

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра
«Теоретическая механика и механика материалов»

Л.Е. Реут

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛОВ**

Учебно-методическое пособие
для студентов машиностроительных специальностей

Электронное учебное издание

Реут Л.Е.

Экспериментальное изучение свойств материалов: учебно-методическое пособие для студентов машиностроительных специальностей (электронное учебное издание) / Л.Е. Реут. – Минск: БНТУ, 2022. – 55 с.

Рецензенты:

доктор технических наук, доцент, заведующая лабораторией сверхтвердых и износостойких материалов Института порошковой металлургии им. академика О.В. Романа *Л.Н. Дьячкова*;

кандидат технических наук, доцент, декан факультета информационных технологий и робототехники Белорусского национального технического университета *А.М. Авсевич*

Электронное учебное издание представляет собой пособие по дисциплине «Механика материалов» и рассматривает один из важных разделов курса, посвященный вопросу экспериментального изучения механических свойств материалов. Первостепенная роль экспериментальных исследований заключается в изучении механических свойств материала и определении для него наиболее важных механических характеристик, используемых в инженерных расчетах при проектировании деталей, работающих в разных силовых условиях, в том числе, в условиях высоких температур и больших скоростей. Только экспериментально можно установить прочностные возможности материала и на основании этого рассматривать вопрос его применения для проектируемой детали. Вторая важная роль экспериментальных исследований заключается в проверке правильности и достоверности расчетных теоретических формул, используемых в инженерных расчетах. В пособии рассмотрены основные виды испытаний, дан сравнительный анализ поведения различных материалов, рассмотрены вопросы концентрации напряжений, явление наклепа, а также влияние различных факторов на механические свойства материалов.

Учебное пособие предназначено для студентов всех технических специальностей дневной и заочной форм обучения высших технических учебных заведений, а также для преподавателей при подготовке к лекционным и лабораторным занятиям.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Виды испытаний	5
2. Испытания на растяжение	5
2.1. Диаграмма растяжения. Характеристики прочности и пластичности.....	5
2.2. Полная и удельная работа деформации	14
2.3. Допускаемые напряжения. Коэффициент запаса прочности	15
2.4. Диаграмма напряжений (условных и истинных). Условные характеристики прочности	17
2.5. Повышение предела упругости материала при повторном нагружении. Наклеп	22
3. Испытания на сжатие	26
3.1. Проведение испытаний	26
3.2. Пластичные материалы. Диаграмма сжатия. Сравнительный анализ свойств при растяжении и сжатии	28
3.3. Хрупкие материалы. Диаграмма сжатия. Сравнительный анализ свойств при растяжении и сжатии	29
3.4. Сопоставление механических свойств пластичных и хрупких материалов. Основные критерии выбора материала	30
4. Потенциальная энергия деформации при растяжении (сжатии). Удельная потенциальная энергия	33
5. Понятие о концентрации напряжений. Концентрация напряжений при растяжении (сжатии)	36
6. Испытания на твердость	40
7. Влияние различных факторов на механические свойства материалов	50
Литература	55

ВВЕДЕНИЕ

«Механика материалов» представляет собой фундаментальную общетехническую дисциплину, изучаемую во всех технических вузах, и лежит в основе технического образования инженера любой специальности. При этом, механика материалов является наукой не только теоретической, но в значительной степени и экспериментальной, и экспериментальная часть играет здесь достаточно важную роль.

В первую очередь, экспериментальные исследования – и в этом заключается их первостепенная роль – позволяют определить механические характеристики материала, используемого для изготовления рассчитываемого элемента – его прочность, пластичность, упругость – и ответить на вопрос относительно его работоспособности в условиях силового воздействия и оценки его свойств для расчета проектируемой детали. Только экспериментально можно увидеть, как ведет себя материал в условиях нагружения и установить его предельные возможности, т.е. нагрузки, при которых он достигает предельного состояния, соответствующего моменту потери его прочности. Выполняя опытные измерения, определяют *механические характеристики материала*, т.е. численные значения его свойств, и на основании этих величин устанавливают допусковое напряжение $[\sigma]$, которое затем используется во всех проектировочных расчетах. Кроме того, только с помощью опытных измерений определяются для материала такие важные характеристики как *модуль продольной упругости E* (модуль Юнга), характеризующий жесткость материала или его способность сопротивляться деформированию, и *коэффициент поперечной деформации* (коэффициент Пуассона), также используемые при проектировании и расчете деталей;

Вторая важная роль экспериментальных исследований заключается в проверке правильности и достоверности используемых теоретических формул. Следует помнить, что многие расчетные формулы в механике материалов получены на основании целого ряда допущений и упрощений, а поэтому, имеют приближенный характер и степень их точности можно проверить только опытным путем;

И наконец, работа машин и механизмов, работающих в условиях высоких температур и больших скоростей, также требует знания механических свойств материалов, которые можно определить только опытным путем.

1. Виды испытаний

Различают виды испытаний:

① *По виду деформации* испытания бывают: на растяжение, на сжатие, на изгиб, на кручение, на срез, на смятие. Иногда проводят испытания на различные комбинации деформаций (на сложное сопротивление).

② *По виду нагрузки* испытания бывают статические и динамические (на удар, на циклические нагрузки и т. д.).

③ *Специальные* испытания, которые позволяют выявить какие-то особые свойства материала для деталей, работающих, например, в условиях высоких или низких температур (криогенная техника).

Однако *главными* и *основными* испытаниями, которые в первую очередь всегда проводят для любого материала, являются испытания на **РАСТЯЖЕНИЕ** и **СЖАТИЕ**. Именно эти испытания позволяют определить основные механические характеристики материала, которые можно использовать в расчетах на прочность и при других деформациях, например, при изгибе.

2. Испытания на растяжение

2.1. Диаграмма растяжения. Характеристики прочности и пластичности

Испытанию на *статическое растяжение* подвергаются стандартные призматические образцы круглого или прямоугольного поперечного сечения, которые соответственно либо вытачивают из прутковых заготовок, либо вырезают из листового материала или для неметаллов, например, полимеров, получают методом заливки жидкого материала в форму.

В нашей работе мы будем определять механические свойства мягкой низкоуглеродистой стали, для чего будем использовать образцы призматической формы круглого поперечного сечения. Образцы имеют утолщенные части (головки) для закрепления в захватах испытательной машины и плавные конические участки перехода от головок к цилиндрической части, что позволяет уменьшить влияние концентрации напряжений в месте резкого изменения диаметра на расчетную часть образца и обеспечивает равномерное распределение напряжений в зоне перехода.

Рассмотрим цилиндрический образец круглого сечения и перед проведением испытаний производим предварительные его замеры (рис. 1):

★ чтобы судить об изменении длины образца, на его рабочую часть в удалении от конических вставок на расстоянии ℓ_0 наносят две риски, где расстояние ℓ_0 называется *расчетная длина образца* или *база испытаний*, мм.

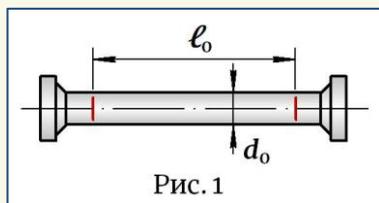


Рис. 1

★ замеряют исходный диаметр образца d_0 , мм.

★ по замеренным данным вычисляют:

$$A_0 = \pi d_0^2 / 4 \text{ – площадь поперечного сечения, мм}^2 ;$$

$$V_0 = A_0 \ell_0 \text{ – расчетный объем образца, мм}^3 .$$

Существуют два стандартных типоразмера цилиндрических образцов – $\ell_0 = 5d_0$ и $\ell_0 = 10d_0$, выбор которых определяется материалом и техническими возможностями лабораторного оборудования.

Далее образец помещают в испытательную машину, закрепляют его концы и начинают плавное растяжение, медленно (*статически*) прикладывая нагрузку, которая постепенно возрастает по мере увеличения деформации образца.

При проведении опыта отмечают ряд последовательных значений нагрузки и измеряют соответствующее им увеличение расчетной длины образца. Однако большинство испытательных машин снабжено *диаграммным устройством*, которое самостоятельно фиксирует величину действующей нагрузки F и соответствующее ей значение $\Delta \ell$, автоматически вычерчивая на специальной ленте в заданном масштабе кривую линию в координатах « $F - \Delta \ell$ », называемую – «*диаграмма растяжения*» (рис. 2). Именно эта диаграмма и дает нам основную информацию о поведении материала при растяжении и, обрабатывая ее, мы получаем *основные характеристики прочности и пластичности материала*.

Рассмотрим характерные участки и точки диаграммы растяжения и соответствующие им стадии деформирования образца.

Участок OA

От начала нагружения до определенного значения растягивающей силы имеет место линейная зависимость между удлинением образца и

силой, называемая в механике материалов *законом пропорциональности* или *законом Гука*. Поэтому участок *ОА* называется **участок пропорциональности** и сила при которой закон пропорциональности прекращает свое действие обозначается соответственно $F_{\text{пц}}$. На этом участке определяем первую механическую характеристику:

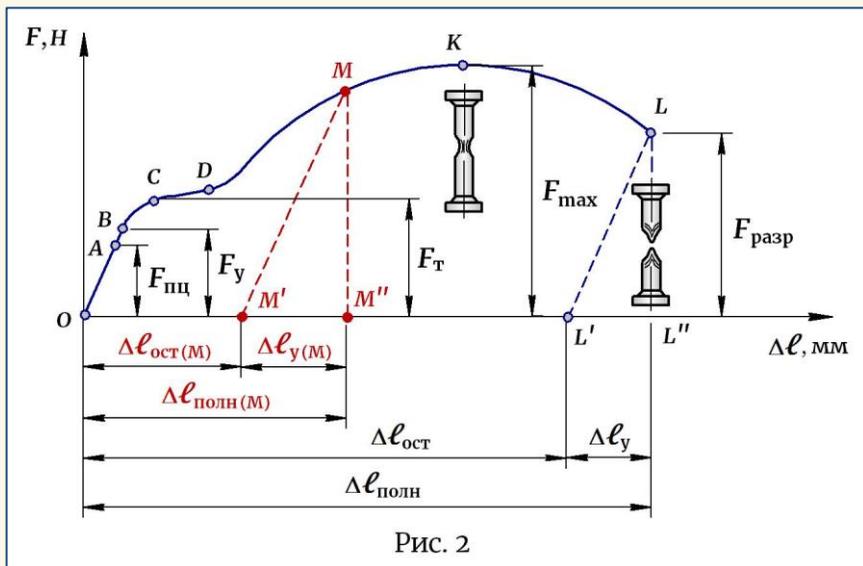


Рис. 2

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}$$

ПРЕДЕЛ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ – это наибольшее напряжение, до которого сохраняется пропорциональная зависимость между нагрузкой и деформацией, т.е. напряжение, до которого материал подчиняется закону Гука.

Участок ОВ

Этот участок называется **участок упругости**. На этом участке материал получает только упругие деформации, которые после снятия нагрузки исчезают и деталь возвращается к первоначальным размерам и форме. Если в точке B нагрузку сбросить, разгрузка пойдет по линии $ВО$. На этом участке определяем вторую механическую характеристику:

$$\sigma_{\text{упр}} = \frac{F_{\text{упр}}}{A_0}$$

ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ – это наибольшее напряжение, до которого материал не получает остаточных или пластических деформаций.

Предел упругости – это характеристика, не связанная с законом Гука. Физический смысл предела упругости заключается лишь в том, что при таких напряжениях материал не получает остаточных деформаций. Точки А и В на диаграмме расположены очень близко друг к другу и практически совпадают, поэтому обычно считают, что $\sigma_{\text{пл}} \approx \sigma_{\text{упр}}$, хотя по физическому смыслу это две разных величины.

Начиная от точки В, прямолинейность диаграммы нарушается, линия искривляется и принимает горизонтальное или почти горизонтальное положение. С этого момента металл начинает течь – возникают пластические деформации, которые охватывают все большую часть материала и, начиная от точки С, уже весь объем образца находится в состоянии пластического течения.

Участок CD

Этот участок называется **площадка текучести**. Для пластичных материалов этот участок представляет наибольший интерес. Именно на этом участке появляются заметные пластические деформации, которые после снятия нагрузки не исчезают и образец необратимо изменяет свою длину. По площадке текучести определяем одну из самых важных механических характеристик металла:

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}$$

ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ – наименьшее напряжение, при котором возникают значительные пластические деформации, охватывающие весь объем образца, и происходит это явление при практически постоянной растягивающей силе.

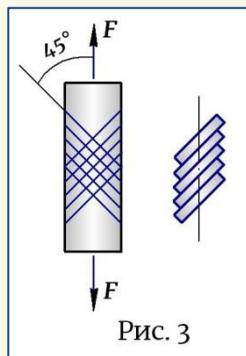
Примечание.

На самом деле, как только начинается процесс нагружения, в материале возникают одновременно и упругие, и пластические деформации, однако последние при нагружении до точки В охватывают микрообъемы материала. Они практически неощутимы и при снятии в этот момент нагрузки они не приведут к изменению размеров элемента. Поэтому считаем, что при нагружении до точки В материал получает только упругие деформации. Но уже начиная от точки В (и особенно, точки С), пластические деформации постепенно захватывают весь объем образца. В этом случае мы говорим – «металл течет» и происходит этот процесс практически без увеличения нагрузки, т.е. материал как будто не сопротивляется растяжению и образец удлиняется как бы самопроизвольно. Для пластичных материалов наступление момента текучести и его протекание является ОПАСНЫМ СОСТОЯНИЕМ, так как большие пластические деформации приводят к необратимому изменению размеров и формы детали, а значит, к потере ее работоспособности. Поэтому для

пластичных материалов следует считать — $\sigma_{\text{опас}} = \sigma_{\text{T}}$.

Обнаружить момент наступления текучести можно не только по диаграмме. При возникновении пластических деформаций повышается температура образца, изменяются электропроводность и магнитные свойства металла, что можно зафиксировать специальными приборами и устройствами.

Наступление момента текучести можно также наблюдать визуально. Если образец отполировать, доведя его поверхность почти до зеркального состояния, то в момент начала текучести поверхность образца «мутнеет», что связано с появлением на поверхности сетки линий, расположенных под углом 45° к оси образца. Эти линии представляют собой периметры сдвигающихся сечений и называются линиями скольжения или линиями Чернова-Людерса (рис. 3). Они расположены очень близко друг к другу и их можно наблюдать только под микроскопом, а на поверхности образца они создают только общий эффект помутнения, по которому и фиксируется сила F_T , соответствующая наступлению текучести.



Вернемся к диаграмме растяжения (рис. 2).

