

*МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

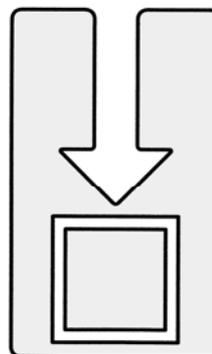
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
по дисциплинам «Сопротивление материалов» и  
«Методы и средства измерений, испытаний и контроля»  
для студентов специальности 200503

Часть 1



Курган 2007

Кафедра: «Теоретическая механика и сопротивление материалов»

Дисциплины: "Сопротивление материалов", "Методы и средства измерений, испытаний и контроля" (специальность 200503)

Составили: канд. техн. наук, доц. Коротовских В.К. (теоретическая часть, работы № 1, 2, 3);  
канд. техн. наук, доц. Марфицын В.В. (общая редакция, работа № 4)

Составлены на основе переработанных и дополненных методических указаний к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов. Ч.1 /Бубнов В.А., Емельянова Н.С., Коротовских В.К. – Курган: Изд-во КГУ, 2000.

Утверждены на заседании кафедры 17 мая 2007 г.

Рекомендованы методическим советом университета 20 июля 2007 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение конкурентоспособности отечественной продукции зависит от ее качества и безопасности на всех стадиях жизненного цикла. Одной из форм подтверждения соответствия являются процессы испытаний.

Испытания можно считать источником достоверных сведений о свойствах и качестве продукции, которые являются основанием для совершенствования конструкции, технологии изготовления, планирования производства запасных частей, технического обслуживания в процессе работы.

Испытаниями принято называть экспериментальное определение количественных и (или) качественных характеристик свойств продукции.

Основные виды испытаний классифицируются:

- по виду воздействия внешних факторов;
- по назначению или цели;
- по условиям и месту проведения;
- по принципу осуществления;
- по продолжительности и значениям воздействующих нагрузок;
- по степени или результату воздействия;
- по определенным характеристикам изделия;
- по стадиям жизненного цикла изделия.

Современное производство вообще, а машиностроение в частности, предъявляет высокие требования к механической надежности конструкций, машин, механизмов и отдельных деталей. Этому способствует разновидность испытаний (из вида «Воздействие внешних факторов») на воздействие механических факторов.

Определение механических свойств материалов и их сравнение с требуемыми является гарантией для производства надежной и долговечной продукции.

Основные законы, положения, принципы сопротивления материалов стали достоянием инженеров лишь после десятилетий многократных, многовариантных опытов над стержневыми образцами различных материалов. Результатом этих исследований стали также обоснованные правила сравнительных испытаний образцов материалов с точки зрения их прочности и деформационных свойств. Существуют национальные и международные стандарты на форму и размер образцов, на конструктивные варианты способов их нагружения, на процедуры самих испытаний.

Сравнительные испытания материалов преследуют несколько целей. Во-первых, устанавливаются усредненные в национальных масштабах значения прочности и деформационных характеристик для каждой из марок того или иного материала, включая подварианты этих материалов после различного вида физико-химических, тепловых, радиационных и др. воздействий. Эти сведения накапливаются в общегосударственных, отраслевых и внутрифирменных справочниках и нормативных документах. Они нужны в проектных организациях, а

также в государственных контрольно-ревизионных службах. Во-вторых, механические испытания предназначены для сдаточного и приемочного контроля качества материалов на заводах-изготовителях и предприятиях-потребителях. В-третьих, с помощью таких испытаний осуществляется контроль качества материалов на промежуточных стадиях изготовления сложных деталей, когда имеют место термические и разного рода физико-химические методы его обработки.

В данных методических указаниях представлены 4 лабораторные работы, охватывающие такие виды нагружения, как растяжение, сжатие и кручение.

При осуществлении расчетов в процессе выполнения работ рекомендуется учитывать следующие соотношения между нагрузкой и напряжением:

### Единицы силы и напряжения

1 ньютон (Н); 1 килоньютон (кН); 1 меганьютон (МН);  
1 килограмм-сила (кгс); 1 паскаль (Па); 1 мегапаскаль (МПа).  
1 МН =  $10^3$  кН; 1 кгс = 10 Н; 1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>;  
1 МПа =  $10^6$  Па = 10 кгс/см<sup>2</sup> = 0,1 кгс/мм<sup>2</sup> = 1 Н/мм<sup>2</sup>.

## Лабораторная работа № 1

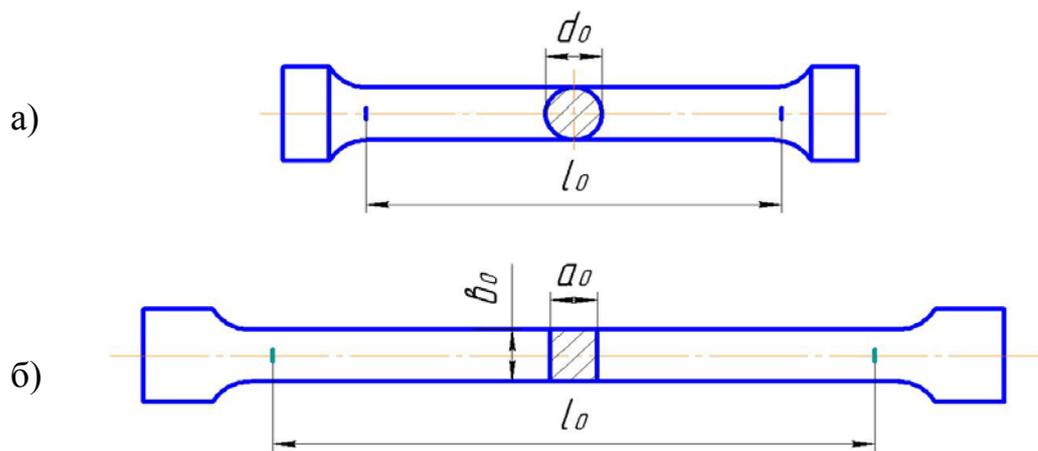
### Испытание материалов на растяжение

*Цель работы:* определение механических характеристик прочности, пластичности и статической вязкости стали при растяжении.

#### Основные сведения

Наибольшую информацию о механических свойствах материалов можно получить из статических испытаний на растяжение. Испытания для условий нормальной температуры проводятся в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение».

Для испытания на растяжение применяют цилиндрические образцы круглого поперечного сечения диаметром  $d_0$  (рисунок 1, а) или плоские - прямоугольного сечения (рисунок 1, б). Образцы имеют рабочую часть с начальной расчетной длиной  $l_0$ , для которой определяется удлинение, и головки с переходным участком, формы и размеры которых зависят от способов их крепления в захватах машины. Различают длинные и короткие образцы: *цилиндрические* - с соотношением  $l_0 = 10d_0$  и  $l_0 = 5d_0$ ; *плоские* -  $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$  и  $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$ , где  $F_0$  - площадь поперечного сечения образца до испытания. Шероховатость поверхности рабочей части образцов  $R_a$  (ГОСТ 2789-73) должна быть не более 0,63 мкм. Размеры образцов делают стандартными для того, чтобы результаты испытаний, полученные в разных лабораториях, были сравнимы.



а) круглого сечения; б) плоские  
Рисунок 1 - Образцы для испытания на растяжение

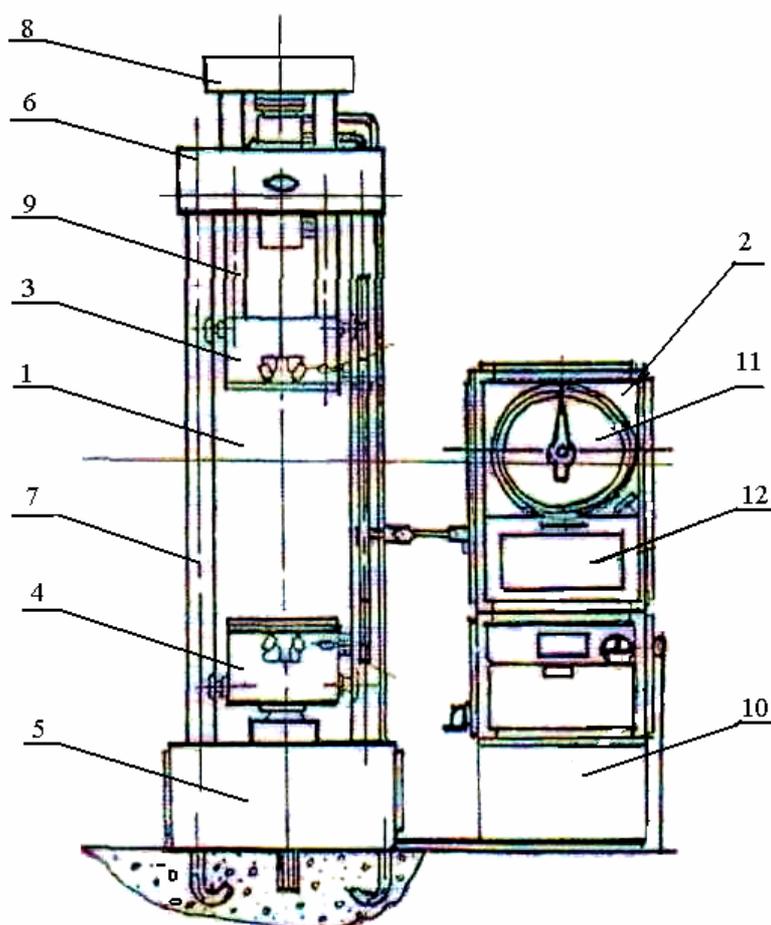
Испытания проводят на разрывных или универсальных машинах. В зависимости от метода приложения нагрузки машины бывают с механическим или гидравлическим приводом. Они обычно выпускаются с вертикальным расположением образца. Передача усилия на образец осуществляется через захваты. Все машины снабжены устройством для автоматической записи в определенном масштабе диаграммы растяжения, т.е. графика зависимости между растягивающей силой  $P$  и абсолютным удлинением образца  $\Delta l$ .

В данной лабораторной работе растяжению подвергается образец круглого поперечного сечения из пластичной низкоуглеродистой (с содержанием углерода не более 0,25%) стали. Испытание проводится на разрывной машине модели Р-10 (рисунок 2) с предельной нагрузкой 100 кН (10 тс).

Разрывная машина предназначена для статических испытаний на растяжение образцов из металлов и сплавов, а также изделий из них. При применении дополнительных приспособлений могут производиться испытания на сжатие и изгиб. Имеется три диапазона нагрузок. Допускаемая погрешность показаний машины составляет  $\pm 1\%$  от измеряемой величины.

Основными узлами машины Р-10 являются: нагружающее устройство 1 и пульт управления 2. Нагружающее устройство, предназначенное для деформирования и разрушения образца, имеет гидравлический привод верхнего захвата 3 и механический – нижнего 4. Станина нагружающего устройства представляет собой раму, состоящую из основания 5 и траверсы 6, соединенных двумя колоннами 7. В траверсе 6 установлен рабочий цилиндр, который связан с подвижной рамой, включающей в себя верхний захват 3 и траверсу 8, соединенных тягами 9. Пульт управления служит для управления процессом нагружения образца и контроля за величиной нагрузок и деформаций. В нижней части пульта управления расположена насосная установка 10. В верхней – находится силоизмеритель 11 с диаграммным аппаратом 12 для записи диаграммы «нагрузка – деформация».

