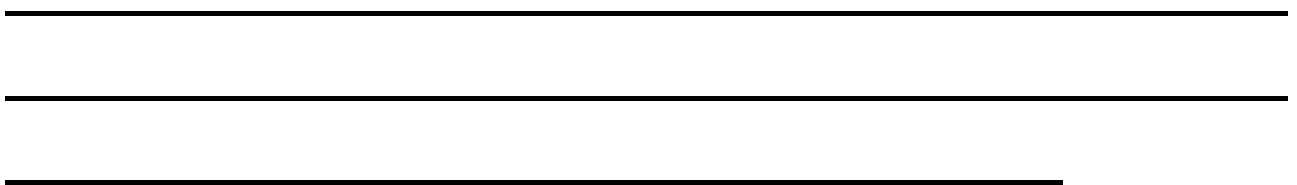


МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ и  
ТЕХНОЛОГИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

Практикум  
по лабораторным работам



## Введение

Назначение настоящего практикума – обеспечить наиболее полное и последовательное изучение студентами практических вопросов дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Практикум содержит 6 лабораторных работ. Ряд работ посвящено изучению механических свойств, диаграмм состояния, термической, и другой обработке материалов.

Выполнение лабораторных работ предусмотрено рабочими программами обучения студентов по разделам дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

Лабораторные работы включают определения, термины, подготовительные рисунки и схемы, необходимые студентам для дальнейшего построения графиков, диаграмм, заполнения таблиц наблюдения.

На занятиях по лабораторным работам студенты, руководствуясь практикумом, изучают основные определения и термины, проводят в соответствии с заданиями практическую часть работы, заполняют необходимые таблицы, строят графики и делают выводы. Некоторые лабораторные работы содержат элементы научных исследований.

Лабораторные работы выполняются в учебной лаборатории Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, в которой располагаются аудитории с необходимым оборудованием.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

## Изучение прочностных характеристик материалов

### Цель работы

1. Изучить основные механические свойства конструкционных материалов и критерии (характеристики) их оценки.
2. Изучить методику определения каждого критерия механических свойств.
3. Ознакомиться с машинами для испытаний материалов: разрывной машиной, маятниковым копром.

### 1. Изучение основных определений и терминов

К механическим свойствам относят показатели, характеризующие поведение материала деталей под действием приложенных к нему внешних механических нагрузок. Основными механическими свойствами материалов являются: **прочность, упругость, пластичность, вязкость, твёрдость.**

**Прочность** – свойство материала сопротивляться разрушению под действием внешних нагрузок.

**Упругость** – свойство материала восстанавливать первоначальные размеры и форму после прекращения действия внешних нагрузок.

**Пластичность** – свойство материала необратимо деформироваться под действием внешних нагрузок.

**Вязкость** – свойство материала поглощать механическую энергию (работу) под действием внешних ударных нагрузок изгиба.

**Напряжение** – мера внутренних сил сопротивления, возникающих в материале под действием внешних или внутренних факторов (нагрузок, нагрева, давления и т.д.). Обозначается буквой  $\sigma$  (сигма). Количественно оценивается отношением  $P/F$ , где  $P$  – сила нагружения,  $F$  – площадь поперечного сечения материала, на которую распространяется действие силы  $P$ .

**Деформация** – процесс изменения формы и размеров материала при сохранении его объёма под действием внешних сил. Бывает двух видов: упругой, исчезающей после снятия нагрузки, и пластической, остающейся после прекращения действия нагрузки. Простейшими видами деформации являются растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и изгиб.

**Статические испытания** – методы испытания материалов, при которых прилагаемая к испытываемому образцу нагрузка возрастает медленно и плавно вплоть до разрушения. Испытания могут быть на: растяжение, сжатие, изгиб, кручение и др.

**Динамические испытания** – методы испытания материалов, при которых нагрузка прилагается к образцу быстро, ударом.

### 2. Изучение критериев оценки механических свойств и методов их определения

Для каждого механического свойства есть базовые критерии (характеристики) оценки, которые включают в паспорта приёмных испытаний, ГОСТы, документы на поставку материалов, используют для расчёта на прочность, упругость и т.д.

## 2.1. Критерии прочности при растяжении

Предел прочности или временное сопротивление разрыву ( $\sigma_B$ ) – это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $P_B$  (рис. 1) и предшествующее разрушению образца (рис. 2)

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}, \text{ МПа.}$$

Величину нагрузки  $P_B$  определяют по диаграмме растяжения, которую получают в результате испытаний стандартных образцов на разрывной машине. Для определения площади  $F_0$  измеряют диаметр образца  $d_0$  до испытаний.

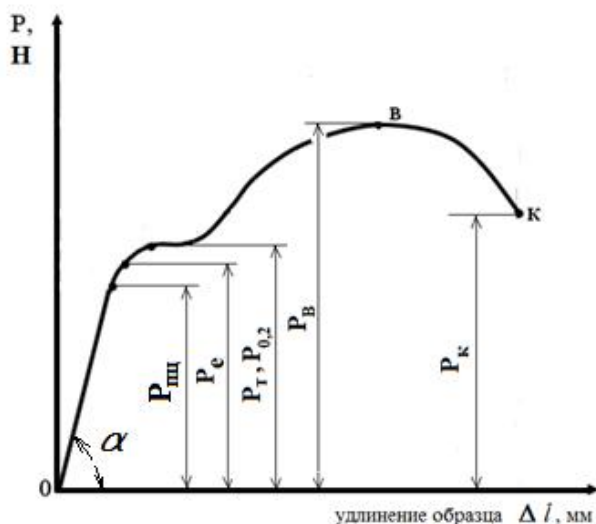


Рис. 1. Диаграмма растяжения образцов на разрывной машине

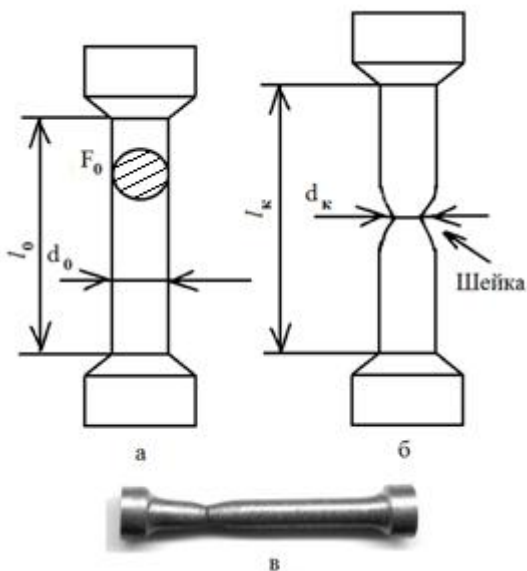


Рис. 2. Образец: а – до; б, в – после испытаний на растяжение

Предел текучести (физический)  $\sigma_T$  – это напряжение, при котором продолжается деформация (удлинение) образца без заметного увеличения нагрузки

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \text{ МПа,}$$

где  $P_T$  – нагрузка, соответствующая горизонтальной площадке текучести (рис. 1).

Предел текучести (условный)  $\sigma_{0,2}$  – это напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,2 %  $l_0$  образца. Его определяют в том случае, если на диаграмме (рис. 1) площадка текучести не является чётко выраженной горизонтальной линией. Кроме того, при растяжении легированных сталей,

алюминиевых сплавов и других материалов диаграмма совсем не имеет площадки текучести

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \text{ МПа,}$$

где  $P_{0,2}$  – нагрузка, при которой остаточная деформация равна 0,2 %  $l_0$  образца.

Удельная прочность – это отношение  $\sigma_B/\gamma$ , где  $\gamma$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>. Эта характеристика позволяет сравнивать по прочности различные материалы, например, стали со сплавами алюминия, титана, пластмассами и др.

## 2.2. Критерии упругости при растяжении

Предел упругости ( $\sigma_e$ ) – условное напряжение, соответствующее появлению остаточных деформаций определенной заданной величины (0,05; 0,001; 0,003; 0,005% $l_0$ )

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0}, \text{ МПа.}$$

Допуск на остаточную деформацию указывается в индексе при  $\sigma_e$ . Согласно закону Гука до нагрузки  $P_e$  сохраняется линейная зависимость между нагрузкой  $P$  и деформацией.

Предел пропорциональности ( $\sigma_{пц}$ ) – наибольшее напряжение, соответствующее началу отклонения от пропорциональной линейной зависимости между нагрузкой и деформацией

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}, \text{ МПа.}$$

На диаграмме от нуля до нагрузки  $P_e$  деформация  $\Delta l$  прямо пропорциональна нагрузке  $P_e$  и начальной длине  $l_0$ , но обратно пропорциональна площади поперечного сечения  $F_0$  и модулю жёсткости  $E = \text{tg}\alpha$ .

Для большинства материалов (сталей, алюминиевых сплавов и др.) предел упругости практически совпадает с пределом пропорциональности (предел упругости лишь на сотые доли процента превышает предел пропорциональности). Однако для материалов с переменным значением модуля  $E$  (медь, чугун, резина и др.) предел упругости расположен значительно выше предела пропорциональности.

Нагрузка, соответствующая точке К, называется разрушающей  $P_k$ , а напряжение – истинным сопротивлением разрыву

$$S_k = \frac{P_k}{F_0}, \text{ МПа.}$$

## 2.3. Критерии пластичности при растяжении

Относительное удлинение ( $\delta$ ) – это выраженное в процентах отношение абсолютного удлинения к начальной длине образца

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

где  $l_k$  – конечная длина образца после разрыва, мм.

Относительное сужение ( $\Psi$ ) – это выраженное в процентах отношение наибольшего уменьшения площади поперечного сечения образца к начальной площади его поперечного сечения

$$\psi = \frac{F_k - F_0}{F_0} \cdot 100\%,$$

где  $F_k$  – конечная площадь поперечного сечения образца в месте разрыва, мм<sup>2</sup>.

Численные значения  $l_0, l_k, F_0, F_k$  для расчёта  $\delta$  и  $\psi$  получают измерением нужных размеров на образцах до и после испытания (рис. 2).

При испытании на растяжение одного образца можно получить девять характеристик (критериев) материала –  $\sigma_B, \sigma_T, \sigma_{0,2}, \sigma/\gamma, \sigma_e, \sigma_{пл}, S_k, \delta, \psi$ . На практике обычно испытывают 5-10 образцов.