После стадии текучести (площадка CD), где удлинение образца происходит без увеличения силы, кривая опять поднимается вверх, а это значит, что металл вновь обретает способность сопротивляться деформированию и для дальнейшего продолжения растяжения требуется увеличивать нагрузку. Это явление возникает вследствие того, что в результате пластической деформации металл упрочняется.

Участок DK

Участок DK называется **участок упрочнения**. На этом участке вследствие упрочнения металла дальнейшее растяжение происходит с повышением нагрузки. Причиной упрочнения является целый ряд механических процессов, связанных с протеканием пластического течения материала. Механизм протекания пластических деформаций представляет собой сложное физико-механическое явление — происходит изменение кристаллической структуры металла, сдвиг и смещение атомов по плоскостям скольжения, их накопление, взаимное торможение, а также торможение на различного рода дефектах структуры, инородных включениях, загрязняющих металл и т.д. В результате, дальнейшее продвижение слоев при нагрузке F_T , соответствующей текучести, становится затруднительным, возникают «заторы», и чтобы их разобрать и сдвинуть слои с места, требуется

увеличение силы. В этом и состоит эффект упрочнения металла, для деформирования которого теперь требуется большая нагрузка.

Продолжаем растягивать образец и, наконец, достигаем точки K , соответствующей наибольшему усилию F_{\max} , которое способен воспринимать материал. Если до точки K образец равномерно удлиняется и так же равномерно уменьшается его поперечный размер, то в точке K на цилиндрической части образца образуется местное утонение (*шейка*), появление которой означает, что несмотря на временную целостность, образец не способен уже нести никакой нагрузки. Это состояние можно считать наступлением *разрушения материала* и для этой точки определяем еще одну механическую характеристику:

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ или **ВРЕМЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ** – это напряжение, при котором происходит разрушение материала и деталь не способна уже нести никакой полезной нагрузки.

Примечание.

Образование шейки на цилиндрической части образца может произойти в любом ее месте. Обычно это происходит там, где внутренняя структура металла ослаблена разного рода дефектами, инородными включениями и т.д., а поверхность – микроскопическими трещинами, царапинами.

Примечание.

Для хрупких материалов, которые разрушаются без заметных пластических деформаций и, соответственно, не имеют площадки текучести, ОПАСНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ является предел прочности σ_B . Поэтому для хрупких материалов считаем – $\sigma_{\text{опас}} = \sigma_B$.

Продолжаем растягивать образец (рис. 2).

Начиная от точки K , удлинение и поперечное сужение образца полностью концентрируется в области шейки, а деформация остальной части образца прекращается. Поскольку площадь сечения шейки уменьшается, процесс растяжения не требует большой нагрузки и растягивающая сила падает (участок KL). И наконец, в точке L образец полностью разрывается:

$$\sigma_{\text{разр}} = \frac{F_{\text{разр}}}{A_0}$$

– напряжение при разрыве.

На основании произведенных вычислений получаем для материала следующие **механические характеристики прочности**:

$\sigma_{\text{пц}}$	– ПРЕДЕЛ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ
$\sigma_{\text{упр}}$	– ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ
$\sigma_{\text{т}}$	– ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ
$\sigma_{\text{в}}$	– ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ или ВРЕМЕННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Напряжение $\sigma_{\text{разр}}$ – не является характеристикой прочности, т. к. оно определено для й площади сечения A_0 , в то время как на момент разрушения площадь сечения в области шейки значительно меньше, а значит, значение $\sigma_{\text{разр}}$ *не является истинным*.

Размерность напряжений – МПа = Н/мм².

Помимо *напряжений* диаграмма растяжения (рис. 2) позволяет также определять *величину деформаций*, возникающих в образце в любой момент его нагружения.

Необходимо помнить, что на любой стадии нагружения, пока образец находится под действием нагрузки, полное удлинение образца определяется суммой двух составляющих – упругой и остаточной деформаций, накопленных на данный момент, т.е.

$$\Delta l_{\text{полн}} = \Delta l_{\text{упр}} + \Delta l_{\text{ост}} . \quad (1)$$

При нагружении до точки B , когда в материале возникают только упругие деформации, $\Delta l_{\text{ост}} = 0$ и изменение длины образца определяется только наличием упругих деформаций, т.е. $\Delta l_{\text{полн}} = \Delta l_{\text{упр}}$.

Дальнейшее нагружение за пределы упругости приводит к появлению еще и пластических деформаций. При этом *упругие деформации до момента снятия нагрузки никуда не исчезают*, они присутствуют в образце вместе с пластическими и по мере роста нагрузки и те, и другие растут, накапливаются и уже своей суммой определяют изменение длины образца.

Однако после разгрузки упругие деформации исчезает, а остаточные сохраняются и образец принимает конечную длину $l_{\text{к}}$, равную:

$$l_{\text{к}} = l_0 + \Delta l_{\text{ост}} . \quad (2)$$

Величину накопленных деформаций (упругих и пластических), а также полное изменение длины образца в любой момент нагружения можно определить по диаграмме растяжения следующим образом.

Рассмотрим на диаграмме точку M . Опускаем из нее перпендикуляр на ось абсцисс и получаем отрезок OM'' , соответствующий полному удлинению $\Delta\ell_{\text{полн}}(M)$ образца на данный момент нагружения, которое возникает как результат накопления в нем упругих и остаточных деформаций и которое согласно (1) равно:

$$\Delta\ell_{\text{полн}}(M) = \Delta\ell_{\text{упр}}(M) + \Delta\ell_{\text{ост}}(M).$$

Чтобы определить величину каждого из этих слагаемых, мысленно сбрасываем нагрузку. Разгрузка пойдет *не по линии* $MDCBAO$, а по *прямой* MM' , параллельной участку OA . Полученные на оси абсцисс отрезки $M'M''$ и OM' будут в масштабе диаграммы соответственно определять долю упругой $\Delta\ell_{\text{упр}}(M)$ и долю остаточной $\Delta\ell_{\text{ост}}(M)$ деформаций, накопленных на данный момент. После разгрузки упругая деформация исчезнет, а остаточная – сохранится, и конечная длина образца при нагружении до точки M согласно (2) будет равна:

$$\Delta\ell_{\text{к}}(M) = \ell_0 + \Delta\ell_{\text{ост}}(M).$$

Аналогичным образом можно определить величину деформаций образца на любой стадии нагружения, в том числе, и к моменту его разрыва. Для этого из точки L диаграммы (рис. 2) опускаем перпендикуляр и на оси абсцисс получаем отрезок OL'' , который дает нам значение полного удлинения образца $\Delta\ell_{\text{полн}}$ в момент, предшествующий разрыву. Как только образец разрывается, нагрузка с него сбрасывается и разгрузка идет по прямой LL' , параллельной участку пропорциональности OA . Величина накопленных упругих деформаций $\Delta\ell_{\text{упр}}$, которые после разрушения исчезают, определяется отрезком $L'L''$, а остаточных $\Delta\ell_{\text{ост}}$, сохраняемых в образце, отрезком OL' . В результате, конечная длина образца после разрыва будет определяться согласно (2) как: $\ell_{\text{к}} = \ell_0 + \Delta\ell_{\text{ост}}$.

Продолжаем рассматривать вопрос. Определение деформаций образца (продольных и поперечных) на момент разрыва позволяет оценить **ПЛАСТИЧНОСТЬ** материала, т.е. его способность претерпевать большие остаточные деформации без разрушения. Эта способность оценивается двумя **характеристиками пластичности**, которые принимаются за *меру пластичности* материала:

★ **ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ОСТАТОЧНОЕ УДЛИНЕНИЕ** –

$$\varepsilon_{\text{ост}} = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100\% = \frac{l_{\text{к}} - l_0}{l_0} \cdot 100\% ;$$

★ **ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ОСТАТОЧНОЕ СУЖЕНИЕ** –

$$\psi = \frac{A_0 - A_{\text{ш}}}{A_0} \cdot 100\% ,$$

где $A_{\text{ш}}$ – площадь поперечного сечения шейки.

Значение $\Delta l_{\text{ост}}$ можно определить по диаграмме растяжения, как это было рассказано выше. Однако вследствие того, что диаграмма имеет большую протяженность, определить это значение с необходимой точностью сложно. Удобнее сделать все замеры по образцу, разорванному после испытаний (рис. 4). Для этого складываем образец по месту разрыва, замеряем расстояние между маркерами $l_{\text{к}}$ и учитывая, что упругие деформации после разрыва исчезли, определяем $\Delta l_{\text{ост}}$ как $\Delta l_{\text{ост}} = \Delta l_{\text{к}} - l_0$.

Затем замеряем диаметр шейки $d_{\text{ш}}$ и, считая, что сечение сохранило круглую форму, определяем площадь сечения в области шейки как:

$$A_{\text{ш}} = \pi d_{\text{ш}}^2 / 4 .$$

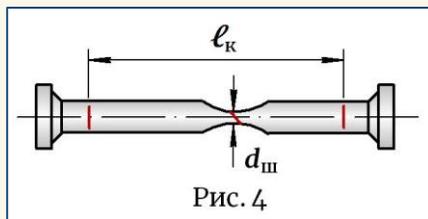


Рис. 4

Определив эти величины, вычисляем $\varepsilon_{\text{ост}}$ и ψ .

Условно считается, что если $\varepsilon_{\text{ост}} > 10\%$ – это пластичный материал, если $\varepsilon_{\text{ост}} \leq 5\%$ – материал является хрупким. Высоко пластичные материалы (малоуглеродистая сталь, медь, свинец, алюминий и др.) имеют $\varepsilon_{\text{ост}} \approx 30\%$ и $\psi \approx 55 \div 65\%$.

Величина $\varepsilon_{\text{ост}}$ в значительной степени зависит от формы образца и, главным образом, от *отношения длины к площади поперечного сечения*. Относительное остаточное сужение ψ в меньшей степени зависит от этих величин, поэтому является более точной характеристикой пластичности.

2.2. Полная и удельная работа деформации

Кроме механических характеристик прочности и пластичности диаграмма растяжения позволяет также определить важные **энергетические характеристики** материала, по которым оценивается его способность поглощать большое количество энергии без разрушения, что является важным критерием для деталей, работающих в условиях динамических нагрузок, например, при ударе. При этом оценить эту способность можно уже при статических испытаниях, например, при статическом растяжении.

Для растяжения и разрушения образца необходимо затратить работу. На основании ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ работа, затраченная на деформирование, численно равна количеству энергии деформации, накопленной в материале. Поэтому, чтобы определить количество энергии, которую накапливает образец до момента разрушения, необходимо определить полную величину работы $A_{\text{полн}}$, затраченной на этот процесс.

|| Полная работа, затраченная на растяжение и разрыв образца, определяется площадью диаграммы растяжения.

Определить полную площадь диаграммы было бы возможно через интеграл $A_{\text{полн}} = \int F d\ell$, если бы был известен закон изменения силы по мере удлинения образца. Однако эта функция неизвестна, поэтому полную площадь диаграммы определяют по приближенной формуле как площадь прямоугольника со сторонами F_{max} и $\Delta\ell_{\text{полн}}$, но с учетом неполного его заполнения диаграммой:

$$A_{\text{полн}} = \eta \cdot F_{\text{max}} \Delta\ell_{\text{полн}} \quad [\text{Дж}] = [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (3)$$

где η – коэффициент полноты заполнения диаграммы, характеризующий отношение площади диаграммы к площади прямоугольника и для пластичной стали принимается равным $\eta = 0,8 \div 0,9$; $F_{\text{max}} [\text{Н}]$ и $\Delta\ell_{\text{полн}} [\text{м}]$ – значения, взятые из диаграммы растяжения.

Однако полная работа, затраченная на растяжение и разрыв образца, зависит от размеров образца, поэтому чтобы уйти от этого влияния и оценить способность именно материала к поглощению энергии, вводят понятие **удельной работы деформации** – работы, затраченной на деформирование единицы объема материала:

$$a = \frac{A_{\text{ПОЛН}}}{V_0} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3} \right], \quad (4)$$

где $V_0 = A_0 \ell_0$ – расчетный объем образца.

Удельная работа деформации a характеризует способность материала поглощать энергию при разрыве, вязкость материала и, соответственно, его сопротивляемость динамическому воздействию. Чем выше значение a , тем лучше материал работает на удар и другие динамические нагрузки, связанные с поглощением большого количества энергии. Таким образом, удельная работа деформации является мерой энергетической емкости материала и может служить одной из характеристик его механических качеств.

2.3. Допускаемые напряжения. Коэффициент запаса прочности

В результате испытаний на растяжение были определены основные механические характеристики материала и установлено, что опасными напряжениями, при которых материал находится в предельном состоянии, предшествующем потере прочности, являются

- ★ для пластичных материалов — $\sigma_{\text{опас}} = \sigma_T$ (предел текучести);
- ★ для хрупких материалов — $\sigma_{\text{опас}} = \sigma_B$ (предел прочности).

При проектировании деталей машин и механизмов информация о механических свойствах материалов должна быть обязательно известна конструктору. Деталь и материал для нее должны быть спроектированы и выбраны таким образом, чтобы рабочие напряжения, возникающие в процессе эксплуатации, не достигали опасных значений и даже были с определенным запасом меньше этих величин. Это связано с тем, что:

- во-первых, элемент, изготовленный из того же материала, что и образец, для которого опытным путем получены σ_T или σ_B , может не обладать такими же свойствами и иметь худшее качество;
- во-вторых, условия работы элемента могут отличаться от условий нагружения образца при испытаниях и, следовательно, возникающие в элементе напряжения могут оказаться больше, чем расчетные;
- в-третьих, расчетная модель элемента, которая используется конструктором, не является совершенной и построена на целом ряде допущений, упрощений и приближенных формул.

Поэтому при проектировании деталей за наибольшее безопасное напряжение принимается не $\sigma_{\text{опас}}$, а напряжение меньшей величины, называемое **ДОПУСКАЕМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ** $[\sigma]$, определяемое как:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{опас}}}{n} = \frac{\sigma_T(\sigma_B)}{n}, \quad (5)$$

где n – называется **коэффициент запаса прочности**.

ДОПУСКАЕМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ – это наибольшее напряжение для материала конструкции, при котором в данных условиях нагружения гарантированы необходимая прочность и надежность работы. Таким образом, максимальные рабочие напряжения должны быть ограничены допускаемыми, которые меньше опасных в n -раз, и **условием прочности** деталей при проверочных и проектировочных расчетах будет являться соотношение:

$$\sigma_{\text{max}} \leq [\sigma]. \quad (6)$$

Коэффициент запаса прочности зависит от свойств материала, характера действующих нагрузок, условий эксплуатации конструкции и др. Выбор коэффициента запаса n – вопрос очень серьезный и связан с безопасностью работы конструкции и людей. Установлением величины n для основных марок материалов, применяемых в машиностроении и строительной промышленности, занимаются специальные **ГОСУДАРСТВЕННЫЕ НОРМИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ**. В общем виде коэффициент запаса прочности n рассчитывается по формуле:

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot \dots \cdot n_k,$$

где $n_1 = 1,2 \div 3,0$ – коэффициент, учитывающий неточность расчетных формул; $n_2 = 1,2 \div 2,2$ – коэффициент, учитывающий неоднородность материала (приблизительно принимают $n_2 = 2,55 \frac{\sigma_T}{\sigma_B}$); $n_3 = 1,0 \div 1,5$ – коэффициент, учитывающий условия работы детали и требования, предъявляемые к ее надежности; n_4 – коэффициент, учитывающий степень ответственности детали и т.д.

