка, отпуск	174-230НВ
 <p>Зуб бороны</p>			
1	2	3	4
90	60Г	Закалка, отпуск	40-46HRC
91	65Г	Закалка, отпуск	28-33HRC
92	70Г	Закалка, отпуск	42-48HRC
 <p>Лемех</p>			
1	2	3	4
93	60Г	Закалка, отпуск	40-46HRC
94	65Г	Закалка, отпуск	28-33HRC
95	70Г	Закалка, отпуск	42-48HRC
 <p>Полуось заднего моста трактора</p>			
1	2	3	4
96	38ХА	Закалка, отпуск	200-210НВ
97	40Х	Закалка, отпуск	188-220НВ
98	40ХРА	Закалка, отпуск	215-280НВ



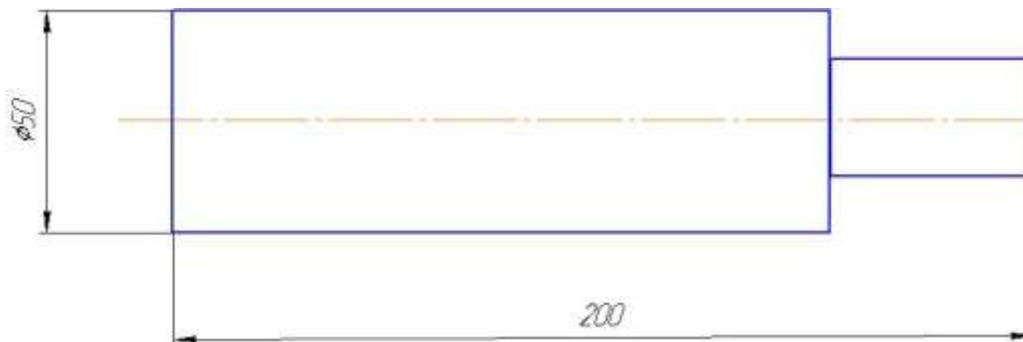
Вилка переключения передач

1	2	3	4
99	35Г2	Нормализация, закалка, отпуск	220-270НВ
100	40Г2	Нормализация, закалка, отпуск	229-269НВ



Вал КПП трактора

1	2	3	4
101	45Г2	Нормализация, закалка, отпуск	269-321НВ
102	50Г2	Нормализация, закалка, отпуск	241НВ
103	40ХГ	Закалка, отпуск	250НВ
104	40ХС	Закалка, отпуск	255НВ

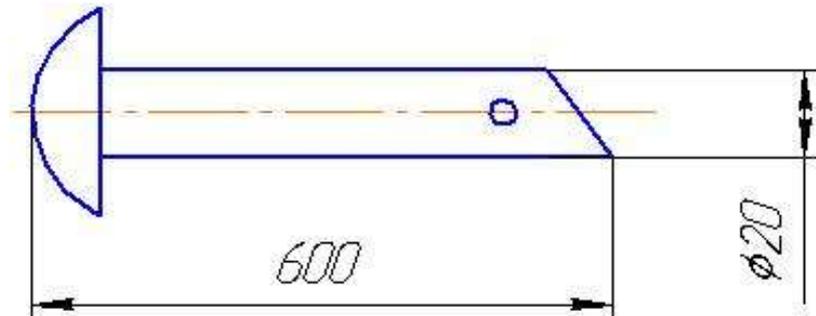


Вал муфты сцепления

1	2	3	4
105	33ХС	Нормализация, закалка, отпуск	220-260НВ

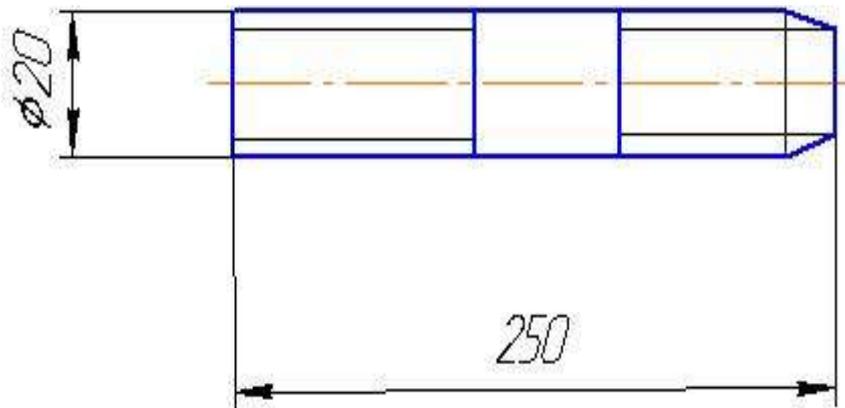
Продолжение табл. 25

1	2	3	4
106	38ХС	Закалка, отпуск	190-200НВ
107	40ХС	Закалка, отпуск	240-250НВ



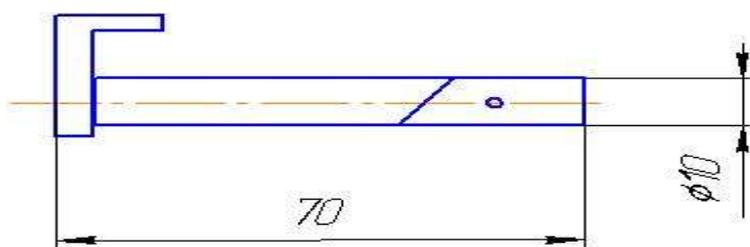
Палец гусеницы

1	2	3	4
108	27СГ	Закалка, отпуск	160-220НВ
109	35СГ	Нормализация, закалка, отпуск	180-200НВ
110	36ГС32	Закалка, отпуск	220-260НВ



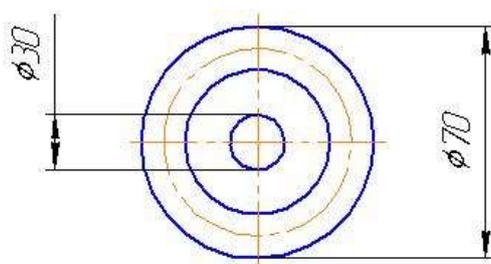
Шпилька

1	2	3	4
111	30ХМ	Закалка, отпуск	180-220НВ
112	30ХМА	Закалка, отпуск	180-220НВ
113	35ХМ	Закалка, отпуск	180-220НВ
114	34ХМА	Закалка, отпуск	180-220НВ