#### 2.4. Критерии вязкости при ударном изгибе

Ударная вязкость ( $KC$ ) – это работа удара  $A$ , затраченная на разрушение надрезанного образца, делённая на площадь его поперечного сечения в месте надреза  $S_0$ , м<sup>2</sup>.

$$A = m \cdot g \cdot (H - h) = m \cdot g \cdot l (\cos\beta - \cos\alpha), KC = \frac{A}{S_0}, \text{Дж/м}^2.$$

где  $m$  – масса маятника, кг (рис.3);  $H$  и  $h$  – высота подъёма маятника до и после удара, м.

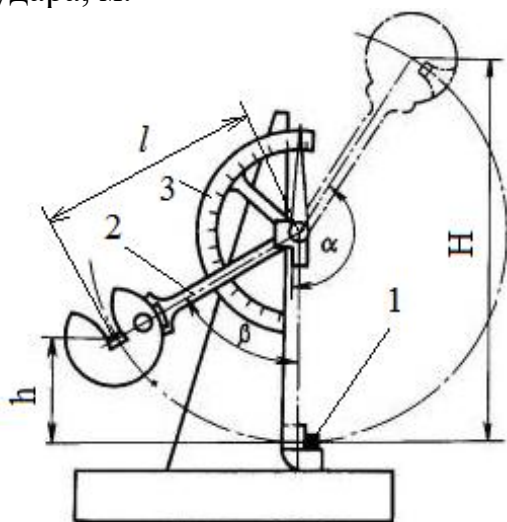


Рис.3. Схема копра для испытаний на ударную вязкость: 1 – образец; 2 – маятник; 3 – шкала

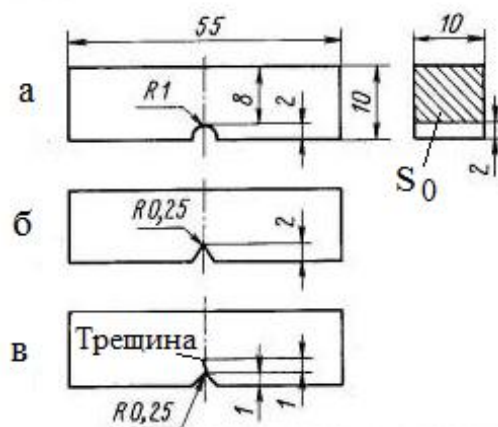


Рис. 4. Образец для испытаний на ударную вязкость: а – с надрезом типа U; б – с острым V надрезом; в – с острым V надрезом и трещиной

Для получения численного значения работы удара  $K$  проводят испытания на маятниковом копре. Испытуемый образец помещают на опоры копра, маятник массой  $m$  поднимают на высоту  $H$ , затем происходит падение маятника

и разрушение образца. Затратив часть энергии на разрушение, маятник поднимается на меньшую высоту  $h$ . Маятник отклоняется на угол  $\beta$ . Величины  $m, H, l, \alpha$  – постоянны, поэтому при испытаниях значение работы разрушения определяют с помощью специальных таблиц по значению  $\beta(h)$ .

Испытуемые образцы стандартного размера имеют надрезы (концентраторы напряжений) различного типа. После испытаний образцов с надрезом типа  $U$  (рис. 4, а) ударную вязкость обозначают  $KCU$ , с острым надрезом типа  $V$  (рис. 4, б) –  $KCV$ , с острым надрезом и трещиной (рис. 4, в) –  $KCT$ .

### Назначение ударной вязкости

Основное назначение ударной вязкости, также как и пластичности, – не допустить хрупкого разрушения деталей и конструкций в процессе работы под действием рабочих нагрузок. Хрупкое разрушение опасно тем, что может наступить в детали, несмотря на то, что рабочие нагрузки находились в пределах допустимых расчётных значений. Известно немало аварий из-за хрупкого разрушения корпусов судов, ферм мостов, трубопроводов и других конструкций.

### Назначение $KCU$

Минимально-допустимая величина ударной вязкости  $KCU$ , позволяющая материалу деталей сохранять вязкое состояние, зависит от сложности конструкции, технических требований к её эксплуатации и для ответственных конструкций должна быть высокой. Например, для стального вала авиадвигателя  $KCU$  должна быть 100...110 кДж/м<sup>2</sup>, для конструкционного материала стволов орудий достаточно иметь  $KCU = 60...70$  кДж/м<sup>2</sup>.

Низкая ударная вязкость  $KCU = 15...20$  кДж/м<sup>2</sup> для деталей, работающих в условиях динамического нагружения, недопустима, так как возникает опасность хрупкого разрушения материала. Предельная допустимая норма  $KCU$  определяется для каждой группы деталей путём контрольных испытаний.

### Назначение $KCV$

Стремление к уменьшению материалоемкости конструкций привело к более широкому применению высокопрочных материалов, которые, как правило, имеют малую пластичность и вязкость, и вследствие этого обладают повышенной склонностью к хрупкому разрушению.

Очагами разрушения таких материалов являются места концентрации напряжений (резкие переходы деталей, острые углы и надрезы, резкие переходы сварных швов к основному металлу и т.п.). К таким материалам, например, относятся высокопрочные легированные стали и титановые сплавы для корпусов твердотопливных ракетных двигателей.

Для оценки уровня вязкости материала в местах концентрации напряжений стали применять ударную вязкость  $KCV$ , так как испытания

образцов с острым надрезом в большей степени соответствовали реальным условиям работы материала в местах концентрации напряжений.

### Назначение $K_{CT}$

Материал в очагах разрушения конструкций разрушается в 2-е стадии: сначала образуется трещина от острого надреза, это первая стадия, затем происходит развитие (рост) трещины под действием напряжений до полного разрушения детали, это вторая стадия.

Разрушение образцов при испытаниях на ударный изгиб происходит также за две эти стадии. Поэтому у ударной вязкости  $K_C$  появились две составляющие

$$K_C = K_{C_3} + K_{C_p},$$

где  $K_{C_3}$  – удельная работа зарождения трещины,  $K_{C_p}$  – удельная работа развития (распространения) трещины.

Для оценки второй составляющей  $K_{C_p}$  стали применять образцы с трещиной и по результатам их испытаний введено обозначение  $K_{CT}$ .

Полагают, что характеристика  $K_{CT}$  является ответственной за переход материала из вязкого в хрупкое состояние. Если она ниже допустимой нормы, значит материал детали имеет низкую сопротивляемость хрупкому разрушению и его нельзя допускать для изготовления детали.

### 2.5. Критерий трещиностойкости

Вязкость разрушения при плоской деформации –  $K_{IC}$ . Так как этот критерий определяет способность материала сопротивляться распространению трещин его называют трещиностойкостью.

Сущность заключается в следующем. В высокопрочных материалах в очагах разрушения неизбежно присутствуют микротрещины, образованные от острых трещиноподобных дефектов.

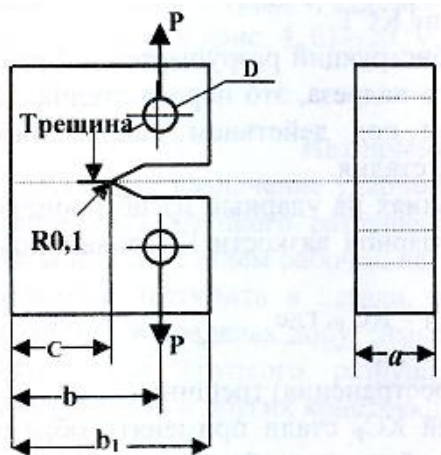
Надёжная работа конструкции зависит прежде всего от сопротивления материала росту этих уже имеющихся микротрещин. Рост микротрещин происходит вследствие концентрации напряжений в вершине (устье) трещины. С позиций механики разрушения материалов определяющими в этом процессе роста трещины являются два фактора: допустимый темп нарастания напряжений в вершине трещины и критическая длина растущей трещины до момента перехода её в разрушение детали. Чем они больше, тем лучше конструкционный материал.

Для оценки работы материала такого рода конструкций применяют испытания образцов (рис. 5) с односторонним острым надрезом и трещиной по схеме внецентренного растяжения с изгибом. Разрушение образцов происходит при плоском напряжённом состоянии (в плоскости трещины).

Критическое значение этого темпа нарастания напряжений  $K$  в условиях плоской деформации обозначают  $K_{IC}$  и называют вязкостью разрушения. Вязкость разрушения  $K_{IC}$  взаимосвязана с пределом текучести  $\sigma_{0,2}$  материала. Для титановых сплавов при отношении  $K_{IC} / \sigma_{0,2} > 0,24$  критическая длина



трещины измеряется сантиметрами, что исключает хрупкое разрушение материала. При отношении  $K_{IC} / \sigma_{0,2} < 0,08$  – длина трещины составляет несколько микрометров. При этих значениях критической длины трещины наступает хрупкое разрушение материала.



Критерий  $K_{IC}$  используют при изготовлении сильно нагруженных конструкций – крупных сварных узлов, деталей самолётов, корпусов ракет, сосудов высокого давления и др.

Рис. 5. Образец для определения вязкости разрушения  $K_{IC}$

### 3. Порядок выполнения работы

1. Измерить исходные размеры (длина и диаметр) образцов для испытания на разрыв.
2. Установить образец в реверсивный зажим разрывной машины и поместить зажим между траверсами разрывной машины.
3. Выбрать свободный ход траверсы на малом усилии.
4. При помощи программного обеспечения разрывной машины установить нулевые значения усилия и удлинения образца.
5. Запустить фиксацию измерения и запустить движение разрывной машины до полного разрыва образца.
6. Распечатать диаграмму растяжения образца в координатах усилие-удлинение.
7. Найти на диаграмме растяжения характерные точки механических характеристик материала.
8. Рассчитать численные значения механических свойств материала.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

### Изучение характеристик твердости материалов

#### Цель работы

1. Изучить основные характеристики твердости и критерии их оценки.
2. Изучить методику определения твердости на твердомерах Бринелля и Роквелла.
3. Ознакомиться с твердомерами Бринелля и Роквелла.

