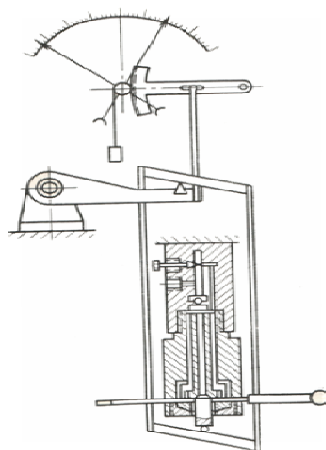


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Инноватика и менеджмент качества»



МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

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



Курган 2010

Кафедра: «Инноватика и менеджмент качества»

Дисциплины: "Методы и средства измерений, испытаний и контроля";
"Сопротивление материалов" (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 13 мая 2010 г.

Рекомендованы методическим советом университета _____ 2010 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 надежности конструкций, машин, механизмов и отдельных деталей. Для обеспечения этих требований необходимы испытания (из вида «Воздействие внешних факторов»), учитывающие воздействие механических факторов.

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

Основные законы, положения, принципы, методики испытаний 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, меха-

нические 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 тонна-сила (тс); 1 килограмм-сила (кгс);
- 1 паскаль (Па); 1 мегапаскаль (МПа).
- $1 \text{ МН} = 10^3 \text{ кН}$; $1 \text{ кгс} \approx 10 \text{ Н}$; $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$;
- $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па} \approx 10 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,1 \text{ кгс/мм}^2 = 1 \text{ Н/мм}^2$.

Лабораторная работа № 1

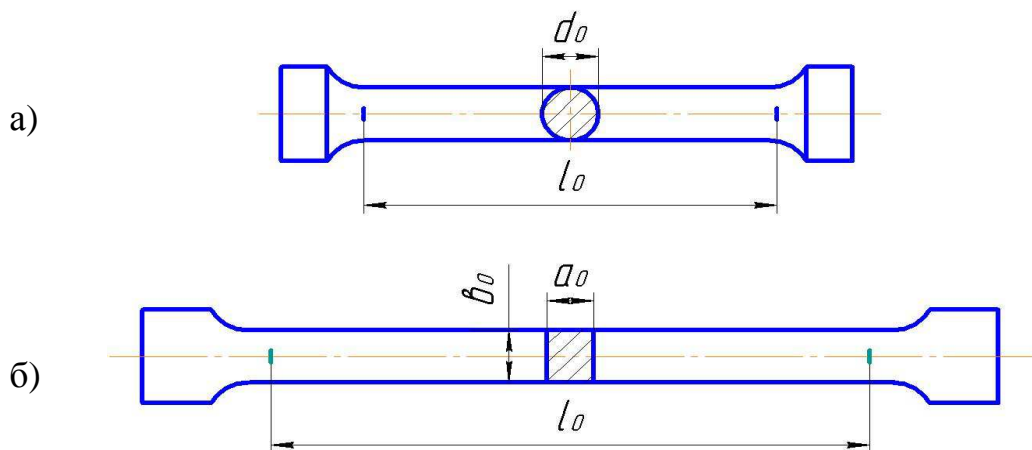
Испытание материалов на растяжение

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 $a_0 \times b_0$ (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 Δl .

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 (0 - 2 тс; 0 - 5 тс; 0 - 10 тс). Допускаемая погрешность показаний машины составляет $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Основными узлами машины модели 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 2 служит для наблюдения за процессом нагружения образца и контроля величин усилий 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

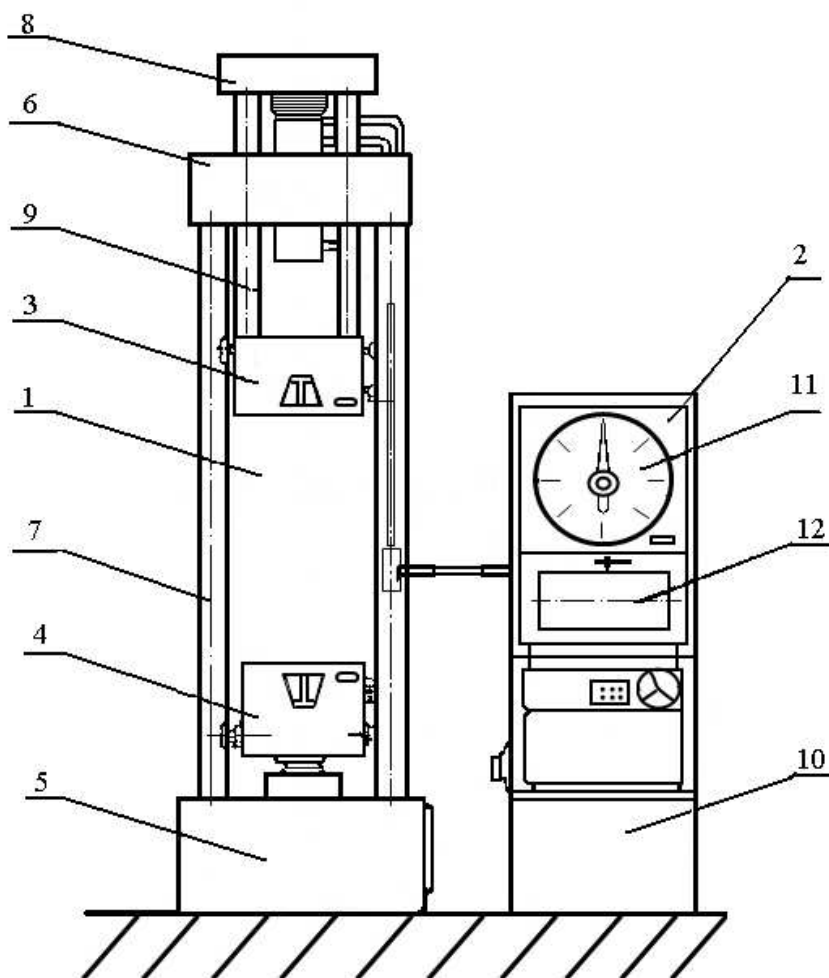


Рисунок 2 – Схема разрывной машины Р-10

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 материала 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.

