

# Лекция

1. Классификация и свойства чугунов
2. Термическая обработка
3. Механические, физические и технологические свойства материалов

# СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

## Классификация и свойства

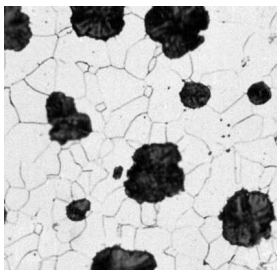
По химическому составу высокопрочные <sup>чугунов</sup>чугуны не отличаются от серых, но шаровидный графит является менее сильным концентратором напряжений, чем пластинчатый, поэтому прочность и пластичность этих чугунов выше, чем серых. Значения механических свойств высокопрочных чугунов приведены в таблице

Механические свойства и структура некоторых марок высокопрочного чугуна

Марка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	Структура
Высокопрочный чугун (ГОСТ 7293–85)				
ВЧ35	350	22	1400–1700	Ф
ВЧ45	450	10	1400–2250	Ф+П
ВЧ60	600	3	1920–2270	Ф+П
ВЧ80	800	2	2480–3510	П
ВЧ100	1000	2	2700–3600	П

В соответствии с ГОСТ 7293–85 марка высокопрочного чугуна состоит из букв ВЧ и числа, показывающего значение предела прочности при растяжении в кгс/мм<sup>2</sup>, например: ВЧ50.

По структуре металлической основы высокопрочные чугуны могут быть ферритными, ферритоперлитными или перлитными. *Ферритный чугун* состоит в основном из феррита и шаровидного графита; допускается до 2 % перлита (см. рис). Структура *перлитного чугуна* состоит из сорбитообразного или пластинчатого перлита и шаровидного графита, допускается до 20 % феррита.



Микроструктура ферритного высокопрочного чугуна

## ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

## Классификация и свойства

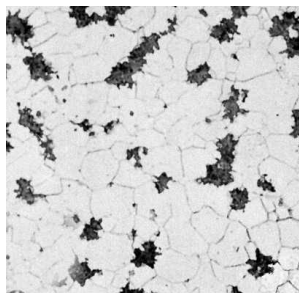
## чугунов

Высокопрочные чугуны способны заменять сталь во многих изделиях и конструкциях. Они могут работать при высоких циклических нагрузках и в условиях износа. Из них изготавливают оборудование прокатных станов, кузнечно-прессовое оборудование, корпуса паровых турбин, коленчатые валы в тракторо- и автомобилестроении, поршни двигателей и др.

В некоторых случаях для улучшения механических свойств чугунов применяют термическую обработку: закалку и отпуск для повышения прочности и отжиг – для увеличения пластичности.

**Ковкими называются чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают отжигом белых доэвтектических чугунов.** Графит в ковких чугунах формируется при термической обработке и в такой форме меньше снижает механические свойства металлической основы. Отливки из белых чугунов должны быть тонкостенными, толщиной не более 50 мм, иначе в сердцевине при кристаллизации выделяется пластинчатый графит и чугун становится непригодным для отжига. По этой причине в ковких чугунах находится пониженное содержание углерода и кремния: 2,4–2,9 % C; 0,8–1,5 % Si; 0,2–0,9 % Mn; до 0,2 % S; до 0,18 % P.

Отжиг на ферритный чугун проводится по режиму 1, что обеспечивает графитизацию в две стадии. Первая стадия графитизации при температуре 950 °C состоит в распаде цементита, находящегося в ледебурите. Это приводит к образованию структуры аустенита и включений углерода отжига. Вторая стадия графитизации протекает при медленном охлаждении в эвтектоидном интервале температур 720–740 °C. В процессе этой выдержки распадается цементит перлита. В результате такого отжига продолжительностью 60–80 часов формируется структура, состоящая из феррита и углерода отжига (см. рис. )



Микроструктура ферритного ковкого чугуна

# СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

## Классификация и свойства чугунов

Перлитный ковкий чугун получают по режиму 2 (см. рис). Продолжительность графитизации при температуре 1000 °С увеличивается, после чего отливки непрерывно охлаждают до комнатной температуры. Графитизации цементита, входящего в состав перлита, не происходит, поэтому чугун приобретает структуру перлита с включениями углерода отжига.

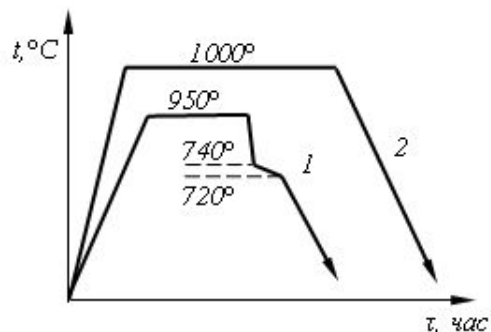


Схема режима отжига белого чугуна с получением ферритного (1) и перлитного (2) ковкого чугуна

В отличие от пластинчатого графита в сером чугуне хлопьевидные включения меньше снижают механические свойства металлической основы, что делает ковкий чугун прочнее серого, хотя уступает высокопрочному чугуну (см. табл.)

Механические свойства и структура некоторых марок ковкого чугуна

Марка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	Структура
Ковкий чугун (ГОСТ 1215–79)				
КЧ30–6	300	6	1000–1630	Ф+ до 10%П
КЧ35–8	350	8	1000–1630	
КЧ37–12	370	12	1100–1630	
КЧ45–7	450	7	1500–2070	
КЧ60–3	600	3	2000–2690	П+ до 20%П
КЧ80–1,5	800	1,5	2700–3200	

# СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ Классификация и свойства чугунов

Название «ковкий» условное, деформировать ковкие чугуны нельзя. В обозначении ковкого чугуна первая цифра показывает значение предела прочности при растяжении в кгс/мм<sup>2</sup>, вторая – относительное удлинение в %, например: КЧ45–7.

Ковкие чугуны широко применяются в сельскохозяйственном, автомобильном и текстильном машиностроении. Из них изготавливают детали высокой прочности, работающие в условиях износа при ударных и знакопеременных нагрузках. Хорошие литейные свойства исходного белого чугуна позволяют получать отливки сложной формы и малой толщины: крышки картеров, редукторов, ступицы, муфты, втулки, звенья и ролики цепей конвейера.

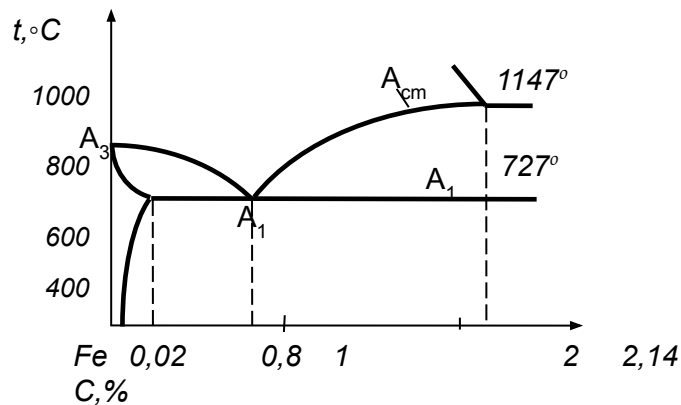
Недостатком ковких чугунов является их более высокая стоимость из-за продолжительного отжига.

## Практическое применение диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C

Диаграмму Fe-Fe<sub>3</sub>C используют для определения видов и температурных интервалов термической обработки стали; для назначения температурного интервала при обработке давлением; для определения температуры плавления и заливки сплавов.

Температуру плавления определяют по **линии ликвидуса**. Температура заливки должна быть выше линии ликвидуса. Температурный интервал при горячей обработке давлением находится ниже **линии солидуса** на 100 - 150 °С (верхний предел) и выше линии критических точек A<sub>3</sub> на 25 - 50 °С (нижний предел).

Основой процесса термической обработки является полиморфизм железа и его твердых растворов на базе α- и γ-железа. Полиморфные превращения стали данного состава происходят в определенном интервале температур, ограниченном нижней A<sub>1</sub> и верхними A<sub>3</sub> и A<sub>m</sub> критическими точками.



