

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

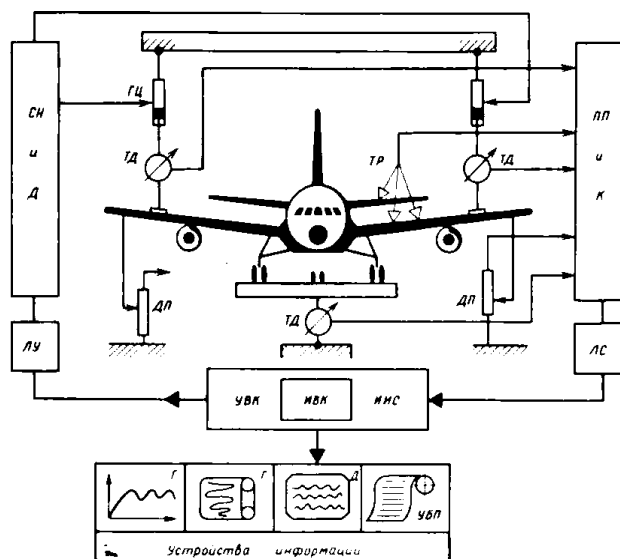
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра теоретической механики и сопротивления материалов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
по дисциплине «Сопротивление материалов»
для студентов направлений 151900.62, 150700.62,
190600.62, 190700.62, 190109.65, 190110.65

Часть 1



Курган 2013

Кафедра: «Теоретическая механика и сопротивление материалов»

Дисциплина: «Сопротивление материалов»

(направления 151900.62, 150700.62, 190600.62, 190700.62, 190109.65, 190110.65)

Составил: канд. техн. наук, доц. В. К. Коротовских

Составлены на основе: Бубнов В.А., Емельянова Н.С., Коротовских В.К. Методические указания к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов. – Курган: Изд-во КГУ, 2000. - Ч. 1.

Утверждены на заседании кафедры 27 февраля 2013 г.

Рекомендованы методическим советом университета 23 апреля 2013 г.

Введение

Механические испытания связаны с исследованием закономерностей деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций в различных условиях в зависимости от вида напряженного состояния, статического, динамического и циклического нагружения; низких, нормальных и высоких температур, при воздействии на объект тепловых, магнитных потоков и т.д. Задачами таких испытаний могут быть проверка справедливости гипотез и теорий механики деформируемого твердого тела; получение данных о изменении материалов при внешнем нагружении; определение их механических характеристик и оценка несущей способности элементов конструкций или конструкций в целом. При этом 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 других 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. Кроме того, механические испытания предназначены для сдаточного и приемочного контроля качества материалов на заводах-изготовителях и предприятиях-потребителях. 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.

Объекты исследования при механических испытаниях – образцы, модели, элементы конструкций и конструкции в натуральную величину. Наиболее широко используются образцы специальной формы, подвергающиеся испытанию для оценки механических свойств материалов.

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

Инструкция по технике безопасности в лаборатории сопротивления материалов

1 Каждый студент, выполняющий лабораторные работы по сопротивлению материалов, обязан знать и выполнять все правила техники безопасности.

2 К работе допускаются только студенты, прошедшие инструктаж.

3 Находясь в лаборатории:

а) будьте внимательны во время проведения опыта, не отвлекайтесь сами и не отвлекайте других; б) не допускайте на свое рабочее место студентов, которые выполняют другие работы; в) не стойте вблизи движущихся открытых частей оборудования; г) не включайте без разрешения преподавателя рубильники и пусковые кнопки; не трогайте без необходимости рычаги и ручки управления машин и приборов.

4 Выполняйте только ту лабораторную работу, которую назначил преподаватель.

5 Перед проведением лабораторной работы на каждой последующей машине прослушайте соответствующие правила безопасности.

6 При выполнении работ на разрывных машинах и на машинах для испытания на кручение запрещается снимать ограждение.

7 При работе на маятниковом копре:

а) при поднятии груза на исходную высоту и его опускании стойте только с боковой стороны; б) проследите за тем, чтобы защелка надежно удерживала зубчатый диск маятника; в) закройте копер ограждением.

8 После окончания работы необходимо отключить оборудование и аппаратуру, привести в порядок рабочее место.

9 При возникновении пожара применяйте имеющиеся средства тушения: огнетушитель и песок в специальном ящике.

10 При несчастном случае:

немедленно выключите электрорубильник; окажите первую помощь пострадавшему; сообщите руководителю занятий; вызовите, при необходимости, скорую помощь по телефону 03.

11 Соблюдение данной инструкции обязательно для всех лиц, занимающихся в лаборатории сопротивления материалов. В случае невыполнения пунктов инструкции студент от проведения лабораторных работ отстраняется.

При осуществлении расчетов в процессе выполнения работ необходимо учитывать единицы измерения нагрузки, напряжения и длины.

Единицы измерения силы, напряжения и длины

- 1 ньютон (Н); 1 килоньютон (кН); 1 меганьютон (МН);
- 1 тонна-сила (тс); 1 килограмм-сила (кгс);
- 1 паскаль (Па); 1 мегапаскаль (МПа); 1 гигапаскаль (ГПа);
- $1 \text{ тс} = 10^3 \text{ кгс}$;
- $1 \text{ кгс} \approx 10 \text{ Н}$;
- $1 \text{ МН} = 10^3 \text{ кН} = 10^6 \text{ Н}$;
- $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$;
- $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па} \approx 10 \text{ кгс/см}^2 \approx 0,1 \text{ кгс/мм}^2 = 1 \text{ Н/мм}^2$;
- $1 \text{ ГПа} = 10^3 \text{ МПа} = 10^9 \text{ Па} = 1 \text{ кН/мм}^2$;
- 1 метр (м); 1 миллиметр (мм); 1 микрометр (мкм);
- $1 \text{ м} = 10^3 \text{ мм} = 10^6 \text{ мкм}$.

Лабораторная работа № 1

Испытание металлов на растяжение

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

Основные сведения

Для количественной оценки поведения различных материалов под нагрузкой используются механические характеристики, необходимые для расчета и проектирования машин и конструкций.

Наибольшую информацию о механических свойствах металлов можно получить из статических испытаний образцов на растяжение. Испытания для условий нормальной температуры ($10...35^{\circ}\text{C}$) проводятся в соответствии с ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытания на растяжение». Из исследуемого материала изготавливают специальные образцы. Согласно стандарту предусмотрено семь типов *цилиндрических* с диаметром d_0 от 3 до 25 мм и два типа *плоских* образцов. Образцы имеют рабочую часть и головки с плавным переходным участком. На рабочей части наносятся две метки на расстоянии начальной расчетной длины l_0 , для которой определяется удлинение. В зависимости от соотношения между длиной и диаметром применяются нормальные (десятикратные) цилиндрические образцы с $l_0 = 10d_0$ и укороченные (пятикратные) - с $l_0 = 5d_0$. В данной лабораторной работе используется один из типов нормальных образцов (рисунок 1) диаметром d_0 и расчетной длиной $l_0 = 10d_0$.

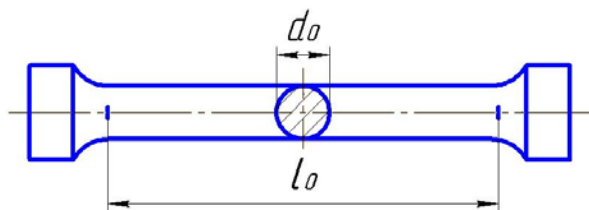


Рисунок 1 – Образец для испытания на растяжение

Испытания проводят на специальных 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. Большинство испытательных машин снабжено устройством для автоматической записи в определенном масштабе *диаграммы растяжения*, т.е. графика зависимости между растягивающей силой P и удлинением образца Δl .

В предлагаемой лабораторной работе для испытания используется разрывная машина модели *P-10* (рисунок 2) грузоподъемностью 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.

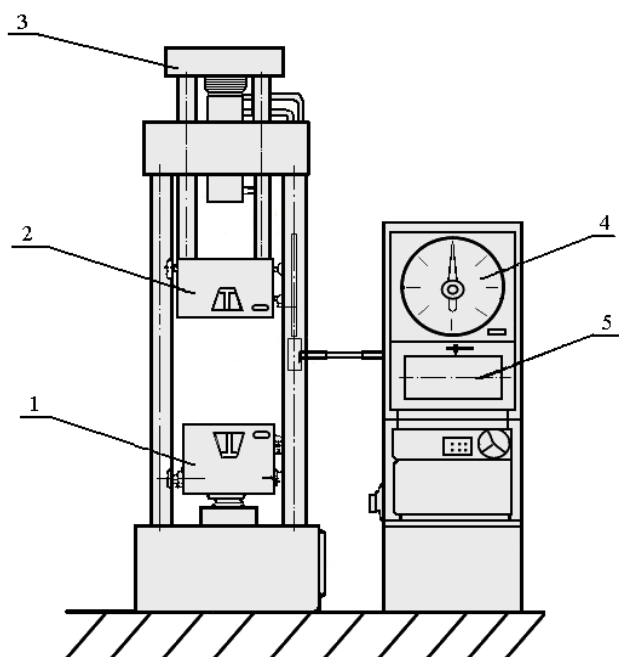


Рисунок 2 - Схема разрывной машины модели Р-10

Основными узлами машины модели Р-10 являются нагружающее устройство (слева) и пульт управления (справа). С помощью нагружающего устройства производится деформирование и разрушение образцов. Для закрепления и растяжения образца в устройстве имеются два захвата 1 и 2. При приложении нагрузки нижний захват 1 неподвижен, а захват 2 вместе с подвижной рамой 3 перемещается вверх, растягивая образец до разрыва. Пульт управления служит для осуществления нагружения и контроля величин усилий и деформаций. Для этого используется силоизмеритель 4 с рабочей и контрольной стрелками и диаграммный аппарат 5, которые позволяют получить диаграмму «нагрузка – удлинение». С целью повышения точности опытных данных в машине предусмотрено три диапазона нагрузок: до 2 тс; до 5 тс; до 10 тс.