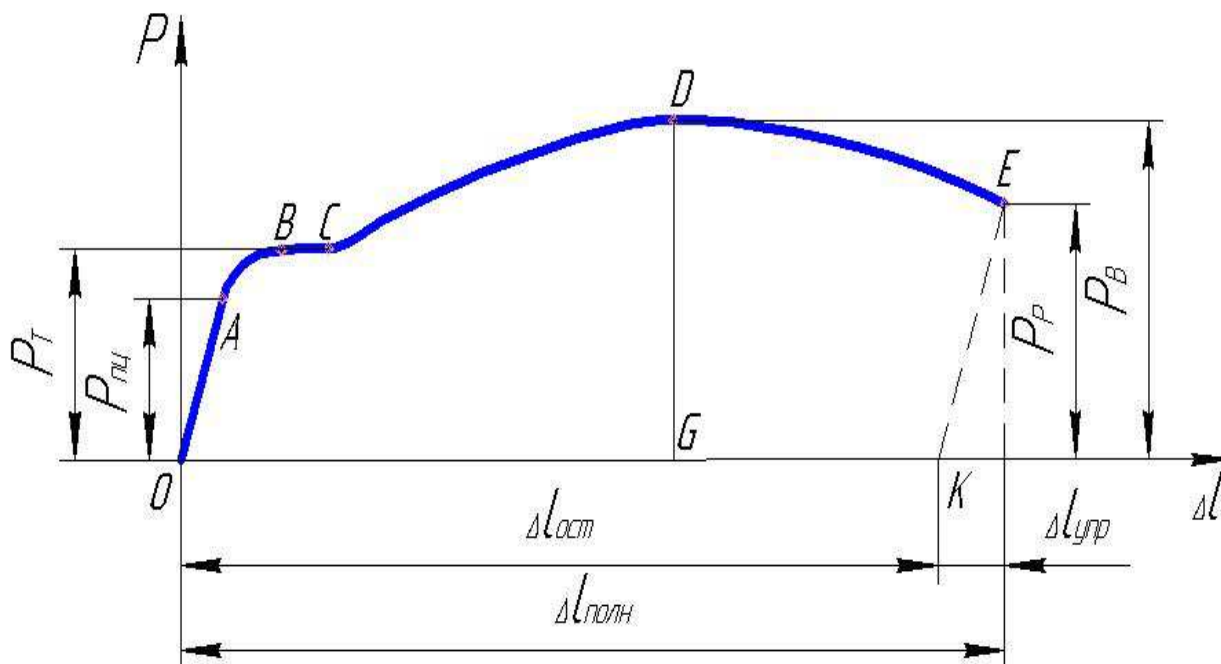


Рисунок 3 - Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

При достижении максимальной силы P_B (точка D) на образце образуется местное сужение – так называемая «шейка». Она 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 или зона разрушения.

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 нагрузок без разрушения. 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 площадь поперечного сечения образца.

Кроме того, независимо от предела пропорциональности существует *предел упругости* σ_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 σ_y незначительно отличаются друг от друга. Поэтому обычно используется только одно напряжение $\sigma_{пл}$.

2. *Предел текучести или физический предел текучести* σ_T – наименьшее напряжение, при достижении которого образец деформируется без заметного увеличения нагрузки (материал «течет»)

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

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 образца Δl 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* $\sigma_{0,2}$.

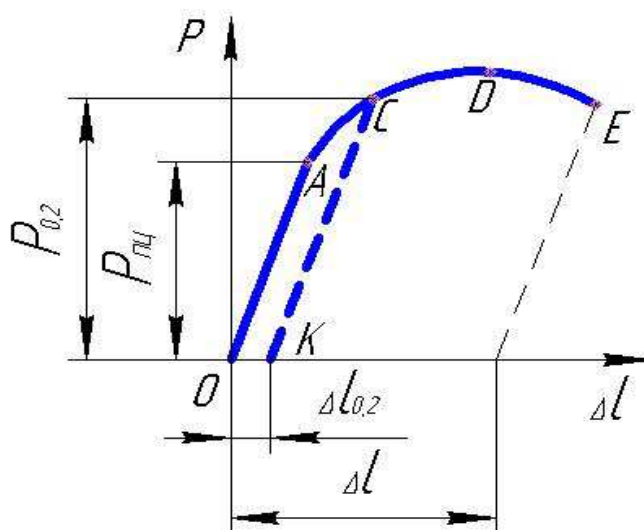


Рисунок 4 - Определение условного предела текучести

3. *Предел прочности материала или временное сопротивление разрыву σ_B* – наибольшее условное напряжение, которое способен выдержать материал (образец) без разрушения

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

где P_B – максимальная сила, предшествующая разрыву образца (ордината точки С).

Напряжение σ_B называется условным, т.к. его действительная величина имеет большее значение. Это объясняется тем, что в формуле (4) используется начальная площадь сечения образца, которая при растяжении уменьшается.

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

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

где P_p – величина силы, соответствующей разрушению (ордината точки D); F_k – площадь (конечная) поперечного сечения образца в месте разрыва.

В международных стандартах пределы пропорциональности, текучести, прочности и разрушения обозначаются как σ_{pr} , σ_y , σ_u , σ_b , соответственно.

Пределы текучести σ_T и прочности σ_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 их разрушению. 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 элементов конструкции.

Чем больше величина предельных напряжений, тем выше прочность материала.

Механические характеристики пластичности

Под пластичностью понимается способность материала получать требуемые для конкретного изделия остаточные деформации и значительно изменять свои первоначальные размеры и форму 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 незначительных остаточных деформациях (чугун, высокоуглеродистые инструментальные стали, керамика, стекло, камень и т.п.).

Мерой пластичности материала служат относительные остаточные удлинение δ и сужение ψ образца.

Относительное остаточное удлинение δ , %:

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

где l_k – конечная длина расчетной части образца после разрыва.

Значение δ 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» ψ , %:

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

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

Статическая вязкость материала

Статические (медленные, плавные) испытания на растяжение позволяют косвенно оценить вязкость материала, т.е. его способность сопротивляться действию кратковременных динамических нагрузок. Эта способность может быть выражена через работу или энергию, затрачиваемую на разрушение образца. Чем больше данная работа, тем выше вязкость материала, тем лучше он воспринимает ударные и циклические нагрузки. Работа, затраченная на разрушение образца, прямо пропорциональна площади диаграммы растяжения $OABCDEK$ (рисунок 2) и учитывает только остаточную деформацию $\Delta l_{ост}$:

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

где η – коэффициент полноты заполнения диаграммы, равный для сталей $0,8 \dots 0,9$. Для низкоуглеродистой стали можно принять $\eta = 0,85$.