## Практическое применение диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C

В результате полиморфизма происходит перекристаллизация в твердом состоянии.

Перекристаллизация - это изменение кристаллического строения стали при ее нагреве или при охлаждении до определенных температур.

Таким образом, **термическая обработка** заключается в нагреве сплавов до определенных температур, выдержке их при этих температурах и последующем охлаждении с различной скоростью. Термическая обработка вызывает изменения в структуре материала в том случае, если сплав претерпевает превращения, вызванные полиморфизмом, диффузией или изменением растворимости одного компонента в другом. Часто эти процессы могут накладываться друг на друга и оказывать влияние на свойства материалов.

Термическая обработка – самый распространенный в современной технике способ изменения свойств металлов и сплавов. Термообработку применяют как промежуточную операцию для улучшения технологических свойств (обрабатываемости давлением, резанием и т. п.) и как окончательную операцию для придания металлу или сплаву такого комплекса свойств, который обеспечивает необходимые эксплуатационные характеристики изделия. Термическая обработка включает в себя следующие основные виды: отжиг I рода, отжиг II рода, закалку с полиморфным превращением, закалку без полиморфного превращения, отпуск, старение.

## Основные виды термической обработки

**Отжиг** - нагрев доэвтектоидной стали выше точки  $A_3$ , заэвтектоидной - выше точки  $A_m$  с последующим охлаждением вместе с печью. После полного отжига структура сплава состоит из феррита и перлита (доэвтектоидные стали). Отжиг снимает внутреннее напряжение, снижает твердость и повышает пластичность, устраняет химическую неоднородность. Неполный отжиг - нагрев выше точки  $A_{1'}$  но ниже  $A_3$ ; происходит неполная фазовая перекристаллизация.

**Отжиг I рода** – термическая операция, состоящая в нагреве металла в неустойчивом состоянии, полученном предшествующими обработками, для приведения металла в более устойчивое состояние. *Отжиг I рода* не связан с фазовыми превращениями. Различают гомогенизационный (диффузионный), рекристаллизационный отжиг и отжиг, уменьшающий напряжения.

**Отжиг II рода** основан на использовании фазовых превращений сплавов и состоит в нагреве выше температуры превращения с последующим медленным охлаждением для получения устойчивого структурного состояния сплавов.





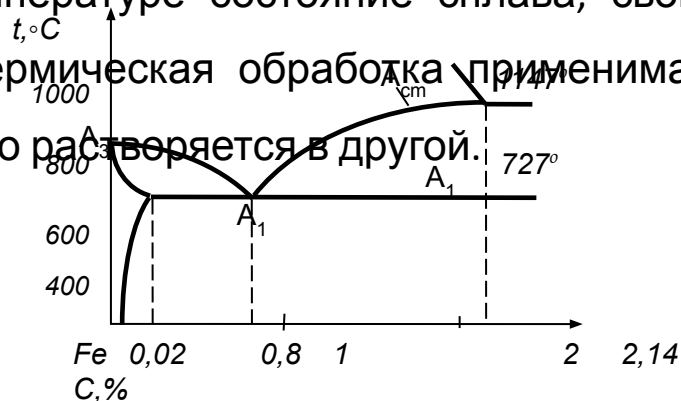
# Основные виды термической обработки

**Закалка** – это процесс термической обработки, заключающийся в нагреве до температуры выше критической и последующем быстром охлаждении, при котором образуется неравновесная структура. Существует закалка без полиморфного превращения и закалка с полиморфным превращением.

**Закалка** - нагрев выше точки  $A_3$ , быстрое охлаждение в воде или масле; повышает твердость и прочность, снижает пластичность.

**Закалка с полиморфным превращением** – это термическая обработка металлов и сплавов, при которой происходит мартенситное превращение высокотемпературной фазы. Эта закалка применима к тем металлам и сплавам, в которых при охлаждении перестраивается кристаллическая решетка.

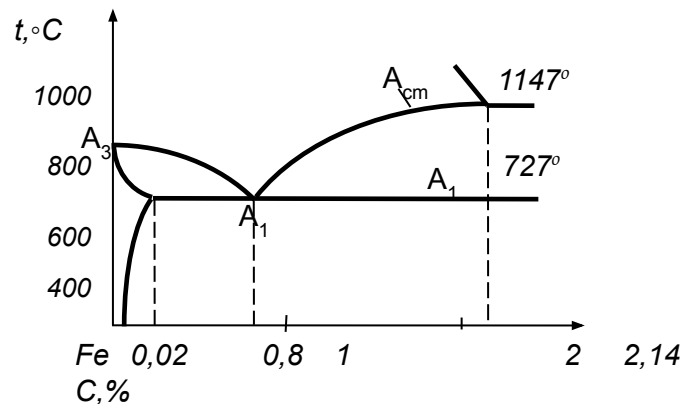
**Закалка без полиморфного превращения** – это термическая обработка, фиксирующая при более низкой температуре состояние сплава, свойственное ему при более высокой температуре. Такая термическая обработка применима к сплавам, у которых одна фаза полностью или частично растворяется в другой.



## Основные виды термической обработки

**Нормализация** - нагрев выше точки  $A_3$ , охлаждение на воздухе; нормализация приводит к измельчению зерна и повышению прочности.

**Отпуск** - нагрев ниже точки  $A_1$  и медленное охлаждение; его применяют как сопутствующую операцию после закалки для получения более устойчивых структур. **Высокий отпуск** (нагрев до температуры 700 °С) применяют для повышения пластичности и обрабатываемости при небольшом снижении прочности закаленной стали; **низкий отпуск** (нагрев до температуры 250 °С) применяют для повышения вязкости закаленной стали при сохранении прочности.



## Основные виды термической обработки

**Старение** – термическая обработка, при которой главным процессом является распад пересыщенного твёрдого раствора. В результате старения происходит изменение свойств закаленных сплавов. В отличие от отпуска, после старения увеличиваются прочность и твёрдость, и уменьшается пластичность. Изменения в свойствах некоторых металлов и сплавов, возникающие при комнатной температуре или при умеренном нагреве после предварительной термообработки (старение стали после закалки, естественное или искусственное старение в цветных сплавах) или после операции холодной обработки (деформационное старение). Изменение в свойствах часто, но не всегда, происходит благодаря фазовым превращениям, но старение никогда не приводит к изменению в химическом составе металла или сплава

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

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Свойства материалов

Способность металла сопротивляться воздействию внешних сил характеризуется **механическими свойствами**. Поэтому при выборе металла для изготовления деталей машин необходимо знать его механические свойства: прочность, упругость, пластичность, ударную вязкость и выносливость. Эти свойства определяют по результатам механических испытаний, при которых металлы подвергаются воздействию внешних сил (нагрузок). Внешние силы могут быть статическими, динамическими или циклическими (знакопеременными).

В зависимости от вида нагружения (растяжения, сжатия, изгиба, кручения, среза) и условий воздействия (температуры, скорости, периодичности и времени приложения) материалы принято характеризовать различными мерами сопротивления их деформации и разрушению – характеристиками механических свойств.

Механические свойства могут быть разделены на три основные группы. **Первая группа** содержит комплекс характеристик, определяемых при однократном кратковременном нагружении. К ним относятся упругие свойства: модуль нормальной упругости  $E$ , модуль сдвига и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Свойства материалов

Механические свойства могут быть разделены на три основные группы. **Первая группа** содержит комплекс характеристик, определяемых при однократном кратковременном нагружении. К ним относятся упругие свойства: модуль нормальной упругости  $E$ , модуль сдвига и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

Сопротивление малым упругопластическим деформациям определяется пределами упругости –  $\sigma_{УПР}$ , пропорциональности –  $\sigma_{пц}$  и текучести –  $\sigma_{0,2}$ .

