

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Институт горного дела и строительства

Кафедра «Механика материалов и геотехнологии»

Утверждено на заседании кафедры  
«Механика материалов и геотехнологии»  
«10» сентября 2024 г., протокол № 1

Заведующий кафедрой

  
\_\_\_\_\_ С.В. Анциферов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**по выполнению лабораторных работ**  
**по дисциплине (модулю)**  
**«Сопроотивление материалов»**

**основной профессиональной образовательной программы**  
**высшего образования – программы бакалавриата**

по направлению подготовки  
**27.03.04 Управление в технических системах**

с направленностью (профилем)  
**«Цифровые технологии в системах обеспечения качества»**

Форма обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 270304-01-24

Тула 2024

Методические указания к лабораторным работам составлены доцентом Деевым П.В. и обсуждены на заседании кафедры механики материалов и геотехнологии института горного дела и строительства.

Протокол № 1 от « 10 » сентября 2024 г.

И.о. зав. кафедрой  С.В. Анциферов

## 1. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является ознакомление студентов с методикой определения механических характеристик пластичных конструкционных материалов.

В ходе лабораторной работы должны быть выполнены следующие задачи:

- 1) на примере малоуглеродистой стали изучено поведение пластичного конструкционного материала при статическом растяжении;
- 2) получена диаграмма растяжения малоуглеродистой стали;
- 3) определены прочностные и деформационные характеристики стали;
- 4) сделаны выводы об особенностях поведения образца из пластичного материала при растяжении.

## 2. Основные теоретические сведения

Для испытаний на растяжение используют цилиндрические или плоские образцы (рис. 1), размеры которых определяются по ГОСТ 1497-84.

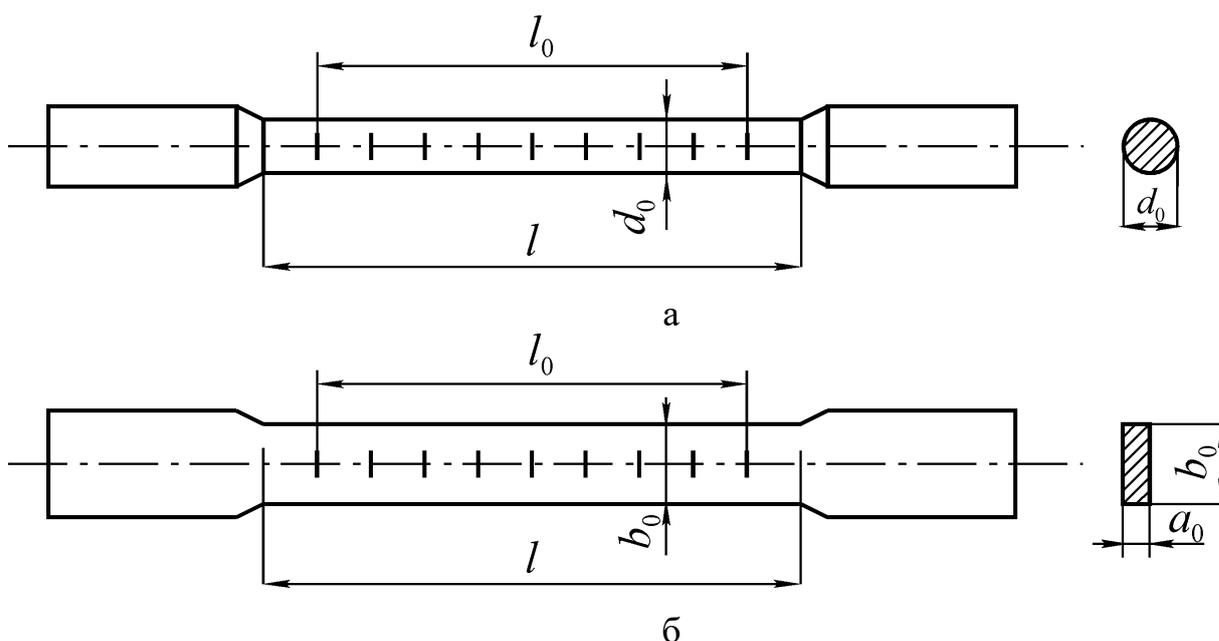


Рис. 1. Цилиндрические (а) и плоские (б) образцы, используемые при испытаниях на растяжение

Основные размеры образцов:  $l$  – рабочая длина,  $l_0$  – расчетная длина,  $d_0$  – диаметр,  $a_0$  и  $b_0$  – соответственно толщина и ширина плоского образца. Образцы бывают короткими ( $l_0 = 5d_0$ ) и длинными ( $l_0 = 10d_0$ ). Для плоских образцов расчетная длина берется соответственно  $l_0 = 11,3\sqrt{A_0}$ , или  $l_0 = 5,65\sqrt{A_0}$ , где  $A_0 = a_0b_0$ .

Результат испытания представляется диаграммой растяжения — графиком зависимости между абсолютным удлинением образца  $\Delta l$  и растягивающей силой  $P$ . Изменение длины образца при изменении растягивающей силы фиксируется диаграммным устройством, в результате работы которого на бумаге вычерчивается первичная диаграмма растяжения (рис. 1).

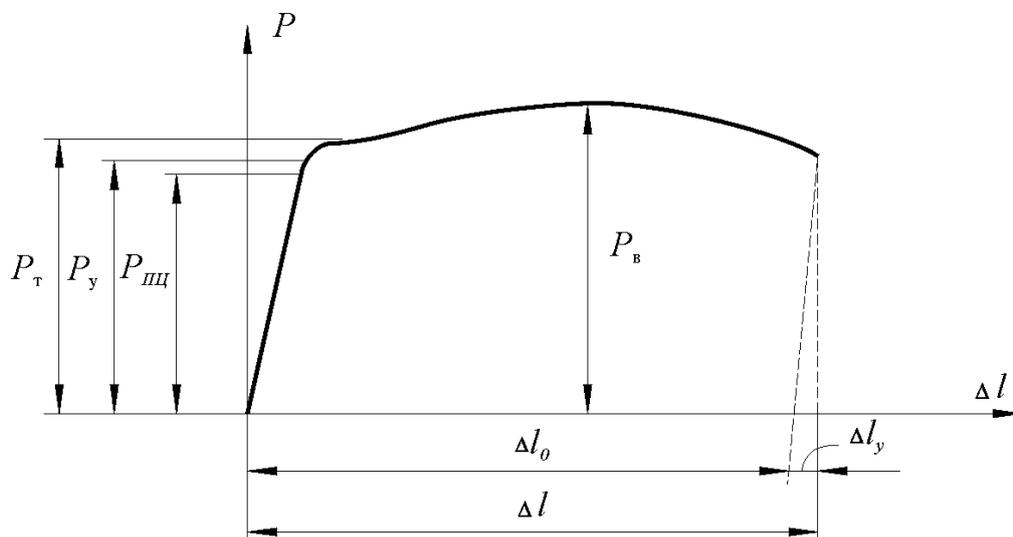


Рис. 2. Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали (первичная диаграмма растяжения)

При изменении растягивающей силы от нуля до  $P = P_{пц}$ , диаграмма растяжения представляет собой наклонную прямую, что свидетельствует о справедливости закона Гука на начальном этапе испытания. Напряжение, соответствующее месту на диаграмме, в котором прямая линия переходит в кривую, называется пределом пропорциональности:

$$\sigma_{пц} = P / A_0, \quad (1)$$

где  $A_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца.

Таким образом, предел пропорциональности материала — это наибольшее напряжение, до которого справедлив закон Гука.

Далее, до нагрузки  $P = P_y$  удлинения образца являются только упругими. Этот факт можно установить рядом последовательных нагружений образца с его разгрузкой при постепенно увеличивающемся уровне каждого последующего нагружения. Наибольшее напряжение  $\sigma_y = P_y / A_0$ , при котором остаточные деформации очень малы, называется пределом упругости.

При дальнейшем деформировании образца на диаграмме растяжения появляется участок, на котором удлинение образца увеличивается при постоянной нагрузке. На диаграмме растяжения образуется горизонтальный или почти горизонтальный участок  $P = P_T$  — «площадка текучести».

Материал образца находится в состоянии текучести – деформации нарастают без увеличения напряжений. Соответствующее напряжение  $\sigma_T = P_T / A_0$  называется физическим пределом текучести.

После образования площадки текучести материал упрочняется, т. е. вновь приобретает способность сопротивляться деформированию, и для дальнейшего растяжения образца необходимо увеличить растягивающую силу. Однако сопротивление материала растягивающим напряжением на этом участке становится значительно ниже, чем в упругой области. В некоторый момент растягивающая сила достигает наибольшего значения  $P = P_B = P_{\max}$ . При этом значении силы на образце возникает «шейка» – местное поперечное сужение. В «шейке» площадь сечения образца уменьшается, а напряжения возрастают. Вследствие этого дальнейшее растяжение образца происходит на малой длине «шейки», нагрузка уменьшается – на диаграмме образуется нисходящий участок. Напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, которую выдержал образец до разрушения, называется временным сопротивлением или пределом прочности  $\sigma_B = P_B / A_0$ .

При дальнейшем растяжении при некоторой нагрузке  $P_K < P_B$  образец разрывается в «шейке». Фотографии места разрыва показаны на рис. 3.

Отношение растягивающей силы, приложенной к образцу в момент разрыва к площади поперечного сечения образца в шейке называется истинным сопротивлением разрыву  $S_k = P_k / A_k$ .



Рис. 3 Фотографии мест разрыва стального (а) и латунного (б) образцов

Из рассмотренных прочностных механических характеристик основное значение для прочностных расчетов имеют  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$ . Характеристики  $\sigma_{\text{пл}}$ ,  $\sigma_y$ ,  $S_k$  используют сравнительно редко.

В настоящей лабораторной работе для малоуглеродистой стали определяются физический предел текучести  $\sigma_T$ , временное сопротивление (предел прочности)  $\sigma_B$  и истинное сопротивление разрыву в шейке  $S_k$ .

Для большинства пластичных металлов и сплавов на диаграмме растяжения переход из упругой в упруго-пластическую область происходит монотонно, без образования площадки текучести. Для таких материалов определяют условный предел текучести, соответствующий определенному допуску на остаточную деформацию. В соответствии с ГОСТ 1497-84 величина допуска на остаточную деформацию принимается равной 0,2 % от длины участка измерения деформации.

Таким образом, условным пределом текучести  $\sigma_{0,2} = P_{0,2} / A_0$  называют напряжение, при котором остаточное удлинение базы измерения удлинений достигает 0,2 % (рис. 4).