Плунжер топливного насоса

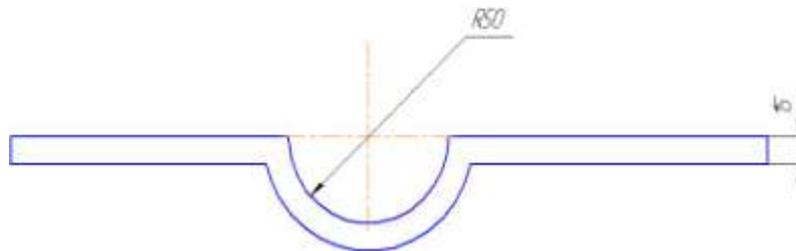
1	2	3	4
115	15ХФ	Цементация, закалка, отпуск	Поверхность HRC 56-62 Сердцевина 285-289НВ
116	20ХФ	Цементация, закалка, отпуск	Поверхность HRC 56-62 Сердцевина 285-289НВ
117	20ХЗФ	Цементация, закалка, отпуск	Поверхность HRC 56-62 Сердцевина 285-289НВ



Сателлит

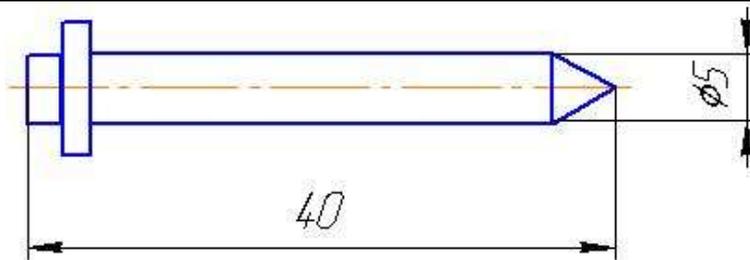
1	2	3	4
118	38ХГС	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
119	18ХГМ	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
120	14ХГ2НР	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
121	14ХГ2	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
122	15ХГНТ	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
123	15ХГНТА	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
124	15Х2ГН2Т	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
125	15ХНГ2ВА	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ

1	2	3	4
126	15X2Г2СВА	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
127	25ХГСНТ	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ
128	25Х2ГНТА	Нормализация, закалка, отпуск	200-230НВ



Крышка шатуна

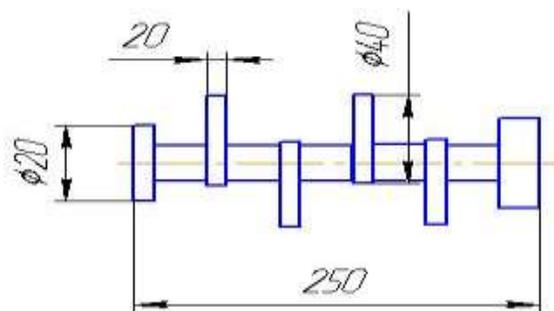
1	2	3	4
129	20ХНМ	Закалка, отпуск	187-220НВ
130	18Х2Н4В	Закалка, отпуск	187-220НВ
131	25Х2Н4ВА	Закалка, отпуск	180-220НВ
132	20ХН4ФА	Закалка, отпуск	180-220НВ
133	34ХН1М	Закалка, отпуск	180-220НВ
134	34ХН3М	Закалка, отпуск	200-240НВ
135	40ХНВА	Закалка, отпуск	200-240НВ
136	38ХНВА	Закалка, отпуск	200-240НВ
137	38Х2НВА	Закалка, отпуск	200-240НВ
138	38ХН3ВА	Закалка, отпуск	200-260НВ



Игла форсунки

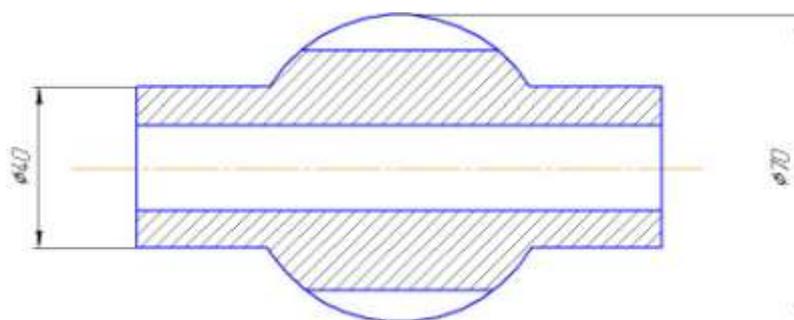
1	2	3	4
139	38ХЮ	Цементация, закалка, отпуск	Поверхность HRC 56-6 Сердцевина 240НВ
140	38ХМЮА	Цементация, закалка, отпуск	Поверхность HRC 56-6 Сердцевина 240НВ

1	2	3	4
141	38ХВФЮ	Цементация, закалка, отпуск	Поверхность HRC 56-6 Сердцевина 240НВ
142	38ХВФЮА	Цементация, закалка, отпуск	Поверхность HRC 56-6 Сердцевина 240НВ



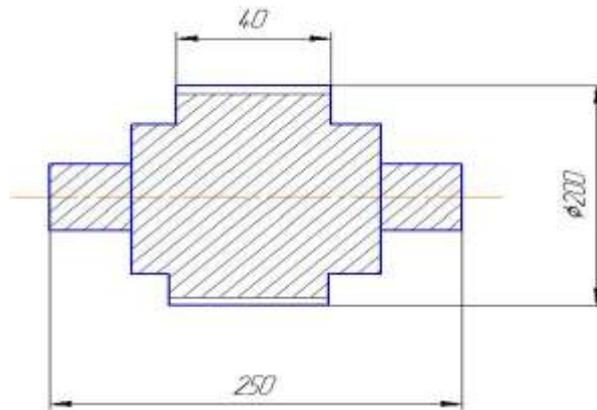
Валик топливного насоса

1	2	3	4
143	30ХМ	Закалка, отпуск	190-230НВ
144	30ХМА	Закалка, отпуск	190-230НВ
145	35ХМ	Закалка, отпуск	190-230НВ
146	34ХМ1А	Закалка, отпуск	190-230НВ



Звездочка

1	2	3	4
147	35ХГ2	Закалка, отпуск	200-240НВ
148	40ХГ	Закалка, отпуск	200-240НВ
149	40ХГР	Закалка, отпуск	200-240НВ
150	40ХГТР	Закалка, отпуск	200-240НВ