На рисунке 3 представлена типичная диаграмма растяжения $\Delta l = f(P)$ образца из пластичной низкоуглеродистой стали, на которой можно выявить все наиболее важные особенности нагружения металлов. Эта диаграмма условно может быть разделена на четыре основных участка. Ее первый участок OA – прямая наклонная линия. Это значит, что при $P \leq P_{\text{пн}}$ соблюдается прямая пропорциональная зависимость между нагрузкой и деформацией, называемая *законом Гука*. Сила $P_{\text{пн}}$ в точке A является силой, соответствующей пределу пропорциональности. Участок OA называется *зоной упругости*, потому что здесь возникают только упругие деформации. *Упругими* называются деформации, которые исчезают после снятия нагрузки с образца. При этом образец *возвращается* к своим начальным размерам.

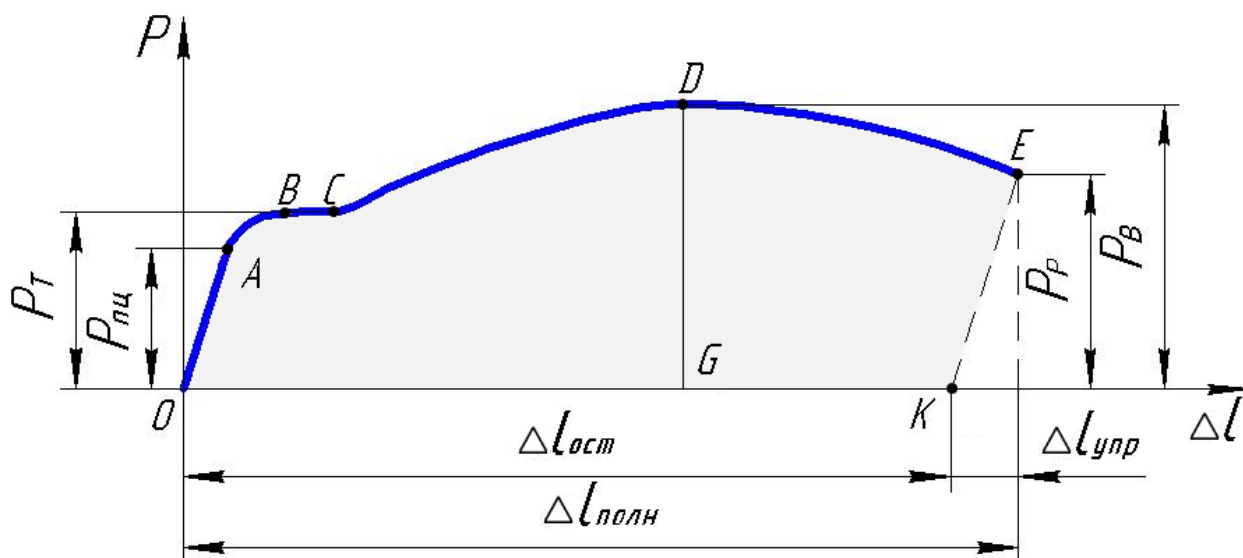


Рисунок 3 – Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

Выше точки *A* диаграмма становится криволинейной (участок *AB*). Затем в точке *B* кривая переходит в горизонтальный участок *BC*. Здесь образец удлиняется при практически неизменной нагрузке – материал «течет». Горизонтальный (или почти горизонтальный) участок *BC* называется зоной общей текучести, или «площадкой текучести». В этой зоне начинают интенсивно развиваться остаточные или пластические деформации. Остаточные деформации являются необратимыми. Они не исчезают (остаются) после снятия нагрузки, что приводит к изменению первоначальных размеров образца. Сила P_T в точках *B* или *C* является силой при физическом пределе текучести материала.

После площадки текучести материал снова приобретает способность сопротивляться деформации при возрастающей нагрузке («самоупрочняться») вплоть до максимального значения силы (точка *D*). Участок *CD* называется зоной упрочнения. Здесь удлинение образца происходит также равномерно по всему его объему, как и на предыдущих участках. Однако возрастание силы на стадии упрочнения более медленное, чем в зоне упругой деформации *OA*.

При достижении максимальной силы $P_{max} = P_B$ (точка *D*) способность материала к дальнейшему упрочнению исчерпывается. На образце в определенном месте начинает формироваться так называемая «шейка». Она быстро прогрессирует. Площадь поперечного сечения образца резко уменьшается, что приводит к падению нагрузки. Дальнейшее растяжение происходит только за счет местной пластической деформации металла в «шейке», после чего наступает разрыв (в точке *E*) под действием разрушающей силы P_P . Последний участок *DE* диаграммы – это зона местной текучести.

Наибольшее усилие, предшествующее разрушению образца, принимается за силу P_B , соответствующую временному сопротивлению (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 и возникновения пластических деформаций. Количественно это свойство определяется следующими напряжениями:

1 *Предел пропорциональности* $\sigma_{\text{пц}}$ – наибольшее напряжение, до которого выполняется закон Гука (напряжение прямо пропорционально деформации)

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

где $P_{\text{пц}}$ – сила, соответствующая пределу пропорциональности, т.е. сила, где заканчивается прямая линия (точка *A*, рисунок 3); F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

Кроме того, независимо от предела пропорциональности, существует *предел упругости* σ_y – напряжение, до которого в материале имеются только упругие деформации. Этот предел σ_y характеризует начало перехода от упругой стадии деформации *OA* к упругопластической *BE*. Однако у большинства конструкционных материалов численные значения пределов $\sigma_{\text{пц}}$ и σ_y незначительно отличаются друг от друга ($\sigma_{\text{пц}} \approx \sigma_y$). Поэтому обычно определяется только одно напряжение $\sigma_{\text{пц}}$.

В упругопластической стадии *BE* общая деформация состоит из упругой и остаточной. Так, например, полное удлинение в момент разрыва $\Delta l_{\text{полн}}$ равняется сумме упругого $\Delta l_{\text{упр}}$ и остаточного $\Delta l_{\text{ост}}$.

2 Важнейшей механической характеристикой пластичных металлов и сплавов является *предел текучести* (*физический и условный*). При наличии на диаграмме «площадки текучести» определяется *физический* предел текучести σ_T – напряжение, при котором происходит интенсивный рост остаточных деформаций при постоянном напряжении:

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

где P_T – сила, вызывающая текучесть материала (точка *B*, рисунок 3).

Для многих материалов (среднеуглеродистых и легированных сталей, меди, дюралюминия и т. п.), называемых *хрупкопластичными*, на диаграмме отсутствует явно выраженная «площадка текучести» (рисунок 4). В этом случае определяется *условный* предел текучести $\sigma_{0,2}$ – напряжение, при котором остаточная деформация образца $\Delta l_{\text{ост}}$ достигает 0,2%, т.е. $\Delta l_{0,2}$:

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

где $P_{0,2}$ – сила, соответствующая остаточному удлинению в 0,2% от расчетной длины образца l_0 , то есть $0,002l_0$.

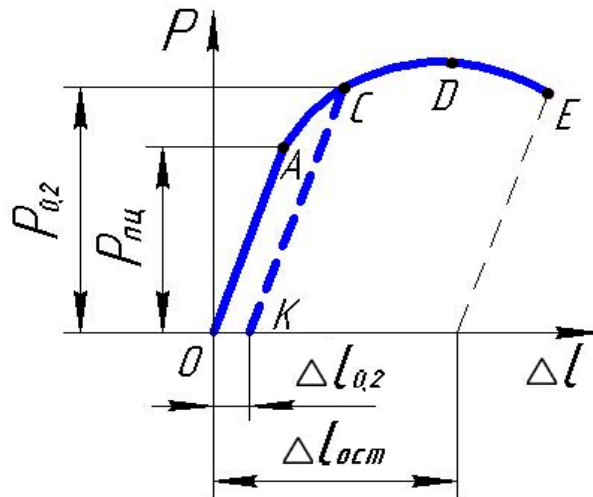


Рисунок 4 - Определение силы $P_{0,2}$, соответствующей условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$

Для нахождения численной величины силы $P_{0,2}$ на диаграмме растяжения по оси абсцисс с учетом увеличенного масштаба откладывают отрезок $\Delta l_{0,2} = 0,002l_0$ (отрезок OK) и из точки K проводят прямую KC , параллельную прямолинейному участку OA . Точка пересечения этой прямой с диаграммой (точка C) и определяет величину силы $P_{0,2}$.

3 *Временное сопротивление (предел прочности) σ_B* – наибольшее условное напряжение, которое способен выдержать материал без разрушения

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

где P_B – максимальная сила, предшествующая разрыву образца (точка D).

Напряжение σ_B является условным, т.к. его фактическая величина больше, чем величина, вычисляемая по формуле (4). Это объясняется тем, что в формуле используется начальная площадь сечения F_0 . На самом деле, эта площадь и, особенно в «шейке», имеет другое - меньшее значение.

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

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

где P_p – величина силы, соответствующей разрушению (точка E); F_k – конечная наименьшая площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (измеренная после извлечения образца из захватов машины).