При статическом нагружении коэффициент запаса обычно принимают **для пластичных материалов** – $n = 1,4 \div 2,5$; **для хрупких** – $n = 2,4 \div 5,0$. При динамическом нагружении коэффициент запаса прочности значительно больше.

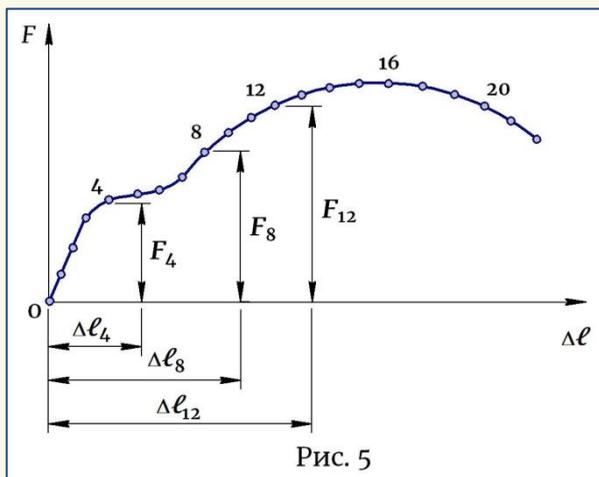
2.4. Диаграмма напряжений (условных и истинных). Условные характеристики прочности

Вид диаграммы растяжения (рис. 2), полученной опытным путем в координатах « $F - \Delta \ell$ » зависит не только от свойств материала, но и от размеров испытываемого образца. Чем длиннее образец, тем большие удлинения он будет получать при одной и той же силе.

Чтобы уйти от влияния размеров и получить график, который характеризовал бы свойства непосредственно изучаемого материала, строят диаграмму напряжений.

Диаграмма напряжений строится в координатах « $\sigma - \varepsilon$ » и чтобы получить точки для построения кривой, выполняют следующее:

★ На диаграмме растяжения наносят серию точек и нумеруют их, например, точки 1,2,3,4 ... 12... и т.д. (рис. 5). Чем больше будет нанесено точек, точнее получится диаграмма напряжений;



★ Затем для каждой точки в масштабе диаграммы замеряют значение силы F и соответствующее этой силе удлинение $\Delta \ell$ и по этим значениям вычисляют напряжение σ и относительную продольную деформацию ε :

$$\sigma_i = F_i / A_0; \quad \varepsilon_i = \Delta \ell_i / \ell_0 .$$

Примечание.

Несмотря на то, что в процессе растяжения площадь сечения и длина образца изменяются, значения σ и ε определяют по первоначальным размерам A_0 и ℓ_0 . Правильнее было бы σ и ε определять для постоянно

изменяющихся размеров, однако это усложнило бы процесс испытания, т.к. потребовало бы пошагового нагружения образца с выполнением соответствующих замеров.

★ А далее, в системе осей « $\sigma - \epsilon$ » в выбранном масштабе откладывают координаты намеченных точек, соединяют их плавной линией и получают **диаграмму напряжений** (рис. 6). Так как эта диаграмма получена из диаграммы растяжения путем деления абсцисс и ординат на одно и то же число ($\epsilon = \Delta l / l_0$ и $\sigma = F / A_0$), то очертание **диаграммы напряжений** будет полностью подобно очертанию диаграммы растяжения;

★ И теперь по этой диаграмме можно непосредственно определять значения *основных характеристик прочности и пластичности* :

$\sigma_{\text{пц}}$ – предел пропорциональности, $\sigma_{\text{упр}}$ – предел упругости,
 $\sigma_{\text{Т}}$ – предел текучести, $\sigma_{\text{В}}$ – предел прочности,
 $\epsilon_{\text{ост}}$ – относительное остаточное удлинение.

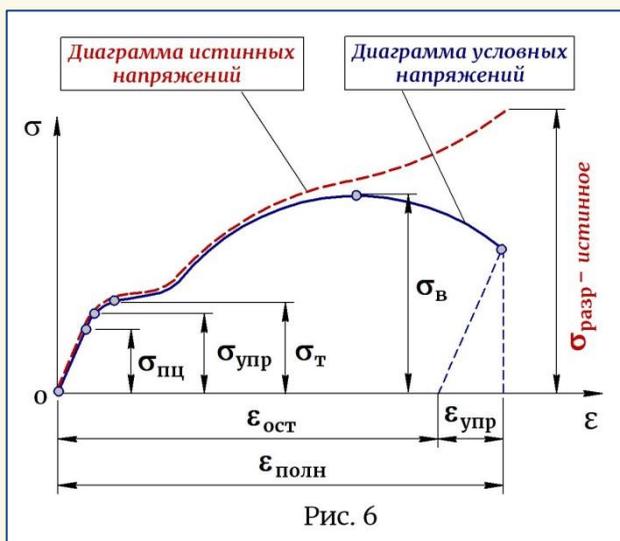


Рис. 6

По аналогии с диаграммой растяжения *площадь диаграммы напряжений* дает нам значение *удельной работы деформации*. На основании формулы (4) и значения (3) получаем:

$$a = \frac{A_{\text{полн}}}{V_0} = \frac{\eta \cdot F_{\text{max}} \Delta l_{\text{полн}}}{A_0 \cdot l_0} = \eta \frac{F_{\text{max}}}{A_0} \cdot \frac{\Delta l_{\text{полн}}}{l_0} = \eta \sigma_{\text{В}} \epsilon_{\text{полн}}.$$

Однако полученная диаграмма является **ДИАГРАММОЙ УСЛОВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**. Координаты σ всех ее точек вычислены по начальному значению A_0 , в то время как площадь сечения образца по мере растяжения постоянно уменьшается, а значит, **истинные значения напряжений** будут выше. Эта разница между расчетными и истинными напряжениями начинает проявляться, когда в металле появляются пластические деформации, и становится особенно заметной, когда на образце образуется шейка, и по мере ее утонения напряжения здесь все больше растут, стремясь к бесконечности при разрыве. Поэтому **ДИАГРАММА ИСТИННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ** проходит выше *условной диаграммы* (рис. б) и после образования шейки устремляется вверх.

Построение диаграммы истинных напряжений представляет собой процесс весьма сложный и трудоемкий. Он требует пошагового нагружения с одновременным замером в разные моменты времени величины силы и поперечных размеров образца в наиболее суженном месте. Однако *диаграммы истинных напряжений* используются, главным образом, для теоретических исследований, например, для изучения пластических деформаций, и в инженерной практике, как правило, не применяются. При выполнении инженерных расчетов для определения механических характеристик материалов используют *диаграмму условных напряжений*. Тем более, что в пределах упругости (а именно в этих условиях работают детали) и даже при достижении материалом текучести, когда уменьшение площади сечения незначительно, *условная и истинная диаграммы* практически совпадают, поэтому значения $\sigma_{\text{пц}}$, $\sigma_{\text{упр}}$ и $\sigma_{\text{Т}}$, вычисленные для площади A_0 , можно принимать за истинные. А вот предел прочности $\sigma_{\text{В}}$ – величина однозначно *условная*, так как он ощутимо меньше истинного значения.

Однако *условность характеристик прочности*, определяемых в результате испытаний, может быть вызвана и другими причинами:

- ★ *во-первых*, при испытаниях на растяжение вид диаграммы растяжения, построенной в координатах « $F - \Delta \ell$ », во многом зависит от точности проведения эксперимента и от качества записи диаграммы;

- ★ *во-вторых*, металлы, используемые на практике, обладают различными свойствами. И хотя механизм нарастания деформаций при растяжении у всех материалов одинаков — прохождение участка пропорциональности, участка упругости, участка текучести, т.е. появление пластических деформаций и т.д. — диаграмма растяжения « $F - \Delta \ell$ », а значит, и *диаграмма напряжений*, не всегда имеют

классический вид со всеми ярко выраженными участками. Очертания диаграмм могут быть различными и участки могут быть выражены нехарактерным образом. Например, на некоторых диаграммах трудно установить линейный участок, на котором должен соблюдаться закон пропорциональности. Даже если такой участок и наблюдается, величина $\sigma_{\text{пл}}$ зависит от той степени точности, с которой этот участок можно рассматривать как *прямую*. На многих диаграммах нельзя установить участок, где возникают только упругие деформации, т.е. *участок упругости*. Некоторые материалы *не имеют площадки текучести*, хотя наличие у них пластических деформаций является очевидным. Вообще говоря, площадка текучести есть у сравнительно немногих металлов (малоуглеродистая сталь, латунь, некоторые виды отожженных бронз), а у большинства, даже высоко пластичных материалов переход в пластическую область происходит без явно выраженной площадки текучести и даже при полном ее отсутствии. Механические характеристики для таких материалов, определяемые из диаграмм напряжений, называют *условными характеристиками прочности*. Определим эти величины.

Условный предел пропорциональности

УСЛОВНЫМ ПРЕДЕЛОМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ $\sigma_{0,02}$ называют напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между напряжением и деформацией достигает некоторой величины, установленной техническими условиями (0,02% от ℓ_0).

Рассмотрим линейную зависимость между напряжениями и деформациями, описываемую законом Гука (рис. 7):

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow E = \sigma/\varepsilon .$$

Но согласно рис. 7 $\rightarrow \sigma/\varepsilon = \text{tg } \alpha$, откуда $E = \text{tg } \alpha$, т.е. в масштабе диаграммы напряжений тангенс угла наклона участка пропорциональности к оси абсцисс равен модулю Юнга материала. Поскольку модуль Юнга E может быть определен опытным путем, значение угла α для материала всегда будет известно.

Согласно техническим нормам, отклонение кривой $\sigma = f(\varepsilon)$ на реальной диаграмме напряжений (рис. 8) от теоретической прямой $\sigma = E\varepsilon$ должно быть таким, чтобы тангенс угла β между касательной, проведенной к диаграмме, и осью абсцисс

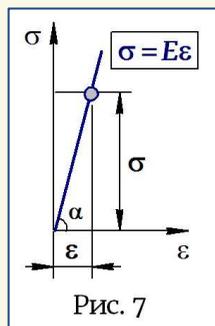
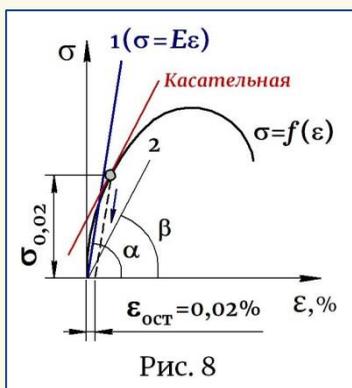


Рис. 7

составлял $2/3$ от тангенса угла наклона α линейного участка, соответствующего закону Гука, т.е. был равен: $\boxed{\operatorname{tg}\beta = (2/3) \operatorname{tg}\alpha}$.

Отыскиваем точку касания. Для этого:



★ На диаграмме напряжений в системе координат « σ - ϵ » под углом, равным $\alpha = \operatorname{arctg} E$, проводим прямую 1, соответствующую закону Гука;

★ По техническим нормам, согласно которым $\operatorname{tg}\beta = (2/3) \operatorname{tg}\alpha$, находим угол β и под этим углом проводим прямую 2;

★ Затем параллельно прямой 2 проводим касательную к диаграмме. Ордината точки касания и дает значение **условного предела пропорциональности**;

★ Теперь, согласно «закону разгрузки», из точки касания проводим линию (на рис. 8 показана пунктиром) параллельно прямой 1 и получаем значение остаточной деформации $\epsilon_{\text{ост}} = 0,02\%$, которое показывает отклонение условного участка пропорциональности от линейной зависимости и которое является принятой технической нормой для определения **условного предела пропорциональности**, соответственно обозначаемого как $\sigma_{0,02}$.

Теперь, обрабатывая любую другую диаграмму, для определения $\sigma_{0,02}$ задача решается в обратном порядке: сначала на диаграмме согласно значению $\alpha = \operatorname{arctg} E$ строится прямая 1, соответствующая линейному закону Гука, затем на оси абсцисс в масштабе диаграммы откладывается отрезок $\epsilon_{\text{ост}} = 0,02\%$ и вверх проводится линия, параллельная прямой 1, до пересечения с диаграммой. Ордината точки пересечения дает значение $\sigma_{0,02}$.

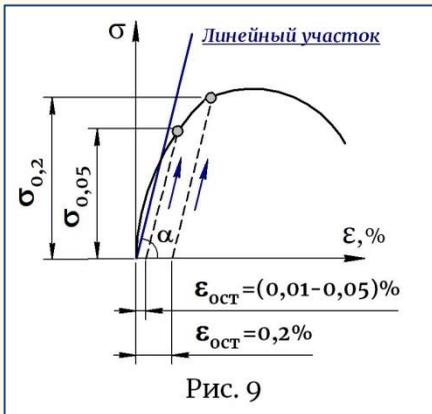
Условный предел упругости

УСЛОВНЫМ ПРЕДЕЛОМ УПРУГОСТИ $\sigma_{0,01}$ или $\sigma_{0,05}$ называют напряжение, при котором остаточная деформация достигает величины, установленной техническими нормами — (0,01- 0,05) % от ℓ_0 .

Условный предел текучести

УСЛОВНЫМ ПРЕДЕЛОМ ТЕКУЧЕСТИ $\sigma_{0,2}$ или $\sigma_{0,5}$ называют напряжение, при котором остаточная деформация достигает величины, установленной техническими нормами — 0,2 % (иногда 0,5 %) от ℓ_0 .

Для определения этих величин также используется «закон разгрузки»: по углу $\alpha = \arctg E$ строится линейный участок, затем на оси абсцисс в масштабе диаграммы откладывается величина деформации $\epsilon_{ост} = (0,01 - 0,05)\%$ (для предела упругости) или $\epsilon_{ост} = 0,2\%$ (для предела текучести) и параллельно линейному участку проводится прямая до пересечения с диаграммой. Ординаты точек пересечения этих линий с диаграммой и дают значения искомых характеристик прочности (рис. 9).



Примечание.