Вал-шестерня

1	2	3	4
151	40ХН	Закалка, отпуск	286-310НВ
152	45ХН	Закалка, отпуск	286-310НВ
153	30ХН3А	Закалка, отпуск	286-310НВ
154	30ХНР	Закалка, отпуск	286-310НВ
155	40ХНР	Закалка, отпуск	286-310НВ

Химический состав и механические свойства (не менее)  
углеродистой качественной конструкционной стали

Сталь	C, %	$\sigma_{\epsilon}$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$
		МПа		%	
08	0,05–0,12	330	200	33	60
10кп	0,07–0,14	320	190	33	55
10	0,07–0,14	340	210	31	55
15	0,12–0,19	380	230	27	55
20	0,17–0,24	420	250	25	55
25	0,22–0,30	460	280	23	50
30	0,27–0,35	500	300	21	50
35	0,32–0,40	540	320	20	45
40	0,37–0,45	580	340	19	45
45	0,42–0,50	610	360	16	40
50	0,47–0,55	640	380	14	40
55	0,52–0,60	650	390	13	35
60	0,57...0,65	690	410	12	35
65	0,62–0,70	710	420	10	30
70	0,67–0,75	730	430	9	30

Примечания:

1. Содержание марганца в сталях 08, 10, 15, 20 составляет 0,35–0,65 %, а в остальных 0,5–0,8 %. Содержание других элементов: 0,17–0,37 % Si (в кипящей стали  $\approx 0,7$  %),  $\leq 0,04$  % S (0,035 % в сталях 08 и 10) и  $\leq 0,04$  % P.
2. Нормы механических свойств относятся к изделиям диаметром или толщиной до 80 мм после нормализации.

Химический состав, термическая обработка (ТО) и механические свойства  
некоторых цементуемых сталей

Сталь	Содержание элементов, %					Режим ТО		$\sigma_{\epsilon}$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$
	С	Mn	Cr	Ni	другие	$t_{\text{зак}}, ^\circ\text{C}$ , среда	$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$ , среда	МПа		%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Хромистая сталь</i>											
20Х	0,17–0,23	0,5–0,8	0,7–0,9	–	–	1. 880, в., м. 2. 770–820, в., м.	180, воз., м.	800	650	11	40
<i>Хромомарганцевые стали</i>											
18ХГТ	0,17–0,23	0,8–1,1	1,0–1,3	–	0,03–0,09 Ti	1. 880–950, воз. 2. 870, м	200, воз., м.	1000	900	9	50
20ХГР	0,18–0,24	0,7–1,0	0,75– 1,05	–	–	880, м.	200, воз., м.	1000	800	9	50
25ХГМ	0,23–0,29	0,9–1,2	0,9–1,2	–	0,2–0,3 Mo	860, м.	200, воз.	1200	1100	10	45
30ХГТ	0,24–0,32	0,8–1,1	1,0–1,3	–	0,03...0,09 Ti	1. 880...950, воз. 2. 850, м.	200, м.	1500	1300	9	40
<i>Хромоникелевые стали</i>											
12ХН3А	0,9–0,16	0,3–0,6	0,6–0,9	2,75– 3,15	–	1. 860, м. 2. 790, м.	180, воз., м.	950	700	11	55

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12X2H4A 20X2H4A	0,1–0,15 (0,16– 0,22)	0,3–0,6	1,25– 1,65	3,25– 3,65	–	1. 860, м. 2. 760–800, м.	180, воз., м.	1150 1300	950 1100	50 45	0,9 0,8
<i>Хромомарганцевоникелевые стали</i>											
15XГН2ТА	0,13–0,18	0,7–1,0	0,7–1,0	1,4– 1,8	0,03– 0,09 Ti	1. 960, воз. 2. 840, м.	180, воз., м.	950	750	11	55
<i>Хромоникельмолибденовые стали</i>											
18X2H4МА	0,14–0,2	0,25–0,55	1,35– 1,65	4,0– 4,4	0,3– 0,4 Мо	1. 950, воз. 2. 860, воз.	200, воз., м.	1150	850	12	50
18X2H4ВА	0,14–0,2	0,25–0,55	1,35– 1,65	4,0– 4,4	0,8– 1,2 W	1. 950, воз. 2. 860, воз.	200, воз., м.	1050	800	12	50

Примечание: 1 – первая закалка; 2 – вторая закалка; в. – вода; м. – масло; воз. – воздух.

Химический состав, термическая обработка (ТО) и механические свойства  
некоторых улучшаемых сталей

Сталь	Содержание элементов, %					Режим ТО		$\sigma_s$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$
	С	Mn	Cr	Ni	другие	$t_{\text{зак}}, ^\circ\text{C}$ , среда	$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$ , среда	МПа		%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>Стали, прокаливающиеся в сечениях до 25–35 мм</i>											
30X	0,24–0,32	0,5–0,8	0,8–1,1	–	–	860, м.	500, в., м.	900	700	12	45
40X	0,36–0,44	0,5–0,8	0,8–1,1	–	–	860, м.	500, в., м.	1000	800	10	45
40XФА	0,37–0,44	0,5–0,8	0,8–1,1	–	0,1–0,18 V	880, м.	650, в., м.	900	750	10	50
<i>Стали, прокаливающиеся в сечениях до 50–75 мм</i>											
40XГТР	0,38–0,45	0,7–1,0	0,8–1,1	–	0,03–0,9 Ti	840, м.	550, в., м.	1000	800	11	45
30XГС	0,28–0,35	0,8–1,1	0,8–1,1	–	0,9–1,2 Si	880, м.	540, в., м.	1100	850	10	45
40XH	0,36–0,44	0,5–0,8	0,5–0,8	1,0–1,4	–	820, м.	550, в., м.	1000	800	11	45
<i>Стали, прокаливающиеся в сечениях до 75–100 мм</i>											
30XH3A	0,27–0,33	0,3–0,6	0,6–0,8	2,8–3,1	–	720, м.	530, в., м.	1000	800	10	50
40XH2MA	0,37–0,44	0,5–0,8	0,6–0,9	1,3–1,7	0,2–0,3 Mo	850, м.	620, воз.	1100	950	12	50
<i>Стали, прокаливающиеся в сечениях более 100 мм</i>											
36X2H2MФА	0,33–0,4	0,25–0,5	1,3–1,7	1,3–1,7	0,2–0,3 Mo 0,1–0,2 V	850, м.	600, воз.	1200	1100	12	50
38XH3MФА	0,33–0,4	0,25–0,5	1,2–1,5	3,0–3,5	0,4–0,5 Mo 0,1–0,2 V	850, м.	600, воз.	1200	1100	12	50

Примечание: в. – вода, м. – масло, воз. – воздух.