Предел текучести σ_T и временное сопротивление σ_B являются предельными (опасными) напряжениями и могут быть найдены только опытным путем при испытаниях материалов. Эти механические характеристики используются в расчетах на прочность для нахождения допускаемых напряжений. Величина расчетных рабочих напряжений, возникающих в деталях машин из любых ма-

териалов, не должна превышать напряжения σ_B , так как это приведет к их разрушению. Более того, для пластичных материалов величина рабочих напряжений должна быть меньше предела текучести σ_T . Это объясняется необходимостью сохранения начальных размеров и формы элементов конструкций, что возможно только при отсутствии остаточных деформаций. Чем больше величина предельных напряжений, тем выше прочность материала.

Механические характеристики пластичности

Под *пластичностью* понимается способность твердых тел изменять свои размеры и форму при нагружении и сохранять их после снятия нагрузки. 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).

Хрупкость - свойство противоположное пластичности. *Хрупкими* называются материалы, разрушающиеся при незначительных остаточных деформациях (чугун, высокоуглеродистые инструментальные стали, керамика, стекло и т.п.).

К характеристикам пластичности материала относятся *относительные остаточные*: удлинение δ и сужение сечения ψ после разрыва образца. Чем больше величины δ и ψ , тем пластичнее материал.

Относительное остаточное удлинение δ , %:

$$\delta = \frac{\Delta l_{ост}}{l_0} \cdot 100\% = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $\Delta l_{ост} = l_K - l_0$ - абсолютная остаточная деформация (изменение начальной длины l_0 расчетной части); 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). Так, для малоуглеродистой стали Ст3, у укороченных образцов ($l_0/d_0 = 5$) удлинение $\delta_5 = 25\%$, у нормальных ($l_0/d_0 = 10$) - $\delta_{10} = 21\%$.

Относительное остаточное сужение поперечного сечения ψ , %:

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

Пластичными принято считать материалы, у которых указанные характеристики находятся в пределах: $\delta = 20 \dots 30\%$, $\psi = 50 \dots 70\%$. Для *хрупких* материалов δ не превышает обычно $2 \dots 5\%$, ψ - 30% . Материалы (бронза, дюралюминий, легированные стали и т.п.) с характеристиками $\delta = 5 \dots 20\%$ и $\psi = 30 \dots 50\%$ называются *хрупкопластичными*.

Применяется также другое условное деление материалов: только на хрупкие - у которых $\delta \leq 5\%$ и пластичные с деформацией $\delta > 5\%$.

Статическая вязкость материала

Статические (медленные, плавные) испытания на растяжение позволяют косвенно оценить *вязкость* материала, то есть его способность сопротивляться действию кратковременных ударных нагрузок. Эта способность может быть выражена через работу или энергию, затрачиваемую на разрушение образца. Чем больше данная работа и пластичнее материал, тем выше его вязкость. Значит, тем лучше материал воспринимает («гасит») удар. Работа A (Дж) на разрыв образца учитывает только остаточную деформацию $\Delta l_{ост}$ (м) и пропорциональна *площади* диаграммы растяжения $OABCDEK$ (рисунок 3):

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

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

Для характеристики вязкости материала используется удельная работа a , т.е., работа, приходящаяся на единицу объема рабочей части образца, МДж/м³:

$$a = \frac{A}{V_0} = \frac{A}{F_0 l_0}, \quad (9)$$

где $V_0 = F_0 l_0$ – начальный объем расчетной части образца, м³.

У *вязких, пластичных* сталей величина удельной работы a , как правило, больше 60 МДж/м³. У хрупких материалов, слабо сопротивляющихся ударным нагрузкам, эта работа незначительна.

Порядок выполнения работы

1 С помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм измерить начальный диаметр d_0 образца. Нанести на его рабочей части две граничные метки расчетной длины $l_0 = 10d_0$.

2 Вычислить площадь поперечного сечения $F_0 = \pi d_0^2 / 4$ и объем рабочей части образца $V_0 = F_0 \cdot l_0$.

3 Закрепить образец в захватах машины и настроить диаграммный аппарат.

4 Произвести плавное (статическое) растяжение образца до разрыва с записью диаграммы зависимости между нагрузкой P и удлинением Δl .

5 Зафиксировать по шкале силоизмерителя (можно использовать контрольную стрелку) значение *максимальной* силы P_B , Н.

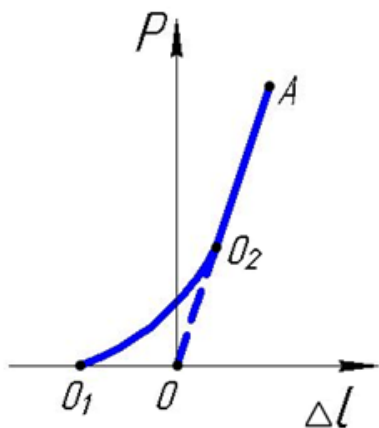


Рисунок 5 - Выбор начала координат диаграммы растяжения

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 (точки O), нужно продолжить прямую линию пропорциональной зависимости O_2A до пересечения с осью абсцисс Δl , проведенной через точку O_1 . Из начала координат восстанавливается ось ординат P . Таким образом, согласно рекомендации ГОСТ 1497-84, участок O_1O_2 диаграммы отбрасывается.

7 Отметить на диаграмме её характерные точки $A, B (C), D, E$ (см. рисунок 3) и измерить (в мм) их ординаты, т.е. расстояния от оси Δl до точек.

8 Измерить конечные размеры образца после разрушения: наименьший диаметр шейки d_K в месте разрыва и длину расчетной части l_K . Для определения конечной длины l_K нужно сложить вместе, как можно плотнее, две части разрушенного образца и найти расстояние между метками.

9 Провести на диаграмме прямую EK параллельно начальной прямой линии OA . Полученный на оси абсцисс отрезок OK отображает на графике величину остаточного удлинения образца после разрыва $\Delta l_{ост}$. Фактическая величина этой остаточной деформации равна разности конечной и начальной длин образца $\Delta l_{ост} = l_K - l_0$ (упругая часть $\Delta l_{упр}$ после разрыва исчезает).

10 Замерить (в мм) на диаграмме отрезки OK и $\Delta l_{упр}$.

11 Найти для полученной диаграммы масштабы силы m_P и деформации $m_{\Delta l}$ по осям ординат и абсцисс.

Масштаб силы m_P — это величина силы, приходящаяся на один мм диаграммы (Н/мм). Масштаб устанавливается путем деления найденной из опыта максимальной силы P_B , на измеренную по диаграмме ординату DG (рисунок 3):

$$m_P = \frac{P_B}{DG}. \quad (10)$$

Масштаб деформации $m_{\Delta l}$, то есть остаточная деформация $\Delta l_{ост}$ образца, соответствующая одному делению диаграммы, мм/мм:

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

12 С помощью масштаба сил и величин ординат (пункт 7) найти численные значения нагрузок $P_{нц}, P_T, P_p$ (Н).

13 Используя масштаб деформации $m_{\Delta l}$, и длину отрезка $l_{упр}$ на диаграмме (пункт 10), определить величину исчезнувшей упругой деформации.

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

15 По полученным из опыта механическим характеристикам, определить примерную марку стали испытываемого образца (таблица 1).

Таблица 1 - Механические характеристики некоторых низкоуглеродистых и низколегированных сталей (по данным /3/)

Низкоуглеродистые				Низколегированные			
Марка стали	Предел текучести (физический) σ_T в МПа, не менее	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_{10} , %	Марка стали	Предел текучести (условный) σ_T , МПа	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_{10} , %
					не менее		
Ст0	190	320-470	18	16ГС	265	430	21
Ст2	220	340-420	26	09Г2	295	430	
Ст3	240	380-470	21-23	12ГС	315	450	
Ст4	260	420-520	19-21	09Г2С	325	450	
Ст5	280	500-620	15-17	17ГС	345	490	

Отчет по работе

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

Таблица 2 – Начальные и конечные размеры образца

До испытания	После разрыва
Диаметр $d_0 =$ (мм)	Диаметр «шейки» $d_k =$ (мм)
Расчетная длина $l_0 =$ (мм)	Конечная длина расчетной части
Площадь поперечного сечения	$l_k =$ (мм)
$F_0 = \pi d_0^2 / 4 =$ (мм ²)	Площадь 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 Перечерченная диаграмма растяжения с численными значениями усилий $P_{пц}$, P_T , P_B , P_p и деформаций $\Delta l_{ост}$ и $\Delta l_{упр}$ для испытываемого образца.

На диаграмме указать масштабы сил m_p и деформаций $m_{\Delta l}$.

6 Величины нагрузок, Н (таблица 3).

Таблица 3 – Численные значения усилий растяжения, Н

Сила, соответствующая пределу пропорциональности $P_{пц}$	Усилие, вызывающее текучесть материала P_T	Максимальная сила, соответствующая пределу прочности P_B	Усилие в момент разрыва P_P

7 Механические характеристики материала (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты опыта

Механические характеристики прочности, МПа	Характеристики пластичности, %	Характеристики статической вязкости
Предел пропорциональности $\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0} =$ Предел текучести $\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} =$ Временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_B = \frac{P_B}{F_0} =$ Истинное напряжение при разрыве $\sigma_P = \frac{P_P}{F_K} =$	Относительное остаточное удлинение $\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100\% =$ Относительное остаточное сужение поперечного сечения $\psi = \frac{F_0 - F_K}{F_0} \cdot 100\% =$	Работа, затраченная на разрушение образца, Дж (Н·м) $A = \eta \cdot P_B \cdot \Delta l_{ост} =$ Удельная работа разрушения, МДж/м ³ $a = \frac{A}{V_0} = \frac{A}{F_0 l_0} =$

8 Примерная марка стали испытываемого образца (по данным таблицы 1).

Контрольные вопросы

- 1 Какие характерные точки и участки имеет диаграмма растяжения пластичной стали?
- 2 Какие деформации называются упругими и остаточными?