Предел прочности –  $\sigma_B$ , сопротивление срезу –  $\tau_{ср}$  и сдвигу –  $\tau_{сдв}$ , твердость вдавливанием (по Бринеллю)  $HB$  и царапанием (по шкале Мооса), а также разрывная длина  $L_p$  являются характеристиками материала в области больших деформаций вплоть до разрушения.

Пластичность характеризуется относительным удлинением  $\delta$  и относительном сужением  $\psi$  после разрыва, а способность к деформации ряда неметаллических материалов – удлинением при разрыве  $\delta_p$ .

Кроме того, при ударном изгибе определяется ударная вязкость образца с надрезом  $KCU$  ( $KCV$ ,  $KCT$ ).

## Механические, физические и технологические свойства материалов. Свойства материалов

**Вторая группа** включает параметры, оценивающие сопротивление материалов переменным и длительным статическим нагрузкам. При повторном нагружении в области многоциклового усталости определяется предел выносливости на базе  $10^7$ – $2 \cdot 10^7$  циклов. Малоцикловая усталость определяется от многоциклового условно выбранной базой испытания ( $N \geq 5 \cdot 10^4$  циклов) и отличается пониженной частотой нагружения ( $f = 0,1$ – $5$  Гц). Сопротивление малоциклового усталости оценивается по долговечности при заданном уровне повторных напряжений или пределом малоциклового усталости на выбранной базе испытаний. Сопротивление длительным статическим нагрузкам определяется, как правило, при температуре выше  $20^\circ \text{C}$ .

Критериями сопротивления материалов длительному воздействию постоянных напряжений и температуры являются пределы ползучести и длительной прочности. Предел длительной прочности определяется при заданной базе испытаний (обычно 100 и 1000 часов), предел ползучести – по заданному допуску на остаточную (обычно 0,2 %) или общую деформацию при установленной базе испытаний.

## Механические, физические и технологические свойства материалов.

### Свойства материалов

**Третью группу** составляют характеристики разрушения. В инженерной практике эти характеристики используются сравнительно недавно.

Характеристики разрушения определяются на образцах с заранее выращенными начальными трещинами и оцениваются следующими основными параметрами: вязкостью разрушения, критическим коэффициентом интенсивности напряжений при плоской деформации  $K_{1C}$ , условным критическим коэффициентом интенсивности напряжений при плосконапряженном состоянии  $K_{IC}$ , удельной работой образца с трещиной  $K_{CT}$  и скоростью роста трещины усталости  $СРТУ$  при заданном размахе интенсивности напряжений  $\Delta K$ .

Практически все механические свойства (кроме упругих) в большей или меньшей степени структурно чувствительны и анизотропны. Резкая анизотропия упругих и других механических характеристик присуща многим неметаллическим материалам, что определяется их ориентированным строением. Некоторая анизотропия свойственна и большинству металлических материалов. Уровень прочности, пластичности, выносливости и характеристик разрушения в продольном направлении относительно оси деформации зерен материала обычно выше, чем в поперечном. Однако для некоторых, например титановых, сплавов характерна «обратная» анизотропия. Наблюдается значительная разница в пределах текучести при растяжении и сжатии у большинства магниевых деформируемых сплавов ( $\sigma_{сж} \ll \sigma_{0,2}$ ).

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Свойства материалов

К основным **физико-химическим свойствам** материалов относятся: температура плавления, плотность, электро- и теплопроводность, коэффициенты линейного и объемного расширения и др. *Температура* характеризует интенсивность теплового движения элементарных частиц – степень нагретости тела. При нагреве твердого тела при температурах меньших, чем температура плавления, т.е. при поступлении определенного количества тепла  $\Delta Q$ , повышаются теплосодержание (или энтальпия)  $\Delta S$  и температура на некоторую величину  $\Delta T$ .

Отношение количества тепла, сообщенного телу, к соответствующему изменению температуры при бесконечно малых изменениях температуры называют *теплоемкостью тела*  $C$  (Дж/К):

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{dQ}{dT}$$

Отношение теплоемкости тела  $C$  к массе  $M$  называют *удельной теплоемкостью*  $C_y$  (Дж/(кг·К)).

Отношение теплоемкости тела  $C$  к молярной массе вещества  $\mu$  называют *молярной теплоемкостью*  $C_\mu$  (Дж/(моль·К)).

Отношение теплоемкости тела к единице объема называют *удельной объемной теплоемкостью*  $C_v$  (Дж/(м<sup>3</sup>·К)), характеризующей изменение объемной концентрации тепла при нагреве (или охлаждении) на 1 °С.



## Механические, физические и технологические свойства материалов. Свойства материалов

Некоторые технологические способы (литье, некоторые виды сварки) связаны с изменением агрегатного состояния вещества. Для того чтобы расплавить металл, нагретый до температуры плавления, необходимо затратить определенное количество тепловой энергии. Для кристаллизации жидкого металла при температуре кристаллизации необходимо отвести такое же количество тепла.

Количество тепла, необходимое для расплавления единицы массы металла при температуре плавления, называют *удельной теплотой плавления*  $L$  (Дж/кг).

Еще одной характеристикой теплопроводности сплава или металла является *коэффициент теплопроводности*, который равен количеству теплоты, протекающему за единицу времени через единицу поверхности при перепаде температур в  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  на единицу длины  $\lambda$  (Вт/(м·К)).

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Свойства материалов

Коэффициент теплопроводности зависит от температуры. Для сталей, как правило, с увеличением температуры он уменьшается, но могут быть и другие зависимости: сначала рост, затем уменьшение. Однако при тепловых расчетах и удельную теплоемкость, и коэффициент теплопроводности считают постоянными, не зависящими от температуры.

С изменением температуры твердых и жидких тел изменяются их размеры и объем. Величина этих изменений характеризуется *коэффициентом линейного расширения*:  $\alpha = (1/t)(l_t - l_0)/l_0$  и *коэффициентом объемного расширения*:  $\beta = (1/t)(v_t - v_0)/v_0$ .

При нагревании тел происходит изменение их плотности, которая зависит от величины коэффициента объемного расширения.

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Свойства материалов

**Технологические свойства** металлов и сплавов характеризуют их способность поддаваться различным видам горячей и холодной обработки. Технологические свойства часто определяют выбор материала для конструкции. Разрабатываемые материалы могут быть внедрены в производство только в том случае, если их технологические свойства удовлетворяют необходимым требованиям. Показатели технологических свойств определяют специальными испытаниями на ковкость, обрабатываемость, свариваемость, а также литейными пробами.

**Литейные свойства** характеризуют способность металла или сплава заполнять литейную форму, обеспечивать получение отливки заданных размеров и конфигурации без пор и трещин во всех ее частях.

**Ковкость** – способность металла или сплава деформироваться с минимальным сопротивлением под действием внешней приложенной нагрузки и принимать заданную форму. Ковкость зависит от многих внешних факторов, в частности от температуры нагревания и схемы напряженного состояния.

**Свариваемостью** называют способность материала образовывать неразъемные соединения с комплексом свойств, обеспечивающих работоспособность конструкции. По степени свариваемости материалы подразделяют на хорошо и ограниченно свариваемые. Свариваемость зависит как от материала свариваемых заготовок, так и от выбранного технологического процесса сварки.

**Обрабатываемостью** называют свойство металла поддаваться обработке резанием. Критериями обрабатываемости являются параметры режимов резания и качество поверхностного слоя.

## Механические, физические и технологические свойства материалов. Свойства материалов

Работоспособность конструкции определяется эксплуатационными или служебными характеристиками материалов, применяемых для ее изготовления. В зависимости от условий эксплуатации и рабочей среды кроме высокой прочности к машиностроительным материалам могут предъявляться и другие требования: **жаропрочность**, т. е. сохранение высоких механических характеристик при высоких температурах; **коррозионная стойкость** при работе в различных агрессивных средах; повышенная **износостойкость**, необходимая, если детали в процессе работы подвергаются истиранию, и т. п. В некоторых случаях материалы должны обладать способностью образовывать неразъемные соединения с помощью сварки либо пайки с другими материалами, в частности с керамикой, графитом и др.