#### 1. Изучение основных определений и терминов

**Твёрдость** – свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при контактом воздействии в поверхностном слое.

**Твердомер** - прибор для определения твердости образца путём внедрения в него более твердого объекта.

**Индентор** - часть твердомера, которая внедряется в образец для определения твердости.

#### 2.6. Критерии твёрдости

Твёрдость можно измерять вдавливанием наконечника инструмента в испытуемый материал (способ вдавливания), царапанием поверхности (способ царапания), маятниковым и динамическим способами и др. Большинство способов определения твёрдости основано на принципе вдавливания в материал твёрдых тел: стального закалённого шарика, конуса или пирамиды из твёрдого сплава, алмаза, сапфира.

Твёрдость измеряют по методу Бринелля, Роквелла, Виккерса, Мооса, Шора и др. В настоящей лабораторной работе студентам предлагается изучить определение твёрдости двумя методами – по Бринеллю и по Роквеллу.

#### Твёрдость по Бринеллю

Испытания проводят на твердомере Бринелля (рис. 6). Сущность определения твёрдости на этом приборе заключается во вдавливании шарика диаметром  $D$  под действием постоянной нагрузки  $P$  (рис. 7) в поверхность испытуемого образца.

После снятия нагрузки измеряют диаметр лунки (отпечатка)  $d$ . Число твёрдости по Бринеллю  $HB$  определяют величиной нагрузки  $P$ , делённой на площадь сферической поверхности отпечатка

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

где  $P$  – нагрузка, кгс (Н);  $D$  – диаметр шарика, мм;  $d$  – диаметр отпечатка, мм.

Чем меньше диаметр отпечатка, тем выше твёрдость металла. На практике твёрдость определяют не расчётом, а по специальным таблицам по

величине диаметра отпечатка  $d$  (Приложение 1). Если нагрузка измеряется в кгс, то твёрдость имеет размерность кгс/мм<sup>2</sup>, если в Н – МПа ( $1 \text{ кгс/мм}^2 \approx 9,8 \text{ МПа}$ ).

Диаметр  $d$  измеряют с точностью до 0,05 мм с помощью лупы, имеющей увеличение до 24 раз. Измерения делают в двух взаимно перпендикулярных направлениях лунки. Есть приборы (бривископы), у которых отпечаток в увеличенном виде выводится на экран, и диаметр отпечатка измеряется линейкой. Для точности результата рекомендуется проводить не менее 3-х испытаний.

Материалом шарика является закалённая сталь или твёрдый сплав. При твёрдости испытуемого материала менее 450НВ следует применять шарик из закалённой стали, при твёрдости более 450НВ – шарик из твёрдого сплава. Диаметр шарика  $D$  в зависимости от испытуемого материала может быть 1,0; 2,0; 2,5; 5,0 и 10 мм. Во избежание остаточной деформации самого шарика необходимо, чтобы его твёрдость была в 1,7 раза больше твёрдости испытуемого материала.



а



б

Рис. 6. Твердомеры: а – Бринелля; б – Роквелла

Нагрузка  $P$  (кгс) для сталей и чугунов берётся из расчёта  $30D^2$ , титановых сплавов –  $15D^2$ , лёгких алюминий-магниевых сплавов –  $10D^2$  и т.д.

Поверхность испытуемого образца должна быть плоской, ровной, с шероховатостью не более  $R_a2,5$ . В обозначении твёрдости по Бринеллю число

твёрдости кгс/мм<sup>2</sup> (МПа) должно стоять перед символом НВ, например, 150НВ (1500НВ).

Твёрдость НВ можно перевести, пользуясь переводными таблицами, в твёрдость по Роквеллу (приложение 2) и Виккерсу.

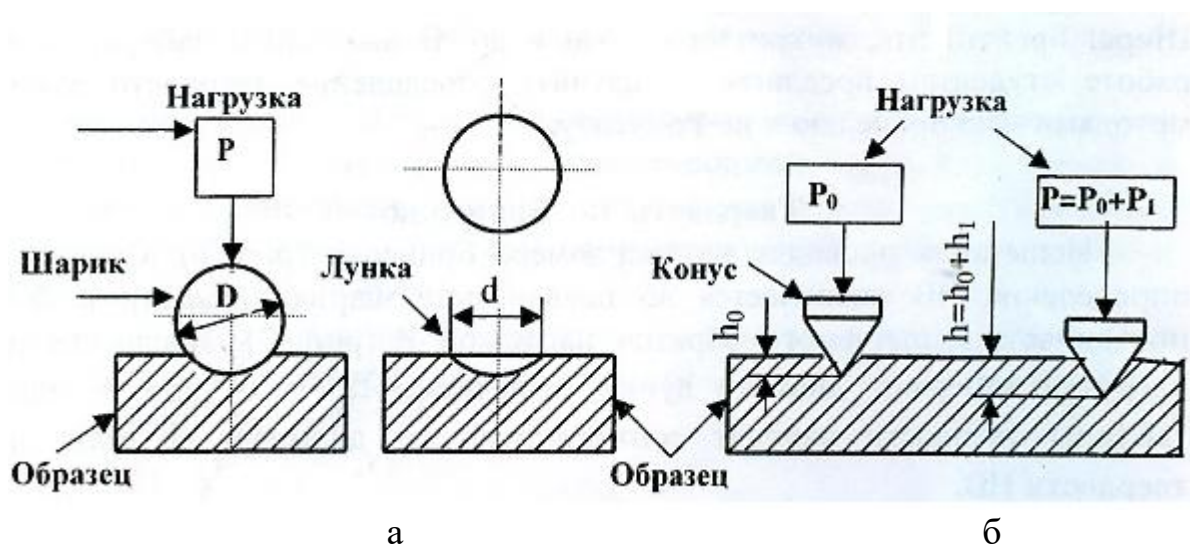


Рис. 7. Схемы определения твёрдости: а – по Бринеллю; б – по Роквеллу

### Твёрдость по Роквеллу

Испытания проводят на твердомере Роквелла (рис. 6) способом вдавливания в поверхность образца алмазного конуса или стального шарика нагрузкой  $P$ . Твердомер оснащён индикатором, который показывает полученную твёрдость.

Главным параметром, влияющим на величину твёрдости в этом методе, является глубина отпечатка  $h$ . Единица твёрдости по Роквеллу – безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индикатора на 0,002 мм.

Твёрдость обозначается символом HR с добавлением буквы шкалы измерения А, В, С, D, E, F, G, К. При вдавливании алмазного конуса нагрузкой  $P = 60, 100, 150$  кгс (588, 980, 1470 Н) полученная твёрдость обозначается HRA, HRB, HRC соответственно.

Алмазный конус имеет угол при вершине  $120^\circ$ , радиус сферической части 0,2 мм. Поверхность испытуемого образца должна быть ровной и шлифованной. Нагрузка  $P$  включает предварительную нагрузку  $P_0$  и основную  $P_1$ . Это необходимо для исключения влияния упругой деформации и шероховатости поверхности на результат измерения. При проведении данной и последующих лабораторных работ, студенты будут пользоваться шкалами В и С. Алмазный конус или стальной шарик вдавливают в металл вначале предварительной нагрузкой  $P_0 = 10$  кгс (98 Н), а затем в зависимости от применяемой шкалы основной нагрузкой  $P_1$  (шкала В –  $P_1 = 100$  кгс (980 Н), шкала С –  $P_1 = 150$  кгс (1470 Н)).

Расстояние от центра отпечатка до края образца или до центра другого отпечатка должно быть не 1,5 мм при вдавливании конуса и не менее 4 мм при вдавливании шарика.

Число твёрдости определяется считыванием показаний с круговой шкалы индикатора: при испытании шариком – с красной шкалы, при испытании алмазным конусом – чёрной. Число твёрдости должно стоять перед буквенным символом, например, 60HRC.

### **3. Порядок выполнения работы.**

1. Подготовить образец для определения твёрдости.
2. Установить на универсальном твердомере индентор в виде стального шарика диаметром 5 мм.
3. Установить на твердомере нагрузку для проведения измерения по методу Бриннеля.
4. Провести три вдавливания индентора в образец.
5. Установить на твердомер индентор в виде стального шарика диаметром 2,2 мм.
6. Установить на твердомере нагрузку для проведения измерения по методу Роквелла шкале HRB.
7. Провести три измерения твёрдости HRB методом Роквелла.
8. При помощи монокулярного микроскопа измерить диаметра отпечатков по методу Бриннеля.
9. Рассчитать твёрдость образца по методу Бриннеля.
10. При помощи переводной таблицы перевести рассчитанную твёрдость по Бриннелю в единицы HRB.
11. Сравнить рассчитанные значения с измеренными методом Роквелла по HRB.
12. Сделать вывод о соответствии различных методов измерения друг другу.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

### Изучение диаграмм состояния двойных сплавов, кривых охлаждения и критических точек

#### Цель работы

1. Изучить сущность и назначение понятий: кривая охлаждения, критическая точка, кристаллизация, сплав и др.
2. Построить кривую охлаждения сплава.

#### 1. Изучение основных определений и терминов

**Компонент** – одна из составляющих химического состава сплава. Компонентами могут быть химические элементы (металлы, неметаллы), химические соединения и др.

**Сплав** – материал, полученный сплавлением или спеканием двух и более компонентов. По количеству компонентов сплавы бывают двойные, тройные, четверные и т.д.

**Структура** – строение сплава или компонента, видимое визуально без увеличения (макроструктура) или под микроскопом с увеличением (микроструктура).

**Фаза** – однородная по химическому составу, строению и свойствам часть системы, отделённая от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую состав, строение и свойства изменяются скачком. Фазами могут быть химические элементы, жидкие и твёрдые растворы, химические соединения и др.

**Система сплавов** – общее количество сплавов всех возможных количественных сочетаний двух (или нескольких) компонентов.

**Критическая точка** – температура, при которой в сплаве или компоненте происходят какие-либо превращения (кристаллизация или плавление, полиморфное или магнитное превращение, растворение или выделение фазы и др.). Критические точки расположены в местах перегибов кривой охлаждения и на линиях диаграмм состояния.

**Кривая охлаждения** – график охлаждения сплава или компонента в жидком и твёрдом состояниях в координатах «температура – время».

**Диаграмма состояния** – график изменения состояния и структуры системы сплавов в координатах «температура – процентное содержание компонентов».

**Ликвидус, солидус** – линии диаграммы состояния, являющиеся геометрическим местом критических точек начала и конца кристаллизации (соответственно) сплавов и компонентов при охлаждении.