На рисунке 3 представлена типичная диаграмма растяжения образца из низкоуглеродистой стали. На ее первом участке  $OA$  наблюдается прямая пропорциональная зависимость между растягивающей силой и удлинением (выполняется закон Гука). Кроме того, в пределах этого участка деформации только



-+

Рисунок 2 – Схема разрывной машины Р-10

упругие, т.е. исчезающие после снятия нагрузки с образца. Поэтому начальная стадия работы материала называется *зоной пропорциональности или упругости*, а ордината точки  $A - P_{\text{пц}}$  силой, соответствующей пределу пропорциональности. Численные величины, характеризующие эту зону, позволяют определить значение модуля продольной упругости  $E$ .

Выше точки  $A$  прямая пропорциональность между силой и абсолютным удлинением нарушается, рост нагрузки замедляется и вскоре совсем прекращается (точка  $B$ ).

Деформация возрастает без заметного увеличения нагрузки - материал "течет". Участок  $BC$  является *зоной общей текучести или «площадкой текучести»* (в этой зоне развиваются значительные пластические или остаточные деформации), а ордината точки  $C - P_T$ , т.е. силой, соответствующей пределу текучести материала.

После зоны текучести образец снова приобретает способность воспринимать возрастающее усилие вплоть до значения максимальной нагрузки. Участок  $CD$  называется *зоной упрочнения*. Здесь удлинение образца происходит равномерно и также сопровождается возрастанием нагрузки, но неизмеримо более медленным (в сотни раз), чем на стадии упругой деформации.

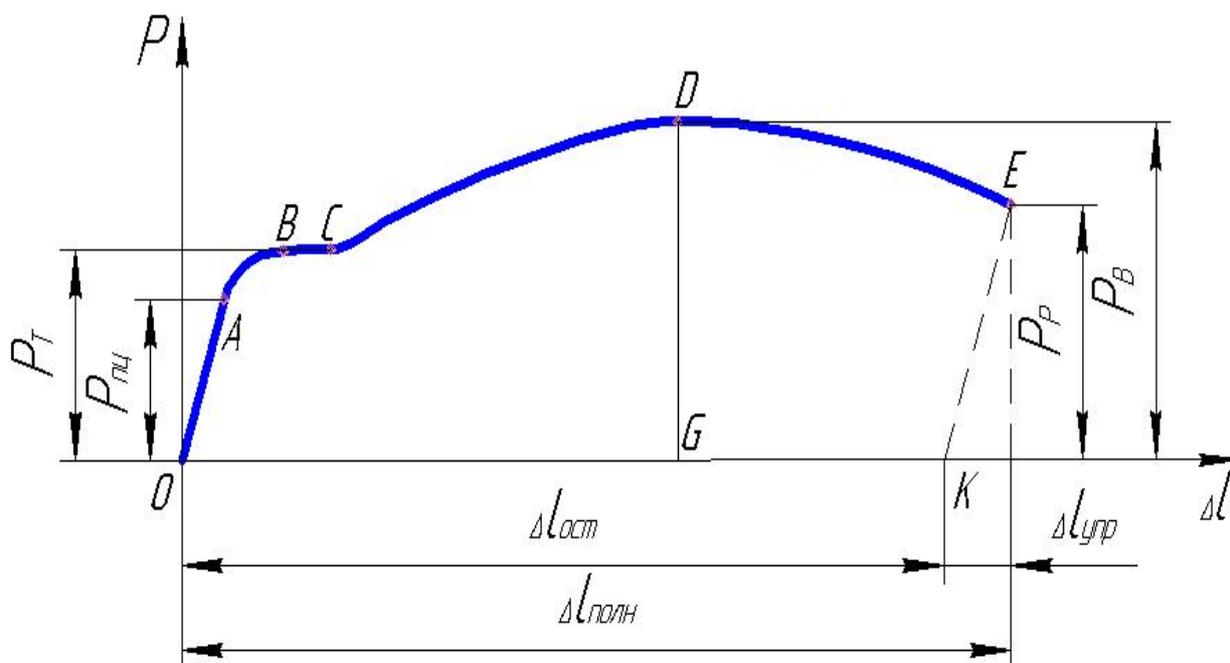


Рисунок 3 - Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

При достижении максимальной силы  $P_B$  (точка  $D$ ) на образце образуется местное сужение – так называемая «шейка». Шейка быстро прогрессирует, площадь поперечного сечения образца резко уменьшается, что влечет за собой падение нагрузки. Дальнейшее растяжение происходит за счет местной пластической деформации металла в месте шейки, после чего наступает разрыв под действием разрушающей силы  $P_p$  (точка  $E$ ). Участок  $DE$  диаграммы – это *зона местной текучести*.

Максимальная нагрузка  $P_B$  - называется силой, соответствующей пределу прочности.

По диаграмме растяжения могут быть определены основные механические характеристики прочности, пластичности и статической вязкости материала.

### Механические характеристики прочности

Под *прочностью* понимается способность материала сопротивляться действию усилий, не разрушаясь. Количественно это свойство определяется следующими напряжениями:

1. *Предел пропорциональности*  $\sigma_{пц}$  - наибольшее напряжение, до которого выполняется закон Гука (деформация прямо пропорциональна нагрузке)

$$\sigma_{пц} = P_{пц} / F_0, \quad (1)$$

где  $P_{пц}$  - сила, соответствующая пределу пропорциональности (величина ординаты точки  $A$ , рисунок 3);

$F_0$  - первоначальная (до испытания) площадь поперечного сечения образца.

Кроме того, независимо от предела пропорциональности существует *предел упругости*  $\sigma_y$  – напряжение, до которого в материале имеются только упругие деформации (не обнаруживаются пластические), характеризующий начало перехода от упругой стадии деформации к пластической. Однако у большинства металлов значения пределов  $\sigma_{пл}$  и  $\sigma_y$  незначительно отличаются друг от друга. Поэтому обычно считают, что они практически совпадают.

2. *Предел текучести или физический предел текучести*  $\sigma_T$  - наименьшее напряжение, при достижении которого образец деформируется без заметного увеличения нагрузки

$$\sigma_T = P_T / F_0, \quad (2)$$

где  $P_T$  - сила, соответствующая пределу текучести (ордината точки  $B$ ).

Для многих материалов (среднеуглеродистой стали, меди, дюралюминия и т. п.) на диаграмме растяжения отсутствует явно выраженная площадка текучести. В этом случае определяется так называемый *условный предел текучести*  $\sigma_{0,2}$  - напряжение, при котором остаточная деформация достигает 0,2% (рисунок 4)

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0, \quad (3)$$

где  $P_{0,2}$  - сила, соответствующая остаточному удлинению 0,2 % от расчетной длины образца  $l_0$ .

Для нахождения численной величины силы  $P_{0,2}$  на диаграмме растяжения (рисунок 4) по оси абсцисс откладывают величину  $\Delta l_{0,2}$  в масштабе удлинений (отрезок  $OK$ ) и из точки  $K$  проводят прямую, параллельную прямолинейному участку  $OA$ . Точка пересечения ее с диаграммой определяет ординату силы  $P_{0,2}$ , соответствующую условному пределу текучести  $\sigma_{0,2}$ .

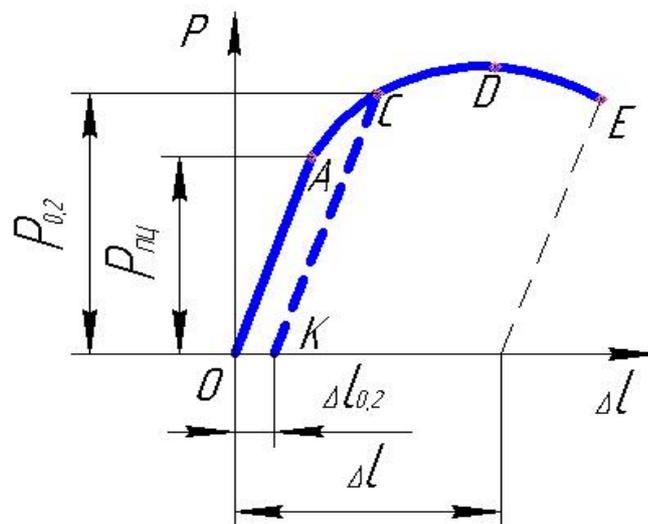


Рисунок 4 - Определение условного предела текучести

3. *Предел прочности материала или временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$*  – наибольшее условное напряжение, соответствующее максимальной силе, предшествующей разрыву образца

$$\sigma_B = P_B / F_0, \quad (4)$$

где  $P_B$  - максимальная сила, предшествующая разрыву образца (величина ординаты точки  $C$ ).

Напряжение, вычисленное по этой формуле, имеет приближенное значение. Его действительное значение будет больше, т.к. площадь поперечного сечения имеет меньшую величину.

4. *Истинное сопротивление разрыву (истинный предел прочности)  $\sigma_p$*  – напряжение в момент разрыва образца

$$\sigma_p = P_p / F_k, \quad (5)$$

где  $P_p$  - величина силы в момент разрушения образца (ордината точки  $D$ );  
 $F_k$  - площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

В международных стандартах пределы пропорциональности, текучести, прочности и разрушения обозначаются как  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ ,  $\sigma_\delta$ , соответственно.

Пределы текучести  $\sigma_T$  и прочности  $\sigma_B$  являются предельными напряжениями и используются при определении допускаемых напряжений в расчетах на прочность. Величина расчетных рабочих напряжений, возникающих в деталях машин, не должна превышать предела прочности, так как это приведет к разрушению детали. Более того, для пластичных материалов величина рабочих напряжений должна быть меньше предела текучести. Это объясняется тем, что при превышении предела текучести быстро нарастают остаточные деформации, возникновение которых нарушает геометрические размеры конструкции.

Чем больше величина предельных напряжений, тем выше прочность материала.

### Механические характеристики пластичности

*Под пластичностью* понимается способность материала получать большие остаточные деформации (которые не исчезают после снятия вызвавшей их нагрузки) без разрушения. Свойство пластичности имеет решающее значение для таких технологических операций, как штамповка, гибка, вытяжка, волочение,ковка и др.

*Пластичными* принято считать материалы, разрушению которых предшествуют большие остаточные деформации (например, низкоуглеродистые стали, медь, алюминий и их сплавы).

*Хрупкими* называются материалы, разрушающиеся при наличии малых остаточных деформаций (чугун, высокоуглеродистые инструментальные стали, кирпич, стекло, камень и т.п.).

Мерой пластичности материала служат *относительные остаточные удлинение и сужение образца*.

Относительное остаточное удлинение  $\delta$ , %:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% , \quad (6)$$

где  $l_k$  - конечная длина расчетной части образца после разрыва.

Значение  $\delta$  для одного и того же материала зависит от длины расчетной части образца или от его кратности (отношения  $l_0/d_0$ ). Например, для стали Ст3: у пятикратных образцов ( $l_0/d_0 = 5$ ) -  $\delta_5 = 25\%$ , десятикратных -  $\delta_{10} = 21\%$ .

Относительное сужение поперечного сечения в месте шейки  $\psi$ , %:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% . \quad (7)$$

Для *пластичных* материалов соответствующие характеристики пластичности находятся в пределах:  $\delta = 20...30\%$ ,  $\psi = 50...70\%$ . Для *хрупких* -  $\delta$  не превышает 2...5%,  $\psi$  - 30%. Материалы с характеристиками  $\delta = 5 - 20\%$  и  $\psi = 30 - 50\%$  принято считать *хрупкопластичными*.

