

## 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 4.1. Определение механических характеристик

**Механические характеристики материалов** – числовые значения, характеризующие прочность, жесткость, пластичность, упругость, вязкость и другие свойства. Они определяются экспериментально, на основе результатов испытаний образцов.

Практически на каждый вид испытаний разработаны соответствующие Стандарты, в которых регламентированы все этапы их проведения: вид, размеры, требования к механической обработке образцов, требования к испытательным машинам, методика проведения и обработки результатов испытаний.

Испытательные лаборатории оснащены универсальными и специальными машинами, позволяющими проводить определение различных характеристик материалов. В СНГ испытательное оборудование производится в Российской Федерации – (АО «Точприбор», г. Иваново и «ИПО Точмашприбор», г. Армавир).

**Наиболее важными и чаще всего используемыми в расчетах на прочность и жесткость являются механические характеристики материалов, которые определяются по результатам испытаний образцов на растяжение и сжатие.**

Испытания проводятся на универсальных испытательных машинах, которые снабжены устройствами, показывающими нагрузку, которая передается на образец – так называемые **силоизмерительные устройства**. Эти машины снабжаются также устройствами, с помощью которых записывается так называемая диаграмма деформирования – вычерчивается **график «удлинение образца – нагрузка на образец»**.

В настоящее время, в связи с бурным развитием компьютерной и микропроцессорной техники многие этапы испытаний автоматизированы.

**4.1.1. Диаграммы деформирования.** Диаграммы деформирования строятся при различных видах нагружения: при растяжении, при сжатии, при изгибе, при кручении и т.д. Построение диаграмм рассмотрим на примере испытаний на растяжение.

Испытанию обычно подвергаются цилиндрические или плоские образцы определенных размеров, устанавливаемых Стандартом. На рис. 4.1 *а* показан вид цилиндрического образца.

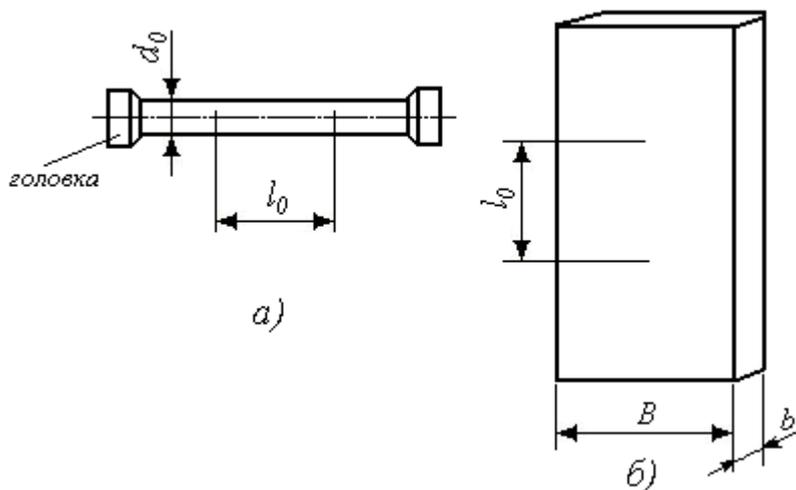


Рис. 4.1. Цилиндрический (*а*) и плоский (*б*) образцы для испытаний на растяжение

При определении размеров образца, исходя из его диаметра  $d_0$ , определяется так называемая **расчетная (рабочая) длина**  $l_0$ . При определении общей длины образцов предусматриваются участки (головки) для обеспечения размещения образца в захватах машины.

Обычно, в соответствии со Стандартом, расчетная длина составляет для нормальных образцов  $l_0 = 10 d_0$ , а для укороченных –  $l_0 = 5 d_0$ .