**Кристаллизация** – процесс перехода сплава или компонента из жидкого в твёрдое состояние при охлаждении.

**Эвтектика** – это тонкодисперсная механическая смесь компонентов диаграммы, одновременно кристаллизующихся из жидкого сплава при

постоянной и самой низкой для данной системы сплавов температуре. На диаграмме состояния находится в точке совмещения линий ликвидус и солидус и ниже этой точки.

**Эвтектический сплав** – сплав, структура которого после кристаллизации состоит только из эвтектики.

**Доэвтектические и заэвтектические сплавы** – сплавы, структура которых после кристаллизации состоит из эвтектики и первого (доэвтектические сплавы) и второго компонента (заэвтектические сплавы). На диаграмме состояния они расположены слева и справа (соответственно) от эвтектического сплава.

**Жидкий раствор, твёрдый раствор** – название структуры сплава, у которого легирующие элементы растворены в основе сплава в жидком и твёрдом состоянии (соответственно).

**Основа сплава, легирующий компонент** – в двойном сплаве, состоящем из двух компонентов, основой называется тот компонент, которого в процентном выражении больше другого, тогда оставшийся компонент будет называться легирующим.

## 2. Изучение кривых охлаждения и критических точек аморфного (а) и кристаллических (б, в, г) материалов

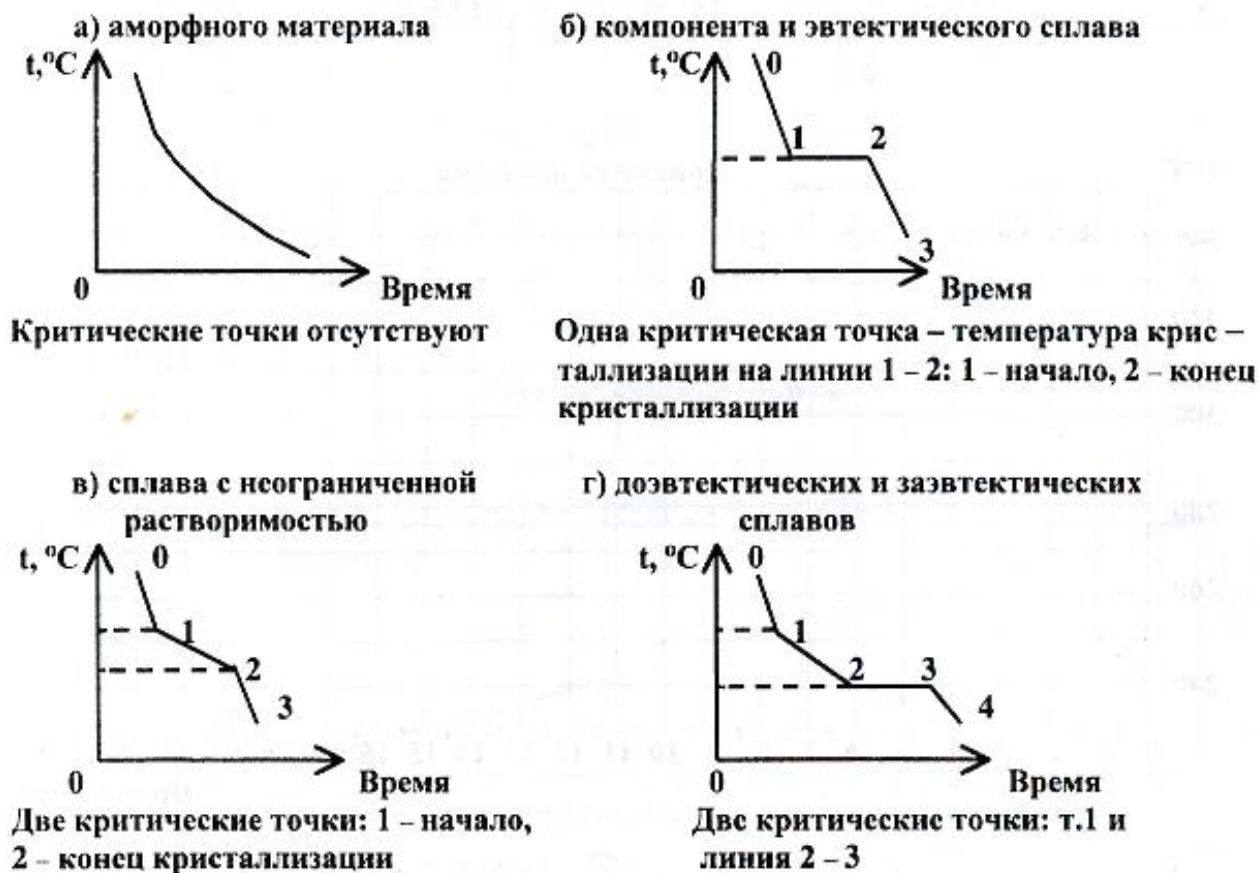


Рис. 8. Типовые кривые охлаждения

### **3. Порядок выполнения работы.**

1. Произвести нагрев металла до расплавления.
2. Достать тигель с расплавленным металлом и установить туда прибор измерения температуры.
3. Фиксировать значения температуры металла каждые 0,5 мин начиная с 350°C и до 230°C. Данные занести в таблицу бланка.
4. По результатам наблюдения построить кривую охлаждения металла.
5. Найти на кривой охлаждения места изменения наклона кривой или площадки.
6. Определить причину возникновения данных критических точек (кристаллизация, перекристаллизация).
7. Определить температуру критической точки.
8. Сделать вывод о соответствии критической точке теоретической температуре кристаллизации.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### Изучение классификации, маркировки, структуры и назначения углеродистых сталей и чугунов

#### Цель работы

Изучить:

1. Классификацию углеродистых сталей и чугунов.
2. Способы маркировки и расшифровку марок углеродистых сталей и чугунов.
3. Влияние углерода на механические свойства сталей в отожжённом состоянии.
4. Научиться изображать типовые структуры сталей и чугунов.
5. Назначение различных групп конструкционных и инструментальных сталей и чугунов.

#### 1. Изучение основных определений и терминов

##### 1.1 Углеродистые стали

**Углеродистая сталь** – сплав железа с углеродом, содержащий 0,006 – 2,14% углерода. Железо является основой сплава.

**Конструкционная сталь** – сталь, предназначенная для изготовления деталей машин и конструкций. В литературе её иногда называют машиностроительной сталью.

**Инструментальная сталь** – сталь, предназначенная для изготовления инструментов (режущих, измерительных, штамповых, деревообрабатывающих и др.).

**Перекристаллизация углеродистой стали** – изменение структуры стали, связанное с полиморфным превращением  $\gamma$  – железа с кристаллической решёткой гранецентрированного куба (ГЦК) в  $\alpha$  – железо с решёткой объёмноцентрированного куба (ОЦК). Перекристаллизация имеет начало на линии GSE, конец – на линии PSK. В результате перекристаллизации структура аустенит превращается в феррит + перлит у доэвтектоидной, перлит у эвтектоидной, перлит + цементит у заэвтектоидной стали.

**Эвтектоидная сталь** – сталь, структура которой после перекристаллизации в точке S (727 °C) содержит 100% эвтектоида (перлита). На диаграмме состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C эвтектоидная сталь расположена на вертикали, проходящей точку S и 0,8% углерода.

**Доэвтектоидная сталь** – сталь, структура которой после перекристаллизации содержит эвтектоид (перлит) и феррит.

**Заэвтектоидная сталь** – сталь, структура которой после перекристаллизации содержит эвтектоид (перлит) и цементит.

**Эвтектоид (перлит)** – структура, образованная при перекристаллизации аустенита в точке S (727<sup>0</sup>C) и представляющая собой механическую смесь феррита и цементита.

**Отожжённая сталь** – сталь, подвергнутая термической обработке – отжигу, после которого она имеет наименьшую твёрдость и прочность, наибольшую пластичность и вязкость, равновесную структуру и хорошую обрабатываемость резанием.

**Химический состав** – процентное содержания углерода и примесей в марке углеродистой стали по ГОСТ.

**Примеси** – элементы, попадающие в сталь при выплавке. Делятся на полезные (марганец, кремний) и вредные (сера, фосфор). Количество вредных примесей определяет качество стали. Чем их меньше, тем качественнее сталь.

## 1.2 Чугуны

**Чугун** – сплав железа с углеродом, содержащий  $\geq 2,14$  до 6,67 % углерода. Железо является основой сплава.

**Белый чугун** – чугун, в котором углерод находится в связанном состоянии в виде **цементита** Fe<sub>3</sub>C.

**Серый чугун** – чугун, углерод в котором находится в свободном состоянии (частично или полностью) в виде **пластинчатого** графита. По виду металлической основы различают ферритный, феррито-перлитный и перлитный серый чугун.

**Ковкий чугун** – чугун, углерод в котором находится в свободном состоянии (частично или полностью) в виде **хлопьевидного** графита. По виду металлической основы может ферритным и перлитным.

**Высокопрочный чугун** – чугун, углерод в котором находится в свободном состоянии (частично или полностью) в виде **шаровидного** графита. По металлической основе бывает трёх видов: ферритный, феррито-перлитный и перлитный.

**Антифрикционный чугун** – чугун, предназначенный для изготовления подшипников скольжения, валов, осей, втулок и других деталей, имеющих трущиеся поверхности. Основным свойством таких деталей является **антифрикционность**.

**Специальный чугун** – чугун, в который кроме железа и углерода вводят легирующие элементы с целью получения специальных свойств: **коррозионной стойкости, жаропрочности, жаростойкости, трещиностойкости** и др.

**Ледебурит (эвтектика)** – структура белого чугуна. Состоит из механической смеси аустенит + цементит (А + Ц<sub>1</sub>) при температуре точки С (1147<sup>0</sup>C) и перлит + цементит (П + Ц<sub>1</sub>) после рекристаллизации при температуре линии PSK (727<sup>0</sup>C). Содержит 4,3 % углерода.

**Эвтектический чугун** – белый чугун, структура которого после кристаллизации состоит из 100 % эвтектики (ледебурита). На диаграмме расположен на вертикали, проходящей через 4,3 % углерода.

**Доэвтектический чугун** – белый чугун, содержащий > 2,14 % до 4,3 % углерода. На диаграмме эти чугуны расположены слева от эвтектического чугуна.