#### Статическая вязкость материала

Статические испытания на растяжение позволяют косвенно оценить *вязкость* материала, т.е. его способность сопротивляться действию динамических нагрузок. Эта способность может быть выражена через работу, затраченную на разрыв образца. Чем больше работы, необходимо затратить на разрыв образца, тем больше энергии в состоянии поглотить материал, не разрушаясь. Тем выше вязкость и способность материала сопротивляться ударным и циклическим нагрузкам. Работа, затраченная на разрушение образца, пропорциональна площади диаграммы растяжения *OABCDEK* (рисунок 2), учитывающая только пластическую деформацию, и может быть вычислена по формуле

$$A = \eta \cdot P_B \cdot \Delta l_{ост} , \quad (\text{Н}\cdot\text{м}) \text{ или } (\text{Дж}) \quad (8)$$

где  $\eta$  - коэффициент заполнения диаграммы, равный для сталей 0,8...0,9.

Для низкоуглеродистой стали можно принять  $\eta = 0,85$ .

Работа, приходящаяся на единицу объема материала, т.е. удельная работа растяжения  $a$ , будет равна:

$$a = A/V_0, \quad (\text{Н}\cdot\text{м}/\text{м}^3) \text{ или } (\text{Дж}/\text{м}^3) \quad (9)$$

где  $V_0 = F_0 \cdot l_0$  - начальный объем расчетной части образца.

Для вязких, низкоуглеродистых сталей величина удельной работы изменяется в пределах  $a = (700 \dots 800) \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{м}^3$ .

### Порядок выполнения работы

1. Замерить диаметр образца  $d_0$ .
2. Штангенциркулем отложить на рабочей части образца расчетную длину  $l_0 = 10d_0$  и поставить две метки.
3. Вычислить площадь поперечного сечения  $F_0 = \pi d_0^2 / 4$  и начальный объем  $V_0$  рабочей части образца.
4. Закрепить образец в захватах машины и настроить диаграммный аппарат. Включить машину.
5. Произвести растяжение образца до разрыва с записью диаграммы зависимости нагрузки от удлинения. При испытании зафиксировать по шкале силоизмерителя наибольшее значение силы  $P_B$ , которую выдерживает материал.
6. Обработать полученную диаграмму. В начальной стадии деформации образца происходит обжатие его головок в захватах и выборка зазоров. Поэтому соответствующая часть диаграммы может быть криволинейной (рисунок 5). Для нахождения начала координат диаграммы (точка  $O$ ), необходимо продолжить прямую пропорциональной зависимости  $O_2A$  до пересечения с осью абсцисс  $Al$ , проведенной из точки  $O_1$ . Из начала координат восстанавливается ось ординат  $P$ . Таким образом, согласно рекомендации ГОСТ, участок  $O_1O_2$  диаграммы отбрасывается.
7. Отметить на диаграмме её характерные точки  $A, B, C, D$  и вычислить их ординаты.
8. Измерить диаметр шейки  $d_K$  в месте разрыва образца и конечную длину расчетной части  $l_K$  (сложив обе половины образца, замерить расстояние между метками).
9. Определить масштаб диаграммы (рисунок 3) по осям ординат и абсцисс.

Масштаб нагрузки по оси ординат  $m_0$  устанавливается путем деления силы  $P_B$ , соответствующей пределу прочности, на величину ординаты  $\overline{DG}$

$$m_0 = \frac{P_B}{\overline{DG}}. \quad (\text{Н}/\text{мм}) \quad (10)$$

Проведя на диаграмме прямую  $\overline{EK}$ , параллельную  $\overline{OA}$ , получим на оси абсцисс отрезок  $\overline{OK}$ , отображающий величину остаточного удлинения образца

после разрыва. Истинная величина этого остаточного удлинения равна разности длин  $l_k - l_0$ . Тогда масштаб деформации по оси абсцисс  $m_a$  будет равен:

$$m_a = \frac{l_k - l_0}{OK}. \quad (\text{мм/мм}) \quad (11)$$

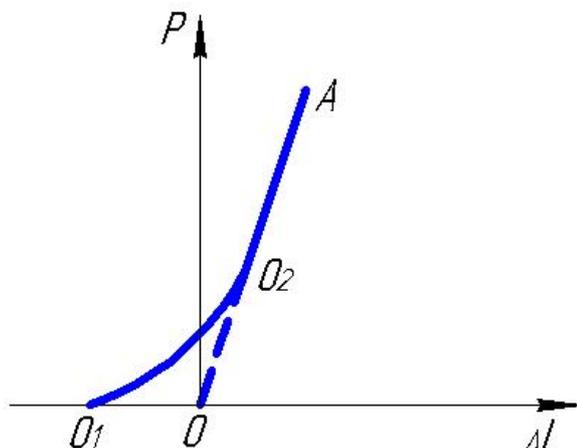


Рисунок 5 - Выбор начала координат диаграммы растяжения

10. Вычислить механические характеристики прочности, пластичности и статической вязкости испытуемого образца. Все данные испытания занести в протокол.

### Протокол испытаний

1. Наименование и цель работы.
2. Модель испытательной машины.
3. Эскиз образца до и после испытания.
4. Размеры образца (таблица 1).

Таблица 1 - Размеры образца

До испытания	После разрыва
Диаметр $d_0 =$ (мм)	Диаметр шейки $d_k =$ (мм)
Расчетная длина $l_0 =$ (мм)	Конечная длина образца
Площадь поперечного сечения	$l_k =$ (мм)
$F_0 = \pi d_0^2 / 4 =$ (мм <sup>2</sup> )	Площадь поперечного сечения
Начальный объем расчетной части	шейки образца в месте разрыва
$V_0 = F_0 \cdot l_0 =$ (мм <sup>3</sup> )	$F_k = \pi d_k^2 / 4 =$ (мм <sup>2</sup> )

5. Полученная диаграмма растяжения, перерисованная в определенном масштабе, с характерными ординатами  $P_{\text{пц}}, P_{\text{т}}, P_{\text{в}}, P_{\text{р}}$ .

6. Величины нагрузок (таблица 2).

Таблица 2 – Численные значения усилий растяжения

Нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности $P_{\text{пц}}, \text{Н}$	Нагрузка, соответствующая пределу текучести $P_{\text{т}}, \text{Н}$	Нагрузка, соответствующая пределу прочности $P_{\text{в}}, \text{Н}$	Нагрузка в момент разрыва $P_{\text{р}}, \text{Н}$

7. Механические характеристики материала (таблица 3).

Таблица 3 - Результаты опыта

Механические характеристики прочности, МПа	Характеристики пластичности, %	Характеристики статической вязкости
<p>Предел пропорциональности</p> $\sigma_{\text{пц}} = \frac{P_{\text{пц}}}{F_0} =$ <p>Предел текучести</p> $\sigma_{\text{т}} = \frac{P_{\text{т}}}{F_0} =$ <p>Предел прочности</p> $\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\text{в}}}{F_0} =$ <p>Истинное напряжение при разрыве</p> $\sigma_{\text{р}} = \frac{P_{\text{р}}}{F_{\text{к}}} =$	<p>Относительное остаточное удлинение</p> $\delta = \frac{l_{\text{к}} - l_0}{l_0} \cdot 100\% =$ <p>Относительное остаточное сужение поперечного сечения</p> $\psi = \frac{F_0 - F_{\text{к}}}{F_0} \cdot 100\% =$	<p>Работа, затраченная на разрушение образца, Н·м</p> $A = \eta \cdot P_{\text{в}} \cdot \Delta l_{\text{ост}} =$ <p>Удельная работа, затраченная на разрыв, Н·м/м<sup>3</sup></p> $a = \frac{A}{F_0 \cdot l_0} =$

8. По полученным из опыта механическим характеристикам определить марку стали (таблица 4).

Таблица 4 – Механические характеристики низкоуглеродистых сталей  
(по данным / 3 /)

Марка стали	Основной химический состав	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , % (при $l = 10d$ )
Ст 0	C-0,14÷0,23	190	320-470	18
Ст 2	C-0,09÷0,15 Mn-0,30÷0,50	240	340-420	26
Ст 3	C-0,12÷0,22 Mn-0,35÷0,55 Si-0,12÷0,30	220	380-470	21
Ст 4	C-0,18÷0,27 Mn-0,40÷0,60 Si-0,12÷0,30	240	420-520	19-21
Ст 5	C-0,28÷0,37 Mn-0,45÷0,70 Si-0,15÷0,30	270	500-620	15-17
Ст 6	C-0,30÷0,50	300	600-720	11-13

9. Выводы.

#### Контрольные вопросы

1. Какие деформации называются упругими? А - остаточными (пластическими)?
2. Какие материалы при нормальных условиях принято считать пластичными, хрупкими?
3. Что называется пределом пропорциональности, текучести, прочности материала?
4. Какие механические характеристики материала определяют его способность пластически деформироваться?
5. Как найти работу растягивающей силы по диаграмме растяжения?
6. Что характеризует статическая вязкость материала?
7. Из каких основных узлов состоит разрывная машина модели Р-10?
8. Какова предельная нагрузка, создаваемая испытательной машиной?
9. Какую допускаемую погрешность показаний имеет применяемая в лабораторной работе машина?

## Лабораторная работа № 2

### Определение модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации для стали

*Цель работы:* определение упругих постоянных для стали - модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации.

#### Основные положения

Модуль продольной упругости (модуль Юнга) и коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) являются основными механическими характеристиками упругих свойств материала и имеют большое практическое значение для расчета на жесткость элементов конструкций. Испытания по их определению ГОСТом не регламентируются.

Для большинства конструкционных материалов, при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ , между нормальным напряжением  $\sigma$  в поперечных сечениях стержня и его относительной продольной деформацией  $\varepsilon$  существует прямая пропорциональная зависимость (общий закон Гука):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (12)$$

где  $E$  - модуль продольной упругости.

Модуль продольной упругости зависит только от материала и характеризует его жесткость при центральном растяжении (сжатии). Чем больше модуль продольной упругости, тем материал более жесткий, т.е. тем меньше он деформируется при одних и тех же напряжениях.

Абсолютное удлинение стержня (образца)  $\Delta l$  по частному закону Гука равно:

$$\Delta l = \frac{N \cdot l}{E \cdot F}, \quad (13)$$

где  $N$  - продольная сила (при действии одной внешней силы  $N = P$ );

$l$  - расчетная длина стержня;

$F$  - площадь поперечного сечения.

Исходя из (13), после определения абсолютного удлинения  $\Delta l$  образца с размерами  $l$  и  $F$  от нагрузки  $P$ , появляется возможность найти опытное значение модуля продольной упругости  $E$ :

$$E = \frac{P \cdot l}{\Delta l \cdot F}. \quad (14)$$

Под действием осевой нагрузки образец меняет не только свою длину, но и размеры поперечного сечения. Установлено, что отношение относительных: поперечной  $\varepsilon_l = \Delta b/b$  и продольной  $\varepsilon = \Delta l/l$  деформаций - есть величина постоянная для каждого материала, называемая коэффициентом поперечной деформации  $\mu$ :

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon} \right|. \quad (15)$$

Для металлов коэффициент  $\mu = 0,23 \dots 0,35$ .

При измерении упругих постоянных  $E$  и  $\mu$  стальной образец прямоугольного поперечного сечения подвергается растяжению на разрывной машине модели Р-5 (рисунок 6).