## Состав пружинных сталей, %

Сталь	C	Mn	Si	Cr	V
65Г	0,62–0,70	0,80–1,20	0,17–0,37	–	–
50С2	0,47–0,55	0,60–0,90	1,50–2,00	–	–
55С2	0,52–0,60	0,60–0,90	1,50–2,00	–	–
60С2	0,57–0,65	0,60–0,90	1,50–2,00	–	–
70С3А	0,66–0,74	0,60–0,90	2,40–2,80	–	–
55СГ	0,50–0,60	0,80–1,00	1,30–1,80	–	–
60СГ	0,55–0,65	0,80–1,00	1,30–1,80	–	–
50ХФА	0,46–0,54	0,50–0,80	0,17–0,37	0,80–1,10	0,10–0,20
50ХГФА	0,48–0,55	0,80–1,00	0,17–0,37	0,95–1,20	0,15–0,25
60С2ХА	0,56–0,64	0,40–0,70	1,40–1,80	0,70–1,00	–

Примечание: не указано ограничение содержания вредных и случайных примесей, которое не должно превосходить следующих значений: S < 0,03–0,04 %; P < 0,03–0,04 %; Ni < 0,3–0,4 %; Cr < 0,3 %.

Таблица 30

## Режимы термической обработки и механические свойства пружинных сталей

Сталь	Температура, °С		Механические свойства стали (не менее)			
	закалки	отпуска	$\sigma_s$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$
			МПа		%	
65	840	480	800	1100	10	35
85	820	480	1000	1150	8	30
50С2	870	460	1100	1200	6	30
55С2А	870	460	1400	1600	6	20
70С3А	860	460	1600	1800	6	25
60С2ХФА	850	410	1700	1900	5	20
60С2ВА	850	420	1700	1900	5	20
60С2Н2А	880	420	1600	1750	6	20

## Состав коррозионно стойких сталей, %

Сталь	С	Mn	Cr	Ni	Ti (Nb)	Mo	Другие
08X13	< 0,08	0,60–0,80	12–14	–	–	–	–
12X13	0,09–0,15	0,60–0,80	12–14	–	–	–	–
20X13	0,16–0,25	0,60–0,80	12–14	–	–	–	–
30X13	0,26–0,35	0,60–0,80	12–14	–	–	–	–
40X13	0,36–0,45	0,60–0,80	12–14	–	–	–	–
12X17	≤ 0,12	0,60–0,80	16–18	–	–	–	–
08X17T	≤ 0,08	0,60–0,80	16–18	–	< 0,90	–	–
15X25T	≤ 0,15	0,60–0,80	24–27	–	< 0,90	–	–
15X28T	≤ 0,15	0,60–0,80	27–30	–	< 0,90	–	–
12X18H8	0,12	1,00–2,00	17–19	8–10	–	–	–
17X18H9	0,13–0,21	1,00–2,00	17–19	8–10	–	–	–
12X18H9T	0,12	1,00–2,00	17–19	8–9,5	< 0,8	–	–
04X18H10	0,04	1,00–2,00	17–19	9–11	–	–	–
08X18H10	0,08	1,00–2,00	17–19	9–11	–	–	–
12X18H10T	0,12	1,00–2,00	17–19	9–11	< 0,8	–	–
10X14Г14НТ	0,10	13–15	13–15	2,8–4,5	< 0,6	–	–
12X17Г9АН4	0,12	8–10,5	16–18	3,5–4,5	–	–	0,15–0,25 N
15X17АГ14	0,15	13,5–15,5	16–18	0,6	–	–	0,25–0,37 N
08X15Н8Ю	0,08	0,8	14–16	8,0–10,0	–	–	0,7–1,3 Al
09X17Н7Ю	0,09	0,8	16–17,5	7,0–8,0	–	–	0,5–0,8 Al
10X17Н13М2Т	0,10	1,0–2,0	16–18	12–14	< 0,8	2,0–3,0	–

Примечание: во всех сталях S < 0,025 % и P < 0,030 %.

## Режимы термической обработки и механические свойства хромистых коррозионно стойких сталей

Сталь	Термическая обработка (температура, °С)			HRC	$\sigma_{\epsilon}$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$
	закалка	отпуск	отжиг					
<i>Стали мартенситного класса</i>								
40X13	1000–1050, м.	200–300, в.	–	50	–	–	–	50
30X13	950–1020, м.	200–300, в.	–	40	–	–	–	48
20X13	1000–1050, в.	600–770, м.	–	–	660	450	16	55
<i>Стали мартенситно-ферритного класса</i>								
12X13	1000–1050, м.	700–790, м.	850–900, п.	–	600	420	20	60
<i>Стали ферритного класса</i>								
08X13	1000–1050, м.	700–800, м.	–	–	600	420	20	60
12X17	1000–1050, м.	700–800, м.	760–780, в.	–	400	250	20	50
08X17T	1000–1050, м.	700–800, м.	760–780, в.	–	500	300	20	45
15X25T	1000–1050, м.	700–800, м.	680–770, в.	–	450	300	20	45
15X28T	1000–1050, м.	700–800, м.	680–770, в.	–	450	300	20	45

Примечание: м. – масло, в. – воздух, п. – печь.