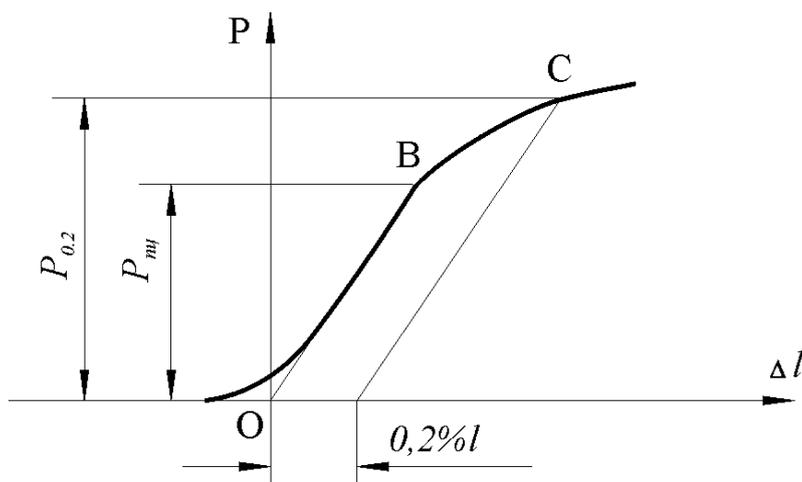


Рис. 4. Определение условного предела текучести

Пластические свойства материалов оценивают величиной остаточной деформации, получаемой образцом при растяжении до разрыва. Испытание на растяжение позволяет определить две характеристики пластических свойств материала – относительное удлинение после разрыва  $\delta$  и относительное изменение площади поперечного сечения после разрыва  $\psi$ :

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%, \quad \psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\%,$$

где  $l_0$  - расчетная длина образца,  $l_k$  - расчетная длина после разрыва образца,  $A_k$  – наименьшая площадь сечения в «шейке» после разрыва образца.

Относительное удлинение образца зависит от расчетной длины. Поэтому характеристику  $\delta$  снабжают индексом, указывающим, на каком образце получена эта характеристика – на нормальном или коротком, т.е.  $\delta_{10}$  или  $\delta_5$ . Для нормального образца индекс 10 разрешается не ставить.

### 3. Объекты исследования, оборудование материалы

Испытание конструкционных материалов на растяжение производится на испытательной машине «P-5» или «SZ-10» с механическим винтовым приводом и маятниковым силоизмерителем (рис. 5, а, б).

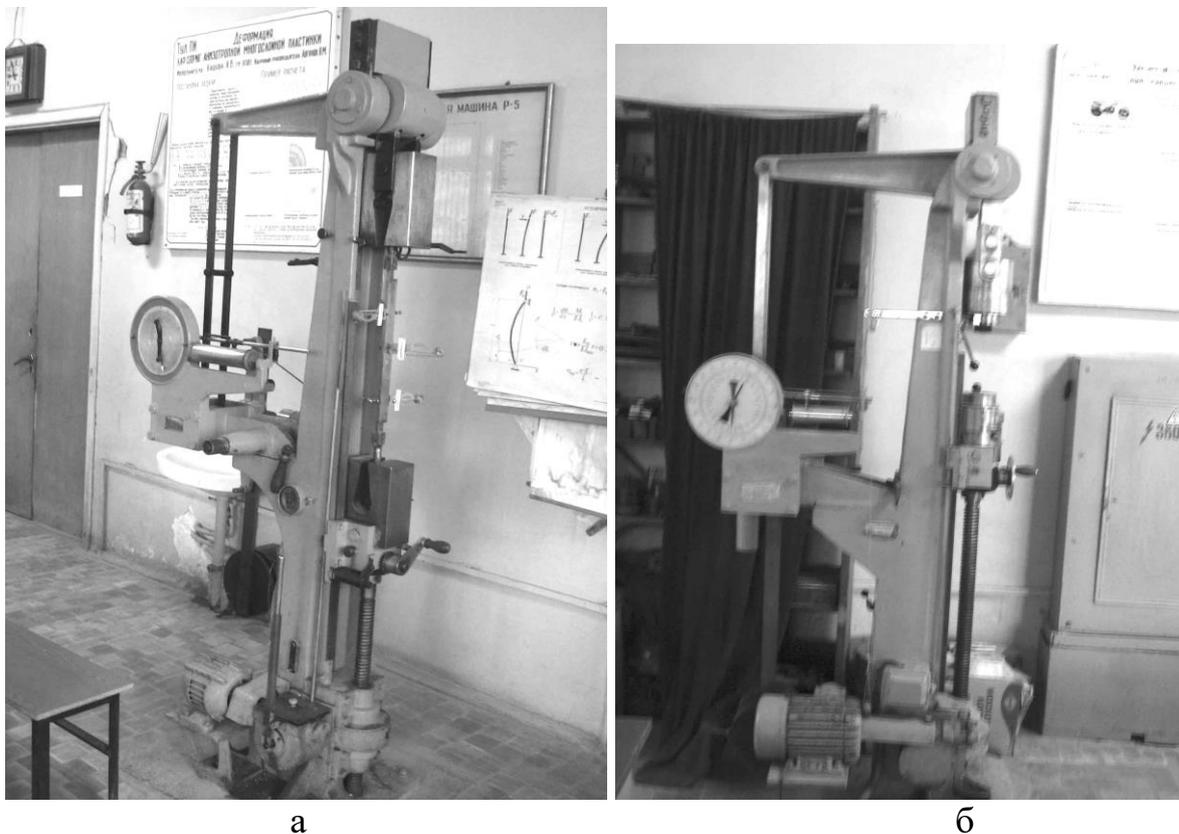


Рис. 5. Испытательные машины P-5 (а) и SZ-10 (б)

Схема испытательной машины «P-5» показана на рис. 6.

Массивное основание 16, жесткая поперечина 5 и направляющие колонны 3 составляют замкнутую силовую раму машины. На поперечине 5 установлен гидравлический цилиндр с поршнем 10. Поршень через шаровую опору соединен с перекладиной 7, к которой на двух винтовых тягах 6 подвешена жесткая верхняя перекладина 4. В центре перекладины 4 находится верхний захват для закрепления образца при растяжении и опора для установки образца при испытании на сжатие. Нижний захват для закрепления образца установлен на нижней жесткой перекладине 1. Рабочее усилие создается гидроцилиндром, в который подается масло под давлением, создаваемым специальным гидронасосом 14. Поршень гидроцилиндра перемещает перекладину 7 вверх и через тяги 6 – верхнюю рабочую перекладину 4 с верхним захватом, вследствие чего образец растягивается. При установке образца 2 на опору верхней перекладины 4 образец испытывает сжатие, осуществляемое штемпелем поперечины 5.

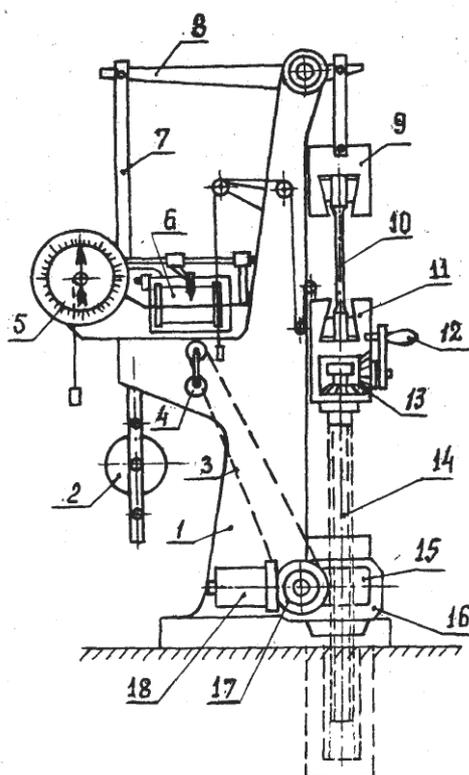


Рис. 6. Схема винтовой испытательной машины Р-5: 1 – станина; 2 – маятник; 3 – цепная передача; 4 – рукоятка; 5 – силоизмеритель; 6 – диаграммный аппарат; 7, 8 – рычаги; 9 – верхний захват; 10 – образец; 11 – нижний захват; 12 – рукоять; 13 – конические шестерни; 14 – винт; 15 – гайка; 16 – загружающий узел; 17 – редуктор; 18 – электродвигатель

При работе машины часть масла отводится в гидроцилиндр 13 маятникового силоизмерителя 11. На силоизмерителе установлен диаграммный аппарат 12 для записи автодиаграммы растяжения или сжатия. При установке на верхней перекладине 4 специальных опор можно осуществлять испытания образцов на изгиб. Нижняя перекладина 1, неподвижная при испытании, снабжена специальным редуктором 15 для ее быстрого перемещения вручную при установке образца. Механическое устройство для быстрого перемещения имеет и верхняя перекладина 4. Это устройство приводится в действие электродвигателем 8, соединенным через редуктор с гайками, установленными в перекладине 7. Последние втягивают винтовые тяги 6 и тем самым перемещают верхнюю перекладину 4.

Сталь – ковкий сплав чугуна с углеродом, характеризующийся эвтектоидным превращением. Малоуглеродистая сталь содержит до 0,25 % углерода, отличается высокой пластичностью и широко применяется в машиностроении и строительстве. Механические характеристики стали обуславливают возможность ее применения в тех или иных целях.

Описание образцов, используемых при испытании стали на растяжение, приведено в разделе 2.

#### 4. Задание на работу

Для стандартного образца, изготовленного из малоуглеродистой стали, необходимо экспериментально определить следующие механические характеристики: предел текучести  $\sigma_T$ , МПа, предел прочности (временное сопротивление),  $\sigma_B$  МПа, истинное сопротивление разрыву в шейке  $S_K$ , МПа, относительное удлинение после разрыва  $\delta$ , %, относительное сужение в шейке после разрыва  $\psi$ , %. Также необходимо экспериментально получить первичную, условную и истинную диаграммы растяжения малоуглеродистой стали. По результатам работы должны быть сделаны соответствующие выводы.

#### 5. Ход работы

Опыт проводится на стальном образце круглого поперечного сечения, на испытательной машине Р-5. Эксперимент включает в себя следующие этапы.

1. Измерение диаметра образца  $d_0$  штангенциркулем в трех сечениях – в середине и по краям рабочей длины с точностью до 0,1 мм.

2. По наименьшему размеру  $d_0$  вычисляется начальная площадь сечения образца  $A_0$  (округление до 0,5 мм<sup>2</sup>).

3. На поверхность образца наносится тонкая риска вдоль образующей и на ней — две граничные точки расчетной длины  $l_0$  (два неглубоких керна). Расчетную длину  $l_0$  следует расположить симметрично по отношению к рабочей длине образца.

4. Образец устанавливается в захваты испытательной машины. Подготавливается к работе диаграммный аппарат, проверяется готовность испытательной машины к проведению испытания.

5. Включается привод машины и образец плавно нагружается возрастающей растягивающей силой. Скорость перемещения активного захвата машины не должна превышать 2 мм/мин при дальнейшем испытании до разрыва.

6. При проведении испытания ведется наблюдение за поведением образца, записью автодиаграммы растяжения, показаниями стрелки силоизмерительного устройства машины.

7. В процессе испытания по силоизмерителю фиксируются следующие величины:

– нагрузка  $P_T$ , соответствующая физическому пределу текучести. При  $P = P_T$  стрелка силоизмерителя на некоторое время останавливается, а на автодиаграмме растяжения образуется площадка текучести;

– наибольшая нагрузка  $P_B = P_{max}$ , соответствующая временному сопротивлению. Нагрузку  $P_B$  определяют по контрольной стрелке силоизмерителя.

8. В процессе испытания следует обратить внимание на образование и развитие «шейки» — местного сужения образца.

9. После разрыва образца испытательная машина отключается, из захватов извлекаются обе половины образца, с машины снимается лента бумаги с записью автодиаграммы растяжения.