**Заэвтектический чугун** – белый чугун, содержащий > 4,3 % до 6,67 % углерода. На диаграмме эти чугуны расположены справа от эвтектического чугуна.

## 2. Изучение классификации углеродистых сталей и чугунов

### 2.1 Углеродистые стали

Углеродистые стали классифицируют (рис. 9) по химическому составу, назначению, структуре и другим признакам.



Рис. 9 Схема классификации углеродистых сталей

### 2.2. Изучение влияния углерода на механические свойства стали в отожжённом состоянии (рис. 10)

Механические свойства углеродистых сталей зависят от содержания в них углерода.

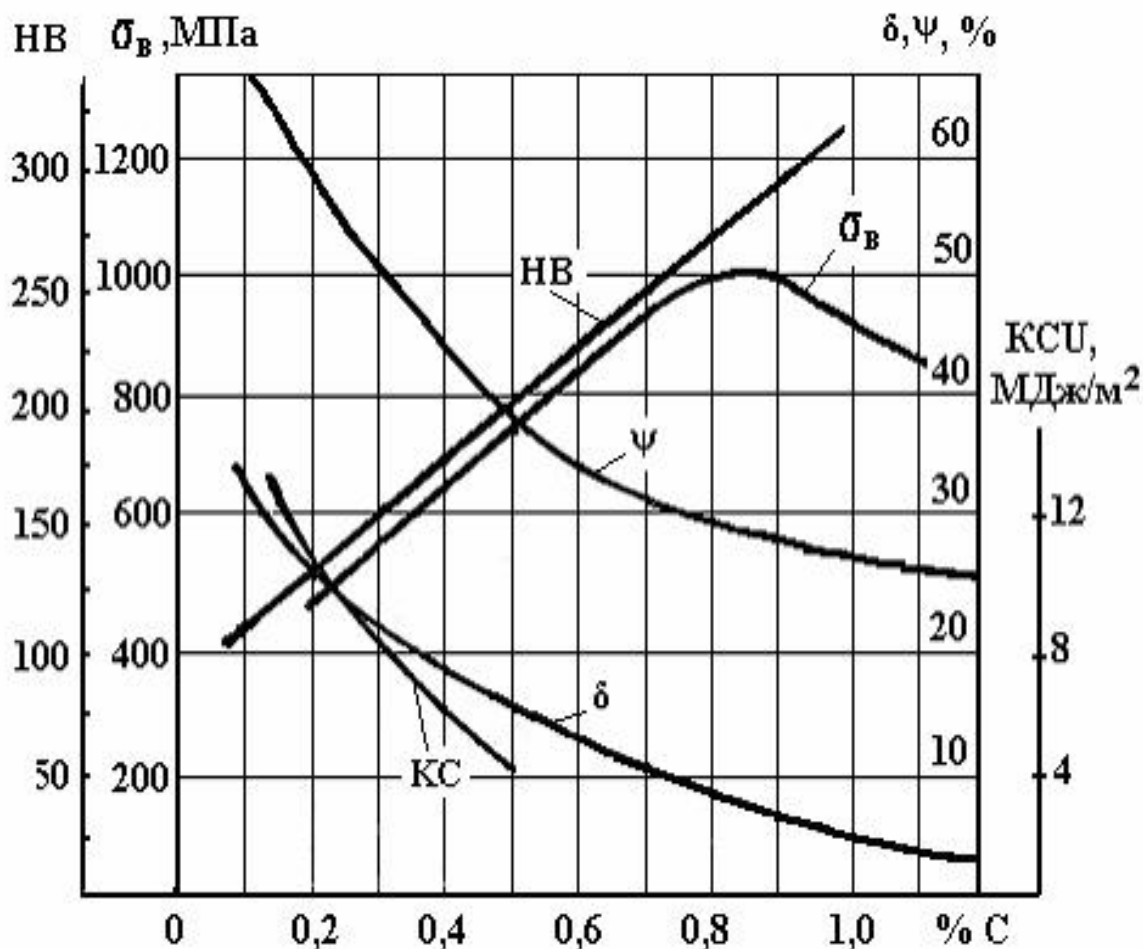


Рис. 10. Зависимость механических свойств отожженной углеродистой стали от содержания углерода.

НВ – твёрдость по Бринеллю, кгс/мм<sup>2</sup>;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_{0.2}$  – предел текучести; KCU – ударная вязкость;  $\delta$  – относительное удлинение;  $\psi$  – относительное сужение

### 2.3 Изучение назначения углеродистых сталей

По назначению углеродистые стали делят на: конструкционные и инструментальные.

Конструкционные стали дополнительно делят на: строительные, холодно-штампуемые, цементуемые, улучшаемые, пружинно-рессорные, арматурные и др.

Инструментальные стали дополнительно делят на стали для режущего инструмента, стали для измерительного инструмента, стали для штампов холодного и горячего деформирования, стали для деревообрабатывающего инструмента и др.

**Строительными** являются низкоуглеродистые ( $\leq 0,25$  % C) стали, имеющие **хорошую свариваемость**. Стали марок Ст2, Ст3 по ГОСТ 19281

– 2013 относят к строительным сталям и предназначены для строительных конструкций: ферм, рам, перекрытий, стоек, балок, колонн, эстакад, газо – и нефтепроводов и др.

**Холодно-штампуемыми** являются низкоуглеродистые ( $\leq 0,15$  % С) стали, имеющие **высокую деформационную способность в холодном состоянии**. Стали марок 05, 08, 10 относят к холодно-штампуемым сталям. Они предназначены для изготовления шайб, прокладок, коробчатых деталей, кожухов, деталей кузова автомобиля и др.

**Цементуемыми** являются низкоуглеродистые стали с 0,15 – 0,25 % С. Марки: сталь 15, 20, 25 и др. относят к цементуемым сталям. Они предназначены для малонагруженных и малоразмерных деталей с износостойкими трущимися поверхностями: валов, осей, втулок, шестерён, и др. Основное рабочее свойство деталей – **износостойкость поверхности** – получают цементацией. Малонагруженность деталей обусловлена невысокой прочностью, малоразмерность – низкой прокаливаемостью (~ 10...15 мм).

**Улучшаемыми** являются среднеуглеродистые стали с 0,3...0,6 % С. Марки: сталь 30...60 относят к улучшаемым сталям. Они предназначены для средненагруженных и небольших размеров деталей с износостойкими трущимися поверхностями: валов, осей, втулок, шестерён, штоков, шатунов и др. Основное рабочее свойство деталей – **износостойкость поверхности** – получают индукционной закалкой токами высокой частоты (ТВЧ). Детали перед закалкой подвергают термообработке – улучшению. Улучшаемые стали прочнее цементуемых и имеют большую прокаливаемость (~ 25 мм). В связи с этим из них изготавливают более нагруженные и более крупные детали.

**Пружинно-рессорные** стали являются высокоуглеродистыми сталями с 0,65...0,85 % С. Марки: сталь 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г по ГОСТ 14959 –2016 относят к пружинно-рессорным сталям. Они предназначены для пружин, рессор, мембран, упругих пластин и других деталей с упругими свойствами. Основное рабочее свойство – **упругость** – достигают термообработкой, состоящей из закалки и среднего отпуска.

**Арматурные** стали предназначены для **армирования** (упрочнения) железобетонных конструкций, где их применяют в виде гладких или периодического профиля стержней. Арматурные стали марок Ст.3 (кп, пс, сп), Ст5 (кп, пс, сп) поставляют по ГОСТ5781 – 82 в горячекатаном состоянии и по ГОСТ 10884 – 94 в упрочнённом состоянии после термической или термомеханической обработки.

**Инструментальные стали** предназначены для изготовления различных инструментов – калибров, напильников, шаберов, метчиков, стамесок, топоров и т.п. Износостойкость инструментов достигается закалкой с последующим низким отпуском.