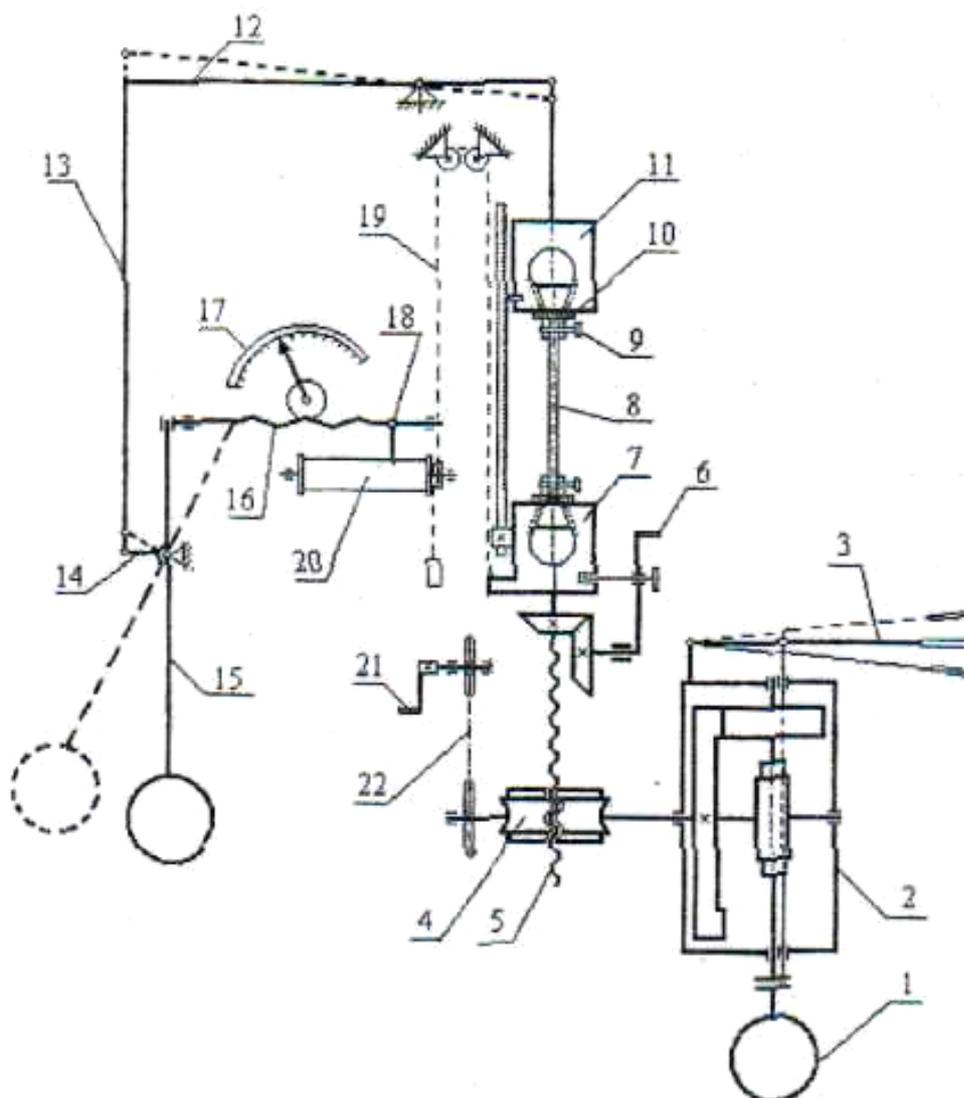


Рисунок 6 – Кинематическая схема разрывной машины Р-5

Машина предназначена для испытаний на растяжение и сжатие круглых и плоских образцов. Максимальное усилие 50 кН (5000 кгс).

Основные узлы машины: станина, нагружающий механизм, рычажно-маятниковый силоизмерительный механизм, диаграммный аппарат.

От электродвигателя 1 через редуктор 2 или от рукоятки 21 через цепную передачу 22 приводится во вращение червячное колесо 4, одновременно являющееся гайкой, заставляющей перемещаться винт 5 вниз (при растяжении) или вверх (при сжатии). В захваты 7, 11 крепится образец 8. Усилие от образца передается через рычаг 12, тягу 13 на кривошип 14 маятника 15, который отклоняется пропорционально усилию. Коротким плечом маятник перемещает рейку 16 с винтовой нарезкой, которая вращает стрелку, указывающую на шкале 17 величину действующего на образец усилия. На рейке 16 крепится ползун 18 с самописцем, перемещение которого вдоль оси диаграммного барабана 20 пропорционально нагрузке. Барабан приводится во вращение с помощью нити 19, один конец которой закреплен на нижнем захвате 7, а другой перекинут через шкив барабана и оттянут грузом. Поворот барабана пропорционален деформации образца. В результате на бумаге, обернутой вокруг барабана, записывается диаграмма деформирования.

У маятника предусмотрен сменный груз и переменное плечо, благодаря этому можно установить четыре диапазона нагрузок: 5 кН (500 кгс), 10 кН (1000 кгс), 25 кН (2500 кгс), 50 кН (5000 кгс). Шкала 17 каждый раз заменяется в соответствии с диапазоном нагрузок и видом деформирования (растяжение или сжатие). При установке образца расстояние между захватами регулируется вращением рукоятки 6. Включение электродвигателя осуществляется поворотом переключателя, установленного на станине машины, в положение «растяжение» или «сжатие». Редуктор 2 обеспечивает две скорости нагружения 48 мм/мин (рычаг 3 в крайнем переднем положении) или 11 мм/мин (рычаг 3 в крайнем заднем положении). При среднем (нейтральном) положении рычага механический привод выключен. При ручном приводе вращение рукоятки 21 против хода часовой стрелки обеспечивает растяжение, по ходу часовой стрелки – сжатие.

Образец при испытании на растяжение крепится с помощью штифтов 9 в специальных проушинах – держателях 10, устанавливаемых в зажимах 7, 11 испытательной машины.

По мере увеличения нагрузки производится измерение продольной и поперечной деформаций образца с помощью рычажных тензометров механического типа ТР (тензометров Гугенбергера) (рисунок 7). Прибор прижимается к испытываемому образцу при помощи струбцины, не показанной на рисунке. Расстояние между нижним ребром призмы 1 и острием ножа 2 является базой прибора  $l = l_T = 20$  мм. При соединении специального удлинителя база может быть увеличена до любых размеров в пределах 50 – 1000 мм. Жесткая рамка прибора 6 вместе с призмой 1 составляет часть прибора, воспринимающую деформацию.

Частью прибора, увеличивающей деформацию, является рычаг 3, жестко соединенный с призмой 1 и стрелка 5, шарнирно соединенная с рычагом 3 тягой 4. Стрелка 5 верхним концом 8 шарнирно прикреплена к рамке. По шкале 7 производятся отсчеты.

При увеличении длины  $l$  (базы прибора) на величину  $\Delta l$  произойдет поворот призмы 1 вокруг ее верхнего ребра на некоторый угол. Вместе с призмой на тот же угол повернется рычаг 3 и при помощи тяги 4 отклонит стрелку 5. Вследствие поворота стрелки 5 нижний конец ее переместится по шкале 7 на величину  $\Delta A$  с отсчета  $A_1$  на отсчет  $A_2$ . Разность отсчетов по шкале  $\Delta A$  пропорциональна удлинению  $\Delta l$ . Коэффициент увеличения зависит от соотношения плеч рычагов 3 и 5 (обычно увеличение равно 1000 – 1200). Если известен коэффициент увеличения прибора  $m$ , то по разности отсчетов легко определяется удлинение  $\Delta l = \Delta A/m$ . Величина, обратная коэффициенту увеличения  $m$ , называется ценой деления шкалы тензометра  $\kappa$  ( $\kappa = 1/m$ ). Для применяемых тензометров  $\kappa = 10^{-3}$  мм, т.е. 1 мкм. Предел измерения 50 мкм, точность  $\pm 0,5$  мкм. При производстве отсчета нужно располагать глаз так, чтобы острое стрелки совпадало с его изображением в зеркале.

Размещение тензометров на образце показано на рисунке 8. Тензометр  $A$  предназначен для измерения продольной деформации, а тензометр  $B$  - поперечной. Так как с помощью тензометров определяются изменения длины и поперечного размера образца в пределах базы прибора  $l_T$ , то относительные деформации будут соответственно равны:

$$\begin{array}{l} \text{продольная} \\ \varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{ср}}}{l_T}, \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{поперечная} \\ \varepsilon_1 = \frac{\Delta b_{\text{ср}}}{l_T}, \end{array} \quad (16)$$

где  $\Delta l_{\text{ср}}$  - среднее приращение абсолютного удлинения, вызванного ступенью нагружения  $\Delta P$ ;

$\Delta b_{\text{ср}}$  - среднее приращение абсолютной поперечной деформации;

$l_T$  - база тензометров.

### Порядок выполнения работы

1. Измерить ширину и толщину испытуемого образца.
2. Вычислить площадь поперечного сечения образца  $F$ .
3. Определить величину наибольшей силы  $P_{\text{max}}$ , которую можно приложить к образцу, не вызывая в нем напряжений, превышающих предел пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$  (т.е. напряжений, в пределах которых выполняется закон Гука). Принять для испытываемого материала  $\sigma_{\text{пц}} = 200$  МПа.

$$P_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{пц}} \cdot F. \quad (17)$$