Предел пропорциональности и предел упругости трудно поддаются определению и они резко меняют свою величину в зависимости от условно принятых технических норм. Вследствие этого указанные механические характеристики в справочные данные обычно не включаются.

2.5. Повышение предела упругости материала при повторном нагружении. НАКЛЕП

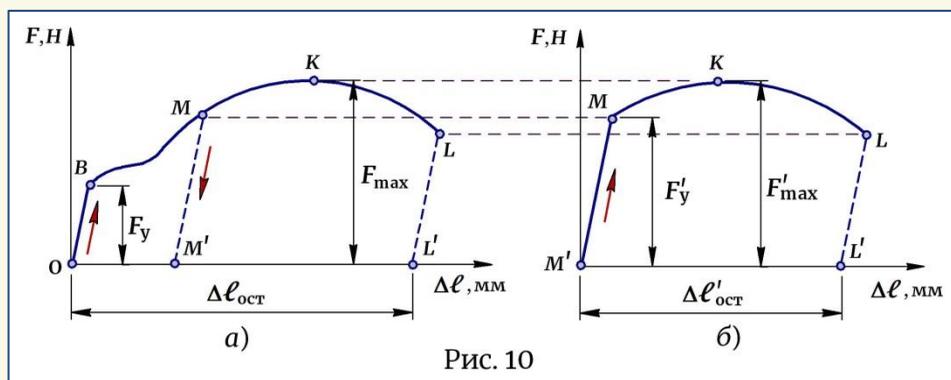
Вернемся к диаграмме растяжения « $F - \Delta\ell$ » (рис. 2) и вспомним хронологию протекания процесса и некоторые механические характеристики, которые были вычислены для материала:

★ при нагружении до точки B возникают только упругие деформации, поэтому для участка OB определяем предел упругости $\sigma_{упр}$, который, учитывая что упругие деформации всегда подчиняются закону Гука, примерно равен пределу пропорциональности $\sigma_{пц}$, т.е. принимаем $\sigma_{пц} \approx \sigma_{упр} = F_{упр} / A_0$;

★ далее металл начинает течь, в результате пластических деформаций происходит его упрочнение (кривая идет вверх) и, наконец, в точке K образуется шейка, т.е. образец не способен более воспринимать никакую нагрузку. Это эквивалентно разрушению и в этой точке мы определяем *предел прочности* или *временное сопротивление* $\sigma_B = F_{\max}/A_0$;

★ диаграмма растяжения позволяет также определить одну из характеристик пластичности. После разрушения образца по остаточной деформации $\Delta l_{\text{ост}}$ определяем *относительное остаточное удлинение* $\varepsilon_{\text{ост}} = \Delta l_{\text{ост}}/l_0$.

Теперь рассмотрим другие варианты нагружения: будем *нагружать образец до определенных точек, затем разгружать и нагружать повторно*, не доводя его до разрушения (рис. 10):



а) нагружаем образец в пределах участка OB и нагрузку сбрасываем. Если в процессе нагружения *предел упругости* $\sigma_{\text{упр}}$ (или $\sigma_{\text{пц}}$) *не был превышен*, то при снятии нагрузки разгрузка пойдет по той же прямой, упругие деформации исчезнут и образец полностью вернется к исходным размерам. При повторном нагружении образец будет проявлять те же механические свойства и вести себя так же, как и при первом нагружении;

б) теперь нагружаем образец *за пределы текучести*, например, до точки M (рис. 10, а), когда в материале уже возникают большие пластические деформации. Если в этот момент процесс остановить и нагрузку сбросить, разгрузка пойдет не по линии MBO , а по прямой MM' , параллельной участку OB . Возникшие упругие деформации исчезнут, а остаточные – сохранятся и материал будет иметь *запас предварительной пластической деформации*;

в) продолжаем испытания и нагружаем образец повторно. Теперь началом отсчета является точка M' (рис. 10, б) и диаграмма пойдет по прямой $M'M$, а затем после точки M кривая полностью будет следовать зависимости MKL с образованием шейки в точке K до полного разрыва образца.

Исследуем свойства материала по данным повторного нагружения и проведем сравнительный анализ изменения механических свойств.

Определяем по диаграмме растяжения (рис. 10, б) механические характеристики стали при повторном нагружении –

$$\sigma'_{\text{пц}} \approx \sigma'_{\text{упр}} = F'_{\text{упр}}/A_0; \quad \sigma'_B = F'_{\text{max}}/A_0; \quad \varepsilon'_{\text{ост}} = \Delta\ell'_{\text{полн}}/\ell_0$$

и сравниваем эти значения с такими же характеристиками, полученными для материала при первоначальном нагружении (рис. 10, а):

$$\sigma'_{\text{упр}} (\sigma'_{\text{пц}}) > \sigma_{\text{упр}} (\sigma_{\text{пц}}); \quad \sigma'_B \approx \sigma_B; \quad \varepsilon'_{\text{ост}} < \varepsilon_{\text{ост}}.$$

Результаты сравнительного анализа показывают, что *предварительная деформация материала за предел текучести изменяет его механические свойства при повторном нагружении.*

|| Изменение механических свойств материала в результате его предварительного деформирования за пределом текучести называется **НАКЛЕП** или **НАГАРТОВКА**.

При наклепе кристаллическая решетка металла искажается и закрепляется в новом деформированном состоянии. Предел упругости и пропорциональности материала (считаем, что они одинаковы), а также предел текучести повышаются, а значит, материал **становится прочнее** и теперь способен воспринимать бóльшие нагрузки без остаточных деформаций. При этом значения $\sigma_{\text{упр}} (\sigma_{\text{пц}})$ и σ_T сближаются и приблизительно равны напряжению, до которого первоначально был растянут образец. Поэтому *чем больше предварительная вытяжка за предел текучести, там более высокие прочностные характеристики будет проявлять материал при повторном нагружении.* Однако вместе с увеличением прочностных свойств **пластичность материала падает**, он становится более **хрупким** и **твердым**. Что касается момента разрушения, т.е. образование шейки, то это произойдет примерно при таком же напряжении, что и у исходного материала, и значит, предварительная вытяжка в пластическую область на величину σ_B не влияет.

Примечание.

Следует иметь ввиду, что изменение механических свойств при наклепе зависит от промежутка времени между разгрузкой и повторным нагружением, поскольку для полного восстановления упругих свойств материала требуется время. Если нагружение детали произвести немедленно сразу после разгрузки, то как показывают точные замеры, предел пропорциональности σ_{III} окажется ниже исходного, а предел текучести σ_{T} повысится и станет равным тому напряжению, до которого первоначально был растянут образец. Если образцу после разгрузки дать некоторое время «отдохнуть», то его упругие свойства восстановятся, $\sigma_{\text{упр}}$ и σ_{III} увеличатся, σ_{T} станет еще больше и даже возрастет предел прочности $\sigma_{\text{в}}$. Такое изменение свойств наклепанного материала с течением времени при отсутствии каких-либо внешних воздействий называется старением.

Наклеп может быть и полезным, и вредным явлением, в зависимости от условий работы детали.

В некоторых случаях он нежелателен и его стремятся устранить. Например, при разрезании ножницами стальных листов края получают наклеп и становятся хрупкими. Дальнейшее изготовление деталей из таких листов, где требуется загиб краев (днище котла, например), приводит к возникновению трещин. Также при выдавливании отверстий в листах для заклепочных соединений края отверстий тоже получают наклеп и становятся хрупкими, поэтому выдавленные отверстия рассверливают для удаления хрупкой части или выдавливание полностью заменяют сверлением.

Наклеп можно удалить отжигом – нагревом до определенной температуры, выдержке при этой температуре и последующим медленным охлаждением.

Однако иногда наклеп полезен и его создают искусственно. Он является важной технологической операцией, необходимой для улучшения свойств материала. Например, цепи и канаты подъемных машин подвергают предварительному растяжению за предел текучести, чтобы они в процессе последующей работы не получали больших деформаций. Именно наклепом объясняется тот факт, что проволока, полученная волочением, имеет значительно большую прочность, чем сталь, из которой она изготовлена.

Примечание.

Явление наклепа в деталях из пластичных материалов возникает и при других деформациях – сжатии, кручении, изгибе и т.д. и протекает так же, как при растяжении. Однако если схемы предварительного и повторного нагружений разные, то изменение свойств материала может быть

другим. Так, например, наклеп, вызванный растяжением, при последующем сжатии элемента приведет к снижению $\sigma_{\text{упр}}$ и его сопротивляемости пластическим деформациям (эффект Баушингера), поэтому для деталей, работающих на сжатие, применять предварительную вытяжку нельзя.

3. Испытания на сжатие

3.1. Проведение испытаний

Испытания на сжатие проводят реже, чем на растяжение, однако для анализа и сравнения механических характеристик пластичных и хрупких материалов, а также сравнения этих характеристик с полученными при растяжении, эти испытания очень важны.

Испытания на сжатие, несмотря на простоту в исполнении, связаны с рядом возникающих эффектов, которые искажают картину испытаний и не позволяют получить точные и корректные результаты. Поэтому **механические характеристики**, полученные при испытаниях на сжатие, носят **несколько условный характер**.

Одной из причин, часто приводящих к такому результату, является нарушение соосности между образцом и сжимающей силой. Это может быть связано с техническими особенностями прессового оборудования, а также с точностью изготовления образца. Так, например, если в образце не выдержана перпендикулярность торца к оси, равнодействующая сжимающих сил будет смещена от оси стержня (рис. 11), в результате чего стержень искривляется и создается комбинация деформаций сжатия и изгиба. Возникающие в сечениях напряжения от этих деформаций алгебраически суммируются и искажают результат, не позволяя получить точные значения механических характеристик материала *чисто при сжатии*. При этом, чем больше высота образца, тем больше вероятность его искривления, поэтому для испытаний на сжатие следует использовать образцы малой высоты.

Вторая проблема, возникающая при испытаниях на сжатие, заключается в том, что на поверхности его контакта плитой *возникают силы трения*, которые принципиально изменяют схему нагружения и вид напряженного состояния (рис. 12).

При «идеальном» сжатии в предположении об отсутствии сил трения высота образца должна равномерно уменьшаться и также равномерно должен увеличиваться его поперечный размер (рис. 12, а). В

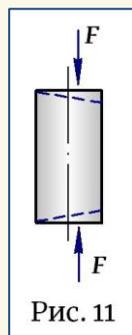


Рис. 11

этом случае в поперечных сечениях будут возникать только нормальные напряжения σ , направленные вдоль оси. Этот случай называется *линейным* или *одноосным напряженным состоянием* и реализация такого нагружения позволила бы получить для материала точные прочностные характеристики при сжатии (рис. 12, б). Однако при сжатии в реальных условиях между плитой и образцом возникают силы трения $F_{\text{тр}}$ (рис. 12, в), направленные к центру сечения. Эти силы сдерживают увеличение поперечного размера в области торца и способность металла к поперечной деформации реализуется на свободной боковой поверхности, вследствие чего образец принимает бочкообразную форму. Силы трения приводят к появлению касательных напряжений τ и изменяют вид напряженного состояния (рис. 12, з). При этом, чем меньше высота образца, тем большее влияние силы трения будут оказывать на определяемые механические характеристики материала. Для снижения трения иногда используют смазку (вазелин, парафин, солидол), прокладки из антифрикционных материалов (графит, фторопласт) или используют конические пуансоны с углом конуса, равным углу трения (рис. 12 д). Однако никакие меры не устраняют полностью возникающие силы трения.

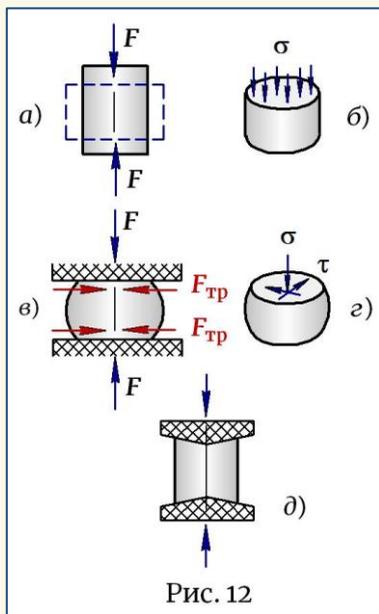


Рис. 12

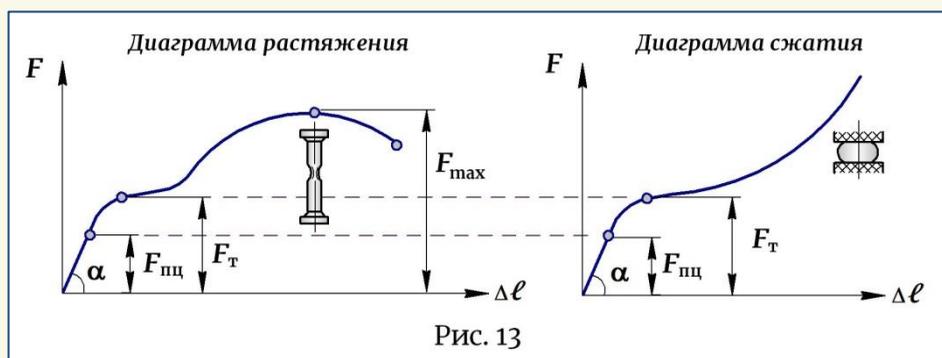
Таким образом, размеры образца оказывают большое влияние на результаты испытаний. Чем длиннее образец, тем меньшее влияние оказывают силы трения, но тем большая вероятность его искривления при сжатии. И наоборот, чем короче образец, тем меньше вероятность его изгиба, но тем большее будет влияние сил трения со стороны плит. И все же, для испытаний на сжатие *выбирают короткие образцы* либо цилиндрической формы, либо в виде кубика. Для сталей и чугунов используют цилиндрические образцы с соотношением высоты и диаметра $h/d = 1 \div 2$.

Испытания на сжатие проводят на универсальной гидравлической испытательной машине, также снабженной диаграммным записывающим устройством.

3.2. ПЛАСТИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Диаграмма сжатия. Сравнительный анализ свойств при растяжении и сжатии

Проведем испытания образца из низкоуглеродистой стали на сжатие, определим для материала основные механические характеристики при сжатии и сравним результаты с характеристиками прочности того же материала, полученными при растяжении (рис. 13).

Анализ результатов показывает, что *диаграмма сжатия* пластичного материала, как и *диаграмма растяжения*, имеет участок пропорциональности и площадку текучести, после которой происходит упрочнение материала и возрастает его способность сопротивляться деформированию (кривая идет вверх). Однако в отличие от растяжения, зафиксировать разрушающую нагрузку при сжатии не удастся. Образец можно сжимать до такого состояния, насколько позволяет мощность пресса, однако довести его сжатием до нарушения целостности, т.е. до разрушения, невозможно.