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

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

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

У вязких, пластичных сталей величина удельной работы a находится в пределах $(700 \dots 800) \cdot 10^5$ Дж/м³ и более.

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 соответствующие метки.
3. Вычислить начальные величины рабочей части: площади поперечного сечения $F_0 = \pi d_0^2 / 4$ и объема $V_0 = F_0 \cdot l_0$.
4. Закрепить образец в захватах машины и настроить диаграммный аппарат.
5. Произвести растяжение образца до разрыва с записью диаграммы зависимости нагрузки P от удлинения Δl . 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 Δl , проведенной из точки O_1 . Из начала координат восстанавливается ось ординат P . Таким образом, согласно рекомендации ГОСТ, участок O_1O_2 диаграммы отбрасывается.

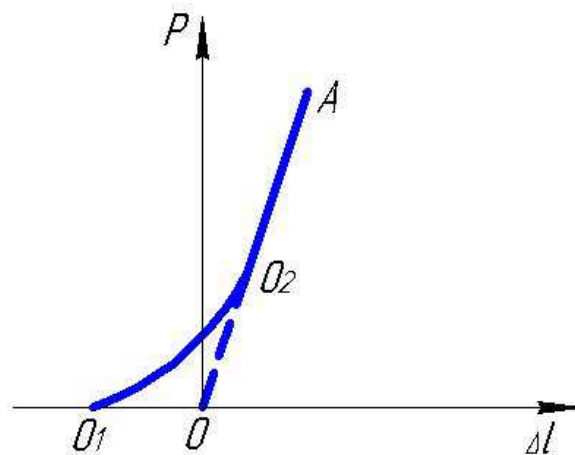


Рисунок 5 - Выбор начала координат диаграммы растяжения

7. Отметить на диаграмме её характерные точки A, B, C, D (см. рисунок 3) и определить их ординаты (в мм).
8. Измерить диаметр шейки d_K в месте разрыва образца и конечную длину расчетной части l_K (сложив обе части, измерить расстояние между метками).

9. Найти для полученной диаграммы масштабы нагрузки m_P и деформации $m_{\Delta l}$ по осям ординат и абсцисс (рисунок 3).

Масштаб нагрузки m_P устанавливается путем деления силы P_B , соответствующей пределу прочности, на величину ординаты DG :

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

Масштаб деформации по оси абсцисс $m_{\Delta l}$. Проведя на диаграмме прямую EK , параллельную OA , получим на оси абсцисс отрезок OK , отображающий величину остаточного удлинения образца после разрыва. Истинная величина этой остаточной деформации равна разности длин $l_K - l_0$. Тогда масштаб $m_{\Delta l}$ по оси абсцисс будет равен:

$$m_{\Delta l} = \frac{l_K - l_0}{OK} \quad (\text{мм/мм}) \quad (11)$$

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 ²)	Площадь поперечного сечения «шейки» образца в месте разрыва
Начальный объем расчетной части	$F_k = \pi d_k^2 / 4 =$ (мм ²)
$V_0 = F_0 \cdot l_0 =$ (мм ³)	

5. Полученная диаграмма растяжения, перечерченная в определенном масштабе, с численными значениями ординат $P_{пц}$, P_T , P_B , P_p .

6. Величины нагрузок (таблица 2).

Таблица 2 – Численные значения усилий растяжения

Нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности $P_{пц}$, Н	Нагрузка, соответствующая пределу текучести P_T , Н	Нагрузка, соответствующая пределу прочности P_B , Н	Нагрузка в момент разрыва P_p , Н

7. Механические характеристики материала (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты опыта

Механические характеристики прочности, МПа	Характеристики пластичности, %	Характеристики статической вязкости
<p>Предел пропорциональности</p> $\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0} =$ <p>Предел текучести</p> $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} =$ <p>Предел прочности</p> $\sigma_B = \frac{P_B}{F_0} =$ <p>Истинное напряжение при разрыве</p> $\sigma_p = \frac{P_p}{F_k} =$	<p>Относительное остаточное удлинение</p> $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% =$ <p>Относительное остаточное сужение поперечного сечения</p> $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% =$	<p>Работа, затраченная на разрушение образца, Дж (Н·м)</p> $A = \eta \cdot P_B \cdot \Delta l_{ост} =$ <p>Удельная работа, затраченная на разрыв, Дж/м³</p> $a = \frac{A}{F_0 \cdot l_0} =$

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

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

Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , % (при $l = 10d$)	Марка стали	Предел текучести σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , % (при $l = 10d$)
Ст 0	190	320-470	18	16ГС	265	430	21
Ст 2	240	340-420	26	09Г2	295	430	
Ст 3	220	380-470	21	12ГС	315	450	
Ст 4	240	420-520	19-21	09Г2С	325	450	
Ст 5	270	500-620	15-17	17ГС	345	490	

9. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие деформации называются упругими? Остаточными (пластическими)?
2. Какие материалы при нормальных условиях принято считать пластичными, хрупкими?
3. Что называется пределом пропорциональности, упругости, 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 величины 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 σ в стержне и его деформацией ε существует прямая пропорциональная зависимость (*общий закон Гука*):

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

где E – модуль продольной упругости материала; ε – относительная продольная деформация $\varepsilon = \Delta l / l$ (Δl – изменение первоначальной длины l , т.е. абсолютная продольная деформация).

Модуль продольной упругости E зависит от материала и характеризует его жесткость при растяжении (сжатии). Чем больше модуль продольной упругости, тем материал более жесткий, т.е. тем меньше он деформируется при одних и тех же напряжениях. Для стали величина модуля продольной упругости изменяется в пределах $(1,9 \div 2,2) \cdot 10^5$ МПа.

Абсолютное удлинение стержня (образца) Δl 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; F – площадь поперечного сечения.