- 3 Какие материалы при нормальных условиях принято считать пластичными? Хрупкими?
- 4 Что называется пределом пропорциональности?
- 5 Что называется физическим пределом текучести?
- 6 Что называется временным сопротивлением (пределом прочности) материала?
- 7 Какие механические характеристики материала определяют его способность пластически деформироваться?
- 8 Как найти работу, затраченную на разрыв образца по диаграмме растяжения?
- 9 Что характеризует статическая вязкость материала?

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

Для большинства конструкционных материалов при растяжении, сжатии между нормальным напряжением σ в стержне и его деформацией ε существует прямая пропорциональная зависимость, которая называется *законом Гука*:

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

где E – *модуль продольной упругости* материала (модуль Юнга); ε – относительная (отнесенная к начальной длине) продольная деформация:

$$\varepsilon = \Delta l / l, \quad (13)$$

где Δl – абсолютная продольная деформация, то есть изменение первоначальной длины l стержня. Закон Гука выполняется только при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ ($\sigma \leq \sigma_{\text{пц}}$).

Модуль продольной упругости E зависит от материала и характеризует его *жесткость*, т.е. сопротивляемость упругим деформациям при растяжении, сжатии. Чем больше модуль E , тем материал более жесткий, то есть тем меньше он деформируется при одних и тех же напряжениях. Например, средняя величина модуля продольной упругости очень жесткого материала – алмаза – равна 1100 ГПа; титана – 100 ГПа, т.е. в 11 раз меньше. У свинца – металла с наи-

меньшей жесткостью – $E = 18$ ГПа; у резины – всего 0,007 ГПа. Для стали $E \approx 200$ ГПа.

Учитывая, что напряжение $\sigma = P/F$, а деформация $\varepsilon = \Delta l / l$, закон Гука (12) может быть выражен в частном виде через абсолютное удлинение Δl образца:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}, \quad (14)$$

где P – растягивающая сила; l – начальная длина; F – площадь поперечного сечения.

Исходя из (14), после нахождения абсолютного удлинения Δl образца с размерами l и F от прикладываемой силы P , появляется возможность определить *опытным путем* численную величину модуля упругости E :

$$E = \frac{Pl}{\Delta l F}. \quad (15)$$

Под действием осевой нагрузки образец изменяет не только свою длину, но и поперечные размеры, например ширину b . Так, растяжение образца на величину Δl вызывает уменьшение его поперечных размеров Δb . При сжатии поперечные размеры увеличиваются. Соотношение между поперечными и продольными деформациями определяется коэффициентом поперечной деформации (коэффициентом Пуассона). *Коэффициентом поперечной деформации*, или *коэффициентом Пуассона* μ , называется абсолютная величина отношения относительной поперечной деформации $\varepsilon^* = \Delta b / b$ к относительной продольной деформации $\varepsilon = \Delta l / l$:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon} \right|. \quad (16)$$

Для известных в практике изотропных материалов коэффициент Пуассона μ находится в пределах от 0 до 0,5. Например, в среднем для чугуна $\mu = 0,22$; для свинца и олова – 0,44; резины – 0,47; для стали $\mu \approx 0,3$.

В данной лабораторной работе упругие постоянные E и μ определяются для стали при растяжении образца *прямоугольного* поперечного сечения на разрывной машине *модели Р-5* (рисунок 6).



Рисунок 6 – Общий вид разрывной машины Р-5

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

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

Растяжение, сжатие образца производится либо от электродвигателя через редуктор, либо вручную от рукоятки через цепную передачу (вращение рукоятки против хода часовой стрелки вызывает растяжение, по часовой – сжатие). При растяжении нижний захват опускается, растягивая образец. Усилие от образца передается через рычаг и тягу к маятнику, который отклоняется пропорционально нагрузке. Коротким плечом маятник перемещает рейку с винтовой нарезкой, вращающей стрелку силоизмерителя. Для построения диаграммы растяжения на рейке может быть закреплен ползун с самописцем, перемещение которого вдоль диаграммного барабана пропорционально нагрузке.

У маятника предусмотрен сменный груз и переменное плечо. Это позволяет применять четыре диапазона нагрузок: до 5 кН (500 кгс), 10 кН (1000 кгс), 25 кН (2500 кгс), 50 кН (5000 кгс). В данной работе использован наибольший диапазон от 0 до 5000 кгс. Шкала силоизмерителя проградуирована в кгс.

Для измерения малых деформаций образца: продольной Δl и поперечной Δb использовались *рычажные тензометры* типа ТР (тензометры Гугенберге-ра) (рисунок 7 а). Принцип их действия – механический с визуальным отсчетом по шкале. Размещение тензометров на образце и его размеры до растяжения (сплошная линия) и после (штриховая) показаны на рисунке 7 б. Тензометр А

предназначен для измерения продольной деформации, а тензометр *B* – поперечной.

Тензометр крепится к испытываемому образцу при помощи струбцины (не показанной на рисунке). Расстояние между нижним ребром подвижной ромбической призмы 1 и неподвижной опорой 2 называется начальной длиной, или *базой тензометра* l_T . При присоединении специального удлинителя база может быть увеличена до любых размеров в пределах 50 – 1000 мм. Корпус прибора 6 вместе с призмой 1 воспринимает деформацию. Частью тензометра, увеличивающей деформацию, является рычаг 3, жестко прикрепленный к призме 1, и стрелка 5, соединенная с рычагом 3 тягой 4. Стрелка 5 верхним концом вращается вокруг шарнира 8. По шкале 7 производятся отсчеты.

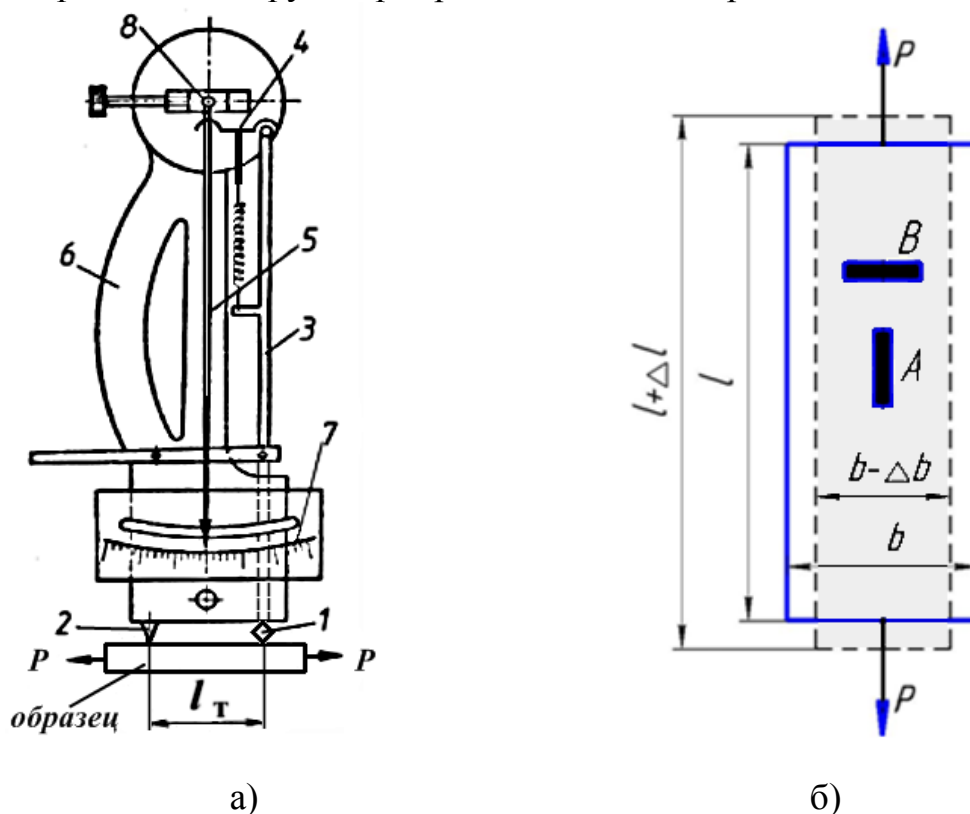


Рисунок 7 - Схема рычажного тензометра а),
расположение тензометров на образце б)

При растяжении, сжатии образца и изменении базы l_T продольного тензометра *A* на величину Δl , произойдет поворот призмы 1 и вместе с ней рычага 3 на некоторый угол. Рычаг 3 при помощи тяги 4 повернет стрелку 5. При этом нижний конец стрелки 5 переместится по шкале 7 на величину ΔA , пропорциональную удлинению Δl . Зная коэффициент увеличения (соотношение плеч рычагов 3 и 5) и цену деления шкалы *K*, по разности отсчетов находится изменение длины $\Delta l = \Delta A \cdot K$ образца. Аналогично работает и поперечный тензометр *B*, с помощью которого находится изменение ширины Δb . Для применяемых в работе тензометров цена деления шкалы равна одной тысячной доле миллиметра $K = 10^{-3}$ мм, т.е. одному микрометру (1 мкм). Предел измерения 50 мкм, точ-

ность $\pm 0,5$ мкм. Для снижения ошибок при производстве отсчета необходимо, чтобы стрелка и ее изображение в зеркале совпадали.

Так как с помощью тензометров определяются изменения длины и ширины сечения по отношению к базе тензометров l_T , то средние относительные деформации ε и ε^* будут соответственно равны:

$$\text{продольная } \varepsilon = \frac{\Delta l_{cp}}{l_T}, \quad \text{поперечная } \varepsilon^* = \frac{\Delta b_{cp}}{l_T}, \quad (17)$$

где Δl_{cp} – среднее приращение абсолютного удлинения, вызванного ступенью нагружения ΔP ; Δb_{cp} – среднее приращение абсолютной поперечной деформации; l_T – база тензометров.