Таблица 33

## Механические свойства коррозионно стойких аустенитных сталей в закаленном состоянии

Сталь	$\sigma_{\delta}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Сталь	$\sigma_{\delta}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
04X18H10	440	180	40	60	10X14Г14Н3Т	590	245	35	50
08X18H10	470	195	40	55	12X17Г9АН4	640	300	35	50
12X18H10	490	195	40	55	15X17АГ14	785	400	30	45
17X18H9	570	210	40	50					

Таблица 34

## Режимы термической обработки и механические свойства коррозионно стойких сталей аустенито-мартенситного класса

Сталь	Режим термической обработки, температура, °С			$\sigma_{\delta}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
	закалка	обработка холодом	отпуск–старение				
08X15H8Ю	975	-70		880	245	30	65
08X15H8Ю	975	-70	500	1080	880	25	60
08X15H8Ю	975	-	-	1270	1080	20	50
09X17H7Ю	1050	-	750 + 550	900	700	10	40

Таблица 35

Состав инструментальных сталей пониженной прокаливаемости, %

Сталь	С	Mn	Cr	Сталь	С	Mn	Cr
У7	0,65–0,74	0,20–0,40	< 0,15	У13	1,25–1,35	0,15–0,35	< 0,15
У8	0,75–0,84	0,15–0,40	< 0,15	Х05	1,25–1,40	0,20–0,40	0,40–0,60
У9	0,85–0,94	0,15–0,35	< 0,15	Х06	1,05–1,14	0,40–0,70	0,40–0,60
У10	0,95–1,04	0,15–0,35	< 0,15	65ХФ	0,60–0,70	0,30–0,60	0,45–0,70
У11	1,05–1,14	0,15–0,35	< 0,15	85ХФ	0,80–0,90	0,30–0,60	0,45–0,70
У12	1,15–1,24	0,15–0,35	< 0,15				

Таблица 36

Состав инструментальных сталей повышенной прокаливаемости, %

Сталь	С	Mn	Si	Cr	W	V
Х	0,95–1,1	< 0,4	< 0,35	1,3–1,6	–	–
9ХС	0,85–0,95	0,03–0,6	1,2–1,6	0,95–1,25	–	–
ХГСВФ	0,95–1,02	0,7–1,0	0,7–1,0	0,6–1,0	0,8–1,1	0,08–0,15
ХГ	1,3–1,5	0,45–0,70	< 0,35	1,3–1,6	–	–
ХВГ	0,9–1,0	0,8–1,0	0,15–0,35	0,9–1,2	1,2–1,6	–
В1	1,05–1,25	0,2–0,4	< 0,35	0,1–0,3	0,8–1,2	–
ХВ5	1,25–1,50	< 0,3	< 0,30	0,4–0,7	4,5–5,5	0,15–0,30

## Режимы термической обработки инструментальных легированных сталей

Сталь	Отжиг		Закалка			Отпуск	
	температура, °С	твёрдость НВ	температура, °С	среда охлаждения	твёрдость HRC	температура, °С	твёрдость HRC
X	770–790	225–207	830–860	Масло	62	150–200	64–61
9XC	790–810	255–207	820–860	Масло	62	140–160 160–180	65–62 63–61
XГСВФ	790–810	228–196	820–850	Масло	62	160–180	63–61
XГ	780–800	241–197	800–830	Масло	61	150–200	64–61
XВГ	770–790	255–207	800–830	Масло	62	140–160 170–200	65–62 62–60
B1	780–800	229–187	800–850	Вода	62	150–200	64–62
XB5	730–750	321–255	800–820	Вода	65	100–120 120–160	66–64 65–64

Состав основных марок быстрорежущих сталей, %

Сталь	C	Cr	W	Mo	V	Co
P18	0,7–0,8	3,8–4,4	17,0–18,5	< 1,0	1,0–1,4	-
P12	0,8–0,9	3,1–3,6	12,0–13,0	< 1,0	1,5–1,9	-
P9	0,85–0,95	3,8–4,4	8,5–10,0	< 1,0	2,0–2,6	-
P6M5	0,82–0,90	3,8–4,4	5,5–6,5	5,0–5,5	1,7–2,1	-
P3M3Φ2	0,85–1,1	3,6–4,3	2,6–3,3	2,6–3,3	1,5–2,0	-
P3M3Φ3	1,0–1,15	3,8–4,6	2,2–2,9	2,3–2,9	2,2–2,8	-
P0M3Φ2	0,9–1,05	4,0–5,0	-	3,2–4,0	2,0–2,6	-
P0M2Φ3	1,1–1,25	3,8–4,6	-	2,3–2,9	2,6–3,3	-
P6M5K5	0,80–0,88	3,8–4,3	6,0–7,0	4,8–5,3	1,7–2,2	4,8–5,3
P6M5Φ2K8	0,95–1,05	3,8–4,4	5,5–6,6	4,6–5,2	1,8–2,4	7,5–8,5
P9M4K8	1,0–1,1	3,0–3,6	8,5–9,6	3,8–4,3	2,1–2,5	7,5–8,5

317

Таблица 39

Режимы термической обработки инструментов из быстрорежущей стали

Сталь	Закалка			Отпуск		
	температура, °C	твёрдость, HRC	количество аустенита, %	температура, °C	число отпусков	твёрдость, HRC
P18	1270–1290	62–64	25	560	3	63–65
P12	1240–1260	62–64	25	560	3	63–65
P9	1220–1240	62–64	30	560	3	63–65
P6M5	1210–1230	62–64	25	550	2-3	63–65
P0M2Φ3	1190–1220	62–63	30	560	2	63–65

## Пример выполнения задания

Разработать технологический процесс термической обработки сверла.

Марка стали: P18.

Операции термической и химико-термической обработки: отжиг, закалка, отпуск, цианирование.

Твердость после обработки: 1100 HV.



Рис. 79. Эскиз сверла

1. Сталь P18 относится к инструментальным быстрорежущим сталям.

Эти стали применяются для изготовления разнообразного режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания в тяжелых условиях разогрева режущей кромки до 600 °С. Быстрорежущие стали являются высоколегированными.

Химический состав стали P18 (ГОСТ 19265-73): C = 0,7–0,8 %; Cr = 3,8–4,4 %; W = 17,5–19 % и V = 1–1,4 %.

Сталь P18 принадлежит к ледебуритному классу легированных сталей. Микроструктура такой стали в литом состоянии состоит из темного сорбитообразного перлита, светлых карбидов и «скелетного» вида ледебуритной эвтектики.

Для разрушения неблагоприятной формы ледебуритной эвтектики и устранения хрупкости литую быстрорежущую сталь подвергают горячей обработке (прокатке, ковке).

Быстрорежущая сталь P18 сочетает главное свойство сталей – теплостойкость 600–620 °С (теплостойкость характеризуется температурой четырехкратного нагрева, до которой закаленная и отпущенная сталь сохраняет твердость не ниже 60 HRC) – с высокими износостойкостью при нагреве до 600–700 °С и сопротивлением пластической деформации (предел текучести при сжатии) 510 МПа при твердости 67–68 HRC. Предел прочности стали P18 послековки 840 МПа. Вязкость – 190 кДж/м<sup>2</sup>.