Исходя из площади цилиндрического образца, определяют его диаметр:

$$F_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}; \quad d_0 = \sqrt{\frac{4F_0}{\pi}} = 1,13\sqrt{F_0}. \quad (4.1)$$

Тогда:

$$\text{для нормальных образцов } l_0 = 10 d_0 = 11,3\sqrt{F_0}; \quad (4.2)$$

$$\text{для укороченных } l_0 = 5 d_0 = 5,65\sqrt{F_0}. \quad (4.3)$$

Эти зависимости используются для расчета размеров плоских образцов (см. рис.4.1

б):

$$B \geq 3b; \quad F_0 = B \times b; \quad l_0 = 11,3\sqrt{B \times b}. \quad (4.4)$$

Порядок испытаний следующий. Образец устанавливается в захватах машины и **плавно** нагружается. В результате нагружения образец деформируется. В процессе испытания производится запись нагрузки и удлинения образца – вычерчивается **диаграмма растяжения** (диаграмма деформирования).

Диаграммы, изображенные на рис. 4.2, характерны для пластичных материалов, например, малоуглеродистой стали или отожженной меди (а), для хрупких материалов – чугуна (б), для некоторых хрупко-пластичных материалов – латуни, марганцовистые и алюминиевые бронзы (в). Большинство металлов и сплавов дают диаграмму, изображенную на рис.4.2 (г)

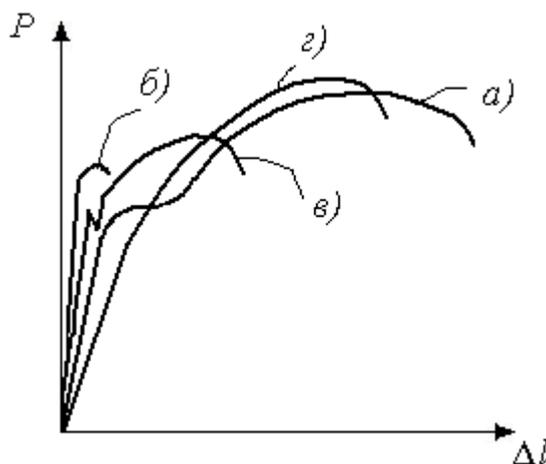


Рис. 4.2. Диаграммы растяжения материалов

Видим, что для материалов с разными пластическими и другими свойствами, диаграммы значительно отличаются. Эти особенности подробно проанализируем при выполнении лабораторной работы.

Рассмотрим подробнее процесс деформирования образца на примере диаграммы для малоуглеродистой стали, имеющей все характерные участки (рис.4.3).

При малых значениях силы  $P$  между **нагрузкой и удлинением** имеет место **прямая пропорциональная зависимость**. Материал деформируется, подчиняясь **закону Гука (прямая OA)**. В точке А нагрузка будет равна  $P_{ли}$ . (нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности материала).

Если образец нагрузить до нагрузки, не превышающей указанную выше, то после снятия нагрузки он полностью восстановит свои форму и размеры. В этой зоне образец испытывает **только упругие деформации**.