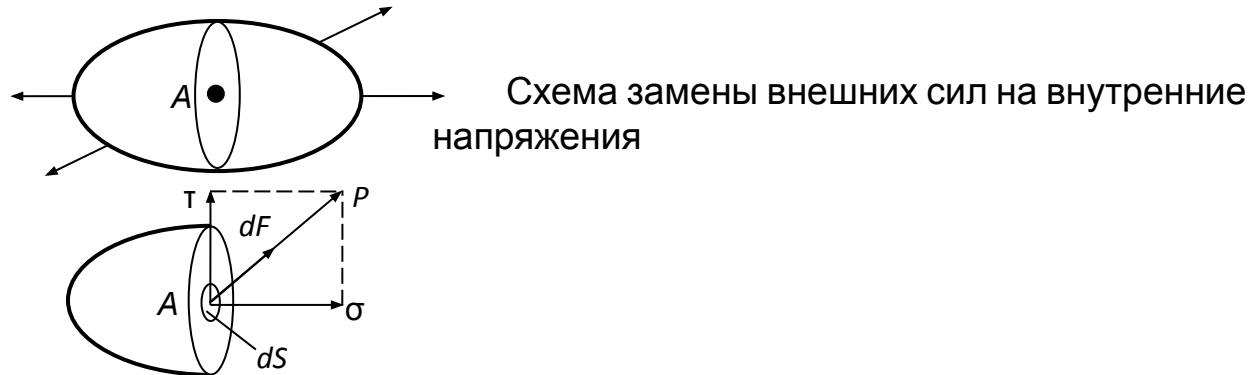
Следовательно, при выборе материала для создания технологичной конструкции необходимо комплексно учитывать его прочностные, технологические и эксплуатационные характеристики

Vp

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Деформации и напряжения

**Напряжение** – мера внутренних сил, возникающих в материале под влиянием внешних воздействий (нагрузок, изменения температуры и пр.). Для изучения напряжений через произвольную точку тела мысленно проводится сечение (см. рис.) и отбрасывается одна из половин тела. Действие отброшенной половины на другую половину заменяют внутренними силами.



В малом элементе сечения площадью  $dS$  в окрестности произвольной точки  $A$  действует произвольно направленная внутренняя сила  $dF$ .

Отношение  $p = dF/dS$  называется *вектором напряжения* в точке  $A$  по площадке  $dS$ . Составляющие вектора напряжения, действующие по нормали к площадке, обозначаются  $\sigma$  и называются *нормальными напряжениями*, а действующие вдоль площадки – *касательными напряжениями*  $\tau$  в точке  $A$  по площадке  $dS$ , причём  $\sigma^2 + \tau^2 = p^2$ .

В общем случае напряженное состояние тела в точке  $A$  характеризуется совокупностью всех векторов напряжений для всевозможных сечений (площадок, проходящих через точку  $A$ ), а значит, и для любого направления. Напряженное состояние в точке  $A$  может быть определено с помощью тензора напряжений и характеризуется девятью компонентами по трем осям координат (три нормальных и шесть касательных). Касательные напряжения попарно равны ( $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ,  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ ,  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ), т. е. остается всего шесть компонентов. Напряжения выражаются в паскалях (Па).

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Деформации и напряжения

$$T_H = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

Для тензора характерным является закон, по которому преобразуются его компоненты при повороте осей координат. При повороте системы координат можно отыскать такое ее положение, когда касательные напряжения будут равны нулю. Эти направления называют *главными*.

Главные направления тензора напряжений определяются условием, зависящим от трех инвариантов  $I_1, I_2, I_3$ .

*Первым инвариантом*  $I_1$  тензора напряжений является сумма нормальных напряжений:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = 3\sigma_0.$$

Среднее значение трёх нормальных напряжений называют *гидростатическим давлением*:

$$\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3.$$

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Деформации и напряжения

Гидростатическому давлению соответствует тензор напряжений, нормальные компоненты которого равны  $\sigma_o$ , а касательные – нулю. Поскольку гидростатическое давление не вызывает в металле пластических деформаций, его исключают из системы напряжений. Оставшуюся часть тензора называют *девиатором напряжений*  $S_\sigma$ :

$$S_\sigma = \begin{Bmatrix} S_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & S_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & S_z \end{Bmatrix}.$$

Второй инвариант  $I_2$  тензора напряжений определяется следующим выражением:

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2$$

Величины, пропорциональные корню квадратному из второго инварианта девиатора напряжений, называют *интенсивностью касательных напряжений*  $\tau_i$  и *интенсивностью нормальных напряжений*  $\sigma_i$ :

$$\tau_i = \sqrt{I_2(S_\sigma)} \quad \sigma_i = \sqrt{3I_2(S_\sigma)}$$

Напряжения в материале могут возникнуть при физико-химических процессах, при неравномерном распределении температуры (при нагреве и охлаждении металла), а также вследствие фазовых превращений при термической обработке. При этом напряжения, возникающие в объеме всего тела, называют *макронапряжениями* (или напряжениями I рода), а напряжения, возникающие в объеме одного зерна, называют *микронапряжениями* (или напряжениями II рода). Напряжения, возникающие в объемах порядка нескольких параметров кристаллической решетки, называются *субмикроскопическими* (или напряжениями III рода).

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Деформации и напряжения

Гидростатическому давлению соответствует тензор напряжений, нормальные компоненты которого

Деформациями называют изменения формы или размеров тела (или части тела) под действием внешних сил, а также при нагревании или охлаждении и других воздействиях, вызывающих изменение относительного положения частиц тела (см. рис.)

С геометрической точки зрения деформированное состояние в точке описывается тензором деформации:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_z \end{vmatrix}.$$

Компоненты  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  характеризуют линейные деформации волокон, расположенных по осям  $x, y, z$ : относительные удлинения (или относительные укорочения), а компоненты  $\varepsilon_{yz}$  – углы поворота двух взаимно перпендикулярных до деформации волокон (или деформации сдвига).

Для компонент деформаций сдвига справедливы равенства

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} \quad \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2} \gamma_{zx} \quad \varepsilon_{zy} = \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \gamma_{yz}$$

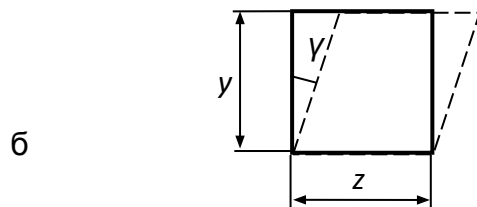
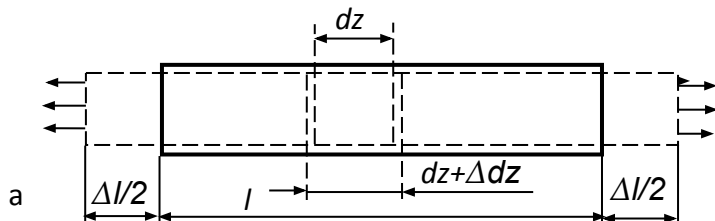


Схема деформации:  
а – линейная деформация;  
б – угловая деформация



# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Деформации и напряжения

При повороте системы координат все компоненты тензора деформации преобразуются по определенным линейным относительно направляющих косинусов соотношениям. В теории деформации и линейных преобразований доказывается, что из всех возможных направлений осей координат существует тройка взаимно перпендикулярных направлений (главных направлений), относительно которых все сдвиговые компоненты деформации равны нулю. Главные направления деформаций определяются тремя скалярными величинами, не зависящими от положения системы координат, и поэтому называемыми инвариантами.

Первый инвариант  $I_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$  используется для записи условия постоянства объема деформируемого металла

$$I_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$$

Второй инвариант тензора деформации имеет вид:

$$I_2 = (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)$$

Величина, пропорциональная корню квадратному из второго инварианта, называется *интенсивностью деформаций* и используется для характеристики деформаций в общем случае деформированного состояния:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}$$

Простейшие схемы деформирования – растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб. Первые две схемы (растяжение и сжатие) могут быть описаны только линейными компонентами, вторые (сдвиг, кручение, изгиб) – только сдвиговыми (угловыми).