Порядок выполнения работы

1 Измерить поперечные размеры, т.е. ширину и толщину испытываемого образца прямоугольного сечения.

2 Вычислить площадь поперечного сечения F .

3 Определить величину силы $P_{пц}$ (кгс), соответствующей пределу пропорциональности $\sigma_{пц}$, до которой выполняется закон Гука:

$$P_{пц} \leq \sigma_{пц} \cdot F. \quad (18)$$

Принять для стали $\sigma_{пц} = 0,2$ кН/мм² (200 МПа). Учесть, что 1кН \approx 100 кгс.

4 Приложить предварительную силу P_0 (например, 500 кгс = 5 кН) для обжатия головок образца в захватах, устранения люфтов, зазоров в машине.

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

6 Произвести 3...4 нагружения образца равными ступенями ΔP (кН) и после каждой ступени записать показания обоих тензометров. Число ступеней приращения силы берется с учетом выполнения условия (18).

Установка стрелок тензометров на нуль не нужна, т.к. в расчетах используются приращения показаний ΔA и ΔB .

7 После приложения последней силы, разгрузить образец до начальной нагрузки P_0 и проверить показания тензометров по данным первой записи.

8 Определить средние приращения ΔA_{cp} и ΔB_{cp} показаний тензометров:

$$\Delta A_{cp} = \frac{\sum \Delta A}{n}; \quad \Delta B_{cp} = \frac{\sum \Delta B}{n}; \quad (19)$$

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

$$\Delta l_{cp} = \Delta A_{cp} \cdot K, \quad (20)$$

$$\Delta b_{cp} = \Delta B_{cp} \cdot K, \quad (21)$$

где K - цена деления шкалы тензометров.

10 Вычислить (формулы 17) относительную поперечную ε^* и относительную продольную ε деформации.

11 Определить величину модуля упругости E , ГПа (1 ГПа = 1 кН/мм²)

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_T}{\Delta l_{cp} \cdot F} \quad (22)$$

12 Вычислить численное значение коэффициента Пуассона μ (выражение (15)).

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

$$E = (190 \div 220) \text{ ГПа}; \quad \mu = 0,25 \div 0,33.$$

Попадают ли полученные данные E и μ в этот интервал величин?

14 Построить график зависимости продольной деформации Δl (в делениях продольного тензометра A) от нагрузки $A = f(P)$, подтверждающий закон Гука. Принять первое показание за условный нуль.

Отчет по работе

1 Наименование и цель работы.

2 Модель испытательной машины.

3 Размеры поперечного сечения образца, мм: ширина =
толщина =

4 Площадь поперечного сечения, мм² $F =$

5 База тензометров, мм $l_T =$

6 Цена деления шкалы тензометров, мкм $K =$

7 Величина наибольшей силы $P_{\text{пц}}$ (кгс), до которой выполняется закон

Гука: $P_{\text{пц}} \leq \sigma_{\text{пц}} \cdot F =$

Принять предел пропорциональности для стали $\sigma_{\text{пц}} = 0,2 \text{ кН/мм}^2$, то есть 200 МПа. Учесть, что 1кН \approx 100 кгс.

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

Таблица 6 – Показания тензометров

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

Таблица 7 – Результаты опыта

Среднее приращение удлинения, мм	$\Delta l_{cp} = \Delta A_{cp} \cdot \kappa =$
Среднее приращение поперечной деформации, мм	$\Delta b_{cp} = \Delta B_{cp} \cdot \kappa =$
Относительная <i>продольная</i> деформация	$\varepsilon = \frac{\Delta l_{cp}}{l_T},$
Относительная <i>поперечная</i> деформация	$\varepsilon^* = \frac{\Delta b_{cp}}{l_T},$
Коэффициент поперечной деформации μ	$\mu = \left \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon} \right .$
Модуль продольной упругости E , ГПа	$E = \frac{\Delta P \cdot l_T}{\Delta l_{cp} \cdot F} =$

9 График зависимости продольной деформации от нагрузки $A = f(P)$.

Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте закон Гука при растяжении, сжатии.
- 2 Какие свойства материала характеризует модуль продольной упругости?
- 3 Что нужно измерить опытным путем для определения величины модуля продольной упругости?
- 4 Как вычисляется величина наибольшей силы, до которой может быть нагружен образец при нахождении упругих постоянных материала - модуля E и коэффициента μ ?
- 5 Какие приборы используются для измерения продольной и поперечной деформации в данной лабораторной работе?
- 6 Что называется коэффициентом поперечной деформации? Запишите формулу для его определения.
- 7 Какие деформации, возникающие при осевом растяжении, больше: продольные или поперечные?
- 8 При проведении лабораторной работы были найдены следующие значения коэффициента Пуассона для стали: 0,15; 0,5; 0,28. Укажите, в каких случаях опыт был произведен неточно?
- 9 Что называется базой рычажного тензометра ТР?

Лабораторная работа № 3

Испытание материалов на сжатие

Цель работы: определение механических характеристик пластичных, хрупких и анизотропных материалов при сжатии; изучение характера их разрушения.

Основные положения

Для испытания на сжатие металлов и их сплавов применяются образцы *цилиндрической формы*; для дерева, бетона и других аналогичных материалов в виде *кубиков*.

Результаты испытаний на сжатие существенно зависят от условий проведения опыта. При сжатии очень важно обеспечить приложение силы точно по оси образца, т.к. несоосность приводит к его изгибу или перекашиванию. Большое значение имеют соотношение продольных и поперечных размеров образца и возникающие силы трения между его торцами и сжимающими плитами. Для длинных и тонких образцов возрастает вероятность потери их устойчивости и искривление. Применение же слишком коротких образцов нежелательно из-за возрастания влияния сил трения на контактных поверхностях (чем короче образец, тем сильнее влияние сил трения). В связи с этим для цилиндрических образцов рекомендуется соотношение высоты к диаметру h_0 / d_0 в пределах 1...3. Силы трения искажают напряженное состояние образца и увеличивают сопротивление его разрушению. Повысить качество испытаний за счет снижения трения можно смазыванием торцов образца воском, парафином, графитовой или другими смазками; с помощью полимерных прокладок. Применяются также образцы с конусообразной торцевой поверхностью и с кольцевой расточкой на торцах, заполненной густой смазкой.

Испытания на сжатие проводятся на универсальных машинах или специальных прессах необходимой грузоподъемности. В данной лабораторной работе используется универсальная машина грузоподъемностью 100 кН (10 тс) модели *P-10* с записью зависимости укорочения образца от нагрузки $\Delta h = f(P)$. На этой же машине образец испытывался на растяжение (работа №1).

Пластичные материалы (низкоуглеродистая сталь). Пластичные материалы *одинаково* сопротивляются растяжению и сжатию. Это значит, что для них численные значения модуля продольной упругости E , пределов пропорциональности $\sigma_{пл}$ и текучести σ_T , полученные при растяжении, *равны* соответствующим величинам, найденным из опытов на сжатие. Пластичные материалы испытываются в основном на *растяжение*, а испытания на сжатие являются дополнением к нему.

Испытание низкоуглеродистой стали на статическое сжатие при нормальной температуре производится по ГОСТ 25.503-97. На рисунке 8 а показан вид образца до и после испытания, а на рисунке 8 б приведена диаграмма сжатия пластичной стали.

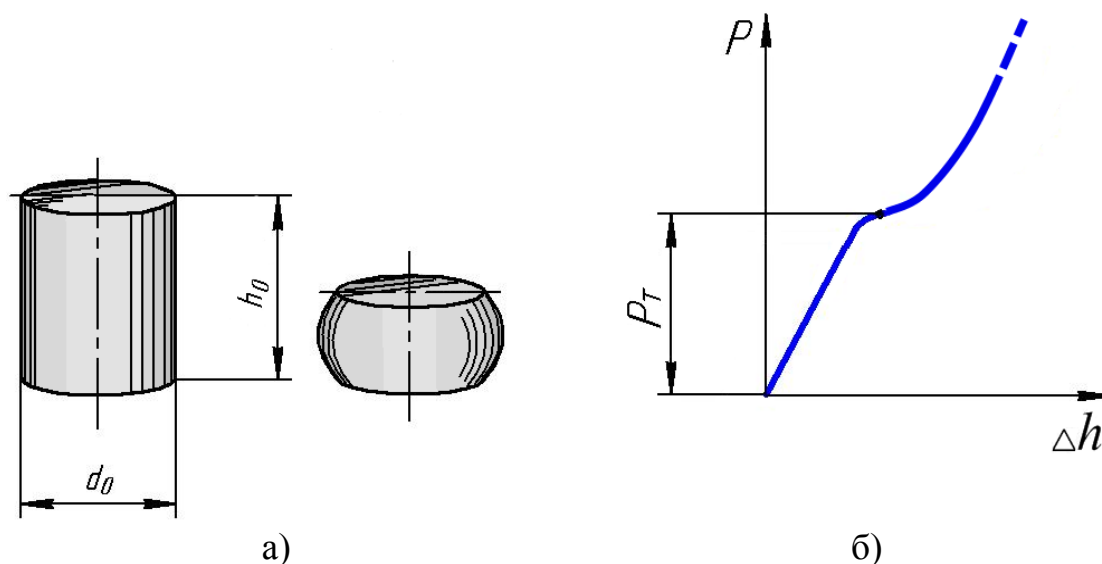


Рисунок 8 - Образец и диаграмма сжатия пластичной стали:
 а) общий вид образца до и после испытания; б) диаграмма сжатия

На диаграмме сначала наблюдается прямая линия, выражающая закон Гука. Затем при силе P_T (рисунок 8 б) отмечается *небольшой* участок текучести и дальнейшее возрастание остаточной деформации Δh по определенной зависимости от нагрузки. Уменьшаясь по высоте, образец увеличивается (и особенно в центральной зоне) в поперечных размерах. Вследствие торцевых сил трения, направленных по радиусам от периферии к центру и ограничивающих поперечную деформацию, образец принимает бочкообразную форму.