## 2.4 Изучение микроструктур углеродистых сталей

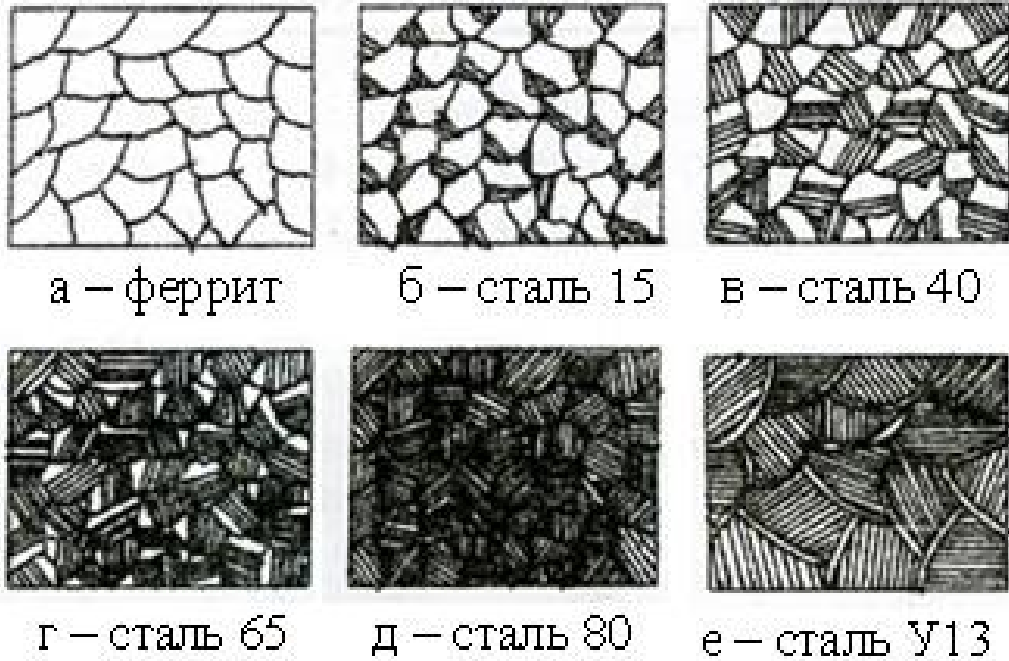
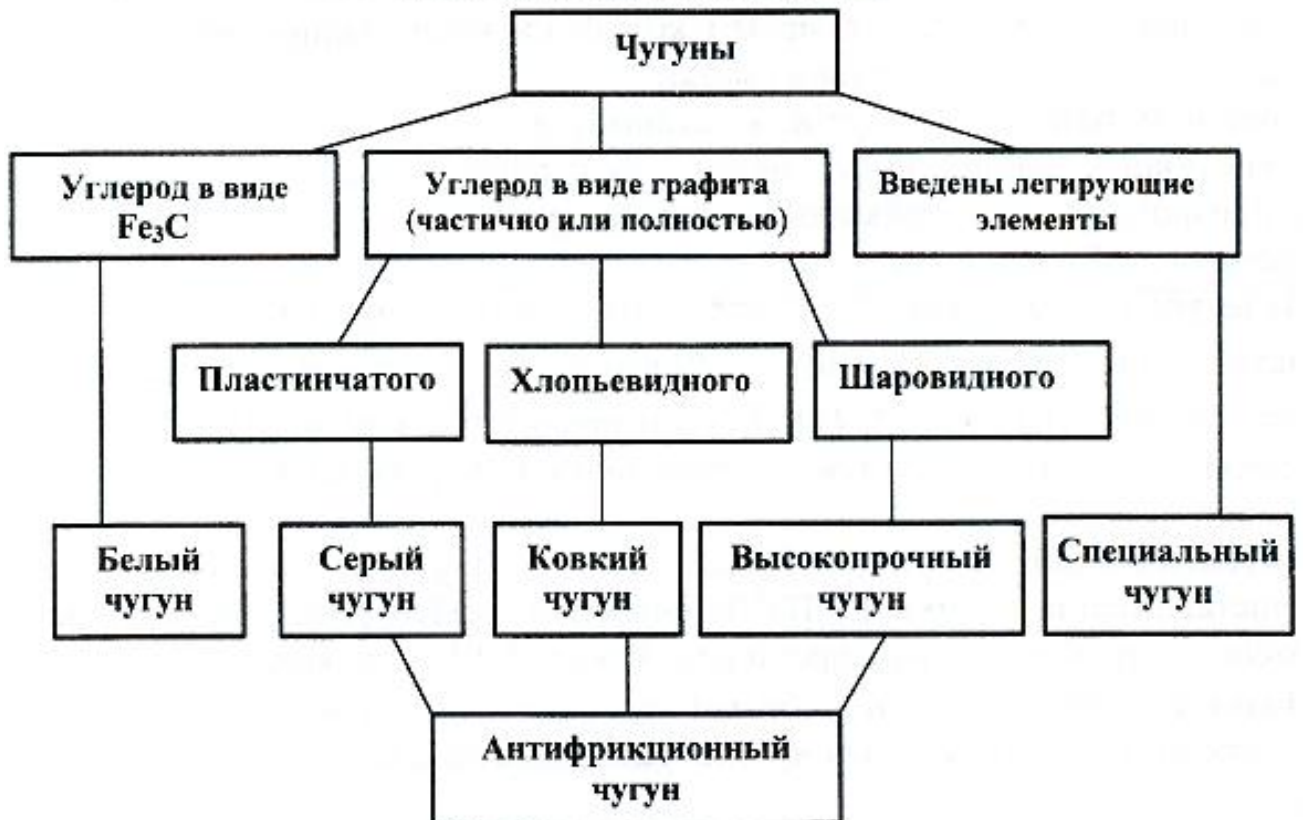


Рис. 11 Типовые схемы изображения микроструктур углеродистой стали с различным содержанием углерода

## 2.4 Изучение классификации чугунов

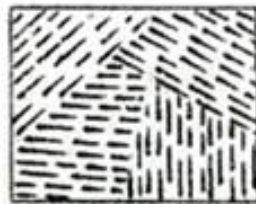
### Схема классификации чугунов



## 2.5 Изучение микроструктур белых и технических чугунов



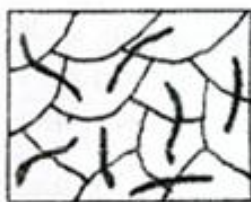
р – доэвтек-  
тический  
белый  
чугун



с – эвтекти-  
ческий бе-  
лый чугун



г – заэвтек-  
тический бе-  
лый чугун



з – серый  
ферритный  
чугун



ж – серый  
феррито-  
перлитный  
чугун



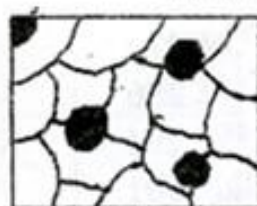
и – серый  
перлитный  
чугун



л – ковкий  
ферритный  
чугун



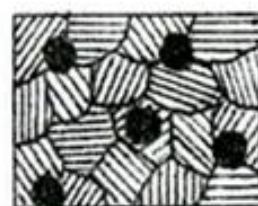
м – ковкий  
перлитный  
чугун



н – высоко-  
прочный фер-  
ритный чугун



о – высоко-  
прочный фер-  
рито-пер-  
литный чугун



п – высоко-  
прочный  
перлитный  
чугун

Рис. 12 Типовые схемы изображения микроструктур белых и технических чугунов



### 3. Порядок выполнения работы

1. Рассмотреть в металлографический микроскоп шлифы различных образцов стали и чугуна.
2. Зарисовать схематично микроструктуру изучаемого образца.
3. Указать фазовый состав микроструктуры.
4. Для доэвтектоидных сталей определить содержание углерода по формуле  $\%C = 0,8П / 100$ , где П - визуальное количество перлита в %.
5. Используя рассчитанное %С определить марку стали по ГОСТу.
6. Используя ГОСТ найти механические свойства и назначение стали.
7. Для чугунов определить тип и вид чугуна.
8. Записать примерную марку чугуна и с помощью ГОСТа найти механические свойства и назначение.



## Изучение термической обработки углеродистых сталей

### Цель работы

1. Изучить сущность, основные виды и назначение термообработки углеродистой стали.
2. Научиться определять параметры режима термообработки, структуру и твёрдость термообработанной стали.
3. Ознакомиться с технологией выполнения закалки, нормализации и отпуска углеродистой стали.

### 1. Термообработка углеродистой стали

**Термообработка** – процесс нагрева, выдержки и охлаждения стали с целью получения нужных структуры и свойств.

**Параметры термообработки** – температура нагрева  $t_n$ , время выдержки  $\tau_n$ , среда охлаждения (вода, минеральное масло, воздух, печь и др.) выбираются перед термообработкой (рис. 13).

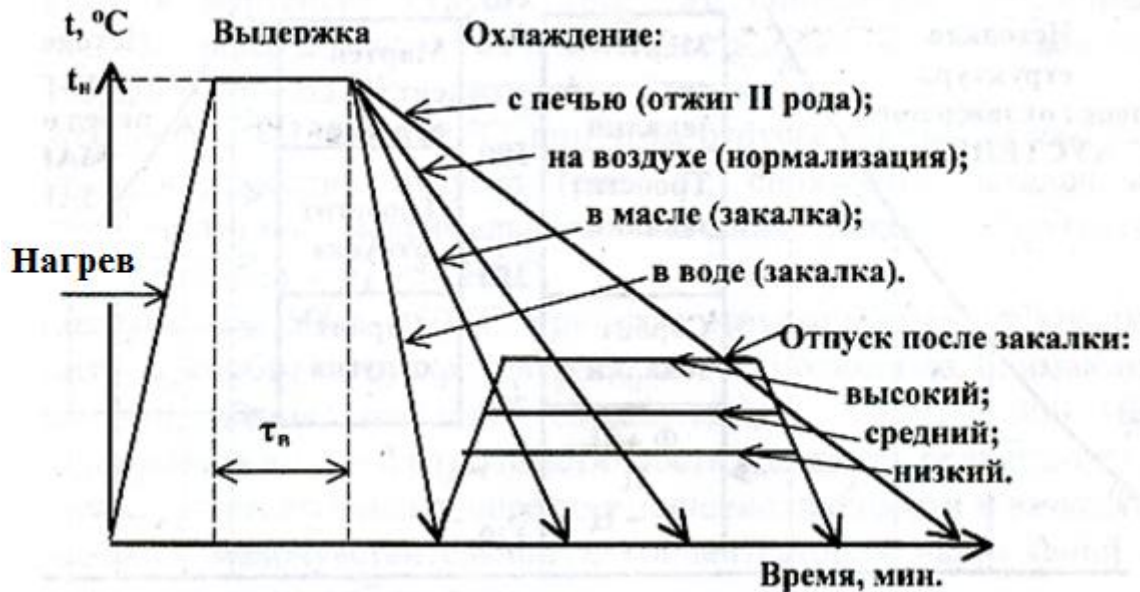


Рис.13. Схема термообработки углеродистой стали

**Выбор параметров термообработки** – температуру нагрева  $t_n$  отжига, нормализации и закалки определяют по диаграмме состояния Fe – Fe<sub>3</sub>C (рис. 14), отпуска – по схеме (рис. 4). Время выдержки можно узнать из приведенных ниже определений закалки, нормализации, отжига и отпуска. Выбор среды охлаждения можно сделать по схеме (рис. 15).

Контроль правильности выполненной термообработки делают по твёрдости и структуре. Прогноз ожидаемой после термообработки твёрдости и структуры можно сделать по схеме (рис. 3).