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Испытание материалов на растяжение и ударную вязкость

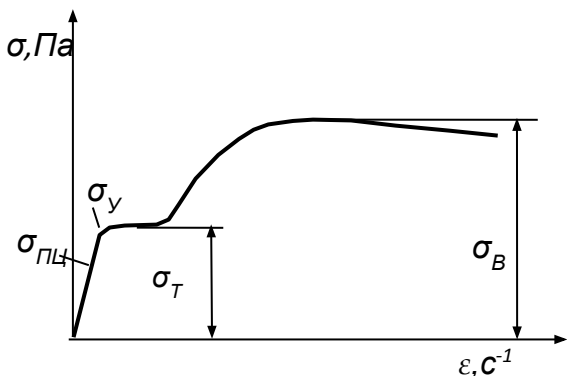
Испытания на растяжение относят к самым распространенным видам механических испытаний, при которых определяется прочность и пластичность материала. Результаты экспериментальных исследований механических свойств материала при одноосном растяжении обычно изображают в виде графиков зависимости напряжения от деформации (см. рис.). Чаще всего испытания проводят при «комнатной» температуре,

т. е. При  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  (или  $T = 293\text{ K}$ ), и при постоянной и достаточно малой скорости деформации ( $\dot{\epsilon} \approx 1 \cdot 10^{-2}\text{ с}^{-1}$ ). При этом силу  $P$ , растягивающую образец, относят к первоначальной площади поперечного сечения  $F_0$ , а удлинение образца  $\Delta l$  – к первоначальной расчетной длине образца  $l_0$ :

т. е. не учитывают изменение площади поперечного сечения образца и предполагают равномерное деформирование образца по его длине.

Условный предел прочности  $\sigma_B$  определяется как отношение максимальной силы  $P_{max}$  к первоначальной площади поперечного сечения образца:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}.$$



Условная диаграмма растяжения

## Механические, физические и технологические свойства материалов.

Для определения действительного предела прочности  $\sigma_b$  максимальную силу  $P_{max}$  необходимо относить к действительной площади поперечного сечения образца. Поскольку длина образца после деформации  $dz(1 + \varepsilon_z)$ , а площадь поперечного сечения равна  $F$ , то согласно постоянству объема до и после деформации,  $F_0 dz = F dz(1 + \varepsilon_z)$ , откуда

На диаграмме растяжения наблюдаются области упругой деформации, исчезающей после снятия вызвавшей ее нагрузки, и пластической. Между напряжениями и деформациями в области упругости соблюдается закон Гука

где  $E$  – модуль упругости при растяжении (модуль Юнга).

Модуль упругости  $E$  является константой материала, характеризующей его жесткость. Величина  $E$  выражает сопротивляемость материала упругой деформации при растяжении. Следует отметить, что величина модуля упругости даже для одного и того же материала не является постоянной и колеблется в некоторых пределах. Однако в инженерных расчетах этой разницей можно пренебречь и принять для большинства материалов одно и то же значение  $E$  как при растяжении, так и при сжатии. Модуль упругости является коэффициентом пропорциональности между нормальным напряжением  $\sigma$  и относительной деформацией  $\varepsilon$  и выражается зависимостью  $E = \sigma/\varepsilon = tg \alpha$ ,

где  $\alpha$  – угол наклона прямолинейной части диаграммы растяжения  $\sigma = f(\varepsilon)$  к оси абсцисс.

Аналогично при сдвиге величина  $G$  является коэффициентом пропорциональности между касательным напряжением  $\tau$  и относительным сдвигом  $\gamma$  и называется модулем упругости при сдвиге или модулем сдвига. Величина  $G$  выражается зависимостью  $G =$

## Механические, физические и технологические свойства материалов.

### Испытание материалов на растяжение и ударную вязкость

В связи с тем, что при растяжении или сжатии материал испытывает как продольные  $\varepsilon$ , так и поперечные  $\varepsilon_1$  деформации, их отношение может быть выражено через коэффициент поперечной деформации, называемый также *коэффициентом Пуассона*  $\mu$ :

$$\mu = \varepsilon_1 / \varepsilon.$$

Коэффициент Пуассона так же, как и модули упругости, является характеристикой упругих свойств материала. Все три константы упругости материала связаны между собой следующей зависимостью:

$$G = E/2(1 + \mu).$$

Наибольшее напряжение, при снятии которого остаточные деформации не превышают некоторой заданной малой величины (обычно менее 0,2 %), называют *пределом упругости*  $\sigma_y$ .

Если за участком пропорциональности напряжения и деформации следует площадка текучести, соответствующая увеличению деформации при постоянном напряжении, то это напряжение называют *пределом текучести*  $\sigma_T$ . При отсутствии таковой площадки пределом текучести считают напряжение, соответствующее некоторому установленному небольшому уровню деформации (например, 0,2%) –  $\sigma_{0,2}$ .

Область справедливости закона Гука устанавливается пределом пропорциональности  $\sigma_{пц}$ . Поскольку пропорциональность напряжения деформации обычно выполняется во всей области упругости, при практических расчетах предел пропорциональности принимают равным пределу упругости (или меньше).

Для использования диаграмм растяжения при других, более сложных схемах деформирования  $\varepsilon_i$  напряжение заменяют интенсивностью напряжений  $\sigma_i$ , а деформацию – интенсивностью деформаций

**Относительное сужение  $\psi$**  – это соотношение разности начальной и конечной площадей ( $S_0 - S_K$ ) поперечного сечения образца после разрыва к начальной площади  $S_0$  поперечного сечения, выраженное в процентах:

$$\psi = [(S_0 - S_K) / S_0] \cdot 100\%.$$

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

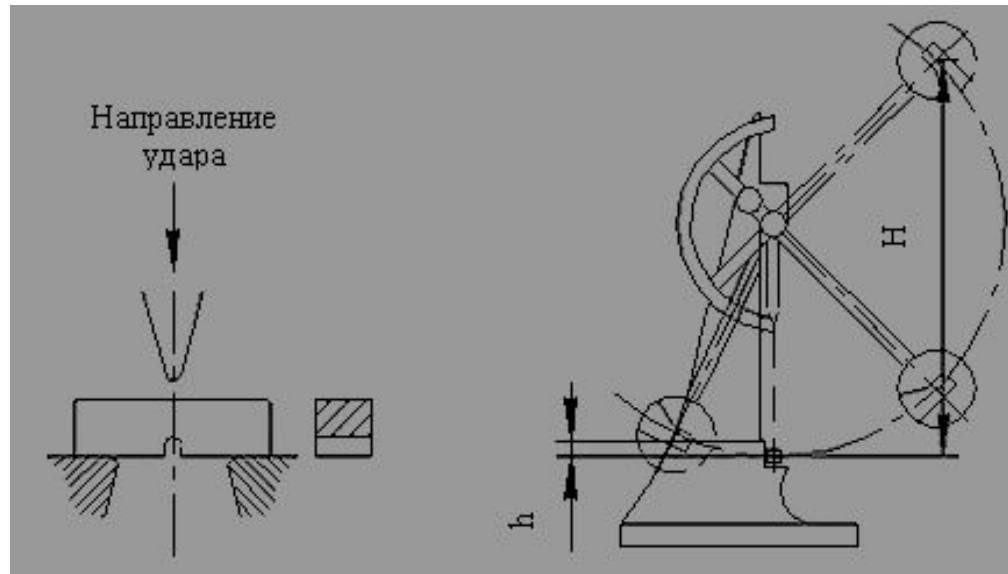
## Испытание материалов на растяжение и ударную вязкость

Испытания на растяжение не всегда оценивают склонность материала к хрупкому разрушению, поэтому применяют испытания для определения ударной вязкости, отличающиеся от обычных испытаний на растяжение тем, что образец испытывается на изгиб при ударном (динамическом) нагружении.