Прочностная характеристика пластичного материала с площадкой текучести – это физический предел текучести σ_T (близкий по величине к пределу пропорциональности $\sigma_{пц}$).

Для менее пластичных, а значит, более хрупких материалов площадка текучести на диаграмме сжатия отсутствует. У таких хрупкопластичных материалов определяют *условный* предел текучести $\sigma_{0,2}$ - напряжение, при котором относительное остаточное сжатие Δh образца достигает 0,2% от начальной высоты h_0 (лабораторная работа №1, рисунок 4). Хрупкопластичные материалы лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению. Для них условный (или физический) предел текучести при сжатии $\sigma_{0,2C}$ (или σ_{TC}) *больше*, чем при растяжении $\sigma_{0,2P}$ (σ_{TP}). К хрупкопластичным материалам с $\sigma_{0,2C} > \sigma_{0,2P}$ относятся некоторые легированные стали, подвергнутые закалке. Например, для легированной закаленной стали 30ХГС условный предел $\sigma_{0,2C} = 0,88 \sigma_{0,2P}$.

Образец при больших нагрузках (на специальном оборудовании) может быть сплюснен в тонкий диск без разрушения. Поэтому фактический предел прочности σ_{BC} , как напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей *разрушению*, для пластичных материалов при сжатии установить *не удается*. В связи с этим определяют *условный* предел прочности $\sigma_{BCул}$, соответствующий заданной величине остаточной деформации. В данной лабораторной работе, учитывая грузоподъемность машины Р-10 (до 10 тс) и размеры об-

разца, испытание следует прекратить при укорочении образца *на одну треть* от первоначальной высоты $\Delta h = h_0 / 3$, зафиксировав при этом *условную* силу $P_{ВСул}$.

Хрупкие материалы (чугун). Хрупкие материалы значительно лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению. Например, у серого чугуна предел прочности на сжатие $\sigma_{ВС}$ (560...1000 МПа) в четыре, пять раз больше, чем на растяжение $\sigma_{ВР}$ (120...200 МПа). Поэтому такие материалы обычно используются для изготовления деталей, сжимающихся в процессе работы.

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

Образцы из чугуна и других хрупких материалов *разрушаются* при незначительных продольных и поперечных деформациях, принимая слегка бочкообразную форму (рисунок 9 а). Разрушение и, как следствие, падение нагрузки происходит при достижении наибольшей величины сжимающей силы $P_{ВС}$, соответствующей пределу прочности. Образец разрушается *внезапно* с образованием трещины под углом 45° к осевой линии от максимальных касательных напряжений, действующих в этом направлении. На рисунке 9 б показана диаграмма сжатия чугуна в виде линии малой кривизны без признаков текучести (в практических расчетах считают, что чугун подчиняется закону Гука).

По максимальной силе $P_{ВС}$ определяется основная механическая характеристика прочности хрупких материалов - *предел прочности (временное сопротивление) $\sigma_{ВС}$* .

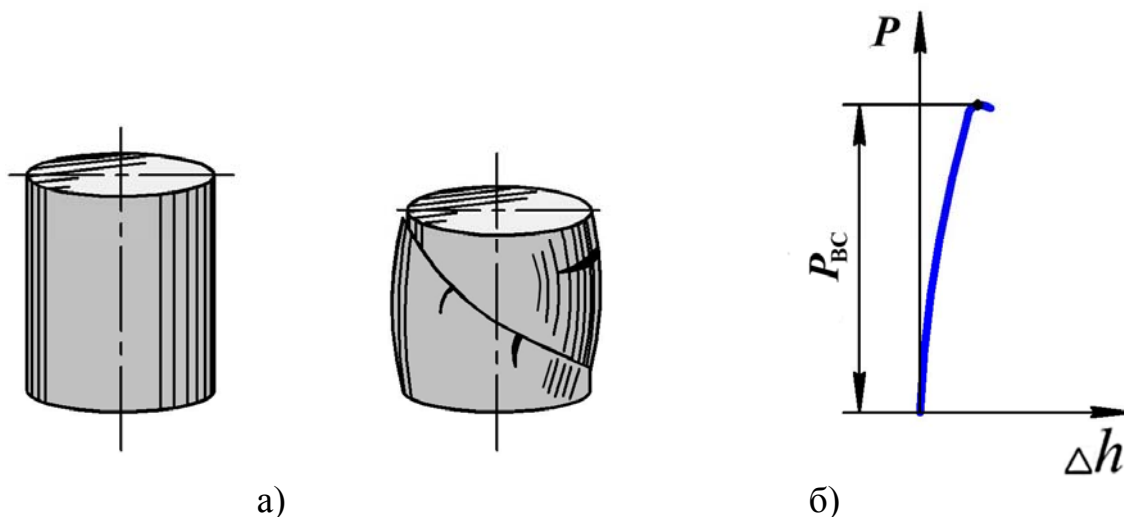


Рисунок 9 - Образец и диаграмма сжатия чугуна:

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

Анизотропные материалы (дерево). Дерево является анизотропным материалом. Его механические свойства зависят от *направления* прикладываемой нагрузки по отношению к волокнам образца. Поэтому при испытаниях деревянные образцы сжимаются *вдоль* (ГОСТ 16483.23 – 73) и *поперек* волокон (ГОСТ 16483.11 - 72). Результаты испытаний и по прочности и по характеру

разрушения при этом существенно различаются (рисунок 10 а). При сжатии вдоль волокон дерево стандартной (15%) влажности выдерживает в 7 – 10 раз большие нагрузки, чем при сжатии поперек волокон. При испытании *вдоль* волокон деревянный кубик разрушается практически без деформаций. При достижении максимальной силы сжатия P_{BC} происходит разрушение - сдвиг слоев в плоскости, наклоненной под углом $45^\circ - 60^\circ$ (рисунок 10 а - 1) к продольной оси образца и резкое падение нагрузки. Иногда наблюдается смятие торцов и продольные трещины. Таким образом, характер разрушения и диаграмма сжатия (рисунок 10 б; кривая 1) дерева *вдоль* волокон соответствуют сжатию *хрупких* материалов (сравните с диаграммой сжатия чугуна).

Если нагрузку прикладывать *поперек* волокон, то дерево ведет себя подобно *пластичному* материалу. В этом направлении кубик сжимается легко и быстро. Сила сначала возрастает пропорционально деформации, а затем почти не меняется (рисунок 10 б; кривая 2). При отсутствии пороков (сучков, трещин) в древесине образец интенсивно уплотняется (спрессовывается) без видимых признаков разрушения за счет течения друг по другу кольцевых слоев дерева. Момент начала разрушения полностью спрессованного образца установить очень сложно. Поэтому условно за разрушающую нагрузку принимают такое значение силы P_{BC} , при которой кубик сжимается на одну треть своей начальной высоты $\Delta h = h_0/3$.

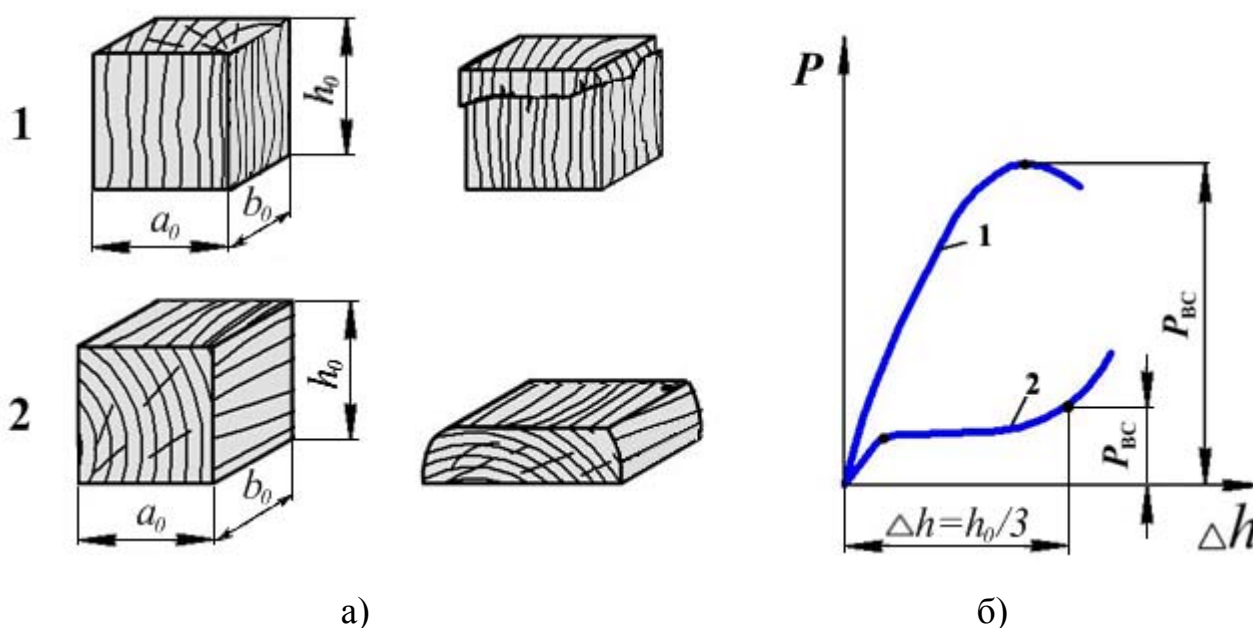


Рисунок 10 - Образцы а) и диаграмма сжатия дерева б)
(1 – дерево вдоль волокон; 2 – дерево поперек волокон)

Порядок выполнения работы

Получить от преподавателя образцы: стальной, чугунный, два деревянных. На деревянных - отметить грани, которыми они будут ориентироваться на плите испытательной машины: вдоль волокон, поперек волокон.