На основании результатов испытаний пластичного материала на растяжение и сжатие вытекают следующие **ВЫВОДЫ**:

① Для пластичного материала при растяжении можно определить три механические характеристики — предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц(раст)}} = F_{\text{пц(раст)}}/A_0$, предел текучести $\sigma_{\text{T(раст)}} = F_{\text{T(раст)}}/A_0$, предел прочности $\sigma_{\text{в(раст)}} = F_{\text{max(раст)}}/A_0$, а при сжатии только две — предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц(сж)}} = F_{\text{пц(сж)}}/A_0$ и предел текучести $\sigma_{\text{T(сж)}} = F_{\text{T(сж)}}/A_0$. Так как пластичный металл сжатием разрушить невозможно, то такой механической характеристики как предел прочности при сжатии $\sigma_{\text{в(сж)}}$ для него не существует.

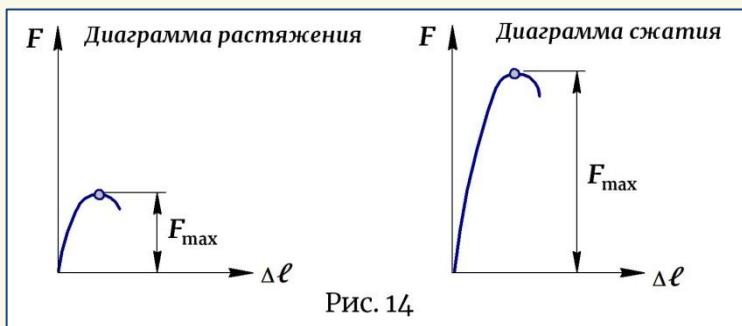
② Пластичные металлы показывают примерно одинаковые механические характеристики прочности при растяжении и сжатии, т.е. $\sigma_{\text{пл}}(\text{раст}) = \sigma_{\text{пл}}(\text{сж})$, $\sigma_{\text{T}}(\text{раст}) = \sigma_{\text{T}}(\text{сж})$, $E_{(\text{раст})} = E_{(\text{сж})}$ (по значению ($E = \text{tg } \alpha$)). А это значит, что **пластичные материалы одинаково сопротивляются растяжению и сжатию**, и поскольку испытания на растяжение дают наиболее точные результаты, прочностные характеристики этих материалов проще и удобнее определять именно при растяжении, а в расчетных формулах принимать —

$$[\sigma]_{\text{раст}} = [\sigma]_{\text{сж}} = [\sigma].$$

3.3. ХРУПКИЕ МАТЕРИАЛЫ. Диаграмма сжатия.

Сравнительный анализ свойств при растяжении и сжатии

Проведем испытания образца из чугуна на сжатие, определим для материала основные механические характеристики при сжатии и сравним результаты с характеристиками прочности того же материала, полученными при растяжении (рис. 14).



Анализ результатов показывает, что *диаграммы растяжения и сжатия* хрупких материалов представляют собой слабо искривленные линии. Они не имеют выраженного *участка пропорциональности*, поэтому для них предел пропорциональности определяют как условный $\sigma_{\text{пл}} = \sigma_{0,002}$ (см. выше), также как и модуль Юнга, который для хрупких материалов не является величиной постоянной и его значение при выполнении инженерных расчетов принимается условно, считая, что до нагрузки $0,5F_{\text{max}}$ материал подчиняется закону Гука. *Диаграммы* не имеют также *площадки текучести* и *участка упрочнения*. Разрушение происходит при весьма незначительных деформациях, однако в отличие от пластичных металлов,

хрупкий материал разрушить сжатием можно. При этом разрушающая нагрузка при сжатии в несколько раз больше разрушающей нагрузки при растяжении, а значит, прочность хрупких материалов при сжатии значительно выше, чем при растяжении. По этой причине эти материалы используют главным образом в конструкциях, работающих на сжатие – опоры, станины станков и т.д.

На основании результатов испытаний хрупкого материала на растяжение и сжатие вытекают следующие **ВЫВОДЫ**:

① Для хрупкого материала и при растяжении, и при сжатии можно определить только одну прочностную характеристику – предел прочности $\sigma_{в(раст)} = F_{max(раст)} / A_0$ и $\sigma_{в(сж)} = F_{max(сж)} / A_0$.

② Разрушение хрупкого материала при сжатии происходит при более высоких нагрузках, чем при растяжении, а значит, $\sigma_{в(сж)} > \sigma_{в(раст)}$ (в 7÷8 раз) и, соответственно, $[\sigma]_{сж} > [\sigma]_{раст}$. Таким образом, **хрупкие материалы неодинаково сопротивляются растяжению и сжатию**, поэтому для определения их прочностных свойств необходимо проводить оба вида испытаний.

Разрушение хрупких материалов *при растяжении происходит по механизму ОТРЫВА*, а *при сжатии – по механизму СДВИГА*. Сдвиг происходит по площадкам, наклоненным к поперечному сечению под углом, примерно равным 45° , однако возникающие силы трения несколько искажают этот угол и в зависимости от их величины разрушение может иметь более сложный характер.

3.4. Сопоставление механических свойств пластичных и хрупких материалов. Основные критерии выбора материала

Существует несколько характерных признаков, строго разделяющих области применения пластичных и хрупких материалов.

ПРИЗНАК № 1.

Пластичные материалы одинаково хорошо сопротивляются растяжению и сжатию, особенно на первых стадиях деформирования. *Хрупкие материалы* «не держат» прочность на растяжение и сопротивляются растяжению намного хуже, чем сжатию. Поэтому:

|| Элементы конструкций, машин и механизмов, работающие на растяжение, следует выполнять из пластичных материалов.

ПРИЗНАК № 2.

Пластичные материалы практически невозможно довести до разрушения при сжатии и на них можно получить высокие степени деформации. *Хрупкие материалы*, хотя и являются при сжатии более прочными, чем при растяжении, однако под действием сжимающих нагрузок все-таки дают трещины и разрушаются. Поэтому:

|| В технологических операциях обработки металлов давлением (ковка, штамповка, гибка, вытяжка, волочение, прокатка и др.), где деталь получают методом формоизменения путем пластического деформирования, могут использоваться только пластичные материалы.

ПРИЗНАК № 3.

Диаграммы растяжения и сжатия *пластичных материалов* имеют площадь намного большую, чем соответствующие диаграммы *хрупких материалов*. А это значит, что для разрушения *пластичного материала* требуется затратить намного большую работу, чем для разрушения *хрупкого материала*. Следовательно, *пластичный материал* способен под воздействием внешних сил воспринимать и накапливать намного большую энергию без риска разрушения, чем *хрупкий*. Поэтому:

|| Для элементов конструкций, которые в процессе работы должны поглощать какую-то величину энергии без разрушения (например, при ударе, импульсных и др. динамических нагрузках), наиболее подходящими являются пластичные материалы. ||
|| *Хрупкие материалы при ударных нагрузках легко разрушаются.*

В то же время при статическом сжатии *хрупкие материалы* иногда способны брать на себя значительно большие нагрузки, чем *пластичные*, вследствие своей способности практически не изменять размеры и форму вплоть до напряжений, близких к пределу прочности.

ПРИЗНАК № 4.

Хрупкие материалы весьма чувствительны к концентрации напряжений. При наличии концентраторов *хрупкий материал* разрушается при напряжениях, значительно меньших, чем предел прочности. *Пластичные материалы* гораздо менее восприимчивы к концентрации напряжений и способны выравнивать их по объему в процессе нагружения. Поэтому:

Если деталь согласно конструктивным требованиям должна иметь поперечные отверстия, вырезы, канавки, выточки и др. концентраторы напряжений, то ее лучше изготавливать из пластичного материала.

ПРИЗНАК № 5.

Часто при сборке конструкции возникает необходимость доработки детали «по месту» — подгибка, поджатие и т.д. Поскольку хрупкие материалы выдерживают без разрушения очень малые деформации, то если подобные операции предполагаются, предпочтительнее деталь изготавливать из пластичного материала.

Таким образом, при выборе материала во всех отношениях наиболее предпочтительным является ПЛАСТИЧНЫЙ МАТЕРИАЛ. Достоинство хрупких материалов заключается только в том, что они дешевле и в некоторых случаях при статическом сжатии работают надежней, чем пластичные. *Пластичность – это самое желаемое свойство для материала.* Все чистые металлы, добываемые из руды, являются высоко пластичными, даже при очень низких температурах. Однако дальнейшее легирование металлов, создание различных соединений и сплавов охрупчивает материал. Поэтому главная технологическая задача при разработке и создании новых материалов — это сохранить пластичность материала.

В завершении вопроса следует сказать, что деление материалов на ПЛАСТИЧНЫЕ и ХРУПКИЕ – чисто условно. Для любого материала с любыми свойствами можно создать такие условия нагружения (скорость, температура, схема деформации), при которых хрупкий материал будет вести себя как пластичный, и наоборот. Например, чугун, который является типично хрупким материалом, при статическом растяжении в условиях одновременного гидростатического сжатия ведет себя как высоко пластичный материал и разрывается с образованием шейки. Камень, являющийся также хрупким материалом, при объемном сжатии в трех направлениях также ведет себя как пластичный. В то же время мягкая малоуглеродистую сталь, а это высоко пластичный материал, можно поставить в такие условия работы (например, при низких температурах) и создать такую схему нагружения, что она разрушится как хрупкий материал. Поэтому обсуждая свойства материалов, правильнее говорить не «пластичный» или «хрупкий» материал, а «пластичное или хрупкое состояние материала», которое проявляется в зависимости от условий нагружения.

4. Потенциальная энергия деформации при растяжении (сжатии). Удельная потенциальная энергия

При нагружении тела внешними силами эти силы совершают работу, которая затрачивается на деформирование элемента: часть работы затрачивается на *упругую деформацию*, а часть – на *пластическую (остаточную)*, поэтому полную работу деформации можно условно представить в виде суммы двух работ:

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{упр}} + A_{\text{ост}} . \quad (7)$$

По классическим представлениям механизм развития деформаций в твердых деформируемых тела, в частности, в металлах, происходит примерно в одинаковой последовательности: сначала возникают упругие деформации, затем появляются пластические, постепенно охватывающие весь объем элемента. Однако в действительности, как показывают исследования, процесс деформирования представляется намного более сложным. Даже в упругом состоянии в металле могут возникать локальные микропластические деформации, вызывающие неупругие явления и существенно влияющие на поведение металлов в состоянии упругости. Таким образом, с самого начала нагружения вплоть до момента разрушения в структуре материала возможно одновременное возникновение и присутствие и упругих, и пластических деформаций, соотношение между которыми по мере возрастания нагрузки изменяется, но которые всегда существуют вместе до тех пор, пока образец находится под нагрузкой, что выражает так называемый «закон сопровождения пластических деформаций упругими». А значит, на протяжении всего процесса нагружения внешние силы совершают работу на этих деформациях.

Работа $A_{\text{упр}}$, затраченная на упругие деформации ОБРАТИМА. Она накапливается в виде *потенциальной энергии деформации*, которая после снятия нагрузки высвобождается и способна совершить новую работу. Работа $A_{\text{ост}}$, затраченная на пластические деформации – НЕ-ОБРАТИМА, она идет на увеличение внутренней энергии пластически деформированного тела, что проявляется, например, в повышении его температуры, изменении электромагнитных свойств, но она не накапливается и не способна совершить работу при разгрузке.

В данном вопросе нас будет интересовать именно *потенциальная энергия деформации, источник ее накопления и способ определения*. В механике материалов на вычислении энергии деформации строится решение многих инженерных задач – определение деформаций и пе-

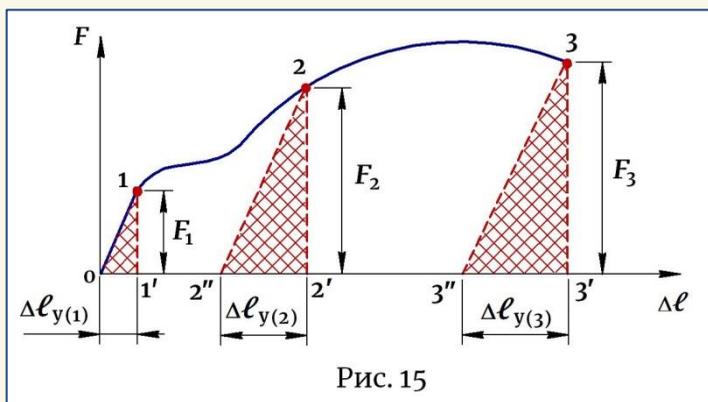
ремещений узлов, расчет элементов на прочность и жесткость, решение статически неопределимых систем и т.д., поэтому определение энергии деформации является одним из самых важных вопросов.

Итак, накопление энергии происходит только на упругих деформациях за счет работы, затраченной на эти деформации, и это накопление происходит в течение всего процесса нагружения, даже за пределом текучести, до самого момента разгрузки. И значит, согласно закону сохранения, потенциальная энергия деформации может быть определена как:

$$U = A_{\text{упр}} . \quad (8)$$

Носителями этой энергии являются внутренние силы упругости (силы упругого сопротивления), которые при деформировании всегда возникают в элементе. Энергия этих сил и есть *потенциальная энергия деформации*, запасенная телом. Благодаря этой энергии силы упругости восстанавливают элемент, возвращая его после разгрузки к первоначальным размерам и форме. Наличие энергии в деформированном теле подтверждает и тот факт, что после снятия нагрузки, когда упругие деформации исчезают, накопленная энергия *высвобождается* и способна *совершить* новую работу. Следовательно, упругое тело работает как аккумулятор и это свойство широко используется на практике, как например, в заводных пружинных часовых механизмах, в амортизирующих элементах типа пружин, рессор и т.д.

Определим величину *потенциальной энергии упругой деформации*. Так как $U = A_{\text{упр}}$ (8), то вычисление энергии произведем через работу, затраченную на упругие деформации, которая, в свою очередь, определяется соответствующей площадью диаграммы растяжения (рис. 15).