Исходя из (13), после определения абсолютного удлинения Δl 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 l , но и поперечные размеры b . Установлено, что отношение относительных поперечной $\varepsilon^* = \Delta b/b$ и продольной $\varepsilon = \Delta l/l$ деформаций – есть величина постоянная для каждого материала, называемая коэффициентом поперечной деформации μ :

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

Для сталей коэффициент поперечной деформации $\mu = 0,25...0,35$.

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

Машина предназначена для испытаний на растяжение и сжатие круглых и плоских образцов с максимальным усилием 5 тс (50 кН).

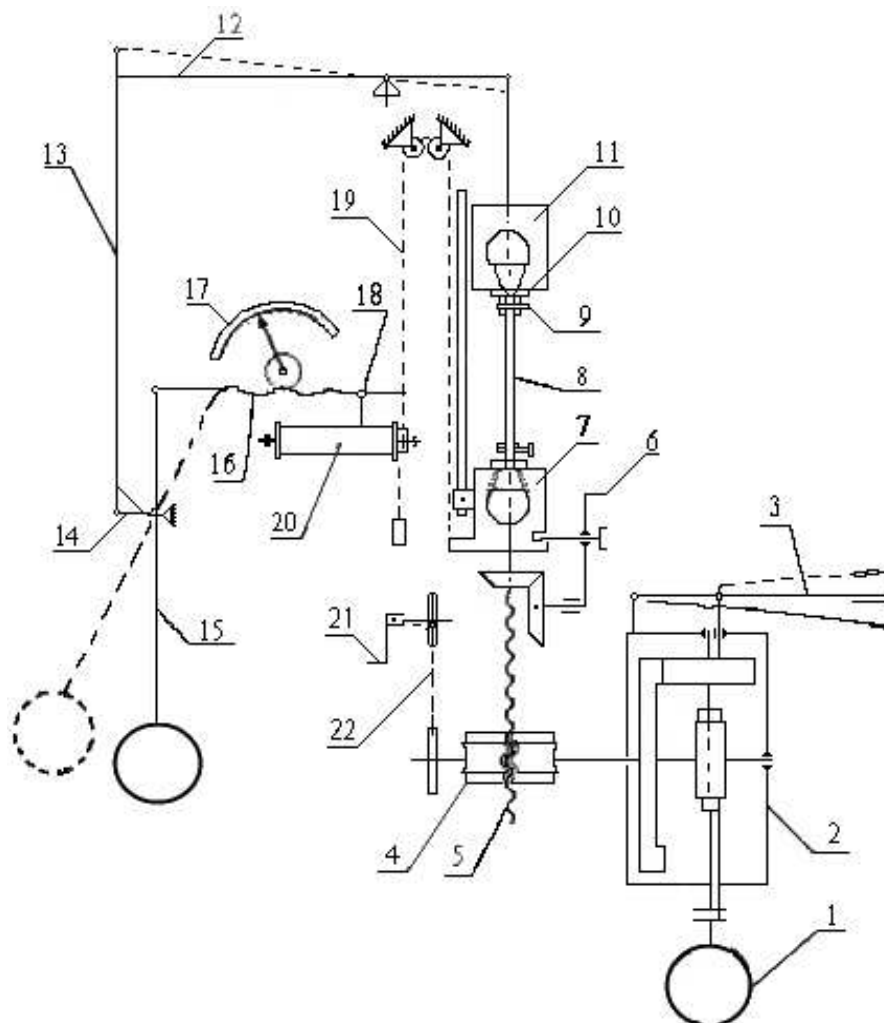


Рисунок 6 – Кинематическая схема разрывной машины Р-5

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 Δl и поперечной Δb 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.