Далее производятся замеры разрушенного образца. Обе половины образца следует плотно сложить, так, чтобы их оси образовали прямую линию, и измерить длину после разрыва  $l_k$  и минимальный диаметр в «шейке»  $d_k$ . Последний измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По среднему значению  $d_k$  вычисляется наименьшая поперечного сечения образца в «шейке» после разрыва  $A_k$  (округление до 0,5 мм<sup>2</sup>).

Испытание считается недействительным при разрыве образца за пределами расчетной длины или по разметочным кернам, а также при образовании двух и более шеек.

## **6. Содержание отчета**

Отчет должен быть выполнен на типовом бланке (см. Приложение).

## **7. Список рекомендуемой литературы**

1. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов / А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 13 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 292 с.

3. Анциферов С.В., Афанасова О.В., Деев П.В. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: компьютерные лабораторные работы: Учеб. пособие для самост. работы студентов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 78 с.

3. Павлов П.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев. – СПб.: Лань, 2003. – 528 с.

4. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Выща школа, 1986. – 479 с.

6. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытания на растяжение. – М.: Стандартинформ, 2005. – 22 с.

Бланк к отчету о выполнении лабораторной работы № 1

Студент \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИСПЫТАНИЕ МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы: изучение поведения пластичного материала при статическом растяжении и определение основных механических характеристик малоуглеродистой стали.

ДАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытательная машина Р – 5, SZ – 10

Материал образца \_\_\_\_\_

Таблица 2

Нагрузки на образец

Нагрузка $F_T$ , соответствующая пределу текучести материала, кН	
Максимальная нагрузка $F_{max}$ , приложенная к образцу, кН	
Нагрузка $F_{разр}$ , при которой произошло разрушение образца, кН	

Таблица 1

Размеры образца

До испытания	
Диаметр рабочей части $d_0$ , мм	
Площадь поперечного сечения $A_0$ , мм <sup>2</sup>	
Расчетная длина $l_0$ , мм	
После разрыва	
Диаметр в шейке $d_k$ , мм	
Расчетная длина $l_k$ , мм	
Площадь поперечного сечения в шейке $A_k$ , мм <sup>2</sup>	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

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

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

Истинное сопротивление разрыву в шейке

$S_k = \frac{F_{разр}}{A_k} =$

Относительное остаточное удлинение после

разрыва  $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$

Относительное остаточное сужение после

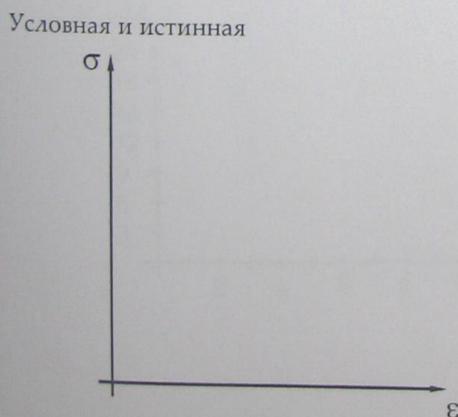
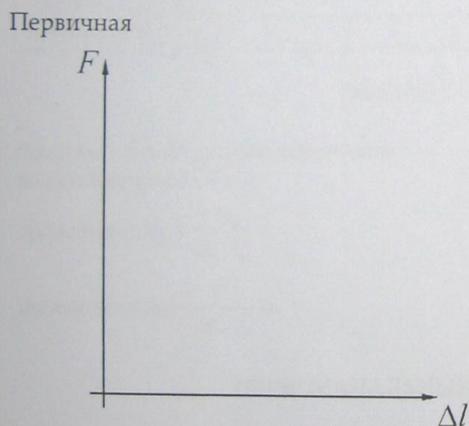
разрыва  $\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\% =$

Таблица 3

Механические характеристики стали

Прочностные характеристики	
Предел текучести $\sigma_m$ , МПа	
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	
Истинное сопротивление разрыву в шейке $S_k$ , МПа	
Деформационные характеристики	
Относительное остаточное удлинение после разрыва $\delta$ , %	
Относительное остаточное сужение после разрыва $\psi$ , %	

ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ



Выводы:

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Кафедра механики материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 2  
«ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА СЖАТИЕ»**

по дисциплине

**«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

Направления подготовки: 15.05.01, 17.05.01, 17.05.02, 21.05.04, 23.05.01,  
24.05.01, 24.05.02 – специалитет; 08.03.01, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.05,  
15.03.06, 22.03.01, 23.03.02, 24.03.02, 24.03.03, 28.03.02 – бакалавриат.  
Форма обучения – очная, заочная

Тула 2016

## 1. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является ознакомление студентов с поведением различных материалов при статическом сжатии.

В ходе лабораторной работы должны быть выполнены следующие задачи:

- 1) на примере малоуглеродистой стали изучено поведение пластичных конструкционных материалов при сжатии;
- 2) на примере чугуна изучено поведения хрупких материалов при сжатии;
- 3) на примере дерева изучено поведение слоистых анизотропных материалов при сжатии;
- 2) получены диаграммы сжатия стали, чугуна и дерева;
- 3) определены прочностные характеристики чугуна и дерева при сжатии вдоль и поперек волокон;
- 4) сделаны выводы об особенностях поведения образцов из разных типов материалов при сжатии

## 2. Основные теоретические сведения

Испытания на сжатие (ГОСТ 25.503-97) обычно производят для определения прочностных характеристик хрупких материалов (чугун, керамические материалы, древесина, бетон и т.д.).

Образцы для испытаний на сжатие, изготовленные из металлов, имеют вид коротких цилиндров, с отношением высоты  $h$  к диаметру  $d$ , равным 2, ..., 3. Образцы из бетона, дерева, цемента и т.п. изготавливают в виде куба или параллелепипеда небольшой высоты (рис. 1). Это связано с необходимостью исключения потери устойчивости при сжатии, что возможно при достаточно большой длине образца.

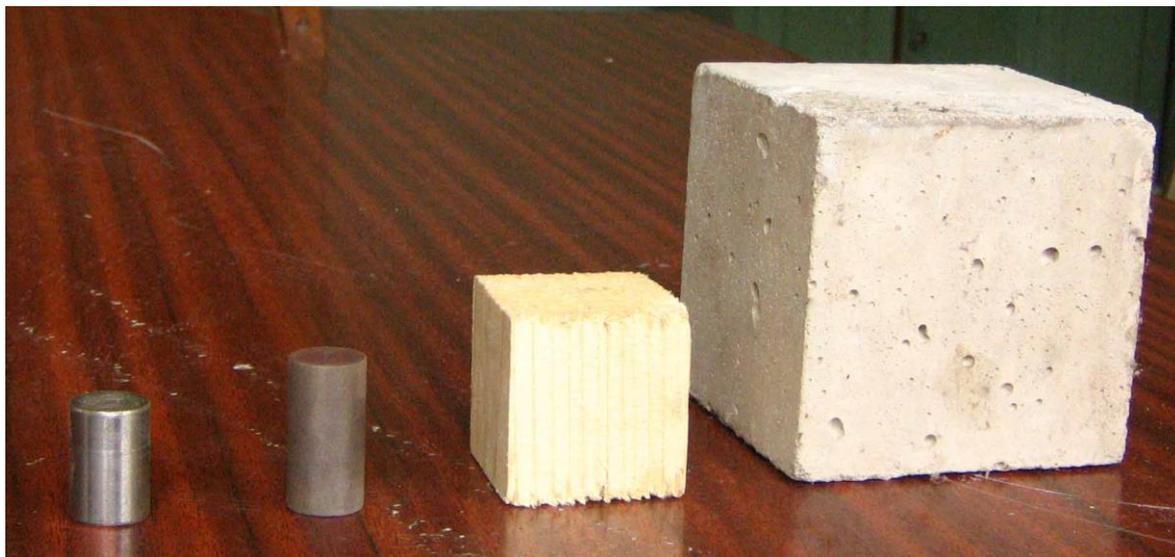


Рис. 1. Образцы для испытания на сжатие. Материалы (слева направо): сталь, чугун, дерево, бетон

Результаты испытаний на сжатие существенно зависят от условий испытания: величины сил трения на опорных торцах образца и от отношения высоты образца и его поперечному размеру. При испытании на сжатие для пластичных материалов можно определить пределы пропорциональности, упругости и текучести, а для хрупких материалов – предел прочности. Предел прочности для пластичных материалов не определяют, так как образец из пластичного материала при сжатии не разрушается, а сплющивается в диск при возрастании сжимающей силы. Диаграммы сжатия различных материалов показаны на рис. 2 а, б, в, г. Диаграмма сжатия пластичного материала (сталь) показана на рис. 2 а. При проведении учебных лабораторных работ испытание на сжатие стального образца прекращают при возникновении заметной пластической осадки. Бочкообразная форма, возникающая при сжатии цилиндрического образца из пластичного материала, связана с влиянием сил трения на торцах образца, которые препятствуют поперечным перемещениям частиц материала.

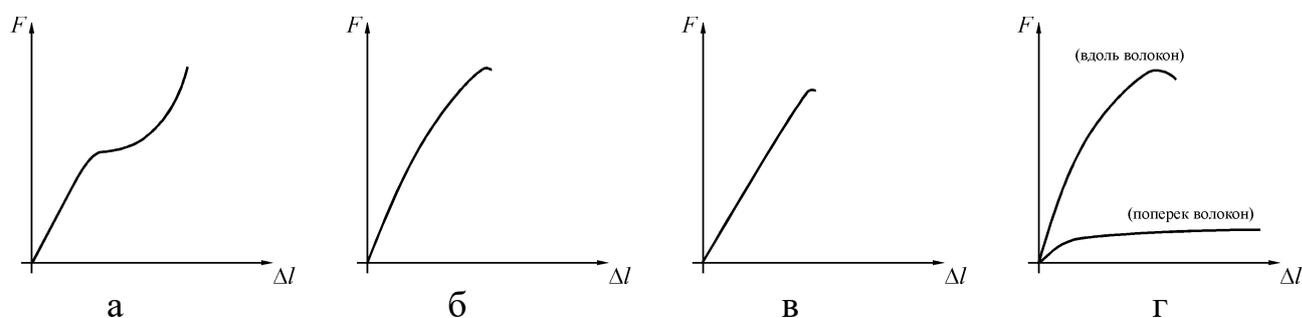


Рис. 2. Диаграммы сжатия некоторых конструкционных материалов:  
а – малоуглеродистая сталь, б – серый чугун, в - бетон,  
г – дерево вдоль и поперек волокон

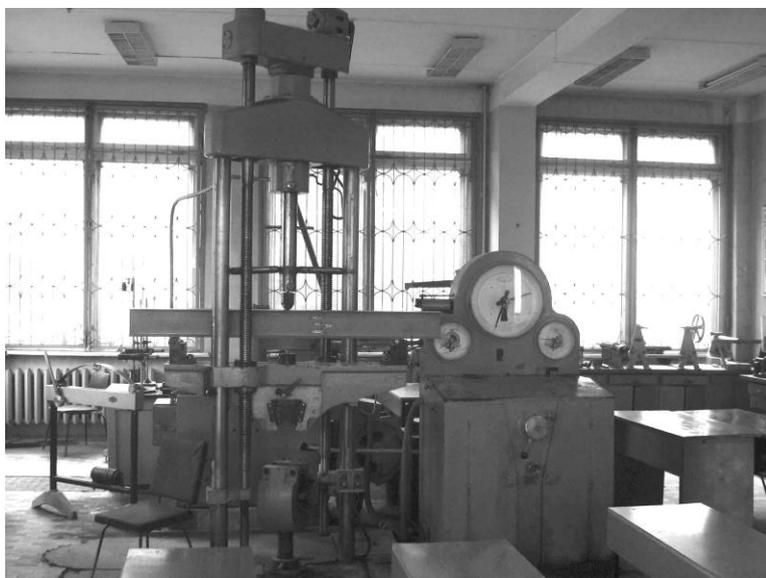
Образцы из хрупкого материала при испытании на сжатие доводят до разрушения, определяя разрушающую нагрузку  $P_B^C$  и предел прочности материала при сжатии  $\sigma_B^C$ . Образцы из хрупкого материала при сжатии разрушаются при малых остаточных деформациях с образованием наклонных или продольных трещин. Форма разрушения во многом зависит от величины сил трения на торцах образца. Так, если силы трения уменьшить, например, путем смазки торцов образца, то разрушение образцов из некоторых хрупких материалов (цемента, камня) происходит с образованием не наклонных, а вертикальных трещин. Одновременно изменятся и величина разрушающей нагрузки  $P_B^C$ , а следовательно, и величина предела прочности  $\sigma_B^C$ .