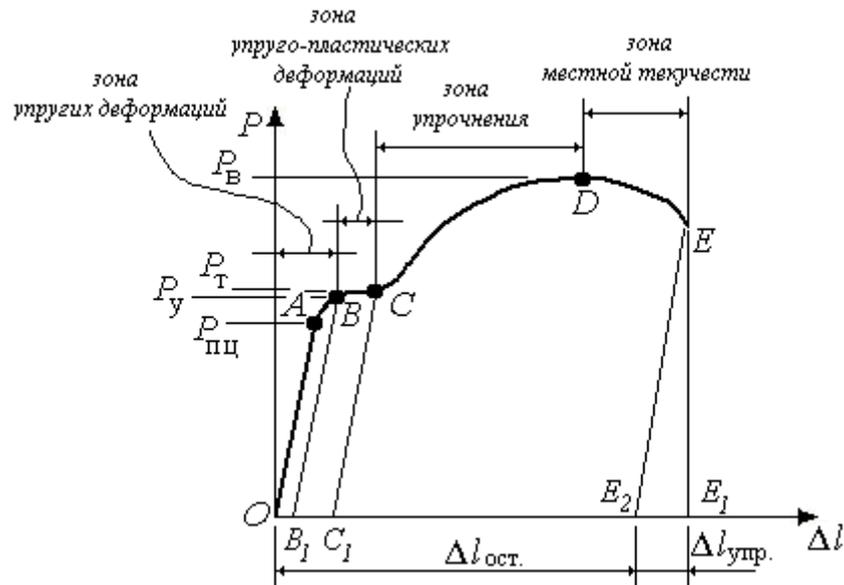


Рис. 4.3. Диаграмма деформирования малоуглеродистой стали и зоны диаграммы

При дальнейшем увеличении нагрузки деформации будут расти несколько быстрее нагрузки – кривая  $AB$ . И если образец разгрузить в точке  $B$ , то в материале появятся **незначительные по величине остаточные деформации**, характеризуемые отрезком  $OB_1$ .

Обычно их определяют в **относительных величинах**: относительные линейные деформации, определяются отношением абсолютной линейной деформации к исходной длине (в данном случае – к расчетной длине образца). Например, если образец, длиной 1 м растягивается некоторой силой и получает абсолютную деформацию 1 мм, то относительная деформация его составит:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{1 \times 10^3} 100\% = 0,1\%. \quad (4.5)$$

Для точки  $B$  эти деформации составят всего  $0,001\%$  и не будут опасными для конструкции. Допускают, что остаточные деформации для этой точки не должны превышать  $0,05\%$ .

Считается, что **до точки  $B$  диаграммы материал сопротивляется нагружению упруго**. Нагрузка  $P_y$  – нагрузка, соответствующая пределу упругости материала.

**УЧАСТОК ДИАГРАММЫ  $OB$  – ЗОНА УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ.**

Дальнейшее увеличение нагрузки вызовет значительные по величине деформации, при этом на данной диаграмме фиксируется постоянство нагрузки при увеличении деформации – материал «течет».

На диаграмме – так называемая площадка текучести (практически это прямая  $BC$ ). В точке  $C$  текучесть заканчивается, а нагрузка  $P_T$  соответствует пределу текучести. Измеренная в этот момент остаточная деформация обычно не превышает  $\approx 0,2\%$ .

**УЧАСТОК ДИАГРАММЫ  $BC$  – ЗОНА УПРУГО ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ.**

Дальнейшее нагружение и деформирование образца идет с увеличением нагрузки и деформации (кривая  $CD$ ). Зависимость между исследуемыми параметрами

криволинейная. В точке  $D$  отмечается максимальная нагрузка, которую может выдержать образец. Эта нагрузка соответствует пределу прочности материала  $P_B$ .

#### УЧАСТОК ДИАГРАММЫ $CD$ – ЗОНА УПРОЧНЕНИЯ.

При достижении этой нагрузки на образце образуется шейка: наблюдается постепенное местное сужение. Деформация образца локализуется в области шейки, диаметр уменьшается и, при достижении определенного его значения, происходит разрушение образца. Фиксируется нагрузка в момент разрушения.

Площадь поперечного сечения образца уменьшается, поэтому на графике фиксируется снижение нагрузки.

#### УЧАСТОК ДИАГРАММЫ $DE$ – УЧАСТОК МЕСТНОЙ ТЕКУЧЕСТИ.

**4.1.2. Условные и истинные диаграммы.** Как уже отмечалось, диаграммы используются для определения механических характеристик. При их построении не фиксируется изменение (уменьшение) площади поперечного сечения в процессе нагружения (растяжения) образца. Они называются условными диаграммами деформирования (рис. 4.4.а).