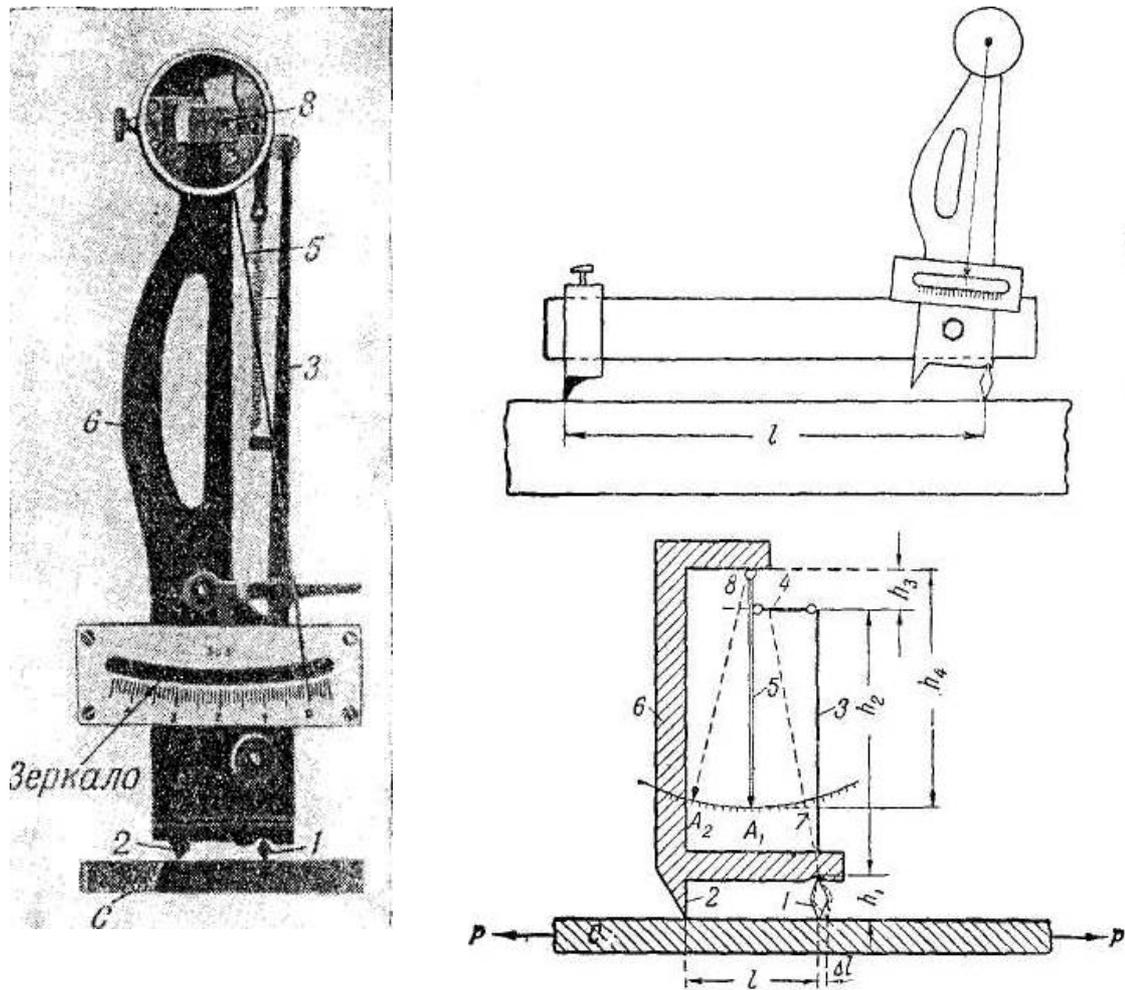


Рисунок 7 – Общий вид и схема рычажного тензометра

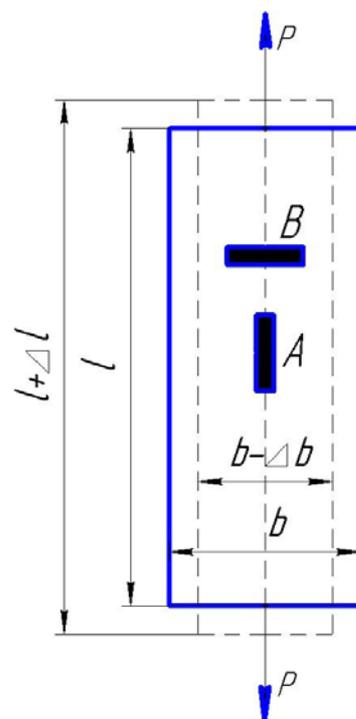


Рисунок 8 – Размещение тензометров на образце

4. Произвести предварительное нагружение усилием  $P_0$  для обжатия головок образца в захватах машины, устранения люфтов, зазоров в машине.

5. Зафиксировать величину этой силы, приняв ее за условный нуль. Записать начальные показания тензометров в делениях прибора.

6. Произвести 3...4 нагружения образца равными ступенями и после каждой ступени записать показания тензометров  $A$  и  $B$ . Число ступеней нагружения берется с учетом выполнения условия (17).

Установка стрелок тензометров на нуль не нужна, т.к. в расчетах используются приращения показаний  $\Delta A$  и  $\Delta B$ .

7. Достигнув наибольшей величины силы  $P_{\max}$ , разгрузить образец до начальной нагрузки  $P_0$  и проверить показания тензометров по данным первой записи.

8. Определить средние приращения  $\Delta A_{\text{ср}}$  и  $\Delta B_{\text{ср}}$  показаний тензометров:

$$\Delta A_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta A}{n}; \quad \Delta B_{\text{ср}} = \frac{\sum \Delta B}{n}; \quad (18)$$

где  $\sum \Delta A$  и  $\sum \Delta B$  - сумма приращений показаний тензометров  $A$  и  $B$  в делениях прибора;

$n$  - число ступеней нагружения.

9. Найти средние приращения абсолютного удлинения и поперечной деформации, вызванных ступенью нагружения  $\Delta P$

$$\Delta l_{\text{ср}} = \Delta A_{\text{ср}} \cdot k, \quad (19)$$

$$\Delta b_{\text{ср}} = \Delta B_{\text{ср}} \cdot k. \quad (20)$$

где  $k$  - цена деления шкалы тензометра.

10. Вычислить относительные продольную  $\varepsilon$  и поперечную  $\varepsilon_1$  деформации по выражениям (16).

11. Рассчитать величину модуля продольной упругости  $E$

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_{\text{T}}}{\Delta l_{\text{ср}} \cdot F}. \quad (21)$$

12. Определить значение коэффициента поперечной деформации  $\mu$  по выражению (15).

13. Полученные значения  $E$  и  $\mu$  сравнить с данными, указанными в научно-технической литературе для испытываемого материала (таблица 5).

Таблица 5 – Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона  
конструкционных материалов

Материал	Модули упругости, МПа		Коэффициент Пуассона $\mu$
	$E$	$G$	
Сталь	$(1,9 \div 2,2) \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$	$0,24 \div 0,33$
Чугун	$(1,15 \div 1,6) \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^4$	$0,23 \div 0,27$
Медь	$(1,1 \div 1,3) \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^4$	$0,31 \div 0,34$
Алюминий и дюралюминий	$(0,69 \div 0,71) \cdot 10^5$	$(2,6 \div 2,7) \cdot 10^4$	$0,32 \div 0,36$
Бетон	$(0,15 \div 0,23) \cdot 10^5$	-	$0,16 \div 0,18$
Дерево (сосна): вдоль волокон поперек волокон	$(0,1 \div 0,12) \cdot 10^5$ $(0,005 \div 0,01) \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^4$ -	- -

### Протокол испытаний

1. Наименование и цель работы.
2. Модель испытательной машины.
3. Схема рычажного тензометра.
4. Размеры поперечного сечения образца: ширина =  
толщина =
5. Площадь поперечного сечения  $F =$
6. База тензометров  $l_T =$
7. Цена деления шкалы тензометров  $k =$
8. Величина наибольшей силы  $P_{max}$ , которую можно приложить к образцу, не вызывая в нем напряжений, превышающих предела пропорциональности  $\sigma_{пц}$  ( $\sigma_{пц} = 200$  МПа).
9. Показания тензометров (таблица 6) и результаты опыта (таблица 7).

Таблица 6 - Показания тензометров

Нагрузка $P$ , кгс	Степень нагрузки $\Delta P$ , кгс	Показания тензометра $A$ (в делениях)	Приращение показаний $\Delta A$	Показания тензометра $B$ (в делениях)	Приращение показаний $\Delta B$
Средние значения показаний:			$\Delta A_{cp} =$	$\Delta B_{cp} =$	

Таблица 7 - Результаты опыта

Среднее приращение абсолютного удлинения, мм	$\Delta l_{cp} = \Delta A_{cp} \cdot \kappa =$
Среднее приращение абсолютной поперечной деформации, мм	$\Delta b_{cp} = \Delta B_{cp} \cdot \kappa =$
Относительная продольная деформация	$\varepsilon = \frac{\Delta l_{cp}}{l_T} =$
Относительная поперечная деформация	$\varepsilon_l = \frac{\Delta b_{cp}}{l_T} =$
Коэффициент поперечной деформации $\eta$	$\mu = \left  \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon} \right  =$
Модуль продольной упругости $E$ , МПа	$E = \frac{\Delta P \cdot l_T}{\Delta l_{cp} \cdot F} =$

## 8. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что называется модулем продольной упругости? Какие свойства материала он характеризует?
2. Что нужно измерить опытным путем для определения модуля продольной упругости?
3. Как определяется величина наибольшей нагрузки, до которой может быть нагружен образец при определении модуля  $E$  и коэффициента  $\mu$ ?
4. Какие приборы используются для измерения продольной и поперечной деформации?
5. Что называется коэффициентом поперечной деформации? Запишите формулу для его определения.
6. Какие деформации, возникающие при осевом растяжении больше: продольные или поперечные?
7. При проведении лабораторной работы были определены следующие значения коэффициента поперечной деформации для стали: 0,15; 0,5; 0,28. Укажите, в каких случаях опыт был произведен неправильно?
8. Что называется базой тензометра типа ТР?
9. Каким образом должен располагаться глаз испытателя для обеспечения точности измерения с помощью тензометра?
10. Каков принцип действия и устройство рычажного тензометра, применяемого в лабораторной работе?

## Лабораторная работа № 3

### Испытание материалов на сжатие

*Цель работы:* изучение методики определения механических характеристик пластичных, хрупких и неоднородных материалов при сжатии.

#### Основные положения

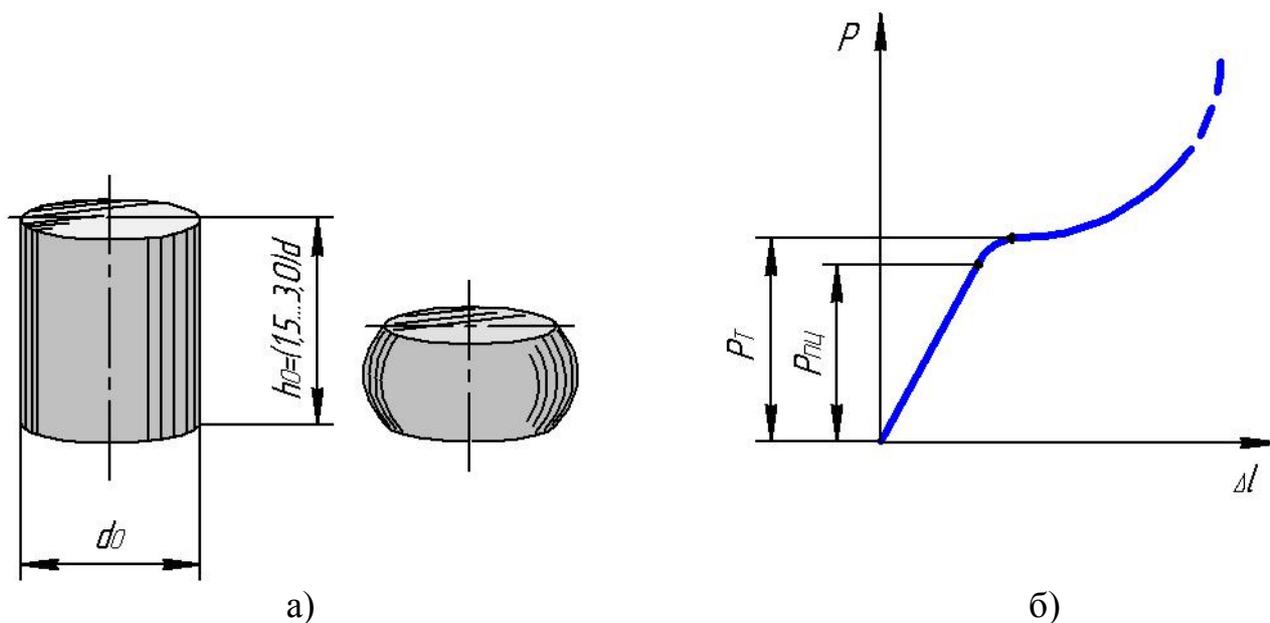
Пластичные материалы (низкоуглеродистая сталь, медь, алюминий и т. п.) одинаково сопротивляются растяжению и сжатию. Для них испытания на сжатие являются дополнением к растяжению. Хрупкие материалы: чугун, бетон, стекло, керамика и т.п. - значительно лучше работают на сжатие. Поэтому для хрупких материалов испытания на сжатие являются основными при определении механических характеристик.