2. Легирующие примеси находятся в стали P18 растворенными в феррите (легированный феррит) и в виде карбидов. Основным является двойной карбид  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , в небольших количествах присутствует карбид типа  $\text{Fe}_2\text{W}_2\text{C}$  и карбид цементитного типа. Присутствие этих легирующих примесей оказывает влияние на положение критических точек  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ ,  $A_{cm}$  – происходит сужение области  $\gamma$ -железа и расширение области  $\alpha$ -железа, повышается температура критической точки  $A_{c1}$ . Указанные легирующие элементы ускоряют изотермический распад аустенита, сдвигаются влево С-образные кривые. Вольфрам и хром в форме карбидов значительно понижают температуру мартенситного превращения ( $M_n$ ) и увеличивают количество остаточного аустенита. Отсюда следует, что увеличивается критическая скорость закалки, а прокаливаемость уменьшается.

### Отжиг

С целью устранения внутренних напряжений, возникающих в процессековки, понижения твердости, улучшения обрабатываемости и подготовки структуры к закалке, быстрорежущую сталь послековки обычно подвергают отжигу. В нашем случае наиболее оптимален отжиг с непрерывным охлаждением.

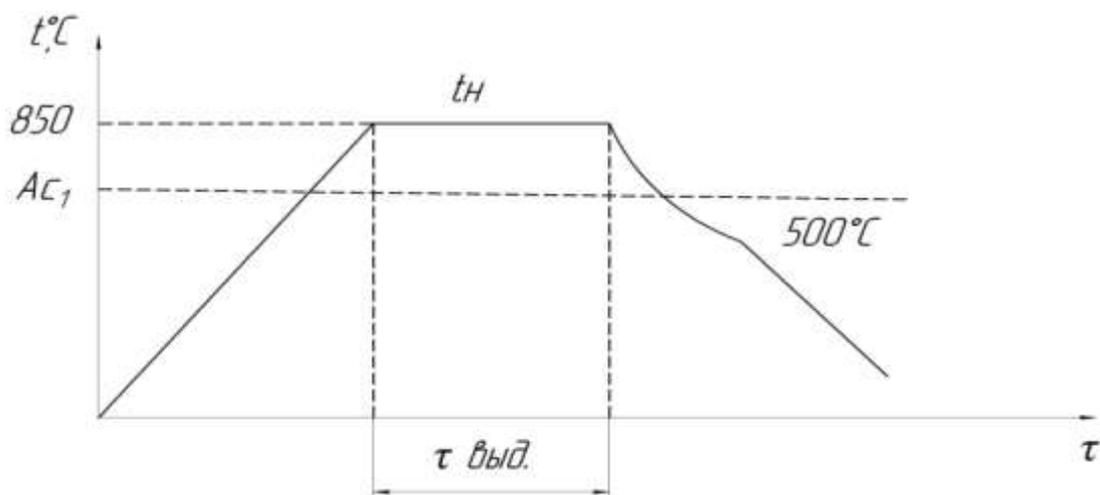


Рис. 80. Схема отжига стали P18

Температура нагрева  $t_H = 850^\circ\text{C}$ .

Время прогрева  $\tau_{\text{пр.}} = 10$  мин.

Время выдержки  $\tau_{\text{выд.}} = 2$  часа.

Скорость охлаждения  $V \leq 30$  град/час (охлаждение с печью до  $500^\circ\text{C}$ , далее – на воздухе).

После отжига структура стали состоит из темного цвета сорбитообразного перлита (феррит + мелкие эвтектоидные карбиды), светлых крупных первичных карбидов, выделившихся из жидкости при кристаллизации, мелких светлых вторичных карбидов, выделившихся из аустенита (см. лабораторную работу № 11).

### *Закалка*

Для закалки быстрорежущую сталь нагревают до высоких температур. Температура нагрева под закалку – 1280 °С.

Из-за низкой теплопроводности нагрев до 850 °С проводят медленно (10–15 мин), а затем до 1280 °С быстро во избежание окисления и обезуглероживания (рис. 81). Нагрев выполняют в смеси солей BaCl<sub>2</sub> (78 %) и NaCl (28 %) при 800–850 °С и далее в чистой соли BaCl<sub>2</sub>. Выдержка при окончательном нагреве ( $\tau_{\text{выд.}}$ ) = 10–12 с на 1 мм диаметра или наименьшей стороны

$$\tau_{\text{выд.}} = 10 \cdot 10 = 100 \text{ с.}$$

Охлаждение при закалке стали P18 следует проводить в масле. После закалки стали в масле получается структура, состоящая из мартенсита (50 %), остаточного аустенита (30 %) и карбидов (20 %). Но под микроскопом мартенсит не виден (см. лабораторную работу № 11).

После закалки сталь имеет твердость HRC 62–64.

### *Отпуск*

Для устранения остаточного аустенита, имеющего пониженную теплопроводность и твердость и ухудшающего тем самым режущую способность инструмента, закаленную сталь подвергают отпуску.

Для инструментов небольшого сочленения (сверл), нагреваемых в автоматизированных агрегатах с точной регулировкой температур, применяют трехкратный отпуск в течение 20 мин при 580–590 °С (рис. 81).

После отпуска структура стали состоит из игольчатого мартенсита и светлых карбидов (см. лабораторную работу № 11). Количество остаточного аустенита уменьшается до 2 %, а твердость повышается до HRC 65.