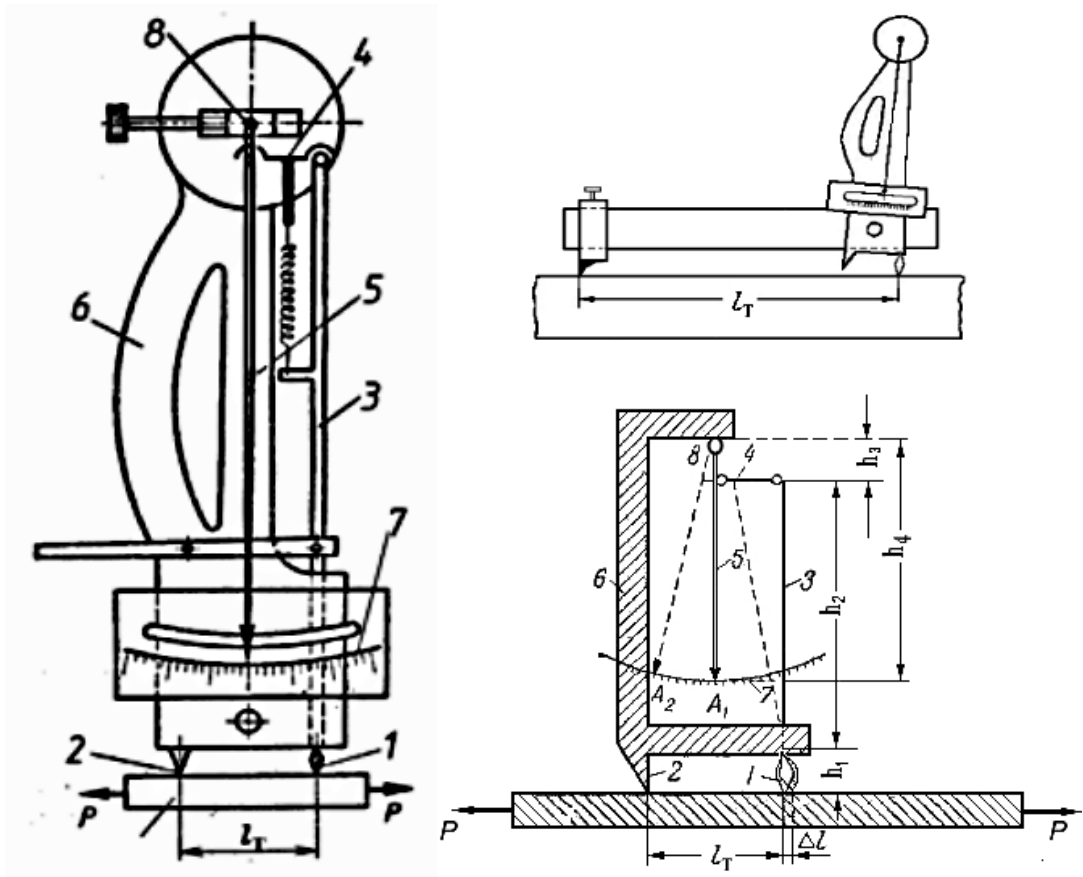


Рисунок 7 – Общий вид и схема рычажного тензметра

При увеличении длины $l = l_T$ (базы прибора) на величину Δl 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 ΔA с отсчета A_1 на отсчет A_2 . Разность отсчетов по шкале ΔA пропорциональна удлинению Δl . Коэффициент увеличения m зависит от соотношения плеч рычагов 3 и 5 ($m = \Delta A / \Delta l = h_2 \cdot h_4 / h_1 \cdot h_3$). 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* тензметра k ($k = 1/m$). Для применяемых в работе тензметров цена деления шкалы $k = 10^{-3}$ мм, т.е. 1 мкм. Предел измерения 50 мкм, точность $\pm 0,5$ мкм. При производстве отсчета нужно располагать глаз так, чтобы острие стрелки совпадало с его изображением в зеркале.

Размещение тензметров на образце показано на рисунке 8. Тензметр A предназначен для измерения продольной деформации, а тензметр B - попереч-

ной. Так как с помощью тензометров определяются изменения длины и поперечного размера образца в пределах базы прибора l_T , то относительные деформации будут соответственно равны:

$$\begin{array}{ll} \text{продольная} & \varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{ср}}}{l_T}, \\ \text{поперечная} & \varepsilon^* = \frac{\Delta b_{\text{ср}}}{l_T}, \end{array} \quad (16)$$

где $\Delta l_{\text{ср}}$ – среднее приращение абсолютного удлинения, вызванного ступенью нагружения ΔP ; $\Delta b_{\text{ср}}$ – среднее приращение абсолютной поперечной деформации; l_T – база тензометров.

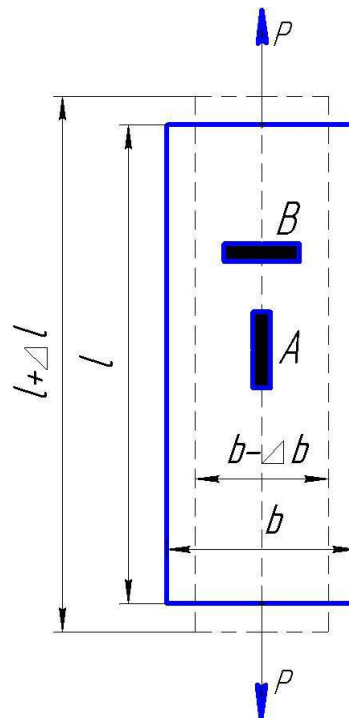


Рисунок 8 – Размещение тензометров на образце

Порядок выполнения работы

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

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

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 ΔA и ΔB .

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 ΔP , мм

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

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

где K - цена деления шкалы тензометра.

10. Вычислить (формулы 16) относительные продольную ε и поперечную ε^* деформации.

11. Рассчитать величину модуля продольной упругости E , МПа

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

12. Определить численное значение коэффициента поперечной деформации μ по выражению (15).

13. Полученные опытные значения модуля E и коэффициента μ сравнить с данными, приведенными в научно-технической литературе для стали:

$$E = (1,9 \div 2,2) \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \mu = 0,25 \div 0,33.$$

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} , до которой наблюдаются упругие деформации и закон Гука (при пределе пропорциональности $\sigma_{пц} = 200$ МПа)

$$P_{max} \leq \sigma_{пц} \cdot F =$$

9. Показания тензометров (таблица 6) и результаты опыта (таблица 7).

Таблица 6 - Показания тензометров

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

Таблица 7 - Результаты опыта

Среднее приращение абсолютного удлинения, мм	$\Delta l_{cp} = \Delta A_{cp} \cdot K =$
Среднее приращение абсолютной поперечной деформации, мм	$\Delta b_{cp} = \Delta B_{cp} \cdot K =$
Относительная продольная деформация	$\varepsilon = \frac{\Delta l_{cp}}{l_T} =$
Относительная поперечная деформация	$\varepsilon^* = \frac{\Delta b_{cp}}{l_T} =$
Коэффициент поперечной деформации μ	$\mu = \left \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon} \right =$
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 вычисляется величина наибольшей нагрузки, до которой может быть нагружен образец при нахождении модуля E и коэффициента μ ?
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 найдены 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