В данной работе проводится испытание на сжатие двух хрупких материалов – чугуна и цемента. Отметим, что большинство конструкционных материалов работает на сжатие существенно лучше, чем на растяжение, т.е. для таких материалов  $\sigma_B^C > \sigma_B^P$ .

Материалы анизотропные испытывают на сжатие в характерных направлениях анизотропии. В данной работе производится испытание образцов из древесины, являющейся анизотропным материалом. Образцы из древесины испытывают в двух направлениях – вдоль и поперек волокон. При сжатии определяют разрушающие нагрузки и пределы прочности древесины вдоль и поперек волокон. Разрушение образца при сжатии вдоль волокон происходит с обмятием торцов и образованием продольных трещин. При сжатии поперек волокон образец после достижения некоторой нагрузки спрессовывается почти при постоянной нагрузке, которая вновь начинает расти только после значительного сжатия образца. За разрушающую нагрузку  $P_B^C$  при испытании поперек волокон условно принимают силу, вызывающую сжатие образца на 1/3 его начальной высоты. Прочность дерева при сжатии вдоль волокон примерно в 8 – 10 раз выше, чем при сжатии поперек волокон.

### 3. Объекты исследования, оборудование материалы

Испытание конструкционных материалов на сжатие производится на универсальных испытательных машинах ГРМ-1 и УИМ-50. Внешний вид гидравлической испытательной машины ГРМ-1 и универсальной испытательной машины УИМ-50 показан на рис. 3 а, б.



а



б

Рис. 3. Внешний вид испытательных машин ГРМ-1 и УИМ-50

Схема универсальной измерительной машины УИМ-50 приведена на рис. 4. Массивное основание 16, жесткая поперечина 5 и направляющие колонны 3 составляют замкнутую силовую раму машины. На поперечине 5 установлен гидравлический цилиндр с поршнем 10. Поршень через шаровую

опору соединен с перекладиной 7, к которой на двух винтовых тягах 6 подвешена жесткая верхняя перекладина 4. В центре перекладины 4 находится верхний захват для закрепления образца при растяжении и опора для установки образца при испытании на сжатие. Нижний захват для закрепления образца установлен на нижней жесткой перекладине 1. Рабочее усилие создается гидроцилиндром, в который подается масло под давлением, создаваемым специальным гидронасосом 14. Поршень гидроцилиндра перемещает перекладину 7 вверх и через тяги 6 – верхнюю рабочую перекладину 4 с верхним захватом, вследствие чего образец растягивается. При установке образца 2 на опору верхней перекладины 4 образец испытывает сжатие, осуществляемое штемпелем поперечины 5. При работе машины часть масла отводится в гидроцилиндр 13 маятникового силоизмерителя 11. На силоизмерителе установлен диаграммный аппарат 12 для записи автодиаграммы растяжения или сжатия. При установке на верхней перекладине 4 специальных опор можно осуществлять испытания образцов на изгиб.

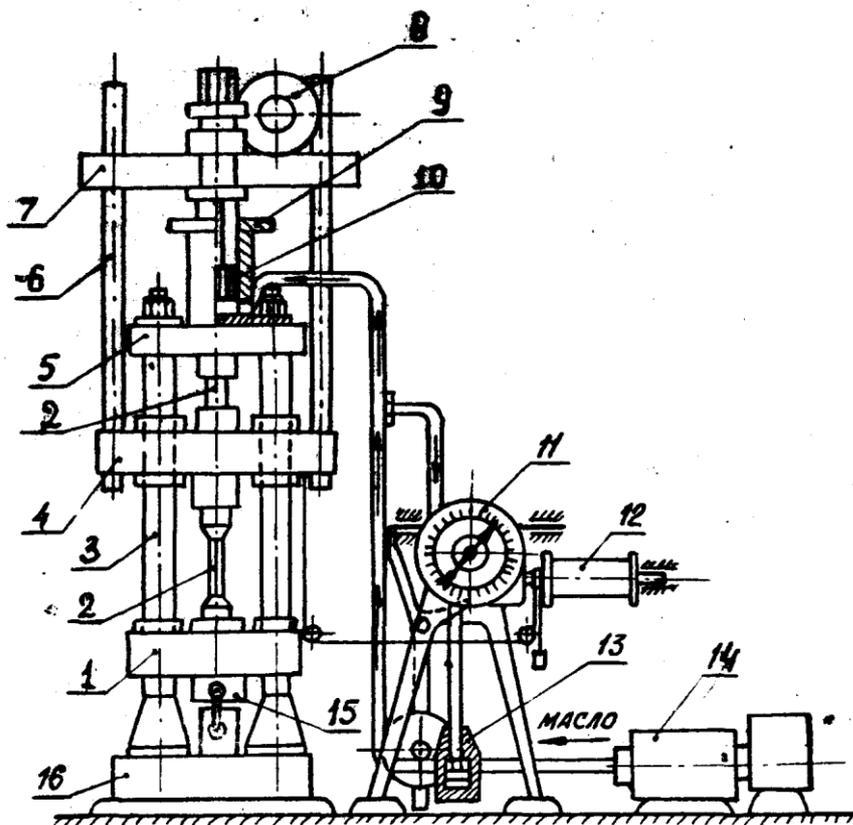


Рис. 4. Схема универсальной испытательной машины: 1 – нижняя перекладина; 2 – образец; 3 – направляющая колонна; 4 – верхняя перекладина; 5 – поперечина; 6 – винтовая тяга; 7 – перекладина; 8 – электродвигатель; 9 – гидравлический цилиндр; 10 – поршень; 11 – силоизмеритель; 12 – диаграммный аппарат; 13 – гидроцилиндр силоизмерителя; 14 – гидронасос; 15 – редуктор; 16 – основание.

Нижняя перекладина 1, неподвижная при испытании, снабжена специальным редуктором 15 для ее быстрого перемещения вручную при установке образца. Механическое устройство для быстрого перемещения имеет и верхняя перекладина 4. Это устройство приводится в действие электродвигателем 8, соединенным через редуктор с гайками, установленными в перекладине 7. Последние втягивают винтовые тяги 6 и тем самым перемещают верхнюю перекладину 4.

Стальные образцы представляют собой цилиндр диаметром 20 и высотой 30 мм, чугунные – цилиндр диаметром 20 и высотой 20 или 30 мм. Деревянные образцы представляют собой кубики с длиной ребра 40... 50 мм.

#### **4. Задание на работу**

Провести испытание четырех образцов конструкционных материалов на сжатие. Для чугуна и дерева необходимо получить предел прочности на сжатие, при этом для дерева определяются два значения – при сжатии вдоль и поперек волокон. Также необходимо экспериментально получить диаграммы сжатия образцов из рассматриваемых материалов. По результатам работы должны быть сделаны соответствующие выводы.

#### **5. Ход работы**

Проведение испытания конструкционных материалов на сжатие включает в себя следующие этапы.

1. Измерение поперечных размеров и вычисление площади поперечного сечения каждого образца.

2. Испытуемый образец устанавливается на рабочую опору верхней перекладины испытательной машины строго по центру опоры.

3. Перемещением перекладины при помощи электрического привода образец доводится до соприкосновения с плоскостью верхнего штемпеля.

4. Включается силовой привод машины и образец плавно нагружается сжимающей силой до разрушения (хрупкий материал) или до заметной пластической осадки (пластичный материал). Скорость перемещения подвижного (активного) захвата машин не должна превышать 2÷3 мм/мин.

5. При испытании хрупких материалов (чугун, цемент), а также дерева вдоль волокон по силоизмерителю машины фиксируется наибольшая нагрузка  $P_b^c$ , соответствующая разрушению образца. При испытании дерева поперек волокон фиксируется нагрузка  $P_b^c$ , вызывающую сжатие образца на 1/3 его начальной высоты. Сжатие образца из стали прекращается при возникновении заметной пластической осадки.

6. При испытании ведется наблюдение за поведением образцов.

7. По данным испытаний вычисляются пределы прочности при сжатии для чугуна и дерева (вдоль и поперек волокон) (округление до 5 МПа)

$$\sigma_B^C = \frac{P_B^C}{A_0}.$$

## 6. Содержание отчета

Отчет должен быть выполнен на типовом бланке (см. Приложение).

## 7. Список рекомендуемой литературы

1. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов / А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 13 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 292 с.

3. Анциферов С.В., Афанасова О.В., Деев П.В. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: компьютерные лабораторные работы: Учеб. пособие для самост. работы студентов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 78 с.

4. Павлов П.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев. – СПб.: Лань, 2003. – 528 с.

5. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Выща школа, 1986. – 479 с.

6. ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 77 с.

Бланк к отчету о выполнении лабораторной работы № 2

Студент \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

Цель работы: изучение поведения пластичных, хрупких, изотропных и анизотропных материалов при одноосном статическом сжатии.