Рассмотрим несколько точек диаграммы и определим работу, затраченную на упругие деформации, накопленные на данный момент нагружения:

★ нагружаем образец до **точки 1**. Здесь возникают только упругие деформации, которые подчиняются закону Гука, поэтому на этом участке диаграмма ограничена прямой. Возникающими здесь микропластическими деформациями пренебрегаем. И если полная работа, затраченная на растяжение и разрыв образца, определяется площадью всей диаграммы (3), то работа, затраченная на деформирование до **точки 1**, будет определяться площадью части диаграммы, лежащей до этой точки, т.е. площадью *треугольника* $\Delta(011')$, т.е.

$$A_{\text{упр}(1)} = F_1 \cdot \Delta \ell_{y(1)} / 2 ;$$

★ нагружаем до **точки 2**. Теперь в образце возникают и упругие, и пластические деформации. Полная работа, затраченная на деформирование до **точки 2**, определяется площадью диаграммы ($0122'$). Если нагрузку сбросить, разгрузка пойдет по прямой, параллельной участку (01), отрезок ($2'2''$) будет соответствовать упругой деформации в образце на данный момент, а работа, затраченная на эту деформацию, определится площадью *треугольника* $\Delta(22'2'')$, т.е.

$$A_{\text{упр}(2)} = F_2 \cdot \Delta \ell_{y(2)} / 2 ;$$

★ нагружаем образец до **точки 3** и, рассуждая аналогичным образом, определяем работу, затраченную на упругие деформации, накопленные на этот момент нагружения, как площадь *треугольника* $\Delta(33'3'')$, т.е.

$$A_{\text{упр}(3)} = F_3 \cdot \Delta \ell_{y(3)} / 2.$$

Обобщая результаты расчета, получаем:

|| В любой момент нагружения, даже за предел текучести, когда в образце присутствуют и упругие, и пластические деформации, работа, затраченная на упругую деформацию, всегда определяется площадью *треугольника*.

Поскольку сделанный вывод справедлив для любых значений силы F и упругой деформации $\Delta \ell_y$, соответствующей этой силе в каждый момент нагружения, то индексы можно опустить и, обобщая сказанное, получаем:

$$U = \frac{F \cdot \Delta \ell}{2} . \quad (9)$$

Согласно закону Гука для растяжения и сжатия $\Delta \ell = F \ell / EA$. Подставляем это значение в выражение (9) и получаем значение **потенциальной энергии деформации при растяжении (сжатии)**:

$$U = \frac{F^2 \ell}{2EA} . \quad (10)$$

Чтобы получить энергию деформации, не зависящую от размеров образца, определяют **удельную потенциальную энергию деформации**, т.е. энергию, накопленную в единице объема. Тогда согласно (10):

$$u = \frac{U}{V} = \frac{F^2 \ell}{2EA} \cdot \frac{1}{A \ell} = \frac{F^2}{A^2} \cdot \frac{1}{2E} = \frac{\sigma^2}{2E} = \|\sigma = \varepsilon E\| = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} \rightarrow$$

$$u = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} . \quad (11)$$

Из формул (10)-(11) видно, что чем выше модуль Юнга, т.е. чем жестче материал, тем меньше количество энергии он способен запасти при деформировании и тем меньшую работу он способен произвести при разгрузке. И наоборот, чем меньше модуль Юнга (например, резина), тем более энергоемким является материал. Эта имеет большое значение при устройстве различных рессор и амортизаторов. Например, при посадке самолета амортизатор шасси, сжимаясь при ударе о землю, должен запасти достаточно энергии, чтобы высвобождаясь, она способна была совершить работу по отталкиванию самолета от земли, погашая вертикальную скорость и смягчая посадку. Поэтому чем меньше будет жесткость амортизатора, тем мягче будет посадка. По той же причине при тугой накачке шин велосипеда дорожные толчки ощущаются резче, чем при слабой накачке.

5. Понятие о концентрации напряжений.

Концентрация напряжений при растяжении (сжатии)

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что равномерное распределение напряжений по сечению растянутого или сжатого стержня будет действительно наблюдаться только в тех случаях, когда площадь сечения постоянна по длине или изменяется плавно, без резких скачков и переходов (рис. 16). В этом случае

формула $\sigma = F/A$ дает достаточно точные и достоверные значения напряжений, подтверждаемые опытным путем, и проверку прочности элемента можно выполнять по условию:

$$\sigma_{\max} = F/A \leq [\sigma]. \quad (12)$$

Однако реальные элементы конструкций не имеют, как правило, идеально плавной продольной формы и по своему функциональному назначению наделены разного рода *вырезами, выточками, канавками, отверстиями, ребрами, пазами* и т.д., которые резко изменяют контур тела и форму сечения (рис. 17):

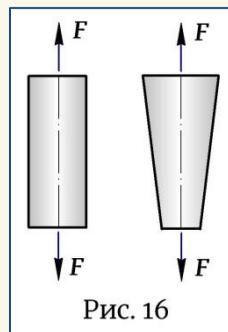


Рис. 16

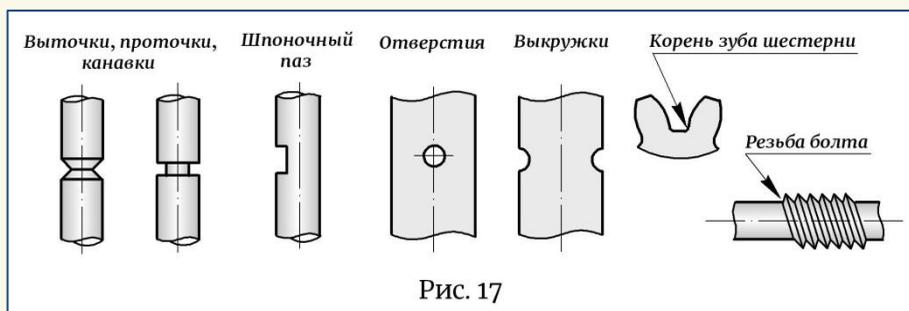


Рис. 17

В таких элементах напряжения неравномерно распределены по сечению и в местах нарушения формы они имеют величину значительно более высокого порядка, чем в остальных точках сечения.

|| Явление повышения напряжений в местах резкого изменения геометрической формы детали называется **КОНЦЕНТРАЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ**, а факторы, вызывающие концентрацию, — **КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**.

Эти напряжения локализируются на очень малой площади сечения – около самого края выреза, отверстия и т.д. Они носят местный характер, поэтому называются *местными напряжениями*, но именно они могут сыграть решающую роль для прочности детали. При этом, чем резче переходы и острее подрезы, тем выше местные максимальные напряжения в области концентратора.

Рассмотрим распределение напряжений в растягиваемой полосе, ослабленной сквозным отверстием (рис. 18), и введем некоторые понятия и величины, используемые в расчетах на прочность в случае концентрации напряжений:

① **Номинальное напряжение** – это напряжение, вычисленное на основании предположения об отсутствии концентрации напряжений, но с учетом ослабленного сечения:

$$\sigma_{\text{НОМ}} = \sigma_{\text{ср}} = F/A_{\text{ослаб}} \quad (13)$$

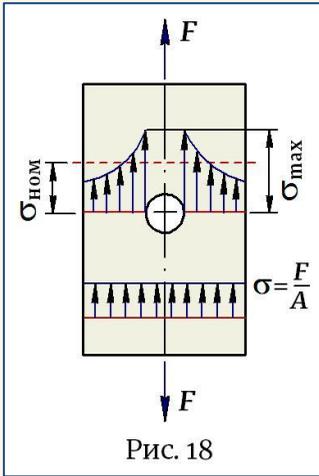


Рис. 18

② **Коэффициент концентрации напряжений** – это количественная характеристика концентрации напряжений, показывающая, во сколько раз максимальные напряжения в области концентратора больше номинального (среднего по сечению), напряжения:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\sigma_{\text{НОМ}}} \quad (14)$$

Тогда согласно (14) и с учетом (13) максимальные напряжения около концентратора определяются как:

$$\sigma_{\text{max}} = \alpha_{\text{к}} \sigma_{\text{НОМ}} \quad (15)$$

Коэффициенты концентрации напряжений различают:

★ **Теоретический коэффициент концентрации напряжений** $\alpha_{\text{к(т)}}$. Зависит от размеров и формы концентратора, вычисляется методами теории упругости и его значение для различных видов и размеров концентраторов представлено в СПРАВОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ. Теоретический коэффициент концентрации $\alpha_{\text{к(т)}} > 1$.

★ **Действительный (эффективный) коэффициент концентрации напряжений** $\alpha_{\text{к(д)}}$. Зависит от размеров и формы концентратора, а также от механических свойств материала. Определяется экспериментально как $\alpha_{\text{к(д)}} = \sigma_{\text{в}} / \sigma_{\text{в(к)}}$, где $\sigma_{\text{в}}$ и $\sigma_{\text{в(к)}}$ – это предел прочности образца без концентратора и при наличии концентратора соответственно. Действительный коэффициент концентрации $1 \leq \alpha_{\text{к(д)}} < \alpha_{\text{к(т)}}$ (рис. 19).

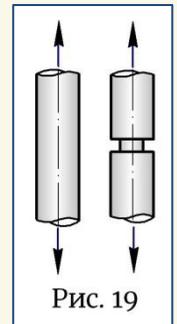


Рис. 19

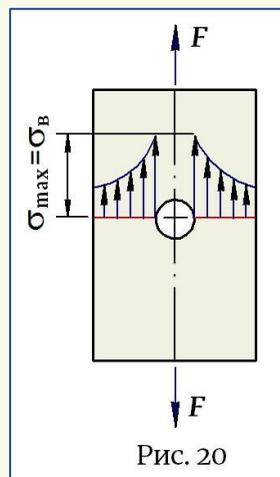
Прочность элементов при наличие концентратора и использование в расчетах того или иного коэффициента концентрации напряжений зависит от свойств материала.

Рассмотрим, каким образом *пластичные* и *хрупкие* материалы реагируют на наличие концентрации напряжений.

Хрупкие материалы

При нагружении образца во всех точках поперечного сечения возникают напряжения, но самое большое значение они имеют изначально около концентратора. По мере увеличения нагрузки напряжения растут и именно в этой области они быстрее всего достигают своего предельного (опасного) значения. Для хрупких материалов опасным является предел прочности σ_B , и как только около концентратора напряжения достигнут значения — $\sigma_{\max} = \sigma_B$ (рис. 20), здесь появляется трещина и начинается разрушение образца. Поэтому для хрупких материалов в расчет принимают теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_K = \alpha_{K(T)}$ и условием прочности с учетом (13) является:

$$\sigma_{\max} = \alpha_{K(T)} \sigma_{\text{ном}} \leq [\sigma]. \quad (16)$$



Хрупкие материалы крайне чувствительны к концентрации напряжений и при статическом, и при динамическом нагружении. При изготовлении деталей из хрупких материалов следует избегать глубоких вырезов, надрезов и резких переходов сечений. Для них необходима тщательная обработка поверхности, так как даже мелкие следы от шлифовального круга являются концентраторами напряжений.

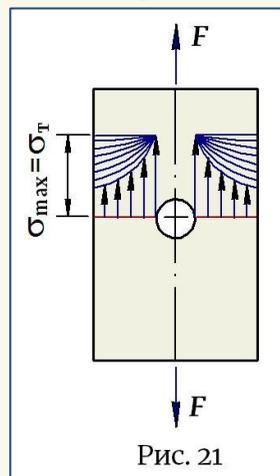
Пластичные материалы

При нагружении образца во всех точках поперечного сечения возникают напряжения, но самое большое значение они имеют изначально около концентратора. По мере увеличения нагрузки напряжения растут и быстрее всего именно в этой области они достигают своего предельного (опасного) значения. Для пластичных материалов опасным напряжением является предел текучести σ_T , и как только около концентратора напряжения достигнут значения — $\sigma_{\max} = \sigma_T$ (рис. 21), рост напряжений здесь приостанавливается, в то время как в остальной части сечения напряжения продолжают расти и зона пластичности около концентратора постепенно увели-

чивается (рис. 21). Прочность образца будет полностью потеряна тогда, когда во всех точках напряжения достигнут значения σ_T .

Пластичные материалы мало чувствительны к концентрации напряжений, так как пластичность материала способствует их выравниванию по сечению. Однако это наблюдается только при статическом нагружении. При динамических нагрузках, когда деформации и напряжения быстро изменяются во времени, выравнивание напряжений произойти не успевают и вредное влияние концентрации напряжений сохраняется. Для пластичных материалов $\alpha_{к(д)} \approx 1$, поэтому прочность таких деталей можно проверять по условию:

$$\sigma_{\max} = \alpha_{к(д)} \sigma_{\text{ном}} \approx \sigma_{\text{ном}} \leq [\sigma]. \quad (17)$$



6. Испытания на твердость

В некоторых случаях для оценки прочности и пластичности материала используют косвенный способ определения его прочностных характеристик, например, через измерение *твердости*.

ТВЕРДОСТЬ – это способность материала сопротивляться механическому проникновению в его поверхность другого, более твердого тела (индентора), не испытывающего остаточных деформаций.

Измерение твердости является одним из самых распространенных и доступных методов механических испытаний, который широко используется в заводской практике и при выполнении научных исследований как способ оценки качества материалов. Испытания на твердость получили широкое применение благодаря простоте, скорости измерения, портативности оборудования, возможности осуществлять текущий контроль изделий в процессе производства и эксплуатации, не влияя на их работоспособность и, что особенно ценно, относятся к неразрушающим методам механических испытаний. Путем измерения твердости эту величину можно оценивать как характеристику, косвенно отражающую механические свойства материала. Это позволяет контролировать различные производственные объекты, и особенно, относящиеся к опасным (например, грузоподъемные краны),

и выявлять в них локальные пластически деформированные зоны, являющиеся потенциальными очагами трещинообразования и разрушения, контролировать изменение свойств элементов, эксплуатируемых в течение длительного времени (например, трубопроводов), осуществлять контроль качества термической обработки при цементации или поверхностной закалке, вызывающих изменение свойств в поверхностном слое.

Испытания на твердость очень разнообразны и отличаются друг от друга по форме индентора, условиям приложения нагрузки, способам расчета величины твердости, времени нагружения и т. д. В зависимости от этих факторов твердость может характеризовать упругие и упруго-пластические свойства, сопротивление малым или большим деформациям, а также сопротивление разрушению.

Оценивается твердость так называемыми *числами твердости*, которые связаны с показателями прочности и пластичности материала и являются производными характеристиками его основных механических свойств – предела прочности, предела текучести, модуля упругости и др. Числа твердости зависят от конкретных условий испытаний и методов вычисления, поэтому для одного и того же материала они могут быть различны как по величине, так и по размерности. Пересчет чисел твердости осуществляется с помощью специальных таблиц, номограмм и эмпирических формул, представленных в специальной литературе.

В настоящее время существует около 30 видов испытаний на твердость, которые по скорости приложения нагрузки и способу измерения сопротивления вдавливанию индентора подразделяют на:

★ *статические*, при которых нагрузку к индентору прикладывают плавно и постепенно, а время выдержки под нагрузкой регламентируется стандартами на соответствующие методы;

★ *динамические*, при которых индентор действует на образец с определенной кинетической энергией, затрачиваемой на формирование отпечатка и упругую отдачу и, поэтому динамическую твердость часто называют твердостью материала при ударе. Твердость при ударе характеризует сопротивление внедрению не только на поверхности образца, но и в некотором объеме материала;

★ *кинетические*, основанные на непрерывной регистрации процесса вдавливания индентора с записью диаграммы «нагрузка на индентор — глубина внедрения индентора». Особенность такого подхода заключается в регистрации не только конечного результата испытаний, но всей кинетики процесса упругопластического деформирования материала при вдавливании индентора.