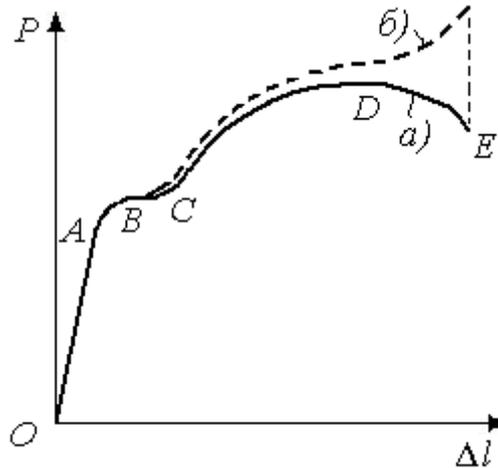


Рис. 4.4. Условная (а) и истинная (б) диаграммы растяжения

Начиная с точки  $B$ , сначала не очень явно, а на участке местной текучести – значительно изменяется площадь сечения. При углубленном анализе свойств материалов исследователи учитывают изменение площади сечения измерением ее в процессе нагружения – такие диаграммы называют истинными (рис 4.4 б)

**4.1.3. Механические характеристики материала.** Нагрузка, однако, не может характеризовать механические свойства материала, т.к. ее величина зависит от конкретных размеров образца. Поэтому основные механические характеристики вычисляют по формулам, используя данные, полученные при проведении испытаний.

Полученная в процессе испытания диаграмма обычно перестраивается в относительных координатах: нормальное напряжение  $\sigma$  – относительная продольная деформация  $\epsilon$  (рис. 4.5). Такие диаграммы дают возможность сравнивать результаты испытаний, полученные в разных лабораториях.

Как будет показано ниже, нормальные напряжения при растяжении определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{P}{F_0}, \quad (4.6)$$

где  $F_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения образца.  
Относительная продольная деформация определяется формулой:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (4.7)$$

где  $l_0$  – расчетная длина образца.

Следовательно, диаграммы  $P - \Delta l$  и  $\sigma - \varepsilon$  будут отличаться только масштабом.

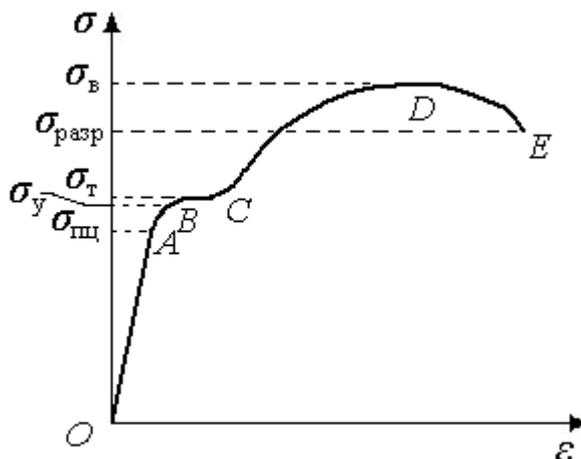


Рис. 4.5. Условная диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали

Таким образом, механические характеристики определяются делением соответствующей нагрузки на начальную площадь поперечного сечения образца  $F_0$ .

Предел пропорциональности:

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}. \quad (4.8)$$

**ПРЕДЕЛ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ – НАИБОЛЬШЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ПРИ КОТОРОМ МАТЕРИАЛ ОБРАЗЦА СЛЕДУЕТ ЗАКОНУ ГУКА.**

Предел упругости:

$$\sigma_y = \frac{P_y}{F_0}. \quad (4.9)$$

**ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ – МАКСИМАЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ПРИ КОТОРОМ ОБРАЗЕЦ ДЕФОРМИРУЕТСЯ БЕЗ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ.**

Предел текучести:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}. \quad (4.10)$$

**ПРЕДЕЛ ТЕКУЧЕСТИ – НАПРЯЖЕНИЕ, ПРИ КОТОРОМ ДЕФОРМАЦИИ РАСТУТ БЕЗ ВИДИМОГО УВЕЛИЧЕНИЯ НАГРУЗКИ.**

Предел прочности:

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}. \quad (4.11)$$

Значения механических характеристик приводят в учебниках по сопротивлению материалов, а также в справочной литературе.