ДАнные ИСПЫТАНИЯ

Испытательная машина УИМ – 50М

Материал образца	Форма образца	Размеры образца			Разрушающая нагрузка $F$ , кН	Предел прочности при сжатии $\sigma_s$ , МПа
		Диаметр $d$ (сторона $a$ ), мм	Высота $h$ , мм	Площадь поперечного сечения $A_0$ , мм <sup>2</sup>		
Сталь						
Чугун						
Дерево (вдоль волокон)						
Дерево (поперек волокон)						

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

ВИД ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЯ

Предел прочности чугуна при сжатии

$$\sigma_s^{(ч)} = \frac{F_{разр}^{(ч)}}{A_0^{(ч)}} =$$

Предел прочности дерева при сжатии:

$$\sigma_s^{(дв)} = \frac{F_{разр}^{(дв)}}{A_0^{(д)}} =$$

- поперек волокон

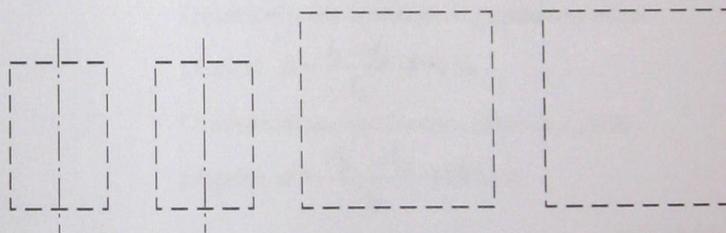
$$\sigma_s^{(дн)} = \frac{F_{разр}^{(дн)}}{A_0^{(д)}} =$$

Сталь Чугун

Дерево

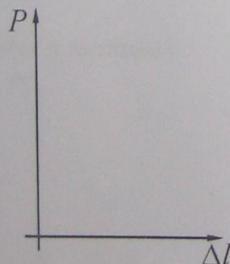
сжатие  
вдоль волокон

сжатие  
поперек волокон

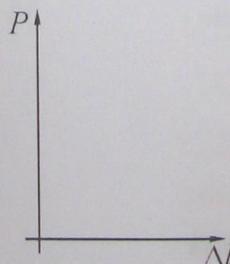


ДИАГРАММЫ СЖАТИЯ

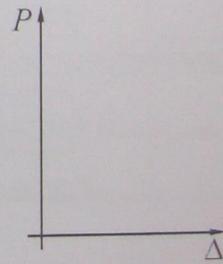
Сталь



Чугун



Дерево



Выводы:

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Кафедра механики материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 3  
«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ  
УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА СТАЛИ»**

по дисциплине

**«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

Направления подготовки: 15.05.01, 17.05.01, 17.05.02, 21.05.04, 23.05.01,  
24.05.01, 24.05.02 – специалитет; 08.03.01, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.05,  
15.03.06, 22.03.01, 23.03.02, 24.03.02, 24.03.03, 28.03.02 – бакалавриат.

Форма обучения – очная, заочная

Тула 2018

## 1. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является экспериментальное определение упругих постоянных малоуглеродистой стали – модуля деформации и коэффициента Пуассона.

В ходе лабораторной работы должны быть выполнены следующие задачи:

- 1) экспериментальное определение модуля упругости стали;
- 2) экспериментальное определение коэффициента Пуассона стали;
- 3) проверка закона Гука при растяжении стального образца (напряжения не должны превышать предел пропорциональности).

## 2. Основные теоретические сведения

На первой стадии упругого растяжения, при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности, для большинства конструкционных материалов имеет место прямая пропорциональная связь между растягивающим напряжением и удлинением в направлении растяжения, так называемый закон Гука (рис.1)

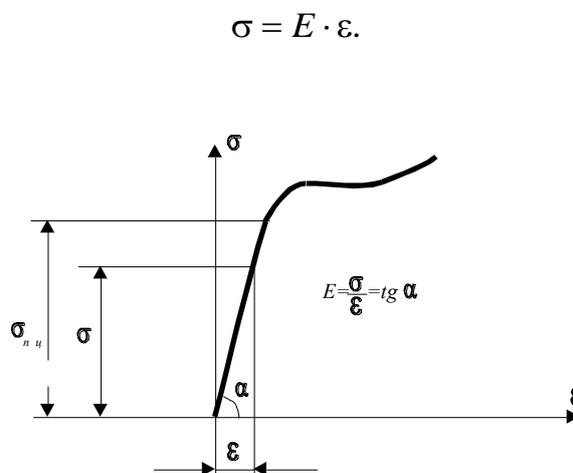


Рис. 1. Диаграмма растяжения стали

Коэффициент пропорциональности  $E$  в законе Гука, определяющий наклон начального линейного участка характеристики материала  $\sigma \sim \varepsilon$  к оси деформаций  $\varepsilon$  (рис. 1), называется модулем упругости 1-го рода или модулем продольной упругости или модулем Юнга. Модуль продольной упругости является основной характеристикой упругих свойств материала. Закон Гука при растяжении можно представить в виде  $\Delta l = \frac{P \cdot l}{E \cdot A}$ . Зная

размеры образца, задавая растягивающую силу и измеряя удлинение образца на некоторой длине (базе измерения), можно экспериментально определить модуль Юнга для исследуемого материала

$$E = \frac{P \cdot l}{A \cdot \Delta l}.$$

При упругом растяжении (сжатии) и напряжениях, не превышающих предела пропорциональности, поперечная деформация составляет вполне определенную часть от продольной деформации, т.е. прямо пропорциональна растягивающему (сжимающему) напряжению  $\varepsilon = -\mu\varepsilon'$ . Коэффициент  $\mu = |\varepsilon' / \varepsilon|$ , определяющий пропорциональность между  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon$ , называют коэффициентом Пуассона. Этот коэффициент является второй упругой константой материала, характеризующей его упругие свойства. Для экспериментального определения коэффициента Пуассона необходимо в процессе растяжения испытуемого образца, задавая растягивающую силу, измерять его продольную и поперечную деформации.

### 3. Объекты исследования, оборудование материалы

Лабораторная работа проводится на испытательной машине «Р-5» или с механическим винтовым приводом и маятниковым силоизмерителем (рис. 2).



Рис. 2. Испытательные машины Р-5

Схема испытательной машины «Р-5» показана на рис. 3.

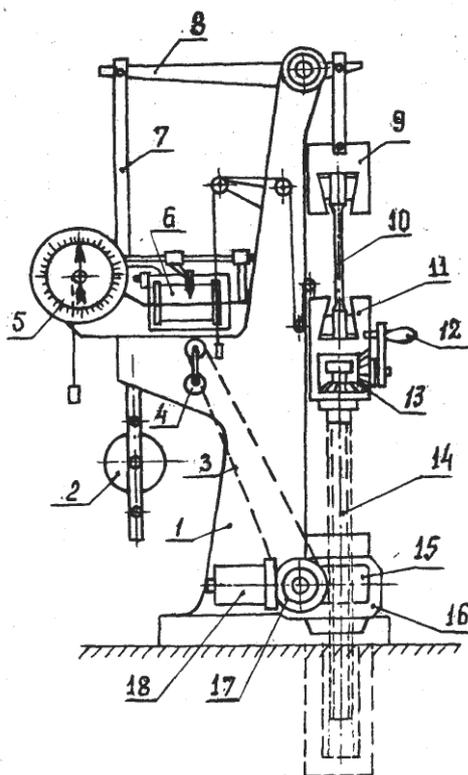


Рис. 3. Схема винтовой испытательной машины Р-5: 1 – станина; 2 – маятник; 3 – цепная передача; 4 – рукоятка; 5 – силоизмеритель; 6 – диаграммный аппарат; 7, 8 – рычаги; 9 – верхний захват; 10 – образец; 11 – нижний захват; 12 – рукоять; 13 – конические шестерни; 14 – винт; 15 – гайка; 16 – загружающий узел; 17 – редуктор; 18 – электродвигатель

Массивное основание 16, жесткая поперечина 5 и направляющие колонны 3 составляют замкнутую силовую раму машины. На поперечине 5 установлен гидравлический цилиндр с поршнем 10. Поршень через шаровую опору соединен с переключиной 7, к которой на двух винтовых тягах 6 подвешена жесткая верхняя переключина 4. В центре переключины 4 находится верхний захват для закрепления образца при растяжении и опора для установки образца при испытании на сжатие. Нижний захват для закрепления образца установлен на нижней жесткой переключине 1. Рабочее усилие создается гидроцилиндром, в который подается масло под давлением, создаваемым специальным гидронасосом 14. Поршень гидроцилиндра перемещает переключину 7 вверх и через тяги 6 – верхнюю рабочую переключину 4 с верхним захватом, вследствие чего образец растягивается. При установке образца 2 на опору верхней переключины 4 образец испытывает сжатие, осуществляемое штемпелем поперечины 5. При работе машины часть масла отводится в гидроцилиндр 13 маятникового силоизмерителя 11. На силоизмерителе установлен диаграммный аппарат 12 для записи автодиаграммы растяжения или сжатия. При установке на

верхней перекладине 4 специальных опор можно осуществлять испытания образцов на изгиб. Нижняя перекладина 1, неподвижная при испытании, снабжена специальным редуктором 15 для ее быстрого перемещения вручную при установке образца. Механическое устройство для быстрого перемещения имеет и верхняя перекладина 4. Это устройство приводится в действие электродвигателем 8, соединенным через редуктор с гайками, установленными в перекладине 7. Последние втягивают винтовые тяги 6 и тем самым перемещают верхнюю перекладину 4.

При проведении лабораторной работы в захваты испытательной машины вставляется стальная полоса прямоугольного сечения, с двух сторон которой закреплены четыре датчика, по два с каждой стороны. Два датчика измеряют продольную деформацию, два – поперечную. Датчики могут быть механическими рычажного типа (ТР-1 или др.) или тензометрическими.

Опыт проводится на плоском образце из стали, имеющем прямоугольное поперечное сечение. Образец растягивается ступенчато возрастающей нагрузкой при упругих напряжениях на испытательной машине «Р-5» или «SZ-10» с использованием механического ручного привода. Для измерения упругих деформаций образца используются механические рычажные тензометры ТР-1. Измерение размеров образца производится штангенциркулем. С целью исключения влияния возможного внецентренного растяжения образца для измерения продольных и поперечных деформаций используются по два тензометра, установленных на противоположных сторонах образца. Показания каждой пары тензометров осредняются. Общий вид и схема рычажного тензометра ТР-1 показаны на рис. 4 и рис. 5. Тензометр при помощи трубки прижимается призмами 1 и 2 к образцу. Расстояние между ребрами призм является базой тензометра  $l_0$ , т.е. длиной волокна, удлинение которого измеряется. При растяжении образца и увеличении длины  $l_0$  на величину  $\Delta l_0$  подвижная призма 1 поворачивается вокруг верхнего ребра. Вместе с призмой поворачивается рычаг 5 и при помощи тяги 4 отклоняет стрелку 7, которая показывает на шкале 6 некоторый отсчет  $\Delta n = A \cdot \Delta l$ , пропорциональный удлинению  $\Delta l_0$ . Все детали тензометра смонтированы на жесткой рамке 3. Коэффициент

увеличения тензометра  $k = \frac{\Delta n}{\Delta l_0}$  определяется соотношением плеч рычагов:

$$k = \frac{h_2 \cdot h_4}{h_1 \cdot h_3}$$

Для рычажного тензометра ТР-1 коэффициент увеличения  $k = 1000$ , база  $l_0 = 20$  мм.

Для повышения точности отсчетов шкала прибора снабжена прорезью с зеркалом. При выполнении отсчетов глаз располагают так, чтобы стержень стрелки совпадал с его отражением в зеркале.

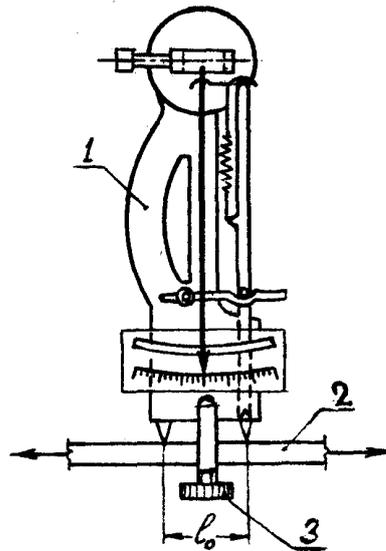


Рис. 4 Общий вид тензометра ТР-1:  
1 — тензометр; 2 — образец; 3 — струбцина.