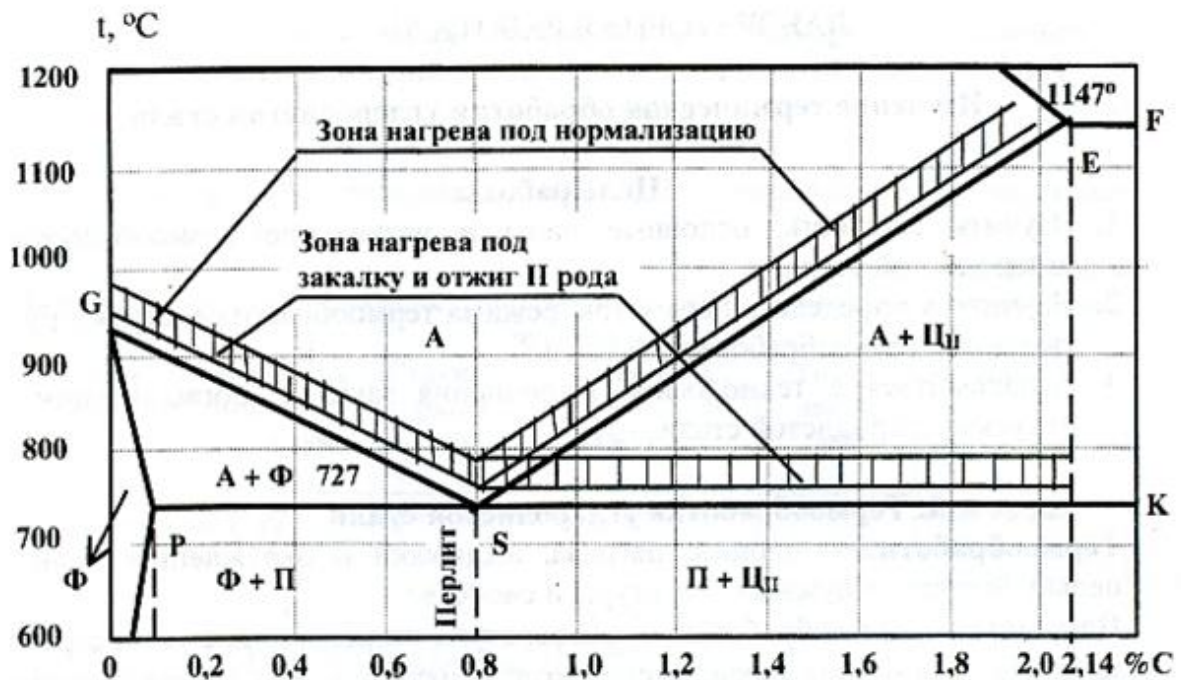


Рис. 14. Зоны температур нагрева под термообработку углеродистых сталей

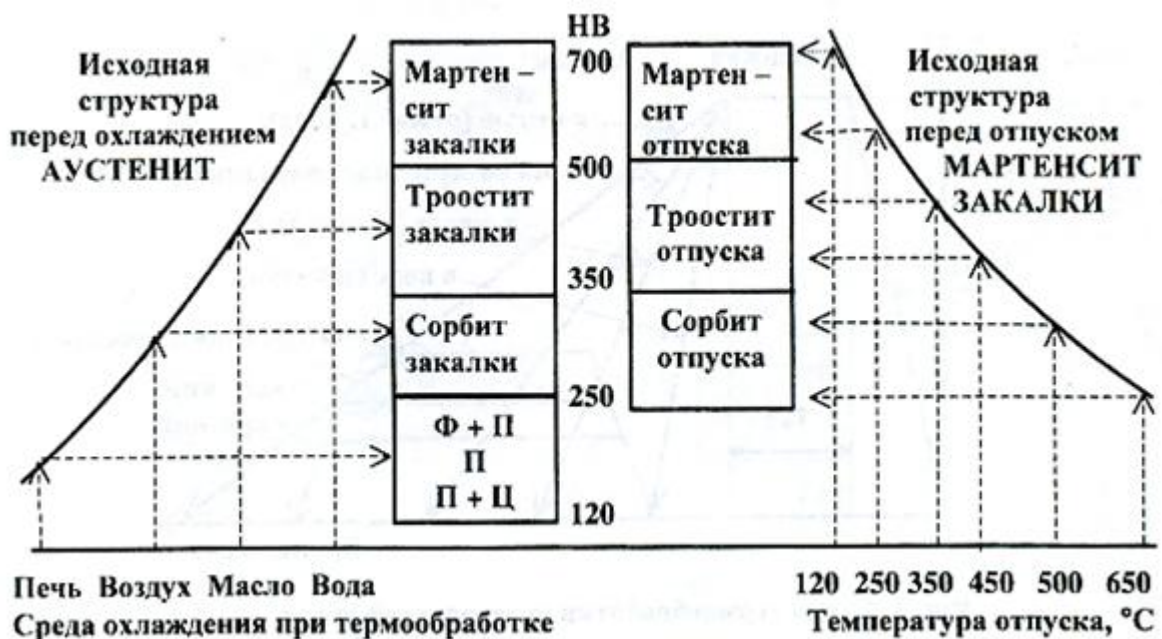


Рис. 15. Схема определения структуры и твёрдости после различных видов термообработки

**Отжиг II рода** – вид термообработки, заключающийся в нагреве стали выше линии GSK на 30...50<sup>0</sup>C (рис. 2), выдержки для получения структуры аустенит и охлаждения с печью. Время выдержки углеродистой стали при отжиге находится в пределах 0,5...1 ч.

**Нормализация** – вид термообработки, заключающийся в нагреве стали выше линии GSE на 30...50<sup>0</sup>C (рис. 2), выдержке для получения структуры аустенит и охлаждении на воздухе.

**Закалка** – вид термообработки, заключающийся в нагреве стали выше линии GSK на 30...50<sup>0</sup>C (рис. 2), выдержке для получения структуры аустенит и охлаждении со скоростью больше критической.

Время выдержки углеродистой стали под закалку в электропечи назначается из расчёта 50...80 секунд на 1 мм наименьшей толщины сечения детали.

**Критическая скорость охлаждения  $V_{кр}$**  при закалке – минимальная скорость, при которой переохлаждённый аустенит будет превращаться в мартенсит закалки. Для углеродистой стали  $V_{кр}$  получают охлаждением в воде.

**Отпуск** – вид термической обработки, заключающийся в нагреве **закалённой на мартенсит** углеродистой стали, выдержке при заданной температуре и охлаждении. Отпуск снижает хрупкость и внутренние напряжения, полученные при закалке.

По температуре нагрева различают три вида отпуска:

– **низкотемпературный (низкий) отпуск**,  $t_H = 120...250^0C$ , при этом отпуске мартенсит закалки превращается в мартенсит отпуска (рис. 3), снижаются закалочные напряжения, несколько повышается пластичность и вязкость, сохраняется высокая твёрдость 56...63 HRC и износостойкость;

– **среднетемпературный (средний) отпуск**,  $t_H = 350...500^0C$ , при этом отпуске мартенсит закалки превращается в троостит отпуска (рис. 3), снижаются закалочные напряжения, достигает максимального значения предел упругости, снижается твёрдость до ~ 40...54 HRC.

– **высокотемпературный (высокий) отпуск**,  $t_H = 500...650^0C$ , при этом отпуске мартенсит закалки превращается в сорбит отпуска (рис. 3), почти полностью снимаются закалочные напряжения, твёрдость снижается до ~ 170...300 HB, прочность снижается в 1,5...2 раза, пластичность и вязкость повышаются в несколько раз, достигается наилучшее соотношение прочности и вязкости, сталь становится малочувствительной к концентраторам напряжений и имеет высокую трещиностойкость  $K_{IC}$ .

Время выдержки при отпуске составляет 1...2 часа. Для крупных изделий и измерительного инструмента дают более длительный отпуск до 6...12 часов и более.

Охлаждение при отпуске должно быть медленным, например, на воздухе, чтобы полностью снять остаточные напряжения. Однако, если сталь склонна к отпускной хрупкости, охлаждение должно быть быстрым, в воде.

**Улучшение** – двойная термообработка, состоящая из закалки в воде и высокого отпуска.

## 2. Структура термообработанной стали

**Перлит + феррит, перлит, перлит + цементит** – структура доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной(соответственно) углеродистой стали после отжига II рода. Имеет зернистое строение. Перлит внутри зёрен может быть пластинчатым или зернистым. Отожжённая структура является равновесной и устойчивой. Она характеризуется малой прочностью, твёрдостью, высокой пластичностью, вязкостью, хорошей обрабатываемостью резанием.

**Сорбит закалки** – структура углеродистой стали после нормализации. Является механической смесью более тонких по сравнению с перлитом пластин феррита и цементита. Имеет твёрдость 250...350 НВ.

**Троостит закалки** – структура углеродистой стали после закалки в масле. Является механической смесью очень тонких пластин феррита и цементита. Имеет твёрдость 350...500 НВ. Микроструктура имеет вид тёмных образований. Пластинчатое строение удаётся различить при увеличении электронного микроскопа ~ 7000 раз.

**Сходство структур перлита, сорбита и троостита закалки** заключается в том, что они являются механическими смесями (эвтектоидами) пластин феррита и цементита. Их отличием является разная толщина (дисперсность) пластин феррита и цементита (табл. 1).

**Таблица 1**

**Средняя толщина пары пластин феррита и цементита, мкм**

Структура	Перлит	Сорбит закалки	Троостит закалки
Толщина пластин феррит + цементит	0,6 – 1,0	0,25 – 0,30	0,10 – 0,15

**Мартенсит закалки** – структура углеродистой стали после закалки в воде. Является пересыщенным твёрдым раствором внедрения углерода в  $\alpha$  – железе. Микроструктура имеет тонкопластинчатое (тонкоигольчатое) строение. Обладает высокой твёрдостью до 65 HRC, прочностью до 1000...2600 МПа и износостойкостью (положительные свойства), но характеризуется склонностью к хрупкому разрушению и закалочными напряжениями (отрицательные свойства).

**Троостит отпуска** – структура углеродистой стали после среднего отпуска. Является высокодисперсной механической смесью феррита и цементита. Микроструктура имеет тонкодисперсное зернистое строение.

**Сорбит отпуска** – структура углеродистой стали после высокого отпуска. Является мелкозернистой механической смесью феррита и цементита.