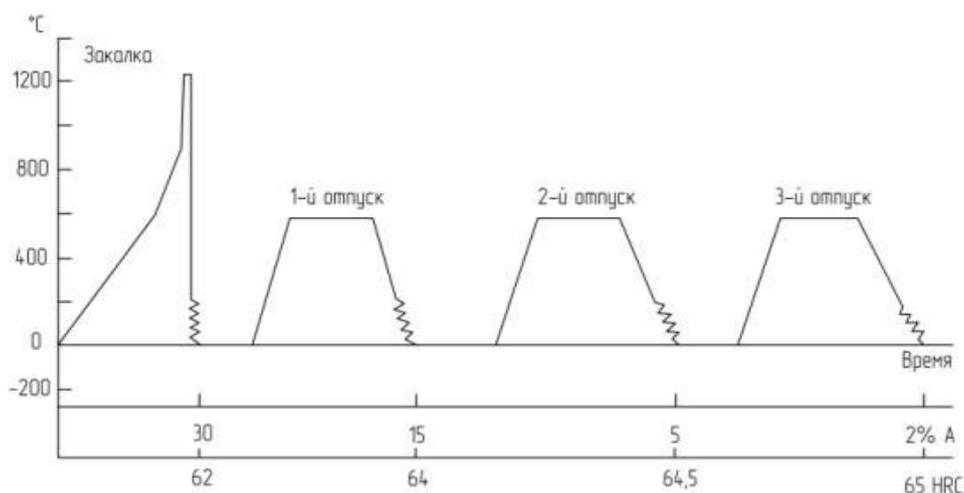


Рис. 81. Схема закалки и отпуска быстрорежущей стали марки P18

### Цианирование

Качество инструмента в значительной мере определяется свойствами поверхностного слоя, которые в процессе термической обработки или в результате шлифования могут существенно снижаться.

Наиболее эффективно свойства поверхностного слоя могут быть повышены в результате химико-термической обработки, поскольку в результате её возрастают твердость, теплостойкость, стойкость против коррозии. Сталь P18 подвергают жидкому низкотемпературному цианированию. Эта работа заключается в насыщении поверхностного слоя углеродом и азотом в расплаве солей NaCN (KCN) в течение 15–30 мин, при 560–580 °С. Твердость слоя после азотирования HV 1000–1100.

Сводный график термической и химико-термической обработки сверла представлен на рисунке 82.

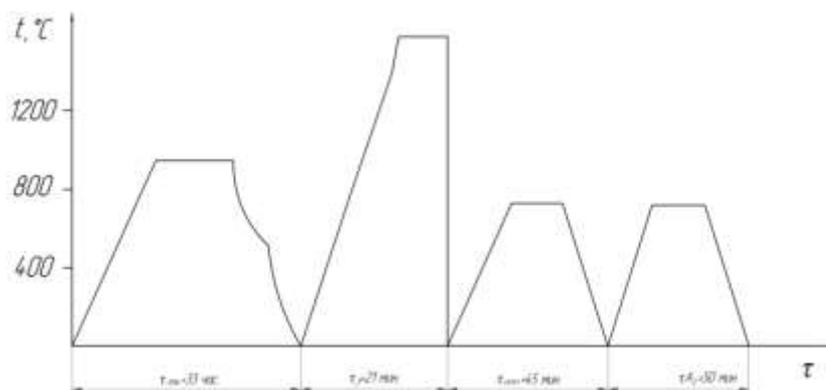


Рис. 82. Сводный график термической и химико-термической обработки сверла

Результаты расчетов технологического процесса термической и химико-термической обработки сверла сведены в таблице 40.

## Технологическая карта термической обработки сверла

Эскиз детали		Красноярский ГАУ		Кафедра «Общеинженерные дисциплины»					
		Наименование детали: сверло							
		Материал: сталь P18							
		Габариты детали: $l = 60$ мм, $d = 10$ мм							
		Технические условия: высокая поверхностная твердость не менее 1000 HV, высокая теплостойкость 600–620 °С							
		Режим нагрева и охлаждения				Твердость HRC (HB)			
Номер операции	Наименование операции	°С	Нагревательная печь	Время нагрева и выдержки, мин	Охлаждающая среда				
1	Отжиг	850	Конвейерная печь	130	С печью до 500 °С, далее – воздух	(207–255)			
2	Закалка	1280	Соляная печь	19	Масло	60–62			
3	Отпуск	590	Конвейерная печь	20	Воздух	65			
4	Цианирование	560–580	Соляная печь	15–30	Соли NaCN (KCN)	HV 1000–1100			
Составил студент:		Группа		Дата		Работу принял:		Дата	
Иванов И.И.		И-31.1-17		15. 05. 18		Романченко Н.М.		20. 05. 18	

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью изучения предлагаемого учебного пособия является приобретение и усвоение студентами, обучающимися по направлениям 05.03.06 «Агроинженерия», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» (институтов инженерных систем и энергетики, пищевых производств), знаний о свойствах и строении, классификации и маркировке основных конструкционных материалов, применяемых в сельскохозяйственном и пищевом машиностроении, на объектах электроэнергетики АПК.

Учебное пособие обобщает результаты многолетней методической работы сотрудников кафедры общепрофессиональных дисциплин Красноярского государственного аграрного университета.

В работе сконцентрирован обширный материал различных источников, который систематизирован и акцентирован для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования вышеуказанных направлений.

При написании пособия использованы сведения из проведенного автором литературного обзора по металлургическому производству в Красноярском крае, результаты исследований надежности зерноуборочных комбайнов (коллекция изломов и изношенных деталей, микрошлифы образцов, наплавленных порошковой проволокой, фотографии микроструктур конструкционных материалов и др.).

Учебное пособие содержит методические указания по выполнению двенадцати лабораторных работ по разделу «Материаловедение» дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». Проведению работ предшествует изучение теоретических сведений, кратко представленных по каждой теме.

В пособии обсуждаются вопросы, требующие закрепления полученных знаний при прохождении студентами последующей учебной практики по получению первичных профессиональных умений и навыков и производственной технологической практики. Каждая глава содержит необходимые контрольные тесты для самопроверки знаний.

Использование студентами материалов, изложенных в пособии, позволит им не только овладеть общими и профессиональными компетенциями, но и целенаправленно подготовиться к успешной сдаче экзамена по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов, В.Ф. Практикум по материаловедению и технологии конструкционных материалов / В.Ф. Беспалов, Н.М. Романченко. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2014. – 321 с.
2. Гуляев, А.П. Металловедение: учеб. для вузов / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
3. Жуков, А.П. Основы металловедения и теории коррозии: учебник / А.П. Жуков, А.И. Малахов. – М.: Высш. шк., 1991. – 168 с.
4. Журавлева, Л.В. Электроматериаловедение: учебник / Л.В. Журавлева. – М.: Академия, 2000. – 312 с.
5. Колесов, С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высш. шк., 2007. – 533 с.
6. Кондратьев, Е.Т. Технология конструкционных материалов и материаловедение: учеб. для вузов / Е.Т. Кондратьев. – М.: Колос, 1992. – 320 с.
7. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учеб. для вузов / Ю.М. Лахтин. – М.: Машиностроение, 1993. – 448 с.
8. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосников, С.А. Вяткин [и др.]; под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
9. Материаловедение и технология металлов: учеб. для вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин [и др.]; под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высш. шк., 2006. – 638 с.
10. Материаловедение: учеб. для вузов / Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов [и др.]; под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Изд-во МГТУ, 2003. – 648 с.
11. Мозберг, Р.К. Материаловедение: учеб. пособие для вузов / Р.К. Мозберг. – М.: Высш. шк., 1991. – 448 с.
12. Почекутов, С.И. Методические основы педагогического тестирования: учеб. пособие / С.И. Почекутов, Е.Е. Савченко. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – 60 с.
13. Практикум по технологии конструкционных материалов и материаловедению: учеб. пособие для вузов / С.С. Некрасов, А.М. Пономаренко, Г.К. Потапов [и др.]; под ред. С.С. Некрасова. – М.: Колос, 1983. – 236 с.