Результаты испытаний материалов на сжатие существенно зависят от условий проведения опыта. Образцы для испытания на сжатие стали и чугуна имеют форму цилиндра. Практически очень трудно добиться приложения сжимающей силы точно по оси образца. При наличии эксцентриситета образец не только сжимается, но и изгибается. Чем он длиннее, тем сильнее сказывается влияние изгиба. Поэтому рекомендуются образцы, длина которых не более чем в два раза превышает их поперечные размеры. Применение слишком коротких образцов нежелательно из-за влияния сил трения между торцами образца и опорными плитами. Чем короче образец, тем сильнее влияние сил трения. Появление этих сил изменяет характер напряженного состояния и увеличивает сопротивление разрушению образца. Уменьшить трение можно смазыванием торцов образца парафином или графитовой смазкой.

Опыт проводится на универсальной испытательной машине усилием не менее 100 кН (10 тс) модели Р-10 с записью диаграммы сжатия. Данная машина использовалась при испытании на растяжение в лабораторной работе №1.

#### *Пластичные материалы*

Испытание низкоуглеродистой стали на статическое сжатие при нормальной температуре 20°C, производится по ГОСТ 25.503-97. На рисунке 9, а показан вид образца (до и после испытания) из низкоуглеродистой стали. При больших сжимающих нагрузках образец пластически деформируется (расплющивается), но не разрушается. Диаграмма сжатия стали представлена на рисунке 9, б. Из неё видно, что усилие сжатия непрерывно возрастает, поперечное сечение при этом вследствие сил трения, возникающих по торцам образца, увеличивается, образец принимает бочкообразную форму.



а) общий вид образца до и после испытания;  
 б) диаграмма сжатия низкоуглеродистой стали  
 Рисунок 9 – Образец и диаграмма сжатия стали

Площадка текучести при сжатии выявлена слабо, иногда она полностью отсутствует. Образец может быть сплюснен в тонкий диск, но довести его до разрушения практически невозможно. Поэтому предел прочности малоуглеродистой стали при сжатии, как и других пластичных материалов, установить не удастся. При расчетах обычно принимают значение его (а также и пределов пропорциональности и текучести) при сжатии, равном пределу прочности при растяжении. В данной лабораторной работе определяется условный предел прочности – напряжение, при котором образец сжимается на одну треть своей первоначальной высоты.

Для большинства пластичных материалов в результате испытаний на сжатие определяют условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , представляющий собой напряжение, при котором относительное сжатие образца равно 0,2 % (лабораторная работа №1, рисунок 4).

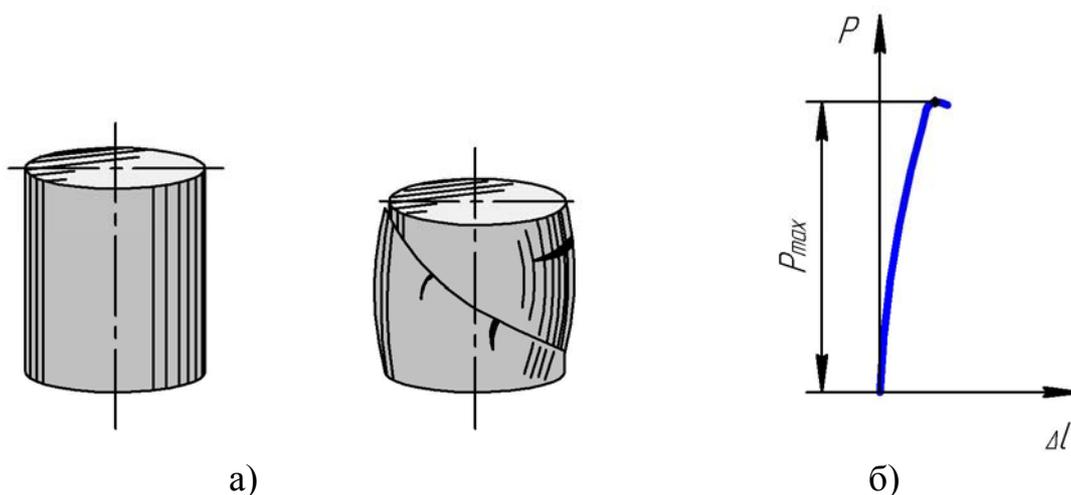
В тех случаях, когда пределы текучести при растяжении и сжатии различны, их обозначают соответственно  $\sigma_{0,2p}$  и  $\sigma_{0,2c}$ , (или  $\sigma_{Tp}$  и  $\sigma_{Tc}$ ). К таким хрупкопластичным материалам, для которых  $\sigma_{0,2c} > \sigma_{0,2p}$ , относятся некоторые легированные стали, подвергнутые закалке. Например, для стали 30ХГС  $\sigma_{0,2p} = 0,88 \sigma_{0,2c}$ .

### *Хрупкие материалы*

Испытания отливок из серого чугуна осуществляется в соответствии с ГОСТ 27208-87. При этом применяются цилиндрические образцы диаметром от 10 до 25 мм с высотой, равной диаметру. На поверхности образцов не должно

быть риск, коррозии, раковин, пор, а ее шероховатостью  $R_a$  не должна превышать 1,25 мкм.

Хрупкие материалы имеют существенно меньший предел прочности при растяжении, чем при сжатии. Например, серый чугун при сжатии имеет предел прочности  $\sigma_{вс} = 500...1500$  МПа, а при растяжении - почти в четыре раза меньше:  $\sigma_{вр} = 120...380$  МПа. Продольные деформации при сжатии чугунного образца незначительны. Образец несколько выпучивается в средней части, принимая слегка бочкообразную форму. Разрушение чугуна при сжатии начинается с образования трещин под углом  $45^\circ$  к оси цилиндрического образца, что вызвано наибольшими касательными напряжениями (рисунок 10, а). На рисунке 10, б показана соответствующая диаграмма сжатия. Диаграмма сжатия чугуна с самого начала нелинейная. Однако в условиях небольших деформаций, при которых материал используется в деталях машин, диаграмма представляет собой линию малой кривизны. Поэтому в практических расчетах считают, что чугун подчиняется закону Гука.



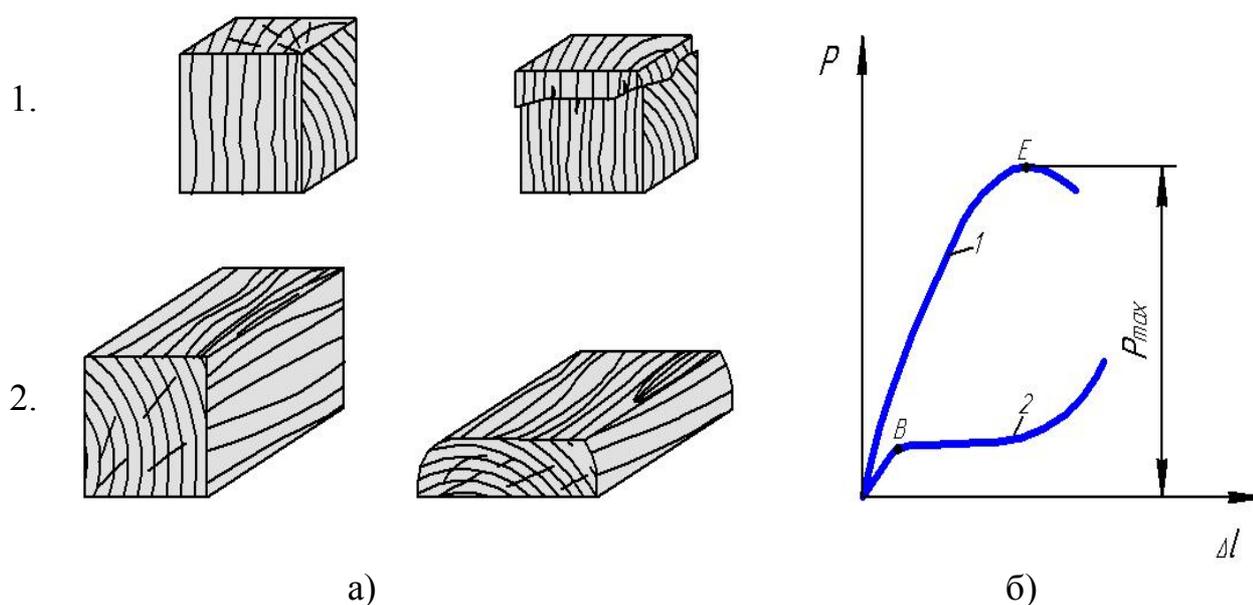
а) общий вид образца до и после испытания;  
б) диаграмма сжатия чугуна  
Рисунок 10 – Образец и диаграмма сжатия чугуна

Испытания считаются недействительными, если в изломе после разрушения обнаруживаются раковины, неметаллические включения и другие дефекты.

#### *Испытание анизотропных материалов (дерево)*

Такие строительные материалы, как цементный камень, бетон, дерево, испытываются на сжатие на образцах в виде кубиков. Прочность этих материалов неодинакова в различных направлениях. Дерево является анизотропным материалом, у которого физические и прочностные свойства существенно различаются в направлениях вдоль и поперек волокон (рисунок 11, а). При сжатии дере-

вянного кубика вдоль волокон разрушение происходит в виде сдвига по наклонной плоскости одной части образца относительно другой (рисунок 11, а - 1). При сжатии поперек волокон происходит прессование дерева (рисунок 11, а - 2). Пределы прочности дерева при сжатии вдоль и поперек волокон значительно отличаются. Прочность дерева зависит от его влажности. Стандартная влажность испытываемой древесины принята 15 %. Испытываемый образец при сжатии вдоль волокон рекомендуется сжимать со скоростью не более  $2 \div 3$  Н в минуту до момента разрушения. При достижении разрушающей нагрузки происходит сдвиг - смещение слоев в плоскости, наклоненной под углом  $45^\circ - 60^\circ$  к продольной оси образца. Диаграмма сжатия дерева вдоль волокон напоминает диаграмму сжатия хрупких материалов (рисунок 11, б; кривая 1).



а) общий вид образца до и после испытания;  
 б) диаграмма сжатия деревянных образцов:  
 1 – дерево вдоль волокон; 2 – дерево поперек волокон  
 Рисунок 11 – Образцы и диаграмма сжатия дерева

При испытании деревянного образца поперек волокон нагрузка сначала возрастает пропорционально деформации (рисунок 11, б; кривая 2), а затем замедляется, образец интенсивно уплотняется без видимых признаков разрушения (спрессовывается). Условно за разрушающую нагрузку принимают такое значение силы, при которой кубик уплотняется на одну треть своей первоначальной высоты, т.е.  $\Delta h = h_0/3$ . Это уменьшение высоты определяют по шкале перемещений подвижной траверсы испытательной машины, а величину разрушающей силы - по шкале ее силоизмерительного устройства.

## Порядок выполнения работы

Подготовить образцы: стальной, чугунный, два деревянных. На деревянных образцах отметить грани, которыми они будут устанавливаться на плиту испытательной машины при сжатии одного образца вдоль волокон, другого – поперек.

Измерить штангенциркулем начальные размеры образцов. Измерение диаметра  $d_0$  и высоты  $h_0$  производится в двух взаимно перпендикулярных направлениях. За окончательный результат принимается среднее арифметическое двух измерений с погрешностью не более 0,05 мм. Размеры ребер деревянных образцов определяются с точностью до 0,1 мм.

Вычислить первоначальные площади поперечных сечений  $F_0$  с округлением до 0,1 мм.

### *Сжатие образца из низкоуглеродистой стали*

1. Подготовить машину к испытаниям (закрепить миллиметровую бумагу на барабан диаграммного аппарата, каретку с пером установить в нулевое положение).