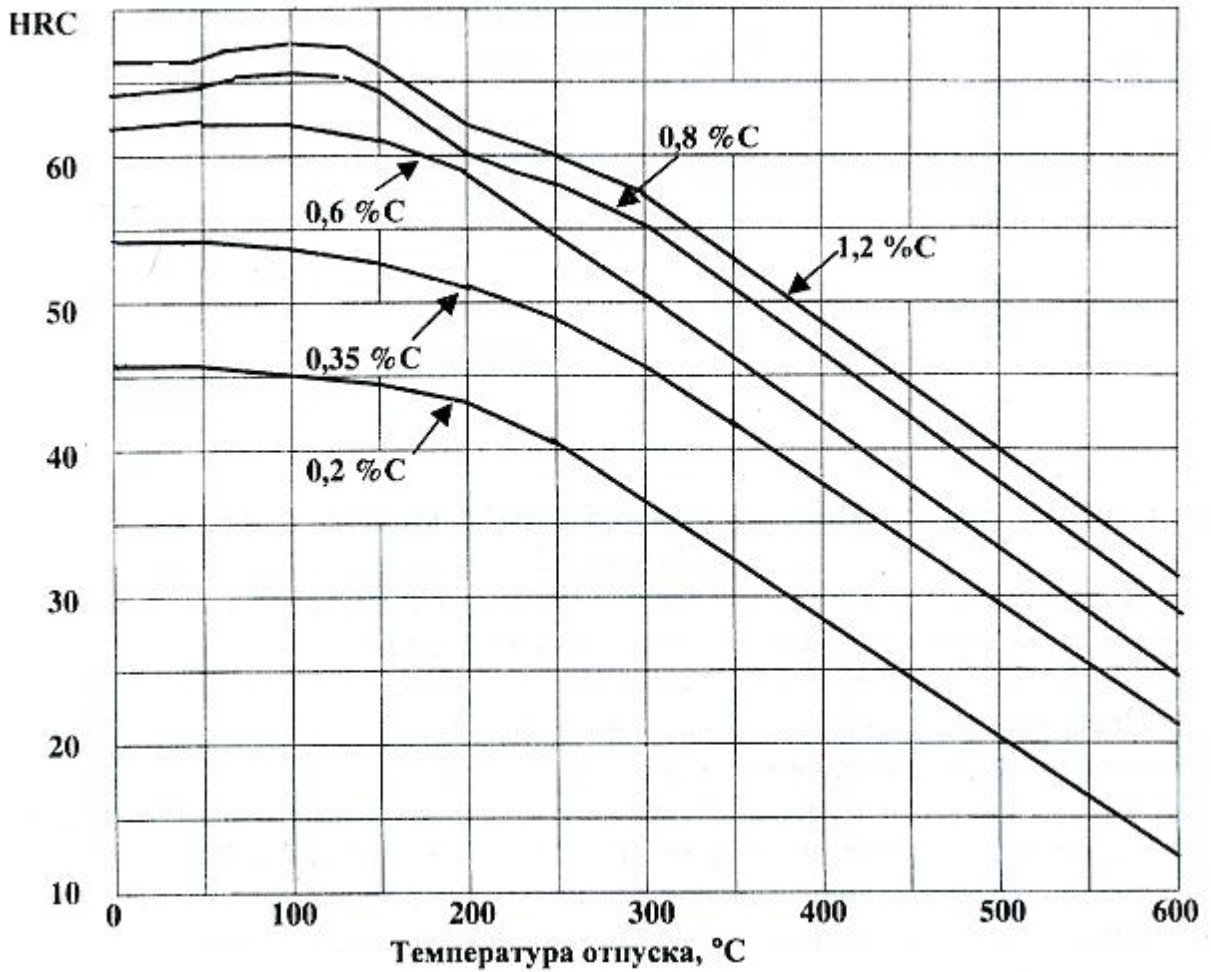


Рис. 16. Зависимость твёрдости от температуры отпуска сталей с различным содержанием углерода

#### 4. Порядок выполнения работы

1. Измерить на твердомере твёрдость образцов, прошедших различные виды термообработки и записать в таблицу.

2. Перевести значения твёрдости HRB и HRC в значения HB при помощи переводной таблицы.

3. Сравнить значения твёрдости HB для образцов с различной термообработкой.

4. Сделать выводы о влиянии различных видов термообработки стали на её твёрдость.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### Изучение пластической деформации при холодной осадке металла

#### Цель работы

1. Изучить сущность осадки, основные виды и причины деформации при осадке.
2. Изучить как влияет соотношение длины и поперечного сечения образца на деформацию при холодной осадке..

#### 1. Изучение основных определений и терминов

**Осадка** - кузнечная операция, в результате которой увеличивается площадь поперечного сечения исходной заготовки за счёт уменьшения её высоты.

Осадка вызывает неравномерность деформации, характеризующуюся искажением цилиндрической боковой поверхности заготовки.

**Бочкообразность** - искажение цилиндрической боковой поверхности заготовки, вызванное наличием контактного трения между поверхностями образца и инструмента.

Инструментами для проведения осадки являются части прессовой оснастки матрица и пуансон.

**Матрица** - неподвижная часть технологической оснастки прессы, являющаяся основной для формообразования.

**Пуансон** - подвижная часть технологической оснастки прессы, выполняющая операции деформирования.

#### 2. Деформация при холодной осадке

Для предотвращения эксцентричной осадки и потери устойчивости заготовки рекомендуется чтобы отношение высоты к диаметру торца детали не превышало 2,5...3.

Если цилиндрическую заготовку с диаметром  $d_0$  и объёмом  $V$  подвергнуть осадке (рис 17) от начальной высоты  $h_0$  до некоторой высоты  $h$  при условии отсутствия контактного трения, то получится цилиндр, средний диаметр которого может быть определён по формуле:

$$D_{ид} = 1,13 \sqrt{\frac{V}{h}} = d_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}}$$

В случае наличия контактного трения форма цилиндра искажается с образованием бочкообразной поверхности.

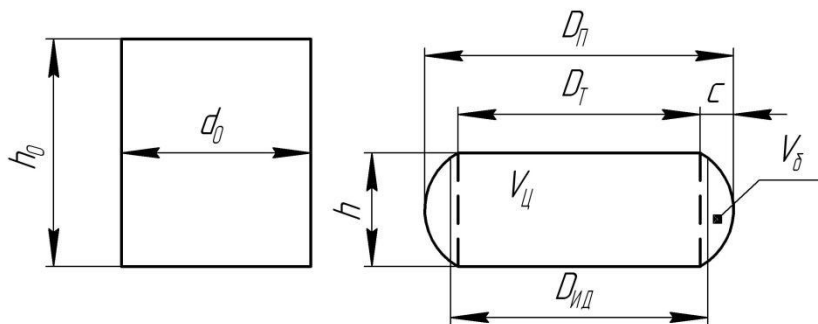


Рис. 17 - Схема осадки заготовки

Для расчёта коэффициента бочкообразования ( $\lambda$ ) потребуется определить начальный объём заготовки ( $V$ ), а также объём цилиндра ( $V_{Ц}$ ), диаметр которого равен усреднённой величине диаметров верхнего ( $D_{Т.В.}$ ) и нижнего ( $D_{Т.Н.}$ ) торцов деформированного образца.

Усреднённый диаметр торца определяется как среднее значение измеренных диаметров торцов:

$$D_T = \frac{(D_{Т.В.} + D_{Т.Н.})}{2}$$

Объём цилиндра с усредненным диаметром торца определим как:

$$V_{Ц} = \frac{\pi \cdot D_T^2 \cdot h}{4}$$

Объём, характеризующий бочкообразование определяется как разница между полным объёмом заготовки и объёмом цилиндра с усреднённым диаметром торца:

$$V_{б} = V - V_{Ц}$$

Коэффициент бочкообразования рассчитывается как отношение объёма бочки к общему объёму детали:

$$\lambda = \frac{V_{б}}{V}$$

Коэффициент бочкообразования может быть представлен в процентном отношении объёма бочки от общего объёма детали:

$$\lambda_{\%} = \lambda \cdot 100\%$$

Исходя из усреднённого диаметра торца и коэффициента бочкообразования, можно рассчитать стрелку бочки ( $c$ ):

$$c = \frac{3}{4} D_T \left( \sqrt{1 + \frac{\lambda}{1 + \lambda}} - 1 \right)$$

Зная стрелку бочки, можно определить расчётное значение максимального диаметра ( $D_{П\text{ расч}}$ ) деформированного цилиндра:

$$D_{П\text{ расч}} = D_T + 2c$$



### 3. Порядок выполнения работы

1. Провести измерение размеров заготовки  $h_0$ ,  $d_0$ ,
2. Провести осадку детали на прессе до высоты  $h$ .
3. Измерить размеры полученной детали:  $h$ ,  $D_{Т.Н.}$ ,  $D_{Т.В.}$ ,  $D_{П\text{ изм.}}$ .
4. Провести расчёты:  $h_0/d_0$ ,  $V$ ,  $D_{ид}$ ,  $D_{т}$ ,  $V_{ц}$ ,  $V_{б}$ ,  $\lambda$ ,  $c$ ,  $D_{П\text{ расч.}}$ .
5. Сравнить значения  $D_{П\text{ расч}}$  и  $D_{П\text{ изм.}}$ , они не должны сильно отличаться.
6. Сравнить значение коэффициента бочкообразования  $\lambda$  для образцов с различным соотношением  $h_0/d_0$ . Сделать выводы о влиянии геометрических
7. размеров образца ( $h_0/d_0$ ) на коэффициент бочкообразования  $\lambda$ .



## Приложение 1

### Соотношение чисел твёрдости по Бринеллю и Роквеллу

<b>HRB</b>	<b>HB</b>	<b>HRB</b>	<b>HB</b>	<b>HRC</b>	<b>HB</b>	<b>HRC</b>	<b>HB</b>
30	64	95,5	201	17	210	43	409
35	68	96,2	206	18	215	44	419
39	72	96,9	210	19	220	45	430
44	76	97,5	215	20	225	46	442
47	79	98,1	220	21	230	47	453
51	83	98,9	225	22	233	48	464
55	87	99,5	230	23	241	49	476
58	92	100,2	235	24	247	50	488
61	96	100,8	241	25	253	51	500
64	100	101,5	247	26	259	52	512
66	104	102,2	253	27	265	53	524
68	108	102,9	259	28	272	54	536
70	113	103,7	265	29	279	55	548
72	117	104,3	272	30	286	56	561
74	122	105	279	31	294	57	574
76	127	105,7	285	32	301	58	584
77,5	135	106,4	294	33	309	59	600
80,5	140	107,1	301	34	318	60	613
82	145	107,8	309	35	327	61	628
88,3	150	108,5	318	36	337	62	646
84,5	154	109,1	327	37	347	63	656
85,5	158	109,7	337	38	357	64	671
86	160	110,4	347	39	367	65	686
87	162	110,9	357	40	377	66	701
87,5	165	111,5	367	41	387	67	717
88,3	168	112,1	377	42	398	68	719
89	171	112,7	387				
89,7	174	113,3	398				
90,3	177	113,8	408				
91,2	180	114,4	419				
91,8	183	115	430				
92,6	186	115,6	442				
93,4	190	116,2	453				
94,9	197						