14. Романченко, Н.М. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии: учеб. пособие / Н.М. Романченко. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2016. – 187 с.

15. Романченко, Н.М. Материалы и технологии в машиностроении: учеб. пособие / Н.М. Романченко; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2018. – 364 с.

16. Чередниченко, В.С. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учеб. пособие / В.С. Чередниченко. – 5-е изд., стереотип. – М.: Омега-Л, 2009. – 752 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Глава I. Основы строения и свойств материалов. Фазовые пре- вращения .....	5
Тема 1. Кристаллическое строение металлов. Кристаллиза- ция .....	5
1.1. Классификация металлов .....	5
1.2. Кристаллическое строение металлов .....	6
1.3. Анизотропия свойств кристаллов .....	11
1.4. Методы изучения строения металлов .....	12
1.5. Кристаллизация металлов .....	13
1.6. Превращения в твердом состоянии. Аллотропия .....	18
Тема 2. Свойства металлов и сплавов. Наклеп и рекристаллиза- ция .....	20
2.1. Свойства металлов и сплавов .....	20
2.2. Пластическая деформация .....	23
2.3. Наклеп и рекристаллизация .....	27
Тема 3. Теория сплавов .....	29
3.1. Составляющие структуры сплавов .....	29
3.2. Правило фаз .....	31
3.3. Диаграммы состояния двойных сплавов .....	33
Лабораторная работа № 1. Определение твердости металлов и сплавов методом Бринелля .....	42
Лабораторная работа № 2. Определение твердости металлов и сплавов методом Роквелла .....	51
Лабораторная работа № 3. Макроскопический анализ металлов и сплавов .....	59
Лабораторная работа № 4. Микроскопический анализ металлов и сплавов .....	63
Лабораторная работа № 5. Построение диаграммы состояния сплавов Pb-Sb по кривым охлаждения .....	72
Тестовые задания к главе I .....	77
Глава II. Сплавы на основе железа .....	90
Тема 4. Диаграмма состояния сплавов системы <i>железо – углерод</i> .....	90
Тема 5. Углеродистые стали .....	95
5.1. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали .....	95

5.2. Классификация углеродистых сталей.....	96
5.3. Углеродистые стали обыкновенного качества .....	98
5.4. Углеродистые качественные стали .....	99
5.5. Обрабатываемость резанием. Автоматные стали.....	100
Тема 6. Чугуны .....	102
6.1. Белые чугуны.....	103
6.2. Серые чугуны .....	104
6.3. Высокопрочные чугуны .....	107
6.4. Ковкие чугуны.....	107
6.5. Специальные чугуны .....	109
Лабораторная работа № 6. Анализ диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов.....	111
Лабораторная работа № 7. Изучение микроструктуры и свойств углеродистых сталей в равновесном состоянии .....	118
Лабораторная работа № 8. Изучение микроструктуры и свойств чугунов .....	122
Тестовые задания к главе II.....	129
Глава III. Основы термической и химико-термической обработки ...	142
Тема 7. Теория и технология термической обработки стали ...	142
7.1. Превращения переохлажденного аустенита .....	142
7.2. Изотермические превращения аустенита.....	144
7.3. Термическая обработка стали.....	145
7.4. Отжиг и нормализация .....	146
7.5. Закалка.....	148
7.6. Отпуск .....	151
Тема 8. Химико-термическая обработка .....	154
8.1. Цементация стали.....	154
8.2. Азотирование стали .....	155
8.3. Цианирование стали .....	156
8.4. Диффузионная металлизация .....	157
Лабораторная работа № 9. Термическая обработка углеродистых сталей.....	159
Лабораторная работа № 10. Отпуск закаленной стали .....	167
Тестовые задания к главе III .....	173
Глава IV. Машиностроительные материалы.....	183
Тема 9. Легированные стали и сплавы.....	183
9.1. Классификация и маркировка легированных сталей .....	185

9.2. Конструкционные стали .....	186
9.3. Инструментальные и штамповочные стали и сплавы ..	190
9.4. Стали с особыми свойствами.....	195
9.5. Применение железоуглеродистых и легированных сталей и сплавов в сельскохозяйственном машиностроении .....	201
Тема 10. Цветные металлы и сплавы .....	209
10.1. Алюминий и его сплавы.....	209
10.2. Медь и ее сплавы.....	214
10.3. Титан и его сплавы.....	218
10.4. Антифрикционные сплавы.....	219
Тема 11. Электротехнические, неметаллические и композиционные материалы.....	221
11.1. Электротехнические материалы.....	221
11.2. Пластические массы .....	228
11.3. Резина .....	245
11.4. Стекло.....	247
11.5. Композиционные материалы .....	250
11.6. Вспомогательные материалы.....	253
Лабораторная работа № 11. Изучение микроструктуры и свойств легированных сталей .....	259
Лабораторная работа № 12. Изучение микроструктуры и свойств цветных металлов и сплавов .....	267
Тестовые задания к главе IV .....	274
Индивидуальное расчетное задание «Разработка технологического процесса термической обработки детали.....	288
Заключение.....	323
Список литературы .....	324

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**  
**ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Часть I. Материаловедение**

*Учебное пособие*

**Романченко Наталья Митрофановна**

*Электронное издание*

Редактор Т.М. Мاستрич

Подписано в свет 30.09.2019. Регистрационный номер 229  
Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета  
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117  
e-mail: rio@kgau.ru