2. Установить испытываемый образец между опорными плитами.

3. Включить машину и наблюдать за процессом сжатия образца.

4. Во время испытания необходимо следить за стрелкой силоизмерителя. Кратковременная остановка или замедление скорости её движения указывает на то, что материал начал пластически деформироваться. Замеченная по шкале силоизмерителя нагрузка в момент остановки стрелки является силой  $P_T$ , соответствующей пределу текучести.

5. При сжатии образца на одну треть от начальной высоты  $h_0$  ( $\Delta h = h_0/3$ ) зафиксировать по шкале силоизмерителя условную нагрузку, соответствующую пределу прочности  $P_{вс}$ . После этого испытание продолжить до нагружения силой, близкой к предельной для данной испытательной машины, но необходимо следить, чтобы не допустить поломки машины.

6. Если на диаграмме отсутствует площадка текучести (или не зафиксирована остановка стрелки силоизмерителя), то определяют нагрузку  $P_{0,2}$ , соответствующую условному пределу текучести при относительной остаточной деформации образца на 0,2 % (формула 3, рисунок 4).

7. Зарисовать внешний вид образца до и после испытания.

8. По определенным нагрузкам вычислить соответственно: предел текучести  $\sigma_T$  (или условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ )

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} \quad \text{или} \quad \sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}; \quad (22)$$

условный предел прочности на сжатие  $\sigma_{вс}$

$$\sigma_{\text{вс}} = \frac{P_{\text{вс}}}{F_0}, \quad (23)$$

где  $F_0$  - площадь поперечного сечения образца до испытания.

### *Сжатие образца из чугуна*

Образец для испытания - цилиндр из серого чугуна с высотой  $h = 1,5d$ .

Работа выполняется аналогично испытанию образца из стали с той лишь разницей, что:

- испытания проводятся до разрушения образца;
- нагрузка, соответствующая пределу прочности при сжатии  $P_{\text{вс}}$ , определяется по шкале силоизмерителя;
- из механических характеристик вычисляется только предел прочности материала  $\sigma_{\text{вс}}$  (формула (23)).

### *Сжатие деревянных образцов вдоль волокон*

Образцы для испытания - деревянные кубики с высотой ребра, например  $h = 20$  мм.

1. Установить образец на нижнюю опорную плиту машины так, чтобы действие сжимающей силы было направлено вдоль волокон.

2. Образец подвергнуть сжатию до разрушения. При достижении наибольшей нагрузки  $P_{\text{вс}}$  образец начинает разрушаться и нагрузка падает. Испытание следует при этом прекратить. Величину максимальной нагрузки зафиксировать.

3. Определить предел прочности при сжатии  $\sigma_{\text{вс}}$  дерева вдоль волокон (выражение (23)).

### *Сжатие образцов из дерева поперек волокон*

Испытание проводится в том же порядке, что и при испытаниях образцов из дерева вдоль волокон.

При сжатии поперек волокон за разрушающую условно принимается нагрузка  $P_{\text{вс}}$ , при которой высота образца  $h_0$  уменьшается на одну треть от первоначальной ( $\Delta h = h_0/3$ ). В процессе этого испытания следует вести наблюдение с помощью линейки за высотой образца и по шкале силоизмерителя зафиксировать величину разрушающей нагрузки.

Определить условный предел прочности  $\sigma_{\text{вс}}$  по формуле (23).

## **Протокол испытаний**

1. Название и цель работы.
2. Модель испытательной машины.

3. Размеры образцов и результаты испытаний (таблица 8).

Таблица 8 – Размеры образцов и результаты испытаний

Размеры образцов и результаты испытаний	Материал			
	Сталь	Чугун	Дерево:	
			вдоль волокон	поперек волокон
Высота образцов $h_0$ , мм				
Размеры поперечного сечения, мм	$d_0 =$	$d_0 =$	$a_0 =$ $b_0 =$	$a_0 =$ $b_0 =$
Площадь поперечного сечения образца $F_0$ , мм <sup>2</sup>				
Нагрузка $P_T$ , соответствующая пределу текучести, Н		–	–	–
Нагрузка $P_{вс}$ , соответствующая пределу прочности (или условному пределу прочности $P_{0,2}$ ), Н				
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа		–	–	–
Предел прочности $\sigma_{вс}$ , МПа (или условный предел прочности $\sigma_{0,2}$ , МПа)				

4. Эскизы образцов до и после испытания, характер их деформации и разрушения.
5. Диаграммы сжатия для стали, чугуна, дерева вдоль и поперек волокон.
6. В протоколе должны быть приведены формулы и вычисления результатов испытаний для таблицы 8.
7. Выводы.

#### Контрольные вопросы

1. Какие механические характеристики определяются при испытании на сжатие?
2. Чем обусловлены размеры образцов при испытании на сжатие?
3. Чем объясняется бочкообразная форма сжатого образца?
4. Обязательны ли испытания на сжатие пластичных материалов? Какой вид имеет диаграмма сжатия образца из низкоуглеродистой стали?

5. Какова последовательность испытаний на сжатие хрупких материалов? Каков характер разрушения чугунного образца?
6. В чем состоит особенность испытаний на сжатие анизотропного материала типа древесины? Как влияет, по вашему мнению, влажность древесины на её прочность?
7. Каково различие диаграммы сжатия древесины вдоль и поперек волокон? В каком направлении дерево прочнее при сжатии?
8. Как экспериментально определяется разрушающая нагрузка при сжатии древесины поперек волокон?
9. Назовите основные узлы универсальной испытательной машины модели Р-10.

## Лабораторная работа № 4

### Определение модуля сдвига при кручении

*Цель работы:* определение величины модуля сдвига для стали и опытная проверка закона Гука при кручении.

#### Основные сведения

Методика проведения испытаний на кручение регламентируется ГОСТ 3565-80 «Металлы. Метод испытания на кручение».

Для испытания на кручение чаще всего используют цилиндрические образцы диаметром 10 мм с длиной рабочей части 50 или 100 мм (такие образцы называют нормальными). Но ГОСТ 3565-80 разрешает проводить испытания образцов, пропорциональных нормальным, а также трубчатых образцов. Шероховатость поверхности рабочей части  $R_a$  (ГОСТ 2789-73) образцов не должна превышать 0,63 мкм.

При кручении в поперечных сечениях стержня возникает один внутренний силовой фактор - крутящий момент  $M_x$  и, как следствие, касательные напряжения  $\tau$ . Для образцов круглого поперечного сечения

$$\tau = \frac{M_x \cdot \rho}{J_p}, \quad (24)$$

где  $\rho$  - расстояние от центра тяжести сечения (полюса) до точки, в которой определяется напряжение;

$J_p$  - полярный момент инерции сечения. Для образцов круглого поперечного сечения диаметром  $d$

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32}. \quad (25)$$

Максимального значения напряжения достигают в точках, наиболее удаленных от центра тяжести поперечного сечения (при  $\rho_{max} = d/2$ )

$$\tau_{max} = \frac{M_x \rho_{max}}{J_p} = \frac{M_x}{W_p}, \quad (26)$$

где  $W_p = J_p / \rho_{max}$  - полярный момент сопротивления.

Для круглого поперечного сечения

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16}. \quad (27)$$

Деформация стержня при кручении характеризуется взаимным поворотом смежных сечений. Угол поворота одного поперечного сечения относительно другого называется углом закручивания  $\varphi$ . В пределах упругой деформации угол закручивания, выраженный в радианах, связан с крутящим моментом линейной зависимостью (законом Гука)

$$\varphi = \frac{M_x l}{G J_p}, \quad (28)$$

где  $l$  - расстояние между сечениями, взаимный угол поворота которых определяется;

$G$  - модуль сдвига или модуль упругости второго рода, характеризующий жесткость материала при кручении.

Из формулы (28) следует, что для нахождения модуля сдвига из опыта  $G^0$  достаточно измерить величину крутящего момента  $M_x$  и соответствующего ему угла закручивания  $\varphi$  при заданных значениях  $l$  и  $J_p$

$$G^0 = \frac{M_x l}{\varphi J_p}. \quad (29)$$

Для определения теоретического значения модуля упругости при сдвиге  $G$  используется зависимость между упругими постоянными для изотропного материала

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (30)$$

где  $E$  - модуль продольной упругости или модуль упругости первого рода;  $\mu$  - коэффициент поперечной деформации (или коэффициент Пуассона).

Работа проводится на испытательной машине модели КМ-50-1, предназначенной для испытания образцов из металла на кручение с наибольшим скручивающим моментом до 50 кгс·м (500 Н·м), изображенной на рисунке 12.

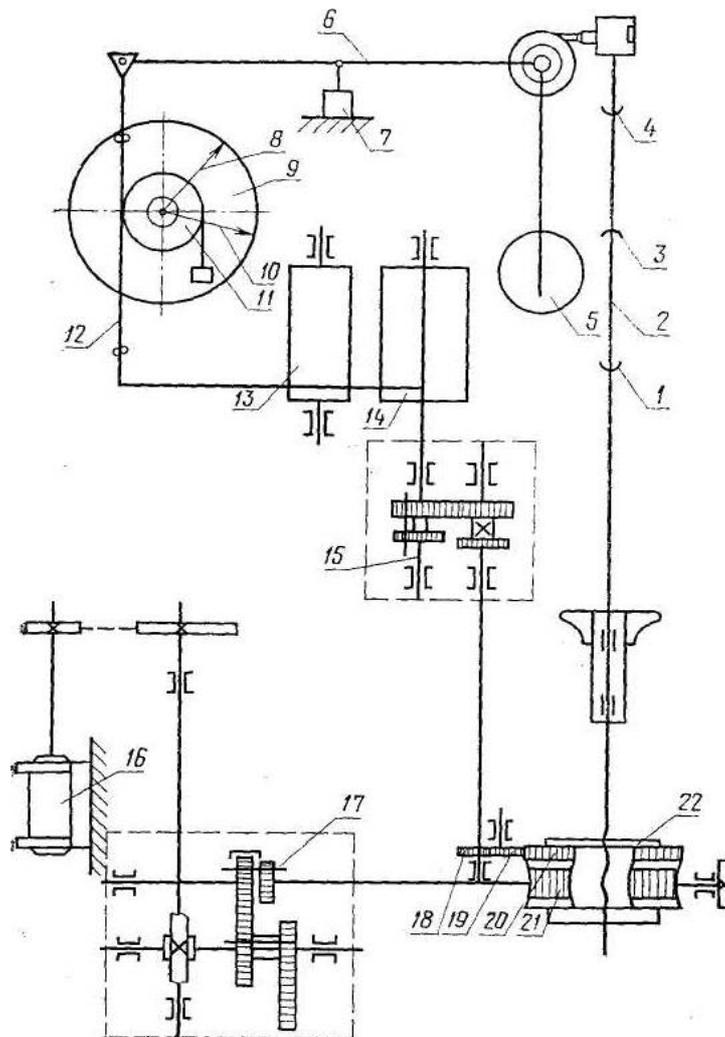


Рисунок 12 – Схема машины для испытаний на кручение КМ-50-1

Все узлы машины смонтированы на станине с двумя вертикальными колоннами. Для передачи движения активному 1 и верхнему 3 захватам через соединение 4 служит электродвигатель 16. В зависимости от установки переключателя 17 активный захват совершает 1 и 0,3 оборота в одну минуту. Для отсчета угла закручивания служит шкала 22, укрепленная на ходовом винте. Цена каждого деления шкалы соответствует углу закручивания  $1^\circ$ . Целые обороты ходового винта отмечает счетчик с пределом 10 оборотов. Для измерения создаваемого момента используется моментоизмеритель. Он представляет собой шкалу 9 для измерения моментов с рабочей 8 и контрольной 10 стрелками, маятник 5 со сменными грузами, рычаг 6, рейку 12 с направляющими роликами и шестерню 11. Конструкция моментоизмерителя такова, что величина создаваемого момента прямо пропорциональна углу отклонения рабочей стрелки по круговой шкале. При разрушении образца происходит резкое падение маятника, для предупреждения которого в корпусе моментоизмерителя смонтирован демпфер 7. Давление, создаваемое в цилиндре демпфера в момент разрушения образца 2, передается через сильфон на микропереключатель, выключающий электродвигатель.