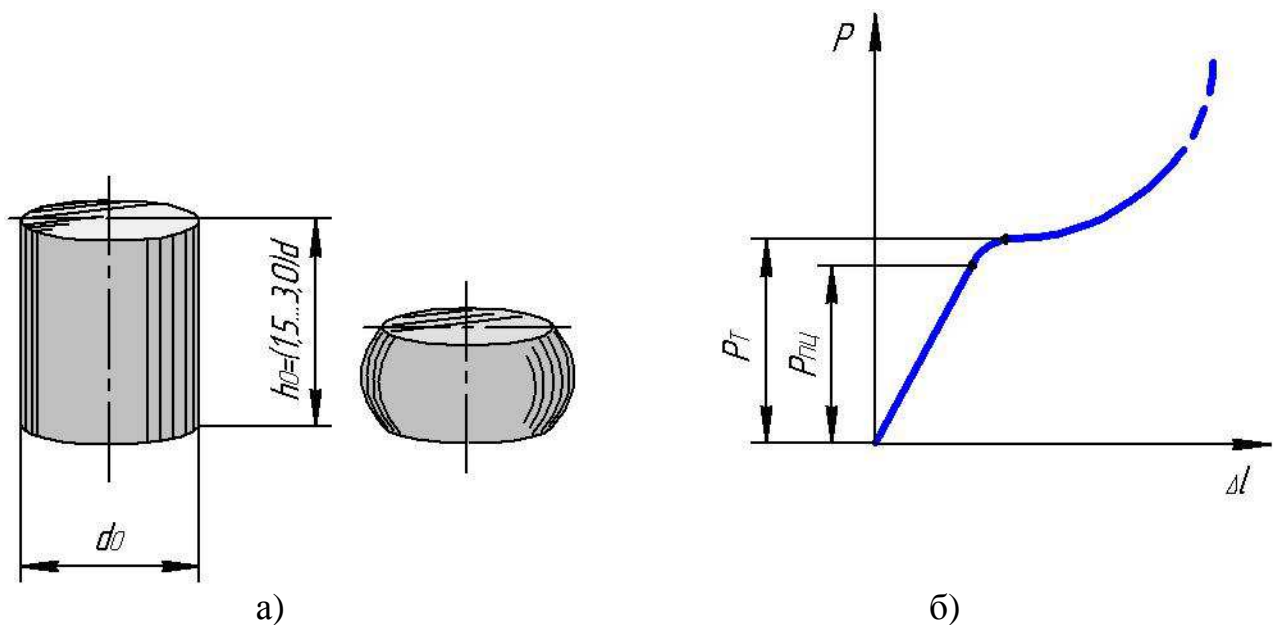
Пластичные материалы (низкоуглеродистая сталь, медь, алюминий и т. п.) одинаково сопротивляются растяжению и сжатию. Для них испытания на сжатие являются *дополнением к растяжению*. *Хрупкие* материалы: чугун, бетон, стекло, керамика и т.п. - значительно лучше работают на сжатие. Поэтому для хрупких 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 возрастания 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. Усилие сжатия непрерывно возрастает, поперечное сечение увеличивается. Вследствие сил трения, возникающих по торцам образца, он принимает бочкообразную форму.



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

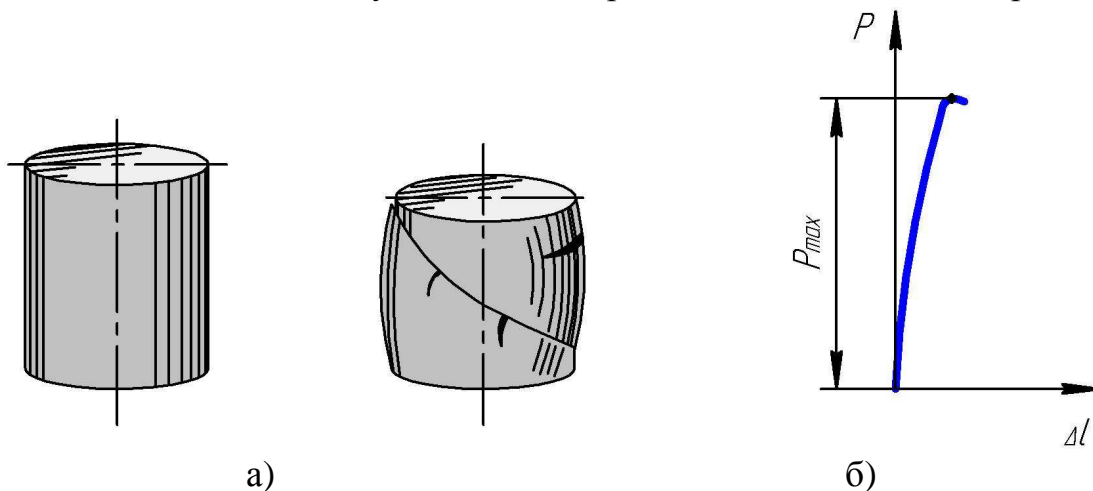
Образец может быть сплюснен в тонкий диск, но довести его до разрушения практически невозможно. Поэтому предел прочности низкоуглеродистой стали при сжатии, как и других пластичных материалов, установить *не удастся*. При расчетах обычно принимают значение его (а также и пределов пропорциональности и 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.

Площадка текучести при сжатии выявлена слабо, иногда она полностью отсутствует. Для большинства пластичных материалов в результате испытаний 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 σ_{Tp} и σ_{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 рисок, 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° к оси цилиндрического образца, что вызвано наибольшими касательными напряжениями (рисунок 10, а). На рисунке 10, б показана соответствующая диаграмма сжатия, которая с самого



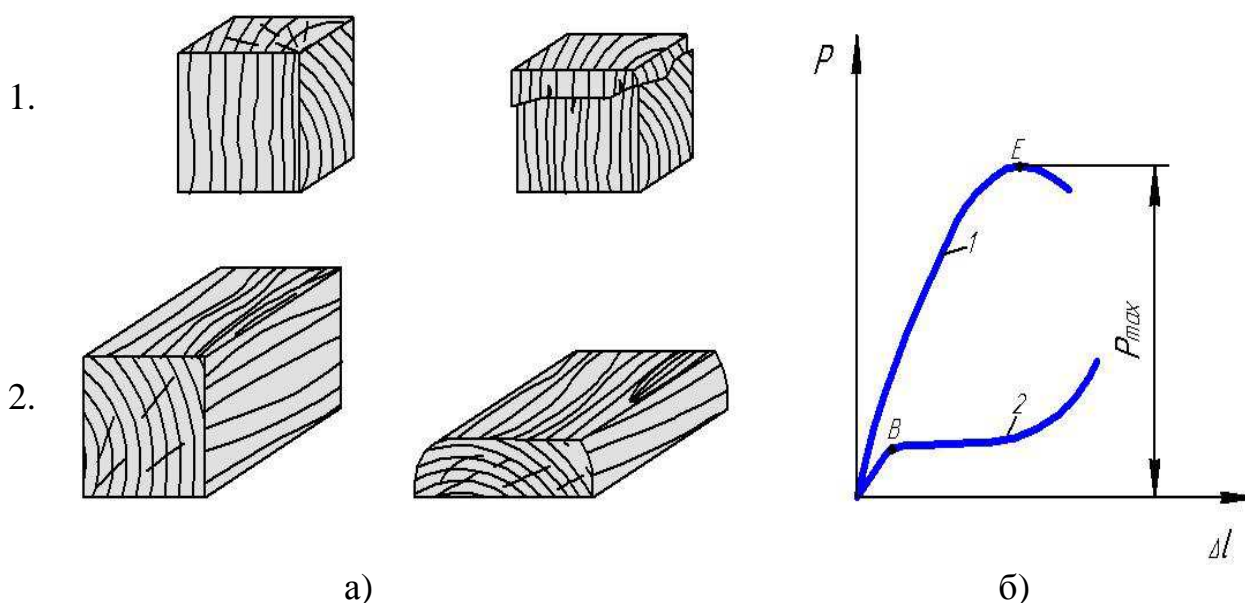
а) общий вид образца до и после испытания;
б) диаграмма сжатия чугуна

Рисунок 10 – Образец и диаграмма сжатия чугуна

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.