По принципу приложения нагрузки на индентор методы определения твердости подразделяется на способы *вдавливания, отскока, царапания и резания*:

★ Способы *вдавливания* являются наиболее распространенными. Твердость в этом случае определяется как сопротивление, которое оказывает испытуемое тело внедрению более твердого индентора и отражает преимущественно сопротивление поверхностных слоев материала пластической деформации. К таким методам относятся измерение твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, а также метод измерения микротвердости. Во всех случаях контакт осуществляется вдавливанием индентора определенной формы и размеров, в результате чего реализуется состояние всестороннего сжатия, что позволяет производить оценку твердости практически любых, в том числе и очень хрупких материалов.

★ Способы *отскока* основаны на измерении твердости по высоте отскока бойка, падающего на испытуемую поверхность. Твердость при этом отражает преимущественно сопротивление упругой деформации. Измерение твердости способом *отскока* широко применяют для контроля качества прокатных валков, больших изделий и конструкций с использованием переносных приборов.

★ Способами *царапания и резания* твердость определяется соответственно как сопротивление материала разрушению.

Определение твердости по БРИНЕЛЛЮ

Метод измерения твердости по Бринеллю заключается в статическом вдавливании в испытуемую поверхность усилием F , приложенным перпендикулярно поверхности образца, индентора в форме *шарика* диаметром D , выполненного из стали или твердого сплава, и измерении диаметра отпечатка d после снятия силы (рис. 22). Число твердости по Бринеллю обозначается HB и определяется как отношение силы вдавливания F [кГс], [Н] к площади сферического отпечатка (лунки) A [мм²]:

$$HB = F/A. \quad (18)$$

Площадь отпечатка (шарового сегмента) определяется по известной формуле как:

$$A = \pi Dh, \quad (19)$$

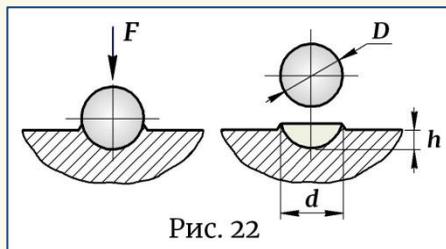


Рис. 22

где D — диаметр шарика, [мм], h — глубина отпечатка, [мм].

И тогда, в зависимости от метода расчета, площадь сферической лунки может быть определена —

★ *по методу невозстановленного отпечатка* — как площадь внедрённой в материал части индентора, вычисляемая путем замера глубины внедрения индентора h [мм];

★ *по методу восстановленного отпечатка* — как площадь сферического отпечатка после снятия нагрузки и его упругого восстановления, вычисляемая путем замера диаметра отпечатка d [мм]. Этот способ является более предпочтительным, и так как диаметр d и высота h шарового сегмента геометрически связаны соотношением —

$$h = (D - \sqrt{D^2 - d^2}) / 2, \quad (20)$$

то согласно формуле (18) и значениям (19)–(20), твердость по Бринеллю вычисляется как:

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (21)$$

По методу Бринелля накоплено много экспериментальных данных и создана объемная техническая документация, поэтому на практике при измерении твердости расчет по указанной формуле (21) не производят, а используют соответствующие таблицы, составленные на основе этой формулы и указывающие значение твердости HB по диаметру шарика D , диаметру отпечатка d и нагрузке F .

При написании числа твердости его размерность не указывается, хотя в технической литературе значения HB для всех материалов представлены в [кГс/мм²]. Для перевода твердости в единицы СИ, принимая $1 \text{ кГс} = 9,81 \text{ Н}$, необходимо число твердости умножить на 9,81, т.е. $HB \text{ [кГс/мм}^2\text{]} = 9,81 \cdot HB \text{ [Н/мм}^2\text{]} = \text{МПа}$. И тогда, например, для отожженной стали твердость по Бринеллю может быть записана как: $HB \text{ 210}$ или $HB = 2060 \text{ МПа}$. Также, если на применяемом твердомере сила F задается в [Н], для приведения твердости HB к принятому справочному виду значение силы в формуле (21) следует умножить на коэффициент 0,102, так как $1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кГс}$.

Для получения одинаковых значений твердости при испытаниях одного и того же металла инденторами разных диаметров необходимо, чтобы соблюдалось соотношение между размером шарика и действующей на него нагрузкой $K = F/D^2$, где величина K [кГс/мм²] подбирается из ряда значений, приводимых в ГОСТе, с учетом свойств испытуемого металла так, чтобы соотношение между диаметрами шарика и отпечатка было в некотором диапазоне ($d/D = 0,2 \dots 0,6$). Так, для стали, чугуна и других высокопрочных сплавов принимают $K = 30$, для меди, никеля и их сплавов — $K = 10$, для алюминия, магния и сплавов на их основе — $K = 5$.

Когда твердость испытуемого металла соизмерима с твердостью индентора, происходит деформация (смятие) шарика, вследствие чего искажается форма отпечатка и нарушается точность результатов. Поэтому для данного метода вводится ограничение – верхний предел измерения твердости по Бринеллю не должен превышать величину $HB\ 450$, а значит, метод пригоден только для относительно мягких материалов. Для испытаний более твердых материалов используют шарики из твердых сплавов на основе карбида вольфрама (WC), что позволяет повысить верхний предел измерения твердости до значений $HBW\ 740$. Ограничением метода Бринелля является также невозможность измерения твердости тонких листов, лент и тонких поверхностных слоев. Минимально допустимая толщина образца для корректного измерения твердости HB должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка h .

Твердость по Бринеллю является косвенной характеристикой прочности и прямой связи твердости HB с пределом текучести или пределом прочности материала не существует. Однако на практике часто используют эмпирическую линейную зависимость $\sigma = k \cdot HB$, где коэффициент k определяется на основе сравнительных испытаний для конкретных классов металлов и в зависимости от вида металла и его состояния принимается в пределах $k = 0,15 \dots 0,5$.

Основной недостаток метода заключается в том, что твердость по Бринеллю зависит от нагрузки. Поскольку шаровой индентор не обеспечивает геометрического подобия сферических отпечатков, т.е. изменение глубины вдавливания не пропорционально изменению диаметра отпечатка (20), а значит, и площади отпечатка, для каждого размера шарика необходимо подбирать соответствующее регламен-

тируемое усилие, что создает неоднозначность при сравнении чисел твердости HV для разных материалов.

Преимуществом метода Бринелля является его простота и отсутствие необходимости специальной подготовки поверхности для проведения испытаний, что является удобным для его применения непосредственно на деталях в цеховых условиях. Метод Бринелля является одним из основных методов определения твердости.

Определение твердости по ВИККЕРСУ

Измерение твердости по Виккерсу основано на вдавливании в образец усилием F , приложенным в течение определенного времени, алмазного индентора в форме правильной четырехгранной пирамиды с углами между гранями $\alpha = 136^\circ$ и измерении диагоналей d_1 и d_2 отпечатка, оставшегося на поверхности образца после снятия нагрузки и соответствующего глубине погружения индентора (рис. 23). При определении твердости по Виккерсу индентор имеет один размер, но варьируется сила — 50...1000Н. Применение алмазной пирамиды обеспечивает геометрическое подобие пирамидальных отпечатков при любой нагрузке, т.е. соотношение глубины и размера отпечатка при максимальном вдавливании не зависит от приложенного усилия. Это позволяет достаточно строго сравнивать твердость разных металлов и результаты испытаний при разных нагрузках. Ввиду того, что геометрические размеры индентора известны и строго регламентированы, вместо глубины погружения определяют площадь отпечатка в поверхностном слое испытуемого материала. Число твердости по Виккерсу обозначается HV и определяется делением нагрузки на площадь боковой поверхности пирамидального отпечатка:

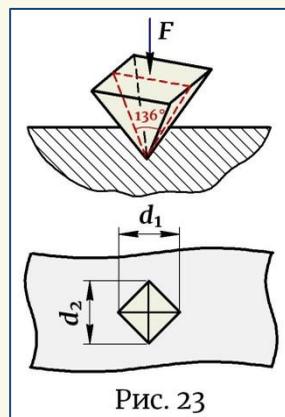


Рис. 23

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2F \sin(\alpha/2)}{d^2} = 1,8544 \frac{F}{d^2}, \quad (22)$$

где $d = (d_1 + d_2) / 2$ — среднеарифметическая величина обеих диагоналей, замеренных с помощью микроскопа, являющегося составной частью прибора Виккера.

Число твердости по Виккерсу имеет такую же размерность, как и твердость по Бринеллю — $[\text{кгс}/\text{мм}^2]$, $[\text{Н}/\text{мм}^2]$ или $[\text{МПа}]$, и перевод единиц здесь осуществляется таким же образом, как описано выше.

Достоинство метода Виккерса заключается в возможности измерения твердости мягких, а также особо твердых материалов. Благодаря применению малых нагрузок этим методом можно измерять твердость очень тонких изделий, изделий малых размеров, а также твердость поверхностных слоев, например, при обезуглероживании, поверхностном наклепе, цементации и т. д. Метод вдавливания алмазной пирамиды является самым точным и универсальным. Вследствие большого угла в вершине наконечника пирамиды даже при малой глубине ее внедрения, диагональ отпечатка имеет большую величину, что определяет высокую точность и чувствительность метода.

Определение твердости по РОКВЕЛЛУ

Измерение твердости по Роквеллу предназначено для неразрушающего контроля твердости наименее пластичных материалов — сталей и их сплавов. Метод основан на фиксации прямого измерения глубины проникновения твердого тела измерительной головки (индентора) в материал образца. Глубина отпечатка характеризует способность материала сопротивляться внешнему воздействию без образования валика из вытесненного металла вокруг индентора. Твердость по Роквеллу (HR) — безразмерная величина, которая выражается в условных единицах до 100, где единица твердости соответствует осевому перемещению индентора на глубину 0,002 мм. Чем глубже внедрение индентора, тем меньше твердость. В качестве индентора применяют алмазный конус с углом 120° и радиусом при вершине 0,2 мм или закаленный шарик диаметром 1,588 мм. Универсальность метода заключается в наличии трех шкал твердости, которые проградуированы под соответствующую нагрузку для работы с одной из измерительных головок. Алмазный конус применяется для измерения твердости по шкале A (HRA) и C (HRC), закаленный шарик — по шкале B (HRB). Шкала A используется для измерения твердости тонких (0,5–1 мм) поверхностных слоев и очень твердых материалов; по шкале C замеряют высокую твердость, превышающую HB 450, шкала B предназначена для мягких материалов, имеющих твердость менее HB 400.

Техника проведения эксперимента заключается во вдавливании наконечника (алмазного конуса или закаленного шарика) в испытуемый образец двумя последовательно прикладываемыми нагрузками — *предварительной* $F_0 = 100\text{Н}$, и *основной* $F_{\text{осн}}$, принимаемой для шкал А, В, С соответственно равной 600Н, 1000Н и 1500Н. Необходимость предварительной нагрузки заключается в том, что она обеспечивает плотное прилегание наконечника к образцу и исключает влияние на результаты испытаний вибраций, шероховатости и локальных повреждений поверхностного слоя и т.п.

После удерживании образца в течение 3-5 секунд под действием суммарной

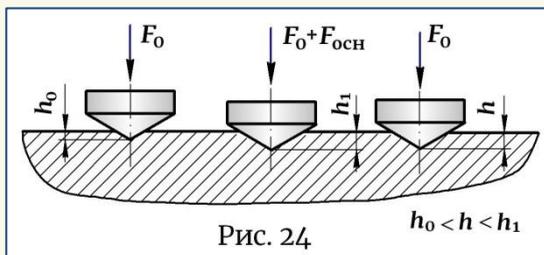


Рис. 24

силы ($F_0 + F_{\text{осн}}$), в результате действия которой индентор внедряется на максимальную глубину, производя пластическую и упругую деформации, основная сила $F_{\text{осн}}$ сбрасывается, а предварительная F_0 сохраняется (рис. 24). Вследствие частичного упругого восстановления образца индентор поднимается вверх, но не достигает значения h_0 — глубины внедрения от предварительной силы F_0 , и занимает положение, соответствующее остаточной глубине h , которая и характеризует твердость металла. Таким образом, твердость по Роквеллу отражают степень упругого восстановления отпечатка после снятия нагрузки, т.е. число твердости по Роквеллу определяет сопротивление упругим или малым пластическим деформациям. Разница ($h - h_0$) зависит от твердости материала и чем он тверже, тем меньше эта величина. Глубина отпечатка измеряется индикатором часового типа с ценой деления 0,002мм и вычисление твердости производится по соответствующим формулам:

★ по шкале А (HRA) и С (HRC) —
$$HR = 100 - \frac{h - h_0}{0,002} ; \quad (23)$$

★ по шкале В (HRB) —
$$HR = 130 - \frac{h - h_0}{0,002} . \quad (24)$$

Преимуществом метода Роквелла является быстрота измерения, так как здесь, в отличие от определения твердости по Бринеллю и

Виккерсу, отпадает необходимости выполнять раздельное проведение операций вдавливания и измерения отпечатка. Однако недостаток метода Роквелла заключается в том, что для проведения эксперимента необходима тщательная подготовка поверхности — шлифование. На приборе Роквелла, где глубина отпечатка мала и ее измеряют с точностью до 0,002 мм, могут оказывать влияние загрязненность, вибрация и другие условия производства.

Определение МИКРОТВЕРДОСТИ

Метод определения микротвердости предназначен для оценки твердости очень малых (микроскопических) объемов материала и его применяют для определения твердости отдельных фаз и структурных составляющих сплавов, тонких поверхностных слоев и покрытий толщиной в сотые доли миллиметра, для измерения твердости мелких деталей, тонкой проволоки, ленты и т.д.

Метод определения микротвердости основан на вдавливании в испытуемый образец алмазных наконечников, которые в зависимости от назначения испытаний могут иметь разные формы и размеры. Основным и наиболее распространенным наконечником является алмазная четырехгранная пирамида с квадратным основанием и углами между гранями 136° , подобная пирамиде Виккерса, однако отличающаяся тем, что поскольку объем, деформируемый вдавливанием, должен быть меньше объема измеряемого фрагмента структуры, пирамида имеет меньшие размеры и нагрузки при его вдавливании составляют величину порядка 0,05...5 Н. Диагональ отпечатка при этом имеет очень малый размер — 7...50 мкм, поэтому прибор для определения микротвердости, помимо механизма для вдавливания алмазной пирамиды, оснащен металлографическим микроскопом.