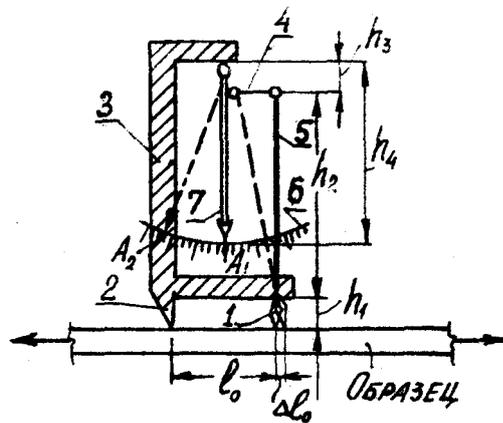


Рис. 5 Схема тензометра ТР-1: 1 — подвижная призма; 2 — неподвижная призма; 3 — рамка; 4 — тяга; 5 — рычаг; 6 — шкала; 7 — стрелка.

#### 4. Задание на работу

Нагружая стальной образец серией возрастающих нагрузок, необходимо определить относительные продольную и поперечную деформации образца, соответствующие заданному шагу нагружения, вычислить модуль упругости и коэффициент Пуассона стали. Полученные результаты должны быть сверены с табличными и выполнена оценка погрешности экспериментальных данных.

#### 5. Ход работы

5.1. Измерить поперечные размеры образца и вычислить площадь его поперечного сечения.

5.2. Ознакомиться с устройством и принципом действия тензометра ТР-1, с приемами его установки на испытуемом образце и методикой отсчета показаний по его шкале.

5.3. Установить на образец два тензометра для измерения продольных деформаций (вдоль оси образца) и два — для измерения поперечных деформаций (перпендикулярно к оси образца).

5.4. Установить образец в захваты испытательной машины.

5.5. Проверить готовность машины и тензометров к проведению испытания.

5.6. Используя ручной привод нагружающего устройства машины, сообщить образцу небольшую предварительную нагрузку  $P_1$ , обеспечивающую выборку зазоров машины и обжатие в захватах головок образца. При этой нагрузке произвести первые (начальные) отсчеты по всем тензометрам.

5.7. Используя ручной привод нагружающего устройства машины, плавно нагружать образец несколькими равными ступенями нагружения:  $\Delta P$ . На каждой ступени нагружения снимать отсчеты по всем тензометрам.

5.8. Наибольшая нагрузка  $P_{max}$  при испытании должна отвечать условию  $P_{max} < \sigma_{i\sigma} A_0$ . Для стали принять  $\sigma_{i\sigma} = 200$  МПа.

5.9. Плавно разгрузить образец, наблюдая за работой тензометров при разгрузке. После разгрузки до  $P < P_1$  повторно нагрузить образец до  $P = P_1$  и снять контрольные отсчеты по тензометрам.

5.10. Разгрузить образец, снять его с машины, снять тензометры с образца.

## 6. Содержание отчета

Отчет должен быть выполнен на типовом бланке (см. Приложение).

## 7. Список рекомендуемой литературы

1. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов / А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 13 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 292 с.

3. Анциферов С.В., Афанасова О.В., Деев П.В. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: компьютерные лабораторные работы: Учеб. пособие для самост. работы студентов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 78 с.

4. Павлов П.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев. – СПб.: Лань, 2003. – 528 с.

5. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Выща школа, 1986. – 479 с.

Бланк отчета по лабораторной работе № 3

Студент \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА СТАЛИ

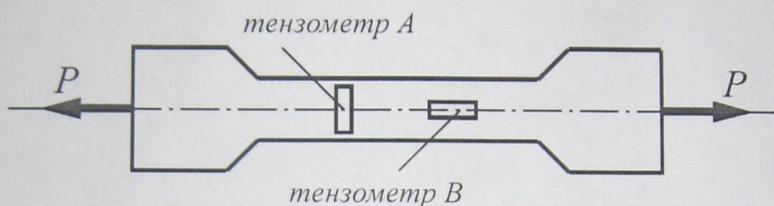
ЦЕЛЬ РАБОТЫ: для пластинки заданных размеров, ослабленной круговым отверстием и нагруженной растягивающей силой, построить эпюру нормальных напряжений в опасном сечении. Сравнить полученный коэффициент концентрации напряжений с табличным.

ДАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытательная машина **Р-5, стенд**  
 Размеры поперечного сечения образца  
 $d =$  мм,  $B =$  мм,

$A = Bd =$   
 Радиус отверстия  $R =$

СХЕМА УСТАНОВКИ ТЕНЗОМЕТРОВ



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Нагрузки, кН	$P$										$\Delta n_{cp}$
	$\Delta P$										
Отсчеты по тензометру А	$A$										
	$\Delta A$										
Отсчеты по тензометру В	$B$										
	$\Delta B$										

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

Средние относительные деформации на ступень нагружения:

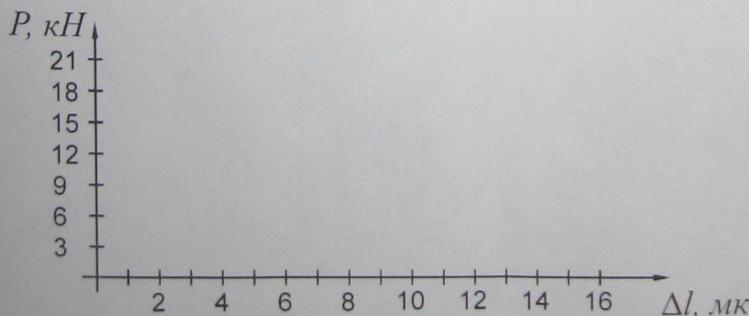
продольная  $\Delta \epsilon = \frac{\Delta n_{cp}}{K \cdot l_0} =$

поперечная  $\Delta \epsilon' = \frac{\Delta n'_{cp}}{K \cdot l_0} =$

Коэффициент Пуассона  $\mu = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right| =$

Модуль продольной упругости  $E = \frac{\Delta P}{A \cdot \Delta \epsilon} = \frac{\Delta P \cdot K \cdot l_0}{A \cdot \Delta n_{cp}} =$

ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЙ УЧАСТОК ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ



ВЫВОД:

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Кафедра механики материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 4  
«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ  
ПЛОСКОГО ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА»**

по дисциплине

**«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

Направления подготовки: 15.05.01, 17.05.01, 17.05.02, 21.05.04, 23.05.01,  
24.05.01, 24.05.02 – специалитет; 08.03.01, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.05,  
15.03.06, 22.03.01, 23.03.02, 24.03.02, 24.03.03, 28.03.02 – бакалавриат.  
Форма обучения – очная, заочная

Тула 2016

## 1. Цель и задачи лабораторной работы

Целью работы является экспериментальное исследование напряженного состояния балки при плоском поперечном изгибе и сравнение экспериментальных величин изгибных нормальных напряжений с результатами теоретических расчетов. В ходе лабораторной работы должны быть выполнены следующие задачи:

- 1) экспериментальное определение напряжений в заданных точках поперечного сечения стальной балки;
- 2) вычисление теоретических значений измеренных напряжений;
- 3) сравнение расчетных значений с опытными и определение погрешности измерений.

## 2. Основные теоретические сведения

При плоском поперечном изгибе в поперечных сечениях балки возникают нормальные и касательные напряжения. Определяющими прочностные свойства балки являются нормальные напряжения. Нормальные напряжения изменяются по высоте сечения балки по линейному закону

$$\sigma = \frac{M}{J_z} \cdot y,$$

где  $M$  – изгибающий момент в рассматриваемом поперечном сечении балки;  
 $J_z$  – момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси  $z$ ;  
 $y$  – расстояние от нейтральной оси до исследуемой точки сечения

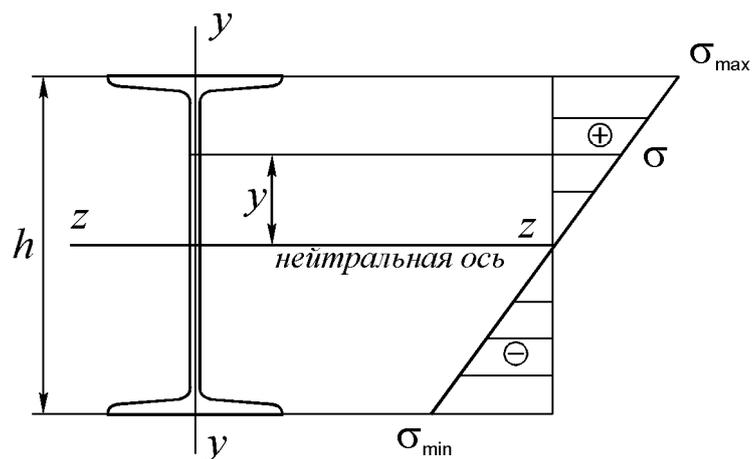


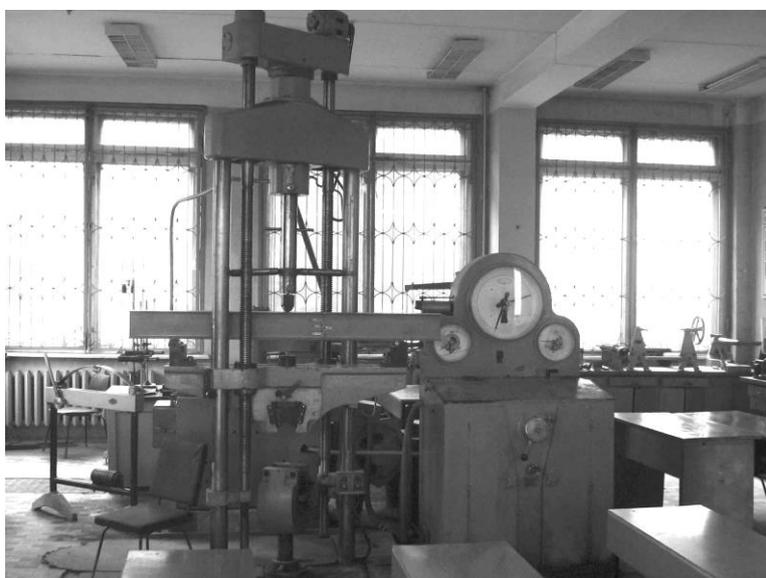
Рис. 1. Нормальные напряжения, возникающие в двутавровой балке при изгибе

На рис. 1 показана эпюра нормальных напряжений, действующих в некотором поперечном сечении двутавровой балки, в предположении, что

растянутые волокна расположены ниже нейтральной оси. Наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения действуют в контурных точках сечения, наиболее удаленных от нейтральной оси. Если сечение симметрично относительно нейтральной оси, то по модулю эти напряжения одинаковы.

### 3. Объекты исследования, оборудование материалы

Испытанию подвергается стальная балка двутаврового сечения, опирающаяся на две шарнирные опоры и нагружаемая сосредоточенной силой в середине пролета. Напряжения определяются в поперечном сечении, расположенном на расстоянии «а» от левой опоры, в пяти точках по высоте этого сечения. Испытание выполняется на универсальной гидравлической испытательной машине ГРМ-1 или УИМ-50.