**Ударная вязкость** – способность материала сопротивляться динамическим нагрузкам, определяется как отношение затраченной на излом работы  $A$  к площади его поперечного сечения  $S$  в месте надреза до испытания:  $KC = A/S$ .

Для испытания (ГОСТ 9454–78) изготавливают стандартные образцы, имеющие форму квадратных брусков с надрезом. Форма надреза может быть округлой, V-образной и в виде трещины. Испытывают образцы на маятниковых копрах. Свободнопадающий маятник копра ударяет по образцу со стороны, противоположной надрезу. При этом фиксируется работа, затраченная на излом образца (см. рис.).

Схема испытания на ударную вязкость:  
а – образец;  
б – маятниковый копер



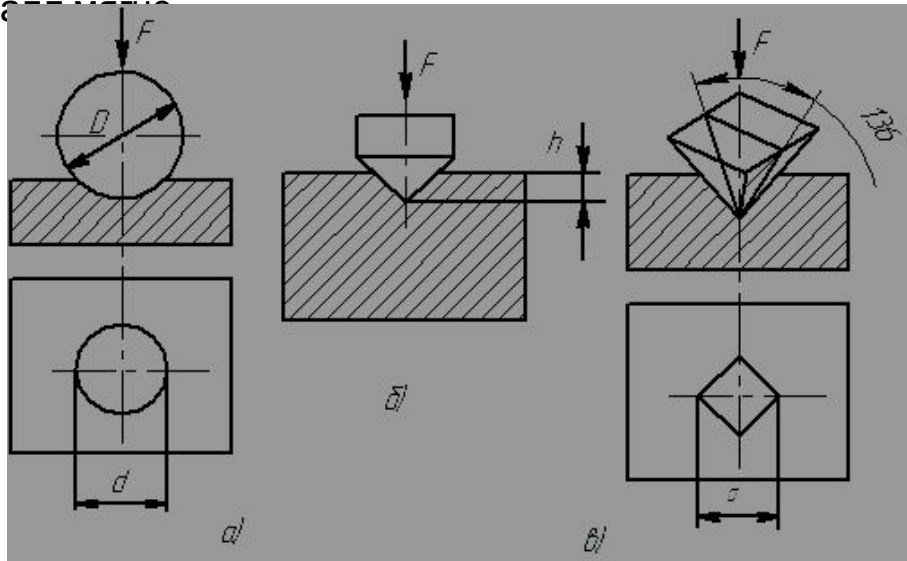
Определение ударной вязкости особенно важно для металлических материалов, работающих при отрицательных температурах и проявляющих склонность к хладноломкости. Чем ниже температура, при которой вязкое разрушение материала переходит в хрупкое, и больше запас его вязкости, тем он надежнее.

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Определение твердости

**Твердость** – способность материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого материала. Высокой твердостью должны обладать металлорежущие инструменты (резцы, сверла, фрезы и т. д.), а также поверхностно упрочненные детали. Твердость металла определяют способами Бринелля, Роквелла, Виккерса и др. (см. рис.).

**Способ Бринелля** (ГОСТ 9012–59) основан на том, что в плоскую поверхность металла вдавливают под постоянной нагрузкой закаленный шарик (индентор). Диаметр шарика и величину нагрузки устанавливают в зависимости от твердости и толщины испытуемого металла. Испытание выполняют на приборе ТШ (твердомер шариковый): столик прибора с установленным на нем образцом поднимают до соприкосновения с шариком. Груз опускается и вдавливает шарик в испытуемый образец. На поверхности образца образуется отпечаток. Чем больше диаметр отпечатка, тем металл мягче.



Схемы определения твердости:  
а – по Бринеллю;  
б – по Роквеллу;  
в – по Виккерсу

За меру твердости НВ (МПа) принимают отношение нагрузки  $F$  к площади поверхности отпечатка шарика диаметром  $D$ :

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

## Механические, физические и технологические свойства материалов.

### Определение твердости

Диаметр отпечатка измеряют оптической лупой, значение твердости определяют по таблице. Метод прост, достаточно точен и пригоден для измерения твердости материалов до HB 6500 (средний уровень твердости).

Для испытания твердых материалов применяют *способ Роквелла* (ГОСТ 9013–59). Он назван по имени американского металлурга XX века С. П. Роквелла.

По способу Роквелла твердость металлов определяют вдавливанием в испытываемую поверхность алмазного индентора в виде конуса с углом при вершине 120° (шкалы А и С) или стального закаленного шарика диаметром 1/16 дюйма, т. е. 1,588 мм (шкала В). Значение твердости отсчитывают по циферблату индикатора, установленного на приборе.

Твердость по Роквеллу измеряют в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мкм:

$$HRC = \frac{0,2 - (H - h)}{0,002}, \quad HRB = \frac{0,26 - (H - h)}{0,002}.$$

При определении твердости *способом Виккерса* (ГОСТ 2999–75) – от названия английского военно-промышленного концерна «ВИККЕРС» – в поверхность образца вдавливается алмазный индентор (наконечник), имеющий форму правильной четырехгранной пирамиды с двугранным углом при вершине 136°. При испытаниях применяют нагрузки от 50 до 1000 Н в зависимости от твердости образца.

Числовое значение твердости определяют следующим образом: замеряют с помощью микроскопа длину обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки и по среднему значению длины диагонали находят в таблице соответствующее значение твердости.

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Определение твердости

Для измерения твердости металлов в малых объемах (например, в зернах металла) применяют способ определения *микротвердости*, подобный способу Виккерса.

Для соизмерения значений твердости, определенных различными способами, применяются переводные таблицы (пример: см. табл.).

Для оценки механических свойств материалов и приблизительного значения предела прочности можно использовать значение твердости, определенной по испытаниям способом Бринелля. Эмпирическое соотношение выглядит следующим образом

$$\sigma_B \approx 0,33HB_{max},$$

где  $\sigma_B$  – временное сопротивление;  $HB_{max}$  – максимальное значение твердости при нагрузке, с которой начинается плавное понижение твердости.

### Перевод величин

d <sub>10'</sub> мм	По твердости		По Роквеллу		По Виккерсу Hv, МПа
	Бринеллю HB, МПа	HRA	HRC	HRB	
2,34	6880	84,5	65,0	–	9400
2,50	6010	81,0	59,0	–	7560
2,60	5550	79,0	56,0	–	6530
2,68	5220	78,0	53,0	–	5940
2,78	4850	76,0	50,0	–	5420
2,88	4510	74,5	47,5	–	4950
2,98	4200	73,0	44,0	–	4490
3,10	3880	71,0	41,0	–	4060



## Механические, физические и технологические свойства материалов.

### Упругая и пластическая деформации, наклеп и рекристаллизация

Любая деформация может осуществляться в твердых телах путем относительного смещения атомов. В твердых телах различают **упругую деформацию** (исчезающую после устранения воздействия, вызвавшего ее) и **пластическую** (оставшуюся после удаления нагрузки).

**Упругая деформация** для твердых тел обычно мала и пропорциональна приложенному напряжению, величина смещения атомов из положения равновесия не превышает расстояния между соседними атомами. Смещение атомов из положения равновесия является реакцией на действие внешних сил на все твердое тело или его отдельную часть. В любых условиях нагружения действие внешних сил на тело уравнивается противодействием межатомных, стремящихся вернуть атомы в положение минимума потенциальной энергии.

Однако увеличение потенциальной энергии тела за счет смещения атомов из положения равновесия не происходит безгранично. При достижении определенного предела потенциальной энергии атомы получают возможность смещаться на расстояния большие, чем межатомные расстояния ненагруженного твердого тела. В этом случае после снятия внешних усилий атомы не возвращаются в свои исходные положения равновесия, а занимают новые положения устойчивого равновесия. Сумма смещений атомов в новые положения равновесия создает **пластическую деформацию** или остаточное изменение формы и размеров твердого тела в результате действия внешних сил.