Измерить начальные размеры образцов. Измерение производится в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до 0,1 мм. За окончательный результат принимается среднее арифметическое двух измерений. Вычислить площади поперечных сечений F_0 с округлением до 0,1 мм².

Сжатие образца из пластичной стали

1 Закрепить миллиметровую бумагу на барабан диаграммного аппарата. Установить наибольшую шкалу нагрузки силоизмерителя от 0 – 10 тс.

2 Поставить испытываемый образец на нижнюю опорную плиту.

3 Включить машину и плавно сжимать образец.

4 При испытании наблюдать за стрелкой силоизмерителя. Кратковременная остановка стрелки или замедление её движения указывает на достижение силы P_T , соответствующей физическому пределу текучести.

Если на диаграмме отсутствует площадка текучести и не зафиксирована остановка стрелки силоизмерителя, то определяют силу $P_{0,2}$, соответствующую условному пределу текучести (формула 3, рисунок 4).

5 При сжатии образца на одну треть от начальной высоты h_0 ($\Delta h = h_0/3$) отметить *условную* нагрузку, соответствующую пределу прочности $P_{BC\text{ усл}}$.

6 Зарисовать диаграмму, внешний вид образца до и после испытания.

7 По найденным усилиям вычислить соответственно:

физический предел текучести σ_T (или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$)

$$\sigma_T = P_T / F_0 \text{ или } (\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0) \quad (23)$$

и *условный* предел прочности на сжатие $\sigma_{BC\text{ усл}}$

$$\sigma_{BC\text{ усл}} = P_{BC\text{ усл}} / F_0, \quad (24)$$

где F_0 - площадь поперечного сечения образца до испытания.

Сжатие чугунного образца

При сжатии образца из хрупких материалов:

- испытания проводятся до *разрушения* образца;
- максимальная сила, соответствующая пределу прочности при сжатии P_{BC} , фиксируется во время опыта по шкале силоизмерителя;
- из механических характеристик вычисляется только предел прочности материала σ_{BC} :

$$\sigma_{BC} = P_{BC} / F_0. \quad (25)$$

Сжатие деревянных образцов вдоль и поперек волокон

1 Образцы установить на опорную плиту машины. Один образец расположить так, чтобы действие сжимающей силы было направлено вдоль волокон. Второй - испытывать поперек волокон.

2 При сжатии вдоль волокон образец подвергнуть сжатию *до разрушения* (в момент разрушения наблюдается падение нагрузки). Зафиксировать максимальную силу P_{BC} , соответствующую пределу прочности.

3 При сжатии дерева поперек волокон условно за разрушающую нагрузку принимается сила P_{BC} , при которой высота образца h_0 уменьшается на одну треть ($\Delta h = h_0/3$). Величина Δh фиксируется с помощью линейки, закрепленной на колонне машины. При испытании использовать шкалу 0 – 2 тс.

4 Определить соответствующие пределы прочности дерева σ_{BC} при сжатии вдоль и поперек волокон по формуле (25).

Отчет по работе

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 ²				
Нагрузка P_T , соответствующая физическому пределу текучести (или условному $P_{0,2}$), Н		–	–	–
Нагрузка P_{BC} , соответствующая пределу прочности (или условному $P_{BC\text{ усл}}$), Н				
Физический предел текучести σ_T (или условный - $\sigma_{0,2}$), МПа		–	–	–
Предел прочности σ_{BC} (или условный $\sigma_{BC\text{ усл}}$), МПа				

4 Эскизы образцов до и после испытания, характер их деформации и разрушения.

5 Диаграммы сжатия для стали, чугуна, дерева вдоль и поперек волокон.

В отчете должны быть приведены формулы и вычисления результатов испытаний для таблицы 8.

Контрольные вопросы

- 1 Какие механические характеристики прочности определяются при испытании на сжатие?
- 2 Какие существуют рекомендации по соотношению продольных и поперечных размеров цилиндрических образцов при испытании на сжатие?
- 3 Чем объясняется бочкообразная форма сжатого образца?
- 4 Какой вид имеет диаграмма сжатия образца из низкоуглеродистой стали?
- 5 Каков характер разрушения и вид диаграммы сжатия 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 в опыте определяется разрушающая нагрузка при сжатии древесины поперек волокон?

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».

При кручении в поперечных сечениях образца возникает один внутренний силовой фактор - крутящий момент M_x (или M_k) и, как следствие, касательные напряжения τ . Эти напряжения τ распределяются по сечению вдоль радиуса по линейному закону

$$\tau = \frac{M_x \cdot \rho}{J_p}, \quad (26)$$

где ρ - расстояние от центра тяжести сечения до точки, в которой определяется напряжение; J_p - полярный момент инерции сечения. Для круглого сечения диаметром d момент инерции J_p вычисляется по формуле:

$$J_p = \pi d^4 / 32. \quad (27)$$

В центре круглого сечения (при $\rho = 0$) напряжения τ равны нулю. Максимального значения τ_{max} напряжения достигают в точках, наиболее удаленных от центра, т.е. в точках контура при $\rho_{max} = d/2$:

$$\tau_{max} = \frac{M_x \rho_{max}}{J_p} = \frac{M_x}{W_p}, \quad (28)$$

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

Для сечения круглой формы полярный момент сопротивления равен

$$W_p = \pi d^3 / 16. \quad (29)$$

В основе работы материала при кручении лежит угловая деформация *чистого сдвига*. Сдвиг возникает под действием касательных напряжений τ и характеризуется относительным углом сдвига γ . В пределах *упругости*, т.е. до предела пропорциональности $\tau_{\text{пл}}$, существует линейная зависимость между напряжением и деформацией (*закон Гука при сдвиге*):

$$\tau = G \gamma, \quad \text{или} \quad \gamma = \tau / G. \quad (30)$$

Деформация сдвига γ при кручении прямо пропорциональна углу поворота поперечных сечений образца. Угол поворота одного поперечного сечения относительно другого называется *углом закручивания* φ . С учетом зависимости (26) закон Гука (30) может быть представлен *в частном виде* через крутящий момент M_x и угол закручивания φ , в радианах:

$$\varphi = \frac{M_x l}{G J_p}, \quad (31)$$

где l - расстояние между сечениями, взаимный угол поворота которых определяется. Упругая постоянная материала G в формулах (30) и (31) называется *модулем сдвига*, или модулем упругости второго рода. Модуль сдвига характеризует *жесткость* материала, т.е. его способность сопротивляться упругим деформациям при сдвиге (и кручении). Чем больше G , тем меньше деформируется материал, тем он более жесткий. Например, средняя величина модуля сдвига различных по жесткости материалов равна: для алмаза 480 ГПа, для стали 80 ГПа, для титановых сплавов 42 ГПа, для резины 0,0006 ГПа.

С помощью закона Гука (31) можно найти модуль сдвига G^0 *опытным* путем. Для этого достаточно задать величину крутящего момента M_x и измерить соответствующий ему угол закручивания φ :

$$G^0 = \frac{M_x l}{\varphi J_p}. \quad (32)$$

Для определения модуля сдвига G из *теории* используется зависимость между тремя упругими постоянными изотропных материалов:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad (33)$$

где E, μ - постоянные упругости материала при растяжении-сжатии: модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона, соответственно (см. лабораторную работу №2).

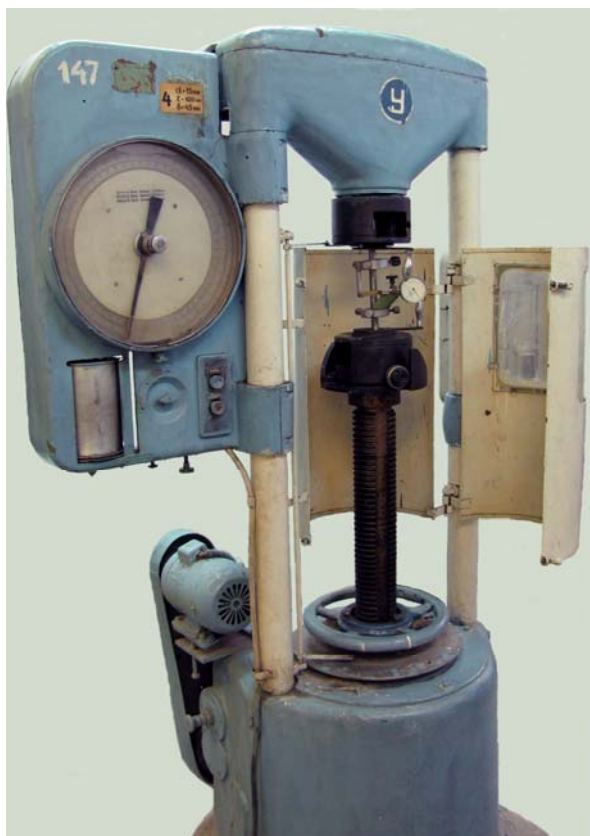


Рисунок 12 - Общий вид машины для испытания на кручение КМ-50-1

Работа проводится на машине модели КМ-50-1 (рисунок 12), предназначенной для испытания образцов на кручение грузоподъемностью до 50 кгс·м (0,5 кН·м).