а



б

Рис. 2. Внешний вид испытательных машин ГРМ-1 и УИМ-50

Схема универсальной измерительной машины УИМ-50 приведена на рис. 3. Массивное основание 16, жесткая поперечина 5 и направляющие колонны 3 составляют замкнутую силовую раму машины. На поперечине 5 установлен гидравлический цилиндр с поршнем 10. Поршень через шаровую опору соединен с перекладиной 7, к которой на двух винтовых тягах 6 подвешена жесткая верхняя перекладина 4. В центре перекладины 4 находится верхний захват для закрепления образца при растяжении и опора для установки образца при испытании на сжатие. Нижний захват для закрепления образца установлен на нижней жесткой перекладине 1. Рабочее усилие создается гидроцилиндром, в который подается масло под давлением, создаваемым специальным гидронасосом 14. Поршень гидроцилиндра перемещает перекладину 7 вверх и через тяги 6 – верхнюю рабочую перекладину 4 с верхним захватом, вследствие чего образец растягивается.

При установке образца 2 на опору верхней переключины 4 образец испытывает сжатие, осуществляемое штемпелем поперечины 5. При работе машины часть масла отводится в гидроцилиндр 13 маятникового силоизмерителя 11. На силоизмерителе установлен диаграммный аппарат 12 для записи автодиаграммы растяжения или сжатия. При установке на верхней переключине 4 специальных опор можно осуществлять испытания образцов на изгиб.

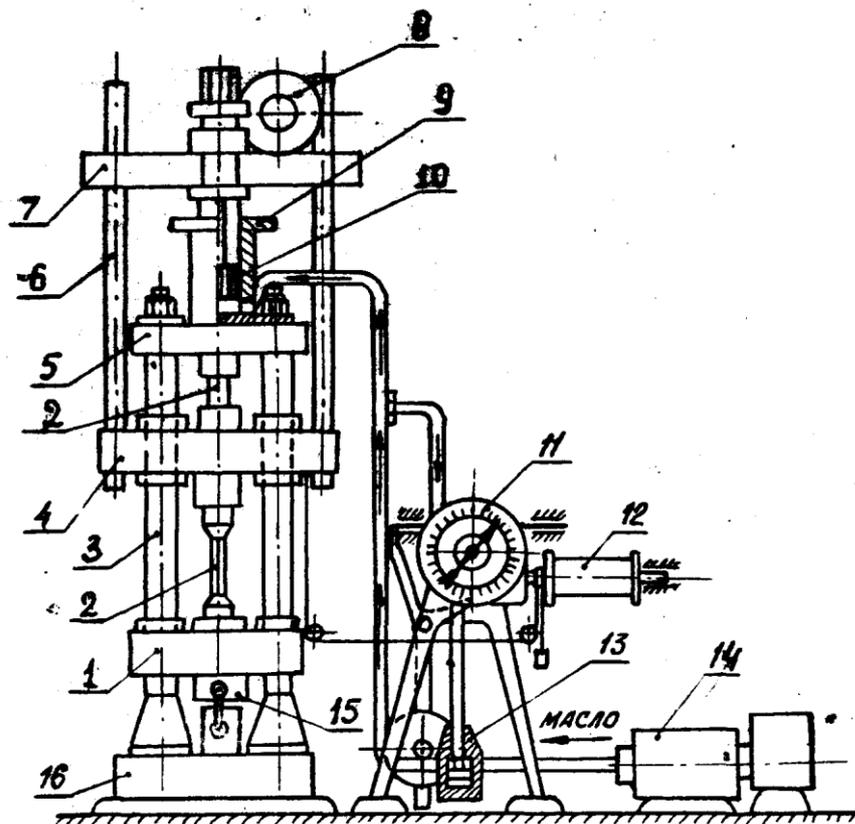
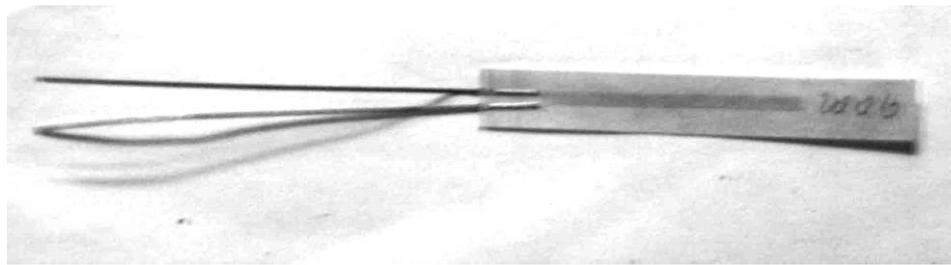


Рис. 3. Схема универсальной испытательной машины: 1 – нижняя переключина; 2 – образец; 3 – направляющая колонна; 4 – верхняя переключина; 5 – поперечина; 6 – винтовая тяга; 7 – переключина; 8 – электродвигатель; 9 – гидравлический цилиндр; 10 – поршень; 11 – силоизмеритель; 12 – диаграммный аппарат; 13 – гидроцилиндр силоизмерителя; 14 – гидронасос; 15 – редуктор; 16 – основание.

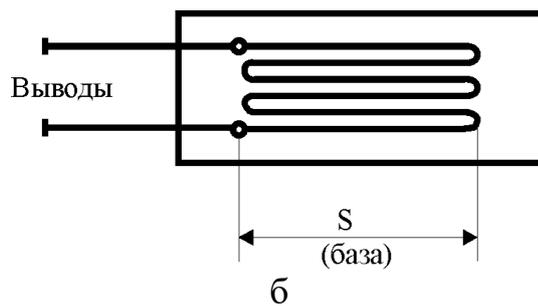
Нижняя переключина 1, неподвижная при испытании, снабжена специальным редуктором 15 для ее быстрого перемещения вручную при установке образца. Механическое устройство для быстрого перемещения имеет и верхняя переключина 4. Это устройство приводится в действие электродвигателем 8, соединенным через редуктор с гайками, установленными в переключине 7. Последние втягивают винтовые тяги 6 и тем самым перемещают верхнюю переключину 4.

Тензорезистор представляет собой проводник в виде нескольких петель проволоки с высоким сопротивлением — константана, нихрома, манганина и

т.п., диаметром  $0,01 \div 0,03$  мм, заклеенный между двумя слоями тонкой бумаги или пленки (рис. 4). Размер резистора  $S$  называют базой.



а



б

Рис. 4. Тензорезистор: а – внешний вид, б – схема

Тензорезистор наклеивается на поверхность балки так, чтобы его база совпадала с направлением измеряемой деформации. При изгибе балки ее продольные волокна растягиваются или сжимаются. Вместе с ними деформируется проволока тензорезистора. В результате этого изменяется омическое сопротивление тензорезистора. При упругих деформациях изменение сопротивления тензодатчика прямо пропорционально изменению длины проволоки, т.е. деформации продольных волокон балки. Для измерения величины изменения сопротивления датчика он включается в схему уравновешенного мостика Уинстона (рис. 5).

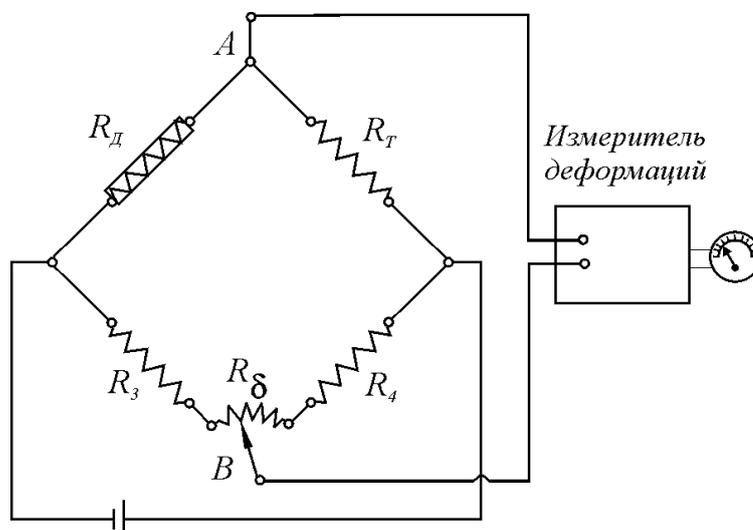


Рис. 5. Принципиальная схема измерителя деформаций

Внешний вид измерителей деформации ИД-70 и ИТЦ-1 показан на рис. 6 а, б.



а



б

Рис. 6. Измерители деформаций: а – ИД-70, б – ИТЦ-1

Плечами мостика являются сопротивления:  $R_A$  – рабочий датчик;  $R_T$  – датчик температурной компенсации;  $R_3 = R_4$  – балансные сопротивления. Между сопротивлениями  $R_3$  и  $R_4$  включается регулировочный реохорд  $R_d$  для тонкой балансировки мостика. Датчик температурной компенсации

представляет собой такой же проволочный резистор, как и рабочий датчик. Его наклеивают на стальную пластинку и последнюю помещают рядом с балкой. Этим обеспечивается равенство температурных условий для сопротивлений  $R_A$  и  $R_T$  и отсутствие разбалансировки мостика при изменении температуры. При помощи реохорда  $R_d$  мостик балансируется так, чтобы в измерительной диагонали АВ ток отсутствовал. При деформации балки сопротивление рабочего тензорезистора  $R_A$  изменяется, баланс мостика нарушается и в измерительной диагонали АВ появляется ток. Этот ток подается на усилитель тензостанции и регистрируется измерительным прибором — миллиамперметром, входящим в состав этой тензостанции.

Предварительно тензодатчики используемой партии одного изготовления выборочно тарируют при помощи специальной тарировочной балки и той же тензостанции. При тарировке определяется цена деления регистрирующего прибора тензостанции для этих датчиков  $k = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta n}$ . Тогда величина деформации исследуемого волокна балки определяется соотношением  $\Delta \varepsilon = k \Delta n$ , где  $\Delta n$  — число делений шкалы регистрирующего прибора тензостанции, полученное при испытании.

#### 4. Задание на работу

Нагружая двутавровую балку серией возрастающих нагрузок, необходимо определить напряжения в пяти характерных точках заданного поперечного сечения балки. Полученные результаты должны быть сверены с расчетными, и выполнена оценка погрешности экспериментальных данных. Также необходимо построить эпюры распределения экспериментальных и расчетных напряжений по высоте балки.

#### 5. Ход работы

5.1. Ознакомиться со схемой нагружения балки и положением исследуемых точек 1÷5.

5.2. Ознакомиться с устройством и принципом действия тензорезисторов, способом их наклейки, схемой включения в измерительную цепь, с устройством и принципом работы тензостанции ИД-70.

5.3. Вычислить для исследуемого сечения балки изгибающий момент  $\Delta M$ , соответствующий выбранной ступени нагружения  $\Delta P$ .

5.4. Вычислить расчетные величины нормальных напряжений в исследуемых точках сечения ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) на ступень нагружения

$$\sigma_i = \frac{\Delta M}{J_z} \cdot y_i.$$

5.5. Проверить готовность испытательной машины и измерительной аппаратуры к проведению эксперимента.

5.6. Включить измеритель деформаций ИД-70 и провести балансировку мостовых схем датчиков, измеряющих деформации продольных волокон балки.

5.7. Включить испытательную машину и нагружать балку медленно возрастающей нагрузкой. При начальной нагрузке  $P_0 = 20 \div 30 \text{ kH}$ ; проверить и, при необходимости, вновь провести балансировку схем всех датчиков, и снять по всем датчикам первые отсчеты.

5.8. Медленно нагружать балку несколькими равными ступенями нагрузки  $\Delta P = 30 \text{ kH}$  и на каждой ступени нагружения снимать отсчеты по всем датчикам, производя их поочередной «опрос».