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

Анизотропные материалы (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 деревянного 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

Получить от преподавателя 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 физическому пределу текучести.

5. 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).

6. 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_{bc} (обычно испытание продолжают до нагружения силой, близкой к предельной для данной испытательной машины, не допуская ее поломки).

7. Зарисовать внешний вид образца до и после испытания.
8. По определенным нагрузкам вычислить соответственно: физический предел текучести σ_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 $\sigma_{вс}$

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

где F_0 - площадь поперечного сечения образца до испытания.

Сжатие образца из чугуна

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

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

Сжатие деревянных образцов вдоль волокон

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 силы сжатия $P_{вс}$ образец начинает разрушаться и нагрузка падает. Испытание при этом следует прекратить. Величину максимальной нагрузки зафиксировать.

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

Сжатие образцов из дерева поперек волокон

При сжатии поперек волокон *условно* за разрушающую нагрузку принимается сила $P_{вс}$, 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 $\sigma_{вс}$ по формуле (23).

Протокол испытаний

1. Название и цель работы.
2. Модель испытательной машины.
3. Размеры образцов и результаты испытаний (таблица 7).

Таблица 7 – 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 ²				
Нагрузка P_T , соответствующая физическому пределу текучести (или условному пределу текучести $P_{0,2}$), Н		—	—	—
Нагрузка $P_{вс}$, соответствующая пределу прочности, Н				
Физический предел текучести σ_T , МПа (или условный условный - $\sigma_{0,2}$, МПа)		—	—	—
Предел прочности $\sigma_{вс}$, 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 7.
7. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Перечислите механические характеристики, определяемые при испытании на сжатие? Дайте их определение.

2. Какие существуют рекомендации по соотношению продольных и поперечных размеров цилиндрических 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. Каков характер и вид диаграммы разрушения чугунного образца?
6. В чем особенность испытаний на сжатие анизотропного материала типа древесины? Как влияет, по вашему мнению, влажность древесины на её прочность?
7. Какой вид имеют 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. Перечислите 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 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 τ . Для образцов круглого поперечного сечения

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

где ρ - расстояние от центра тяжести сечения (полюса) до точки, в которой определяется напряжение; J_p - полярный момент инерции сечения. Для сечения круглой формы 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 φ . 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 знать величину крутящего момента M_x и измерить соответствующий ему угол закручивания φ 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; μ - 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 500 Н·м (50 кгс·м), изображенной на рисунке 12.

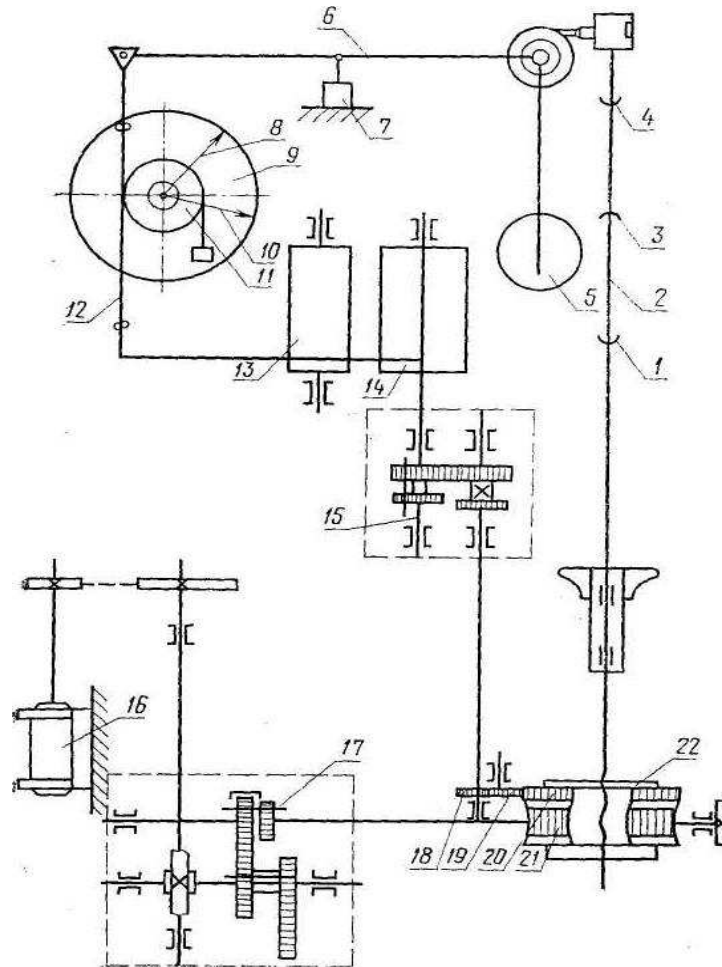


Рисунок 12 – Схема машины для испытаний на кручение КМ-50-1

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. Кроме того предусмотрена передача вращения вручную с помощью цепной передачи. Для отсчета угла закручивания служит шкала 22, укрепленная на ходовом винте. Цена каждого деления шкалы соответствует углу закручивания 1° . Целые обороты ходового винта отмечает счетчик с пределом 10 оборотов. Величина создаваемого момента определяется с помощью моментоизмерителя. Он представляет собой шкалу 9 с рабочей 8 и контрольной 10 стрелками, маятник 5 со сменными грузами, рычаг 6, рейку 12 с направляющими роликами и шестерню 11. Значение передаваемого момента прямо пропорционально углу отклонения рабочей стрелки. При разрушении образца происходит резкое падение маятника, для предупреждения которого используется 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 состоит из вертикального ведущего барабана 14 в корпусе моментоизмерителя и валика 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. В данной испытательной машине КМ 50-1 имеются три шкалы нагружения (шкала А с ценой деления 0,1 кгс·м, один груз; шкала Б с ценой деления 0,05 кгс·м, два груза и шкала В с ценой деления 0,05 кгс·м, три груза).