Все узлы машины смонтированы на станине с двумя вертикальными колоннами. Передача вращения от нижнего захвата к верхнему осуществляется вручную с помощью цепной передачи (при вращении рукоятки по часовой стрелке). Возможно также нагружение с помощью электродвигателя. Величина создаваемого момента (в кгс·м) фиксируется моментоизмерителем. Он состоит из шкалы с рабочей и контрольной стрелками, маятника со сменными грузами, рычага и рейки с направляющими роликами. В зависимости от материала можно использовать три шкалы А, Б и В, кгс·м: от 0 до 10; от 0 - 20 и от 0 - 50. Машина снабжена диаграммным устройством, которое позволяет получить график

зависимости между крутящим моментом и углом закручивания. До испытания выбирают шкалу нагружения, устанавливая на маятнике необходимый груз (шкала А один; Б - два и В - три груза).

Для замера малых углов закручивания используется *угломер* С.В. Бояршинова (*экстензометр*) – рисунок 13 а. 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 кольца 1 переместит на величину Δ измерительный наконечник индикатора часового типа 3, установленного на планке кольца 2. В пределах упругости для малых деформаций угол поворота φ (в радианах) будет равен отношению двух катетов $\varphi \approx \text{tg } \varphi = \Delta/b$ (рисунок 13 б).

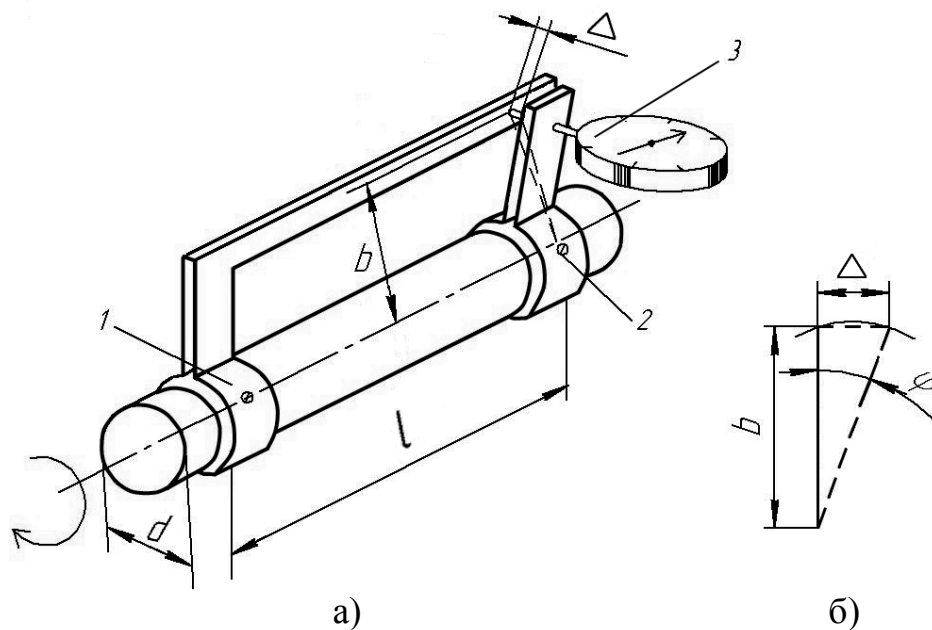


Рисунок 13 – Схема экстензометра

Тогда средним углом закручивания $\varphi_{\text{ср}}$ будет отношение усредненных показаний индикатора (с учетом цены деления κ) на степень нагрузки $\Delta n \kappa$ к расстоянию от оси испытываемого образца до индикатора b :

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{\Delta n_{\text{ср}} \kappa}{b}. \quad (34)$$

Порядок выполнения работы

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

2 Определить величину момента $M_{\text{х пц}}$ (кгс·м), до которого выполняется закон Гука:

$$M_{\text{х пц}} \leq \tau_{\text{пц}} \cdot W_p, \quad (35)$$

где $\tau_{\text{пц}}$ - предел пропорциональности материала образца. Принять для стали $\tau_{\text{пц}} = 100$ МПа. Получите размерность значения момента $M_{\text{х пц}}$ в единицах шкалы моментометра применяемой испытательной машины, т.е. в кгс·м. При расчете учесть, что: $1 \text{ МПа} = 10^{-3} \text{ кН/мм}^2$; $1 \text{ кН}\cdot\text{мм} = 0,1 \text{ кгс}\cdot\text{м}$.

3 Для устранения люфтов, зазоров приложить к образцу предварительный скручивающий момент (например, $0,5 \text{ кгс}\cdot\text{м} = 5 \text{ кН}\cdot\text{мм}$) и установить индикатор угломера на нулевое деление.

4 Нагрузить образец *равными* ступенями момента ΔM_x в пределах упругости (не превышая $M_{\text{х пц}}$), каждый раз фиксируя показания индикатора.

5 Вычислить среднеарифметическое приращение угла закручивания по выражению (34).

6 Определить величину модуля сдвига G^0 , ГПа (1ГПа = 1кН/мм²) из опыта, используя закон Гука (формула 32). Принять $M_x = \Delta M_x$ (кН·мм); $\varphi = \varphi_{ср}$ (в радианах).

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 33). Принять для стали величины модуля $E = 200$ ГПа; коэффициента $\mu = 0,25$.

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

Отчет по работе

1 Название и цель работы.

2 Модель испытательной машины.

3 Диаметр образца, мм $d =$

Расчетная длина, мм $l =$

Расстояние от оси образца до индикатора, мм $b =$

Цена деления шкалы индикатора, мм $k =$

4 Полярный момент сопротивления сечения W_p , мм³

$$W_p = \pi d^3 / 16 =$$

5 Наибольший скручивающий момент $M_{x_{пц}}$ (кгс·м), до которого деформация образца следует закону Гука при $\tau_{пц} = 100$ МПа (0,1 кН/мм²):

$$M_{x_{пц}} \leq \tau_{пц} \cdot W_p =$$

6 Результаты опыта (таблица 9):

Таблица 9 – Результаты опыта

Крутящий момент M_x		Степень момента ΔM_x	Показания индикатора n	Степень показаний Δn	Угол закручивания $\varphi = \frac{nk}{b}$
кгс·м	кН·мм	кН·мм	в делениях прибора		радианы
Среднее значение $\Delta n_{ср} =$					

7 Усредненный угол закручивания $\varphi_{ср}$, радианы

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

8 Полярный момент инерции поперечного сечения образца, мм⁴

$$J_{\text{р}} = \frac{\pi d^4}{32} =$$

9 Опытное значение G^0 модуля сдвига для стали, ГПа

$$G^0 = \frac{\Delta M_{\text{х}} l}{\varphi_{\text{ср}} J_{\text{р}}} =$$

10 Теоретическая величина модуля упругости сдвига G для стали, ГПа
(принять $E = 200$ ГПа; $\mu = 0,25$)

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

11 Погрешность опыта:

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

12 График зависимости угла закручивания от крутящего момента $\varphi = f(M_{\text{х}})$.

Контрольные вопросы

1 Какое напряжение возникает в поперечных сечениях стержня при кручении?

2 В каких точках поперечного сечения касательное напряжение при кручении достигает наибольшей величины?

3 По каким формулам определяются полярные моменты инерции и сопротивления для круглого поперечного сечения?

4 Как связаны между собой крутящий момент и угол закручивания в области упругих деформаций?

5 Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?

6 Во сколько раз изменится угол закручивания, если диаметр стержня уменьшить вдвое при прочих одинаковых условиях?

7 Запишите формулу взаимосвязи между тремя упругими постоянными G , E и μ для изотропных материалов?

8 С помощью какого прибора производится замер угла закручивания, и как он работает?

Список литературы

- 1 Авдеев, Б. А. Техника определения механических свойств материалов [Текст] / Б. А. Авдеев. – М. : Машиностроение, 1965. – 488 с.
- 2 Афанасьев, А. М. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов [Текст] / А. М. Афанасьев, В. А. Марьин. – М. : Наука, 1975. – 288 с.
- 3 Беляев, Н. М. Лабораторные работы по сопротивлению материалов [Текст] / Н. М. Беляев. – М. : Изд-во технико-теоретической литературы, 1956. – 287 с.
- 4 Вербицкая, А. Г. Определение механических свойств материалов [Текст] : учебное пособие / А. Г. Вербицкая, В. И. Кирносов. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 192 с.
- 5 Жуковец, И. И. Механические испытания металлов [Текст] : учебное пособие / И. И. Жуковец. – М. : Высшая школа, 1986. – 199 с.
- 6 Букеткин, Б. В. Экспериментальная механика [Текст] / Б. В. Букеткин, А. А. Горбатовский, И. Д. Кисенко [и др.] ; под ред. Р. К. Вафина, О. С. Нарайкина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 136 с.
- 7 Вольмир, А. С. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум [Текст] : учебное пособие для вузов / А. С. Вольмир, Ю. П. Григорьев, В. А. Марьин, А. И. Станкевич. – М. : Дрофа, 2006. – 352 с.
- 8 Подскребко, М. Д. Сопротивление материалов [Текст] : учебник / М. Д. Подскребко. – Минск : Высшая школа, 2007. – 797 с.
- 9 Сопротивление материалов. Электронный учебный курс для студентов очной и заочной формы обучения // URL : www.soprotmat.ru.
- 10 Электронный ресурс // URL : www.mysopromat.ru.
- 11 Электронная библиотека // URL : www.twirpx.com/files/mechanics/sopromat/.
- 12 Сайт для студентов технических вузов // URL : www.isopromat.ru.

Коротовских Валентин Константинович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
по дисциплине «Сопротивление материалов»
для студентов направлений 151900.62, 150700.62,
190600.62, 190700.62, 190109.65, 190110.65**

Часть 1

Редактор А. С. Мокина

Подписано в печать 22.05.13	Формат 60×84 1/16	Бумага тип. № 1
Печать трафаретная	Усл. печ. л. 2,25	Уч.-изд. л. 2,25
Заказ 98	Тираж 25	Цена свободная

РИЦ Курганского государственного университета.
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.
Курганский государственный университет.