Под нагрузкой атомы всегда смещены из положений равновесия, так как действие внешних сил уравнивается действием внутренних сил, вызванных смещением атомов из положений равновесия. Отсюда следует, что в условиях пластического **деформирования общая (полная) деформация** содержит как пластическую составляющую, так и упругую, исчезающую после снятия деформирующих сил.

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Упругая и пластическая деформации, наклеп и рекристаллизация

Основным механизмом пластической деформации является движение дислокаций (*dislocatio* – смещение, перемещение). Осуществляется пластическая деформация скольжением и двойникованием (см. рис.).

Как следует из диаграмм растяжения, при деформации сталей при комнатной температуре предел текучести увеличивается с ростом деформации, то есть материал в этих условиях упрочняется.

**Упрочнение** – изменение структуры и свойств металлического материала, вызванное пластической деформацией.

Наибольшую сопротивляемость пластическому деформированию должен оказывать металл с очень малой плотностью дислокаций  $\rho$ . По мере увеличения плотности дислокаций  $\rho$  сопротивление пластическому деформированию уменьшается (см. рис.).

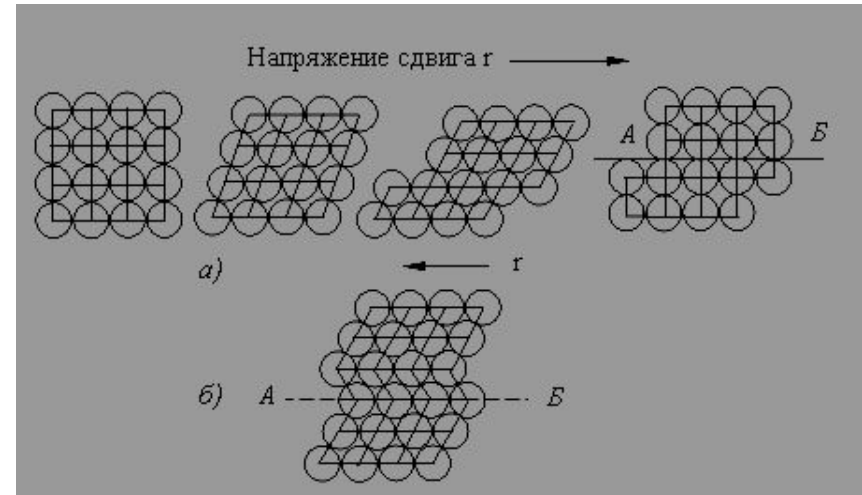
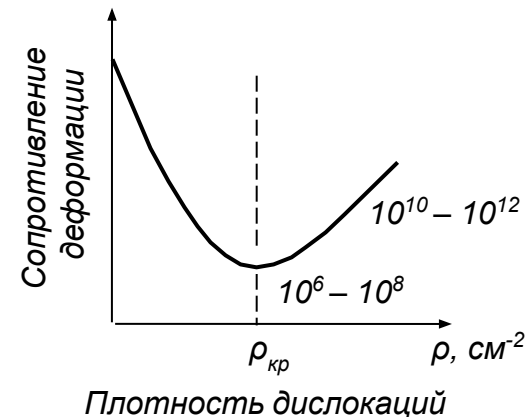


Схема пластической деформации скольжением (а) и двойникованием (б)



Зависимость сопротивления деформированию от плотности дислокаций

## Механические, физические и технологические свойства материалов. Упругая и пластическая деформации, наклеп и рекристаллизация

Это происходит до достижения некоторого критического значения плотности дислокаций  $\rho_{кр}$ , когда начинается взаимодействие силовых полей, окружающих дислокации, что и вызывает увеличение сопротивления пластическому деформированию.

Следовательно, увеличение сопротивления пластическому деформированию можно получить двумя путями: наклепом металла, т. е. прямым повышением плотности дислокаций или доведением плотности дислокаций до очень малого значения.

*Наклепом* называется упрочнение металла при холодной пластической деформации. В результате наклепа прочность ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ , твердость и др.) повышается, а пластичность и ударная вязкость ( $\delta$ ,  $\psi$ ,  $KCU$ ) – уменьшаются. Упрочнение возникает вследствие увеличения числа дефектов кристаллической структуры, которые затрудняют движение дислокаций и, следовательно, повышают сопротивление деформации и уменьшают пластичность.

Наклеп является одним из важнейших способов изменения свойств, особенно для сплавов, не упрочняющихся термической обработкой, и для металлов, обладающих пластичностью. Методы упрочняющего воздействия можно разделить на поверхностные (обкатка роликами, дробеструйная обработка) и сквозные (прокатка листов, волочение проволоки). Обработка металлов резанием также приводит к наклепу и изменению структуры в тонком поверхностном слое, что необходимо учитывать при последующей эксплуатации изделий.

Таким образом, пластические деформации вызывают повышение плотности дислокаций, искажение кристаллической решетки и приводят к увеличению напряжения, при котором возможны дальнейшие деформации.

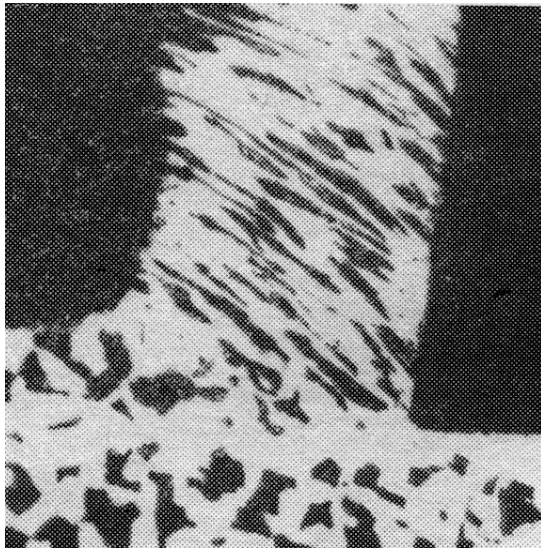
Второй способ – создание металлов и сплавов с бездефектной структурой – является более прогрессивным. В настоящее время получают кристаллы небольших размеров (длиной 2–10 мм и толщиной 0,5–2,0 мкм), так называемые «усы», практически без дислокаций, с прочностью, близкой к теоретической. Такие кристаллы нашли свое применение для армирования волокнистых композиционных материалов, в микроэлектронике и т. д.

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

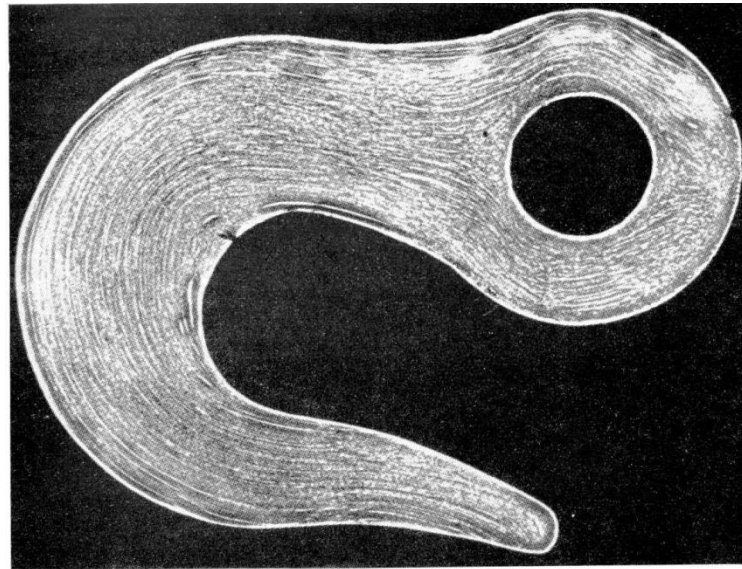
## Упругая и пластическая деформации, наклеп и рекристаллизация

При деформировании округлые зерна заменяются вытянутыми в направлении деформации, образуется так называемая *текстура* (*textura* – ткань, связь, строение) – анизотропная поликристаллическая или аморфная среда, состоящая из кристаллов или молекул с преимущественной ориентировкой. Текстуры могут быть осевыми – с предпочтительной ориентировкой элементов текстуры относительно одного особого направления, плоскими – с ориентировкой относительно особой плоскости и полными – при наличии особой плоскости и особого в ней направления (см. рис.). Текстура создает анизотропию свойств.