Для замера малых углов закручивания используется *угломер* С.В. Бояринова (*экстензометр*) – рисунок 13. Кольца 1 и 2 с жесткими планками неподвижно закреплены на образце на расстоянии расчетной длины l . При скручивании одно кольцо повернется относительно другого. Вследствие поворота планка на кольце 1, будет перемещать стержень индикатора 3, установленного на планке кольца 2. При этом перемещение стержня индикатора Δ пропорционально углу закручивания φ (в силу малости этого угла).

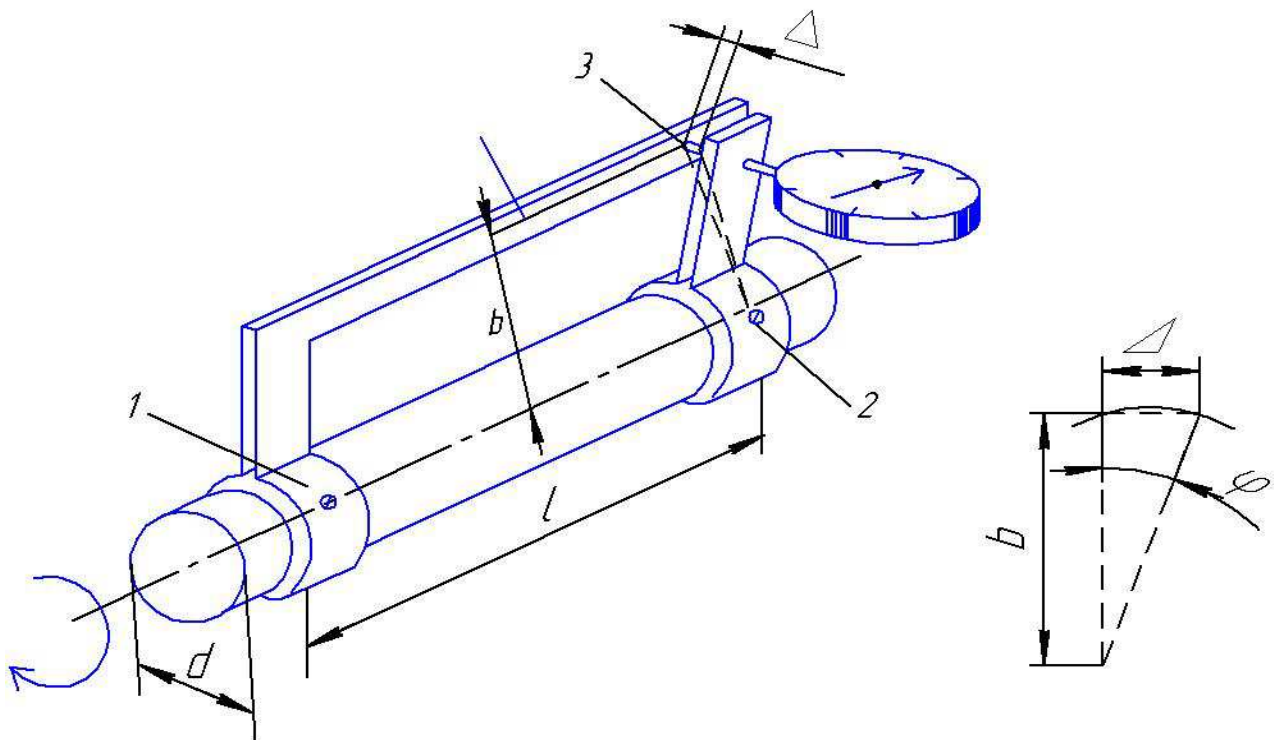


Рисунок 13 – Схема экстензометра

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

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

Порядок выполнения работы

1. Замерить размеры образца - диаметр d и расчетную длину l ; расстояние от его продольной оси до индикатора b ; цену деления шкалы индикатора κ .

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

$$\max M_{\kappa} \leq \tau_{\text{пц}} \cdot W_{\text{р}}, \quad (32)$$

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 $1 \text{ кгс} \approx 10 \text{ Н}$, получите размерность значения нагрузки $\max M_{\kappa}$ в единицах шкалы моментометра применяемой испытательной машины, т.е. в кгс·м.

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

4. Нагрузить образец равными ступенями ΔM_{κ} (не превышая $\max M_{\kappa}$), каждый раз фиксируя показания индикатора.

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

6. Определить величину модуля сдвига G^0 (МПа) из опыта, используя закон Гука (формула 29). Принять $M_{\kappa} = \Delta M_{\kappa}$; $\varphi = \varphi_{\text{ср}}$.

7. Построить график зависимости $\varphi = f(M_{\kappa})$ 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 величины модуля $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициента $\mu = 0,25$.

9. Сопоставить опытные и теоретические величины 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 $\max M_{\kappa}$ (кгс·м), до которого деформация образца следует закону Гука при $\tau_{\text{гук}} = 100$ МПа:

$$\max M_{\kappa} = \tau_{\text{гук}} W_p =$$

6. Результаты опыта (таблица 8).

Таблица 8 – Результаты опыта

Скручивающий момент, кгс·м		Показания индикатора		Угол закручивания, рад
M_{κ}	ΔM_{κ}	n	Δn	$\varphi = \frac{n\kappa}{b}$
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

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

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 $M_K = f(\varphi)$.

13. Выводы.

Контрольные вопросы

1. По каким формулам рассчитываются полярные моменты инерции и сопротивления для круглого поперечного сечения?
2. Как связаны между собой крутящий момент и угол 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 при прочих одинаковых условиях?
5. Запишите формулу связи между упругими постоянными G , E и μ для изотропных материалов?
6. С помощью какого прибора производится замер угла закручивания? Как он работает?
7. Объясните принцип действия и устройство применяемой в данной лабораторной работе испытательной машины.
9. Сколько шкал нагружения имеется на машине модели 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., Киринос 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.

Коротовских Валентин Константинович

Марфицын Валерий Владимирович

**МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ
МАТЕРИАЛОВ**

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

Редактор

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

Редакционно-издательский центр КГУ.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.