Например, эти характеристики для стали Ст. 3 имеют значения в пределах:

$$\sigma_{\text{тл}} \approx \sigma_y = 200 \text{ МПа}; \quad \sigma_T = 220 - 260 \text{ МПа}; \quad \sigma_B = 340 - 420 \text{ МПа}.$$

Опасными для пластичных материалов являются напряжения, равные пределу текучести  $\sigma_T$ , т.к. при достижении этого значения в материале возникают пластические деформации, которые могут привести к выходу из строя элемента конструкции.

Для хрупких материалов, не получающих при нагружении остаточных деформаций, опасными будут напряжения, равные пределу прочности  $\sigma_B$  – наступает разрушение.

Для чугуна при испытаниях на сжатие предел прочности имеет значения  $\sigma_{Bc}$  до 380 МПа, на растяжение  $\sigma_{Br}$  – до 140 МПа.

Отметим, что если материал деформируется без площадки текучести (рис.4.2 з), то определяют так называемый условный предел текучести: напряжение, при котором остаточная деформация образца составляет 0,2%. Условный предел текучести обозначается  $\sigma_{0,2}$ .

При испытаниях некоторых материалов затруднительно точно определить предел упругости. В этих случаях определяют условный предел упругости  $\sigma_{0,05}$  – напряжение, при котором относительная линейная деформация образца равна 0,05%.

**4.1.4. Закон разгрузки и повторного нагружения.** Если после нагружения образца выше  $P_{\text{тл}}$  (выше точки  $B$ ) разгрузить его в зоне упрочнения (например, в точке  $K$ ) – в материале образца сохранятся остаточные деформации, определяемые его пластическими свойствами (рис.4.6).

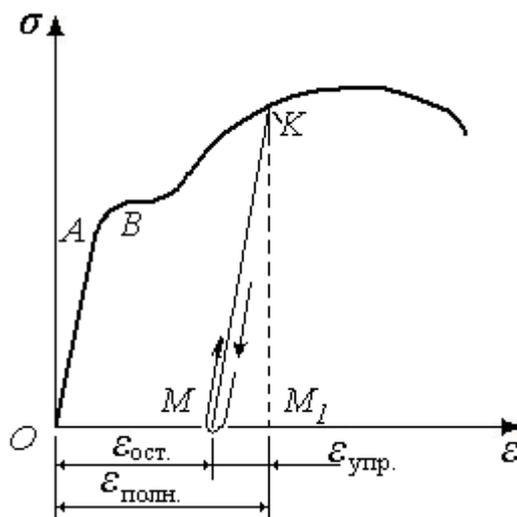


Рис. 4.6. К закону разгрузки и повторного нагружения

При этом линия разгрузки на диаграмме пойдет по линии  $KM$ , параллельной  $OA$ . При повторном нагружении линия на диаграмме пойдет по  $MK$  и далее до предела прочности. Таким образом, материал не проходит участок упруго-пластических деформаций, т.е. повышаются упругие свойства материала. Это явление носит название **НАКЛЕП**. Наклеп может оказывать как положительное, так и отрицательное действие. В ма-

шиностроении (при обработке резанием) используется в совмещении с поверхностно пластическим деформированием (ППД). При этом повышается износостойкость и усталостная прочность рабочих поверхностей.

Полная деформация материала образца для точки  $K$  ( $\varepsilon_{полн.}$ ) характеризуется отрезком  $OM_1$  и состоит из упругой деформации  $\varepsilon_{упр.}$  (отрезок  $MM_1$ ) и остаточной деформации  $\varepsilon_{ост.}$  (отрезок  $OM$ ):

$$\varepsilon_{полн.} = \varepsilon_{упр.} + \varepsilon_{ост.} \quad (4.12)$$

**4.2.1. Пластическое и хрупкое состояние материалов.** В разделе 2.1 были даны определения пластичности и хрупкости материалов:

**ПЛАСТИЧНОСТЬ – СВОЙСТВО МАТЕРИАЛА ДЕФОРМИРОВАТЬСЯ С ОСТАТОЧНЫМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ БЕЗ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ И ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН.**

**ХРУПКОСТЬ – СВОЙСТВО МАТЕРИАЛА К МОМЕНТУ РАЗРУШЕНИЯ ПРЕТЕРПЕВАТЬ ВЕСЬМА МАЛЫЕ ДЕФОРМАЦИИ, Т.Е. К МОМЕНТУ РАЗРУШЕНИЯ БРУС ПРАКТИЧЕСКИ НЕ ИЗМЕНЯЕТ СВОИХ РАЗМЕРОВ.**

Один и тот же материал в разных условиях может находиться как в хрупком, так и в пластичном состоянии.

Материал, находящийся в пластическом состоянии, одинаково хорошо воспринимает как растягивающие, так и сжимающие нагрузки. Хрупкий материал плохо воспринимает растяжение и достаточно хорошо – сжатие.

**БОЛЕЕ ОПАСНЫМ ЯВЛЯЕТСЯ ХРУПКОЕ СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА.**

Пластичность материала оценивается двумя характеристиками, которые определяются по результатам испытаний образцов: относительным удлинением и относительным сужением.

Относительное удлинение:  $\delta = \frac{l_k - l_n}{l_n} 100\%$ ,

где  $l_k$  – конечная длина образца (расстояние между рисками после разрыва),  
 $l_n$  – начальная (расчетная) длина образца.

Относительное сужение:  $\psi = \frac{F_n - F_k}{F_n} 100\%$ ,

где  $F_n$  – начальная площадь поперечного сечения образца (до нагружения),  
 $F_k$  – конечная площадь поперечного сечения образца (в месте разрыва – в шейке).

**4.2.2. Типы разрушений.** Разрушение материала может идти по механизму **хрупкого (упругого)** разрушения или по механизму **вязкого (пластического)** разрушения.

При хрупком разрушении образец не имеет остаточных деформаций и, совместив две его части, мы получим исходный образец (**форма и размеры его не изменяются**).

При пластичном разрушении протекают пластические деформации и **форма и размеры образца в значительной степени изменяются**.

Сравнение диаграмм растяжения показывает, что **протяженность** их в направлении оси удлинений для пластичных материалов значительно больше, чем для хрупких.

Реальные материалы разрушаются по смешанному типу – в зоне разрушения присутствуют признаки обоих механизмов. Более подробно типы разрушения изучают в дисциплине «Механика разрушения».

**4.2.3. Влияние температуры и фактора времени на механические характеристики материалов.** Температура, время и скорость нагружения являются внешними факторами, которые в значительной степени влияют на механические характеристики материалов. Для исследований используются специальные методики и испытательное оборудование. При этом, наряду с обычными механическими характеристиками (см. выше), определяются и специальные – характерные для этих испытаний.

Повышение температуры способствует повышению пластических свойств большинства материалов. Однако, например малоуглеродистая сталь в диапазоне температур  $300 - 330^{\circ}\text{C}$  проявляет склонность к хрупкому разрушению (**синеломкость**). При этом, пределы текучести и прочности быстро снижаются.

Понижение температуры способствует охрупчиванию большинства материалов, даже высокопластичных при нормальных условиях. Прочностные характеристики повышаются. Это явление – **хладноломкость**.

Повышение скорости нагружения (переход от статического нагружения к динамическому), увеличение времени воздействия нагрузки также оказывают **специфическое** влияние на свойства материалов, причем разных – по разному.

При высоких скоростях нагружения проявляется склонность материала к хрупкому разрушению, а увеличение времени силового воздействия сказывается на повышении пластичности (даже стекло!).

Еще более сложным является совместное воздействие разных факторов.

Условия работы конструкций все более усложняются, поэтому особенности поведения материалов необходимо учитывать на этапе их проектирования.