Микротвердость определяется отношением силы вдавливания к площади поверхности полученного отпечатка и вычисляется по формулам, соответствующим форме применяемого индентора. Обозначается микротвердость буквой H с указанием индекса формы наконечника: для четырехгранной пирамиды с квадратным основанием, подобной пирамиде Виккерса, микротвердость обозначается как H_{\square} и вычисляется по формуле (22); H_{\diamond} — для четырехгранной пирамиды с ромбическим основанием, H_{∇} — для трехгранной пирамиды с основанием в виде равностороннего треугольника, H_{\circ} — для билиндрического наконечника. Размерность микротвердости не указывается.

Основным способом определения микротвердости является метод *восстановленного отпечатка*, когда размеры отпечатков определяются после снятия нагрузки. Для случая, когда требуется определение дополнительных характеристик материала (упругое восстановление, релаксация, ползучесть и др.), допускается проводить испытание по методу *невосстановленного отпечатка*, при котором размеры отпечатка определяют в процессе приложения нагрузки по глубине вдавленного индентора. В этом случае указанные выше значения микротвердости обозначают как: $H_{\square h}$, $H_{\diamond h}$, $H_{\nabla h}$, $H_{\emptyset h}$.

При определении микротвердости небольшие нагрузки и малые размеры индентора обуславливают необходимость тщательной подготовки поверхности образца – шлифование, полирование, а при работе с металлографическими структурами – изготовление шлифов и их протравки реактивами для выявления структуры.

Определение твердости по ШОРУ

Этот способ относится к динамическим методам и заключается в определении твердости материала по величине отскока бойка после его удара об исследуемую поверхность. Такой способ измерения твердости принципиально отличается от вышеописанных – здесь твердость оценивают по величине упругой, а не пластической деформации.

При *горизонтально расположенной поверхности* образца удар наносится свободно падающим с заданной высоты бойком с алмазным индентором на конце, представляющим собой определенной формы иглу с закругленным алмазным наконечником. Кинетическая энергия падающего бойка частично расходуется на образование пластически деформированной лунки, частично переходит в потенциальную энергию упругой деформации, под действием которой боек отскакивает на определенную высоту. Высота отскока всегда меньше высоты падения, и чем меньше кинетической энергии затрачено на пластическую деформацию, тем больше будет высота отскока, которая и принимается за характеристику твердости. Твердость по Шору является условной величиной – за 100 единиц твердости принимается высота отскока бойка $h_{100} = 13$ мм и эта величина соответствует максимальной твердости материала. Твердость по Шору не имеет единиц измерения, она выражается целым (округленным) числом с указанием символа *HSD*, например, 90 *HSD*. Согласно стандарту, твердость по Шору измеряют в диапазоне от 20 до 140 единиц *HSD*. Измерение производят на приборе, называемом «склероскоп Шора».

При *вертикально расположенной поверхности* испытуемого образца для нанесения удара используют маятниковый копер, в ударном молоте которого в качестве индентора установлен стальной шарик. Таким способом величина твердости определяется по величине угла отскока маятника.

Метод измерения твердости по Шору не является точным, так как высота отскока бойка зависит от многих факторов — от толщины металла, от степени шероховатости его поверхности и структуры, от формы и массы бойка, а также от массы образца. Если масса образца мала, часть кинетической энергии бойка идет на образование колебаний образца, в результате чего высота отскока бойка уменьшается. Однако этот метод, вследствие его простоты и оперативности, часто используется в заводской практике, например, для быстрого контроля результатов термической обработки стальных изделий, применяется прямо на готовых изделиях, крупногабаритных деталях, криволинейных поверхностях.

В завершении вопроса следует напомнить, что при сопоставлении значений твердости, полученных разными методами, между собой и с механическими свойствами материалов приводимые в литературных источниках таблицы и зависимости являются чисто эмпирическими. Сопоставительный перевод значений твердости не имеет физического смысла, так как при вдавливании различных по форме и размерам инденторов и с разной нагрузкой твердость определяется при совершенно различных напряженных состояниях материала.

7. Влияние различных факторов на механические свойства материалов

Механические характеристики материалов зависят от многих факторов — от химического состава, структуры и строения материала, технологии получения детали, ее механической и термической обработки, от условий эксплуатации — характера нагрузки, температуры, среды и т.д. Рассмотренные выше исследования по определению механических свойств материалов проводились в так называемых *нормальных условиях* — при комнатной температуре и небольших скоростях нагружения. Однако в реальных условиях, в которых работают конструкционные материалы, диапазон температур и скоростей нагружения весьма высок. Так, например, детали паровых и газовых турбин, реактивных двигателей, энергетических установок и др. подвергаются действию температур до $800^{\circ}\dots 1000^{\circ}\text{C}$, в то время как детали машин и

конструкций, работающих в условиях Крайнего Севера, испытывают воздействие очень низких отрицательных температур. В северных районах охлаждение материалов достигает -60°C , корпуса самолетов и космических аппаратов могут охлаждаться до температуры кипения жидкого кислорода (-183°C), детали и отдельные узлы холодильной и криогенной техники, которые используются для получения, хранения, транспортировки сжиженных газов, охлаждаются до температуры кипения жидкого гелия (-269°C) и т.д. Диапазон скоростей нагружения также широк – импульсные нагрузки, которые испытывают тела, находящиеся в области взрыва, нагрузки ударные, действующие в течение нескольких секунд, нагрузки циклические, многократно изменяющиеся по величине и направлению, нагрузки статические, нагружающие деталь кратковременно или постоянно в течение длительного времени. Многие элементы конструкций одновременно с силовым и температурным воздействием работают в условиях высокой влажности, агрессивных сред, радиоактивного облучения и т.д. Соответственно, в зависимости от указанных обстоятельств и механические свойства материалов будут проявляться по-разному.

Влияние температуры

Все механические характеристики металлов существенно изменяются в зависимости от температуры и каждый металл при изменении температуры ведет себя по-разному. Единой строгой теории, общей для всех материалов, которая описывала бы механические свойства того или иного материала в различных диапазонах температур, не существует. Основными данными, используемыми при разработке конструкций и выборе материала, являются экспериментальные данные и отдельные эмпирические формулы, полученные на их основе.

Как показывают исследования, для всех металлических материалов существует общая тенденция — при повышении температуры характеристики ПРОЧНОСТИ падают, а характеристики ПЛАСТИЧНОСТИ возрастают. Однако некоторые металлы проявляют при нагреве особенность изменения свойств — в определенном диапазоне температур повышение их пластичности нарушается и они резко охрупчиваются. Явление охрупчивания сплава при высоких температурах называется **КРАСНОЛОМКОСТЬЮ**. Это явление проявляется в образовании на заготовках рванин и трещин при горячей обработке давлением (ковке, штамповке, прокатке) и происходит в области температур красного или желтого каления $850^{\circ}\dots 1150^{\circ}\text{C}$. Причиной **КРАСНОЛОМКОСТИ** является оплавление примесей по границам зерен, особенно, легко-

плавких соединений серы. Сера является вредной примесью и негативно влияет также на другие свойства металла.

У некоторых сталей при температурах $200^{\circ}\dots 300^{\circ}\text{C}$ наблюдается явление **СИНЕЛОМКОСТИ** — резкое снижение пластичности при одновременном повышении прочности (повышении σ_{T} и $\sigma_{\text{В}}$).

Цветные сплавы при нагревании также становятся более пластичными, однако некоторые из них при температурах, близких к $t_{\text{пл}}^{\circ}$, резко охрупчиваются. Такое явление называется **ГОРЯЧЕЛОМКОСТЬЮ** — склонностью сплавов к хрупкому межкристаллитному разрушению при наличии жидкой фазы по границам зерен. Такое разрушение широко распространено при горячей обработке давлением, термической обработке и эксплуатации изделий при повышенных температурах. По сути, **КРАСНОЛОМКОСТЬ**, проявляемая в сталях при горячей обработке давлением, является частным случаем **ГОРЯЧЕЛОМКОСТИ**. При литье и сварке это явление проявляется в образовании в слитках, фасонных отливках и сварных швах так называемых «горячих» трещин, которые являются одним из самых распространенных и наиболее трудно устранимых видов брака.

! При этом, следует обратить внимание, что все чистые металлы — и железо, и цветные металлы — обладают природной пластичностью и не теряют ее при любых температурах. Любой чистый металл всегда пластичнее сплава, созданного на его основе.

Что касается **ПРОЧНОСТИ**, то с повышением температуры прочность снижается и у сплавов, и у чистых металлов. Способность сталей и сплавов работать в условиях высоких температур в течение заданного периода времени и сохранять высокие механические свойства называется **ЖАРОПРОЧНОСТЬЮ**. Малоуглеродистая сталь, например, при $t^{\circ} > 400^{\circ}\text{C}$ настолько теряет свою прочность, что ее применение при таких температурах недопустимо. **ЖАРОПРОЧНОСТЬ** достигается легированием стали тугоплавкими элементами (ванадием, молибденом, хромом, вольфрамом). Высокой **ЖАРОПРОЧНОСТЬЮ** обладает металлокерамика, способная надежно работать при $t^{\circ} > 1000^{\circ}\text{C}$.

Многие сплавы, например, малоуглеродистые стали, при высоких температурах сильно окисляются и на их поверхности образуется хрупкая окалина. Способность металла противостоять при высокой температуре газовой коррозии и химическому разрушению поверхности оценивается свойством **ЖАРОСТОЙКОСТИ**. Высокая окалиностойкость сталей достигается соответствующим легированием, способствующим созданию прочных и плотных окислов на поверхности деталей, предо-

храняющих металл от контакта с газовой средой и обеспечивающих надежную работу до температур 1100°... 1150°С.

Работа материалов в условиях очень низких температур приводит к явлению **ХЛАДНОЛОМКОСТИ** — разрушению при напряжениях, ниже предела упругости $\sigma_{упр}$. Хладноломкими являются железо, молибден, хром, вольфрам и некоторые другие металлы. Аппараты, работающие при низких температурах, изготавливают из качественной мартеновской стали (область применения до -40°C), из низколегированной стали с добавкой марганца (до -70°C), из высоколегированных хромоникелевых сталей (до -180°C). Широкое применение в условиях низких температур находят цветные металлы и сплавы, не подверженные хладноломкости.

Влияние температуры и времени

Работа в условиях высоких температур в течение короткого времени не представляет опасности, однако намного серьезнее становится ситуация при длительном воздействии температуры на элемент.

При высокой температуре и ее длительном действии у металлов, работающих под нагрузкой, проявляется свойство **ПОЛЗУЧЕСТИ (КРИП)**, которое заключается в том, что с течением времени наблюдается медленный и непрерывный рост пластических деформаций и происходит этот рост при **постоянном напряжении**, которое при кратковременном действии нагрузки вообще не приводит к возникновению пластических деформаций. **ПОЛЗУЧЕСТЬ** опасна тем, что может привести к недопустимым остаточным изменениям расчетных размеров деталей. У сталей она наблюдается в интервале температур 350°... 400°С.

Мерой оценки **ПОЛЗУЧЕСТИ** является **предел ползучести** — напряжение, при котором пластическая деформация при заданных температуре и длительности испытания достигает заданной величины.

Прочность материала при повышенных температурах оценивается **пределом длительной прочности** — напряжением, воздействие которого в течение заданного промежутка времени при постоянной температуре приводит к разрушению образца.

Предел ползучести и **предел длительной прочности** являются основными характеристиками **ЖАРОПРОЧНОСТИ** материала и позволяют оценить его способность в условиях высоких температур сопротивляться медленному, постепенно возрастающему во времени, пластическому деформированию и разрушению.

С явлением **ПОЛЗУЧЕСТИ** тесно связано явление **РЕЛАКСАЦИИ** — самопроизвольное снижение во времени напряжений при неизменной полной деформации. **РЕЛАКСАЦИЯ** происходит вследствие постепенного перехода части упругих деформаций в необратимые пластические, которые закрепляются в детали, поэтому процесс **РЕЛАКСАЦИИ** можно представить как **ПОЛЗУЧЕСТЬ**, протекающую при уменьшении напряжений. Однако эти два процесса не вполне тождественны и механизмы возникновения и нарастания деформаций здесь различны. При **РЕЛАКСАЦИИ** уменьшение напряжений в детали вызывается нарастанием пластической деформации за счет перехода в нее части упругой деформации *при неизменной длине детали*, а при **ПОЛЗУЧЕСТИ** нарастание пластической деформации происходит исключительно *за счет удлинения детали*. Поэтому общая деформация при **ПОЛЗУЧЕСТИ** значительно больше, чем при **РЕЛАКСАЦИИ**.

Влияние температуры и скорости нагружения

Все вышесказанное о влиянии температуры и длительности действия на механические свойства материала относится к работе деталей в условиях статического нагружения. Однако большое влияние на механические свойства материалов оказывает скорость и время нагружения. При медленном нагружении более явно проявляются свойства пластичности, при высокоскоростном — свойства хрупкости, так как при больших скоростях нагружения образование пластических деформаций не успевает полностью завершиться и в большей степени проявляется склонность материала к хрупкому разрушению. Увеличение скорости деформирования приводит к росту прочностных характеристик металла и особенно предела текучести материала. Наиболее заметное влияние скорости сказывается при высоких температурах: в нагретом металле с увеличением скорости нагружения возрастает предел прочности σ_B , а пластичность падает.

Исследование влияния различных факторов на механические свойства материалов является очень многоплановым, разносторонним и неоднозначным вопросом и особенно сложным при совместном воздействии разных факторов. Он требует постоянного изучения и совершенствования методик исследования, поскольку с развитием машиностроения условия работы конструкций все более усложняются и особенности поведения материалов необходимо учитывать на этапе их проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подскребко, М.Д. Сопротивление материалов: Учебник. / М.Д. Подскребко – Минск: Вышэйшая школа, 2007. – 797 с.
2. Сборник задач по сопротивлению материалов / А.С. Вольмир [и др.]; под ред. Вольмира А.С. – М.: Наука, 1984. – 407 с.
3. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: Учебник./В.И. Феодосьев – М.: Наука, 1986. – 512 с.
4. Дарков, А.В. Сопротивление материалов: Учебник. / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро – М.: Высшая школа, 1975. – 742 с.
5. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев – М.: Наука, 1976. – 607 с.
6. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов: Учебник./ Г.С. Писаренко [и др.]; под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Вища школа, 1979. – 696 с.
7. Татур, Г.К. Общий курс сопротивления материалов: Учебник. / Г.К. Татур – Минск:Вышэйшая школа, 1974. – 462 с.