Машина снабжена диаграммным устройством, которое в процессе деформирования образца вычерчивает диаграмму зависимости величины крутящего момента от угла закручивания. Устройство представляет собой вертикальный ведущий барабан 14, укрепленный в корпусе моментоизмерителя, и валик для намотки бумаги 13. Валик имеет тормозное устройство для постоянного легкого натягивания бумаги. Ведущий барабан 14 получает вращение от червячного колеса 21, на котором жестко закреплена шестерня 20. Червячное колесо через шестерни 19 и 18 передает вращение шестерни редуктора масштабов 15. Масштабы записи переключаются выдвиганием ручки.

До начала испытания выбирают шкалу нагружения, устанавливая на маятнике груз, соответствующий выбранной шкале нагружения. Готовят диаграммный аппарат, устанавливая образец в захваты, проверяют установку стрелок на шкале на нуль, включают машину и плавно нагружают образец. При испытании образцов на машине необходимо пользоваться ограждением.

Для замера малых углов закручивания используется угломер С.В. Бояршинова (экстензометр) – рисунок 13. Кольца 1 и 2 неподвижно закреплены на образце на расстоянии  $l$ . При скручивании одно кольцо повернется относительно другого. Вследствие поворота планка, жестко закрепленная на кольце 1, будет перемещать стержень индикатора 3, установленного на кольце 2. При этом перемещение стержня индикатора  $\Delta$  пропорционально углу закручивания  $\varphi$  (в силу малости этого угла).

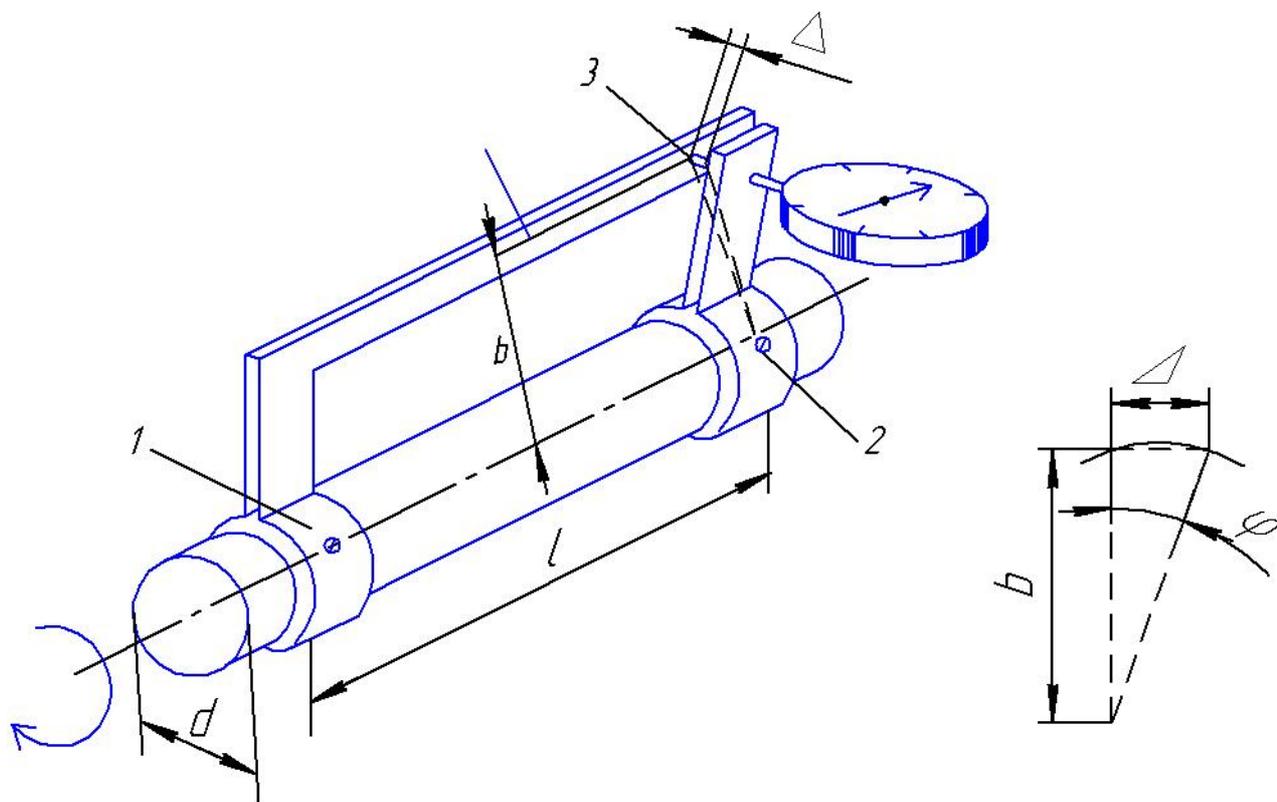


Рисунок 13 – Схема экстензометра

Отношение усредненных показаний индикатора (с учетом цены деления  $\kappa$ ) на ступень нагрузки  $\Delta n \kappa$  к расстоянию от оси испытываемого образца до индикатора и даст средний угол закручивания в радианах

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\Delta n_{\text{ср}} \kappa}{b}. \quad (31)$$

### Порядок выполнения работы

1. Определить размеры образца - диаметр  $d$  и расчетную длину  $l$ ; расстояние от его продольной оси до индикатора  $b$ ; цену деления шкалы индикатора  $\kappa$ .

2. Ограничивая напряжение в образце (формула 26) пределом пропорциональности, вычислить величину наибольшего момента  $\max M_x$ , до которого деформация следует закону Гука

$$\max M_x \leq \tau_{\text{пц}} \cdot W_p, \quad (32)$$

где  $\tau_{\text{пц}}$  - предел пропорциональности материала образца (принять для стали  $\tau_{\text{пц}} = 100$  МПа). Учитывая, что  $1 \text{ МПа} = 1 \text{ Н/мм}^2$  и  $1 \text{ кгс} = 10 \text{ Н}$ , получите размерность величины нагрузки  $\max M_x$  в единицах шкалы моментоизмерителя, т.е. в кгс·м.

3. Приложить к образцу предварительный скручивающий момент и установить индикатор угломера на нулевое деление.

4. Нагрузить образец равными ступенями  $\Delta M_x$  (не превышая  $\max M_x$ ), каждый раз фиксируя показания индикатора.

5. Вычислить среднеарифметическое приращение угла закручивания по формуле (31).

6. Определить опытное значение модуля сдвига  $G^0$  (МПа), используя формулу (29). Для расчета среднего значения  $G^0$  в формуле принять  $M_x = \Delta M_x$ ;  $\varphi = \varphi_{\text{ср}}$ .

7. Построить график зависимости  $\varphi = f(M_x)$  и убедиться, что в пределах точности проводимого опыта деформация образца подчиняется закону Гука.

8. Рассчитать теоретическое значение модуля сдвига  $G$  (формула 30), принимая для стали  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $\mu = 0,25$ .

9. Сопоставить опытные и теоретические значения модуля сдвига, вычислив погрешность.

### Протокол испытаний

1. Название и цель работы.
2. Модель испытательной машины.
3. Диаметр образца  $d =$   
Расчетная длина  $l =$

- Расстояние от оси образца до индикатора  $b =$   
 Цена деления шкалы индикатора  $\kappa =$   
 4. Полярный момент сопротивления

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16} =$$

5. Наибольший крутящий момент  $\max M_x$  (кгс·м), до которого деформация образца следует закону Гука при  $\tau_{\text{пц}} = 100$  МПа:

$$\max M_x = \tau_{\text{пц}} W_p =$$

6. Результаты опыта (таблица 9).

Таблица 9 – Результаты опыта

Крутящий момент, кгс·м		Показания индикатора		Угол закручивания, рад
$M_x$	$\Delta M_x$	$n$	$\Delta n$	$\varphi = \frac{n\kappa}{b}$
Среднее значение $\Delta n_{\text{ср}}$				

7. Усредненный угол закручивания  $\varphi_{\text{ср}}$ , рад

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\Delta n_{\text{ср}} \kappa}{b} =$$

8. Полярный момент инерции поперечного сечения образца

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32} =$$

9. Опытное значение модуля сдвига  $G^0$

$$G^0 = \frac{\Delta M_x l}{\varphi_{\text{ср}} J_p} =$$

10. Теоретическое значение модуля сдвига  $G$  при  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа;  
 $\mu = 0,25$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} =$$

11. Процент погрешности опыта:

$$\delta = \frac{G - G^0}{G} \cdot 100\% =$$

12. Диаграмма кручения  $M_x = f(\varphi)$ .

13. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Как рассчитываются полярные моменты инерции и сопротивления для круглого поперечного сечения?

2. Какая зависимость существует между крутящим моментом и углом закручивания в области упругих деформаций? Запишите условие применимости закона Гука.

3. Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?

4. Во сколько раз изменится угол закручивания, если диаметр стержня уменьшить вдвое?

5. Какая зависимость существует между упругими постоянными  $G$ ,  $E$  и  $\mu$  для изотропных материалов?

6. С помощью какого прибора производится замер угла закручивания? Объясните принцип его работы.

7. Объясните принцип действия и устройство применяемой в данной лабораторной работе испытательной машины.

9. Сколько шкал нагружения имеет машина на кручение КМ-50-1?

10. С какой целью в машине используется демпфирующее устройство?

## Список литературы

1. Авдеев Б.А. Техника определения механических свойств материалов. – М.: Машиностроение, 1965. – 488 с.
2. Афанасьев А.М., Марьин В.А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов.- М.: Изд-во физико-математической литературы, 1960. – 264 с.
3. Беляев Н.М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов.- М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1956. – 287 с.
4. Вербицкая А.Г., Кирнос В.И. Определение механических свойств материалов: Учеб. пособие.- М.: Изд-во стандартов, 1984. – 192 с.
5. Жуковец И.И. Механические испытания металлов: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1986. – 199 с.
6. Крылова Г.Д. Основы стандартизации, сертификации, метрологии: Учебник для вузов. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1998. – 479 с.
7. Раннев Г.Г. Методы и средства измерений: Учебник для вузов. – М.: Академия, 2004. – 336 с.
8. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.
9. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 589 с.

Коротовских Валентин Константинович

Марфицын Валерий Владимирович

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
по дисциплинам «Сопротивление материалов» и  
«Методы и средства измерений, испытаний и контроля»  
для студентов специальности 200503**

**Часть 1**

Редактор Т.В. Тимофеева

---

Подписано к печати	Формат 60×84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл. печ. л. 2,5	Уч. изд. л. 2,5
Заказ	Тираж 50	Цена свободная

---

РИЦ Курганского государственного университета.

640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.

Курганский государственный университет.