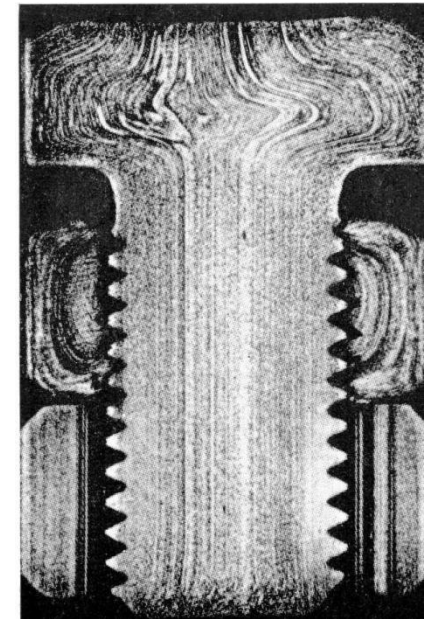
а



б



в



Образование текстуры:

а – в стружке, б – в соединительном крюке железнодорожного вагона, полученного ковкой из куска катаного круга из среднеуглеродистой стали; в – в головке болта, полученной осадкой, в основной части, полученной вытяжкой, в гайках, из которых одна была выточена из пруткового проката, а другая – откована

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Упругая и пластическая деформации, наклеп и рекристаллизация

При деформировании округлые зерна заменяются вытянутыми в направлении деформации, образуется

Упрочненный металл обладает повышенным запасом внутренней энергии, т. е. находится в неравновесном состоянии. Для приведения металла в равновесное состояние его необходимо нагреть. При нагреве наклепанного металла в нем протекают следующие процессы:

частичное восстановление структурного совершенства в результате уменьшения точечных дефектов за счет увеличения подвижности атомов (избыточные вакансии и межузельные атомы взаимодействуют между собой, а также поглощаются дислокациями при перераспределении последних при нагреве) и снижение внутренних напряжений (процесс *возврата*);

уменьшение плотности дислокаций за счет аннигиляции противоположных по знаку дислокаций и образование субзерен (полигонов), свободных от линейных несовершенств за счет выстраивания дислокационных стенок (процесс *полигонизации*);

зарождение и рост новых равноосных зерен вместо ориентированной волокнистой структуры деформированного металла (процесс *рекристаллизации*), рис. 1а.

Процесс рекристаллизации начинается с образования зародышей новых зерен и заканчивается полным замещением деформированного зерна мелкими равноосными зернами (*первичная рекристаллизация*), рис. 1б, в результате чего полностью снимается наклеп, созданный при пластическом деформировании (снижаются прочность и твердость металла и увеличивается его пластичность), металл приобретает равновесную структуру с минимальным количеством дефектов кристаллического строения (рис. 2.). Плотность дислокаций после рекристаллизации снижается с  $10^{10}-10^{12} \text{ см}^{-2}$  до  $10^6-10^8 \text{ см}^{-2}$ .

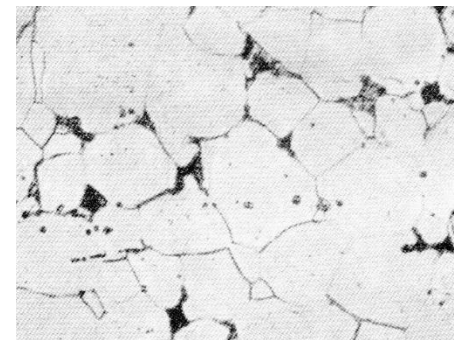
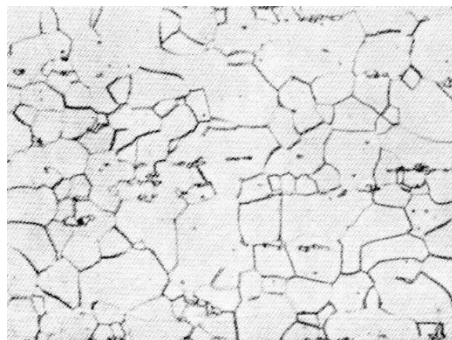
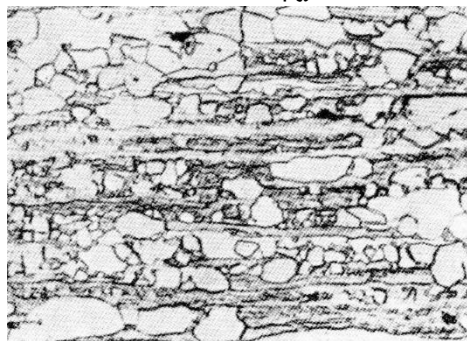


Рис. 1. Рекристаллизация холоднодеформированной стали:  
а – зарождение новых мелких недеформированных зерен; б – конец первичной рекристаллизации; в – вторичная рекристаллизация

# Механические, физические и технологические свойства материалов.

## Упругая и пластическая деформации, наклеп и рекристаллизация

При дальнейшем повышении температуры происходит увеличение размеров наиболее крупных зерен за счет присоединения мелких. С повышением температуры число крупных зерен постепенно растет, пока все мелкие зерна не окажутся присоединенными к крупным, – процесс *вторичной (собирательной) рекристаллизации*, рис. 1в.

Температуру начала рекристаллизации, при которой протекает рекристаллизация, происходит разупрочнение холоднодеформированного металла и восстановление его пластичности, называют *температурным порогом рекристаллизации  $T_{\text{ПР}}$* .

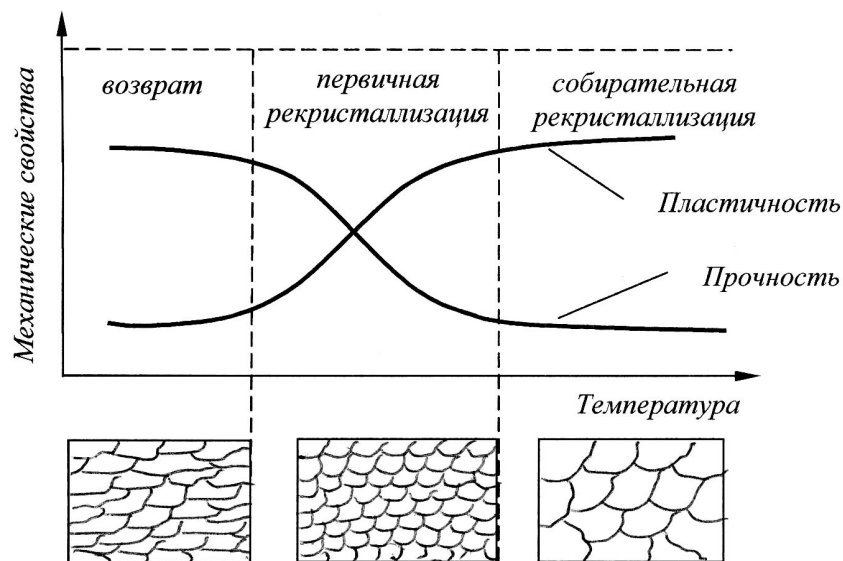


Рис. 2. Изменение прочности, пластичности и зернистого строения в процессе нагрева деформированного металла

Эта температура не является постоянной физической величиной, как, например, температура плавления. Для данного металла (сплава) она зависит от длительности нагрева, степени предварительной деформации, величины зерна до деформации и т. д. Температурный порог рекристаллизации снижается с повышением степени деформации, увеличением длительности нагрева или уменьшением величины зерна до деформации.

Температура начала рекристаллизации  $T_{\text{ПР}}$  для технически чистых металлов составляет примерно  $0,4T_{\text{пл}}$ , для чистых металлов снижается до  $(0,1-0,2)T_{\text{пл}}$ , а для сплавов возрастает до  $(0,5-0,6)T_{\text{пл}}$ .