5.9. Разгрузить балку до начальной нагрузки  $P_0$  и снять контрольные отсчеты по всем датчикам.

5.10. Выключить испытательную машину и измеритель деформаций.

## **6. Содержание отчета**

Отчет должен быть выполнен на типовом бланке (см. Приложение).

## **7. Список рекомендуемой литературы**

1. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов / А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 13 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 292 с.

3. Анциферов С.В., Афанасова О.В., Деев П.В. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: компьютерные лабораторные работы: Учеб. пособие для самост. работы студентов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 78 с.

4. Павлов П.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев. – СПб.: Лань, 2003. – 528 с.

5. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Выща школа, 1986. – 479 с.

Бланк отчета по лабораторной работе № 4

Студент \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ПЛОСКОГО ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА

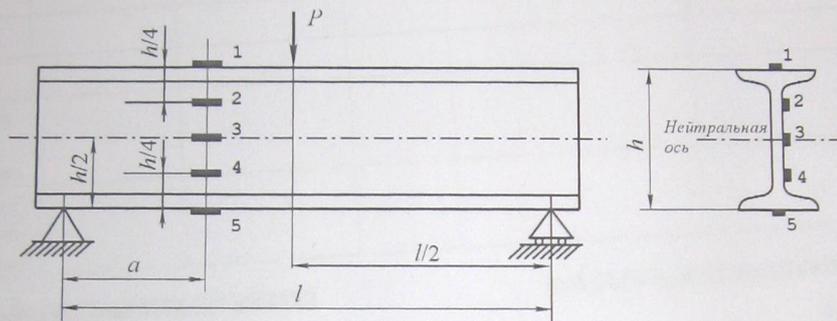
ЦЕЛЬ РАБОТЫ: опытная проверка теоретического закона распределения нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балки.

ДАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытательная машина ГРМ-1  
Измеритель деформаций ИТЦ-1, ИД-70  
База тензодатчиков 20 мм  
Сопrotивление, Ом 200  
Форма поперечного сечения балки двутавр

Номер профиля  
Момент инерции  $J_x = 873 \text{ см}^3$   
Модуль упругости стали  $E = 2,1 \times 10^5 \text{ МПа}$   
Пролет балки, м  $l = 1,3 \text{ м}$   
Коэффициент увеличения  $K =$

СХЕМА НАГРУЖЕНИЯ БАЛКИ



Координаты исследуемого сечения  
 $a = 0,5 \text{ м}$   
Изгибающий момент на ступень нагружения  
 $\Delta M = \frac{P \cdot a}{2}$

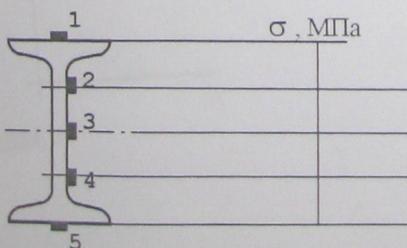
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

№ отсч.	Нагрузка		Отсчеты по прибору										
			Датчик 1		Датчик 2		Датчик 3		Датчик 4		Датчик 5		
			$n_1$	$\Delta n_1$	$n_2$	$\Delta n_2$	$n_3$	$\Delta n_3$	$n_4$	$\Delta n_4$	$n_5$	$\Delta n_5$	
1													
2													
3													
4													
Средние значения $\Delta n_i$			$\Delta n_1 =$		$\Delta n_2 =$		$\Delta n_3 =$		$\Delta n_4 =$		$\Delta n_5 =$		

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

Экспериментальные значения напряжений (МПа) $\sigma_i^{(on)} = \varepsilon_i \cdot E = \Delta n_i \cdot k \cdot E$	$\sigma_1^{(on)}$	$\sigma_2^{(on)}$	$\sigma_3^{(on)}$	$\sigma_4^{(on)}$	$\sigma_5^{(on)}$
Расчетные напряжения на ступень нагружения (МПа) $\sigma_i^{(p)} = \frac{\Delta M \cdot y}{J_x}$	$\sigma_1^{(p)}$	$\sigma_2^{(p)}$	$\sigma_3^{(p)}$	$\sigma_4^{(p)}$	$\sigma_5^{(p)}$
Сравнение расчетных и опытных величин $\Delta_i = \left  \sigma_i^{(p)} - \sigma_i^{(on)} \right  / \sigma_i^{(p)} \cdot 100\%$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_4$	$\Delta_5$	

ЭПЮРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ВЫСОТЕ СЕЧЕНИЯ



ВЫВОД:

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Кафедра механики материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 5**

**«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
МОДУЛЯ СДВИГА СТАЛИ»**

по дисциплине

**«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

Направления подготовки: 15.05.01, 17.05.01, 17.05.02, 21.05.04, 23.05.01,  
24.05.01, 24.05.02 – специалитет; 08.03.01, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.05,  
15.03.06, 22.03.01, 23.03.02, 24.03.02, 24.03.03, 28.03.02 – бакалавриат.  
Форма обучения – очная, заочная

Тула 2016

## 1. Цель и задачи лабораторной работы

Целью работы является экспериментальное определение модуля сдвига стали. В ходе лабораторной работы должны быть выполнены следующие задачи:

- 1) экспериментальное определение угла закручивания участка стального вала при его скручивании рядом возрастающих нагрузок;
- 2) определение модуля сдвига стали на основе экспериментальных данных;
- 3) сравнение значения модуля сдвига, полученного экспериментально, с табличным значением;
- 4) построение диаграммы закручивания.

## 2. Основные теоретические сведения

При кручении бруса кругового сечения в поперечных и продольных диаметральных сечениях действуют только касательные напряжения. Материал испытывает напряженное состояние чистого сдвига. На начальной стадии деформирования при чистом сдвиге для большинства конструкционных материалов справедлив закон Гука  $\tau = G \cdot \gamma$ ,

где  $\tau$  — касательное напряжение на площадках чистого сдвига;

$\gamma$  — угловая деформация (угол сдвига);

$G$  — модуль упругости при сдвиге или модуль упругости второго рода.

Закон Гука при сдвиге в случае кручения можно представить в виде

$$\varphi = \frac{M_k \cdot l}{G \cdot J_p},$$

где  $\varphi$  — угол закручивания;  $M_k$  — крутящий момент;

$l$  — длина, на которой измеряется угол закручивания;

$J_p$  — полярный момент инерции поперечного сечения бруса.

Зная размеры образца, задавая крутящий момент и измеряя угол закручивания, можно экспериментально определить модуль упругости при сдвиге для исследуемого материала.

## 3. Объекты исследования, оборудование материалы

Испытанию на кручение подвергается стальной образец кругового поперечного сечения. Испытание выполняется на испытательной машине К-50. Для измерения углов поворота поперечных сечений образца используются зеркальные тензометры. Схема машины К-50 показана на рис. 1. Электродвигатель 1 через редуктор 2 приводит во вращение вал 3,

передающий вращение через две шестеренки каретки 4 левому захвату 5. Образец 6 закрепляется в захватах 5 и 7. Правый захват 7, жестко соединенный с маятником 8 силоизмерителя, может свободно перемещаться во время испытания вдоль оси машины. Каретка 4 с левым захватом 5 имеет возможность продольного перемещения при установке образца. Величина крутящего момента определяется по шкале 10 силоизмерителя.

На машине имеется устройство 9 для ручного привода силового редуктора. Машина снабжена специальным устройством для отсчета углов закручивания образца, а также диаграммным аппаратом для автоматической записи диаграммы кручения. На машине К-50 возможно испытание образцов, имеющих диаметр до 25 мм и длину до 700 мм. Наибольший крутящий момент 500 Нм.

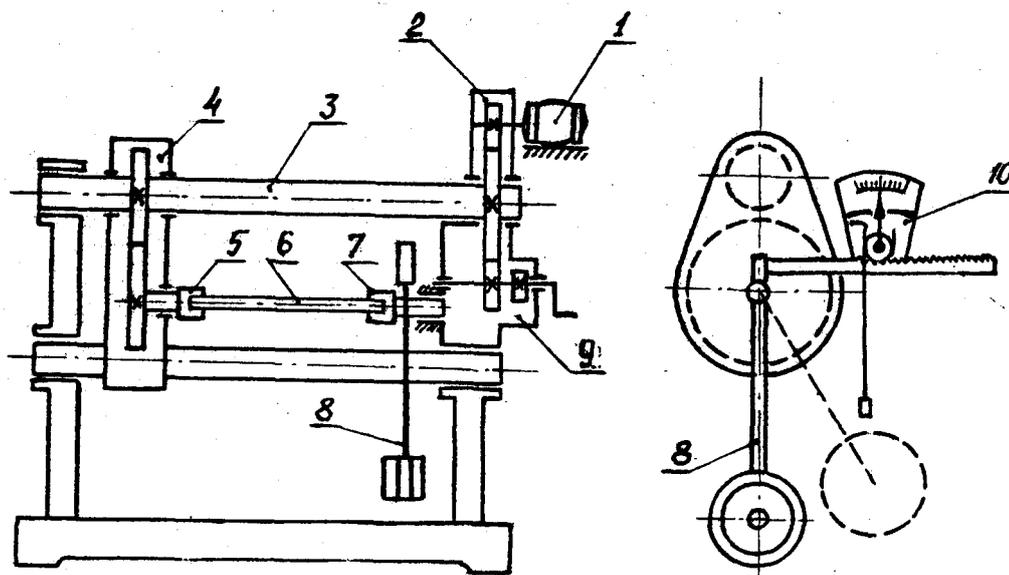


Рис. 1. Схема испытательной машины К-50: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – вал; 4 – каретка; 5, 7 – захваты; 6 – образец; 8 – маятник силоизмерителя; 9 – ручной привод; 10 – шкала силоизмерителя

На рис. 2 показана фотография испытательной машины АМ-1, имеющей аналогичное устройство.



Рис. 2. Испытательная машина АМ-1

Схема зеркального тензометра для измерения угловых перемещений приведена на рис. 2. В сечении, перемещение которого необходимо определить, при помощи струбцины прикрепляется стержень с зеркалом 1. Против зеркала на расстоянии  $L$  устанавливается шкала 3 с миллиметровыми делениями. Рядом со шкалой помещается зрительная труба 4. В начальном положении при помощи волоска окуляра зрительной трубы производят отсчет  $A_1$  по шкале, отраженной в зеркале 1. При повороте сечения образца на угол  $\varphi$  на такой же угол повернется зеркало 1 и в окуляре зрительной трубы против волоска окажется деление  $A_2$  отсчетной шкалы. Разность отсчетов  $\Delta A = A_2 - A_1$  — пропорциональна углу поворота сечения.

Из рис. 22 следует:  $\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\Delta A}{L} = \frac{A_2 - A_1}{L}$ .

Так как при упругих деформациях углы поворота сечений образца имеют малую величину, то  $\operatorname{tg} 2\varphi = 2\varphi$  и, следовательно,  $\varphi = \frac{\Delta A}{2L}$ .



Рис. 3. Схема установки зеркального тензометра: 1, 2 — зеркала; 3 — шкала; 4 — зрительная труба.

Величина  $2L$  является коэффициентом увеличения тензометра. Эту величину для тензометра данной конструкции можно менять, выбирая различную длину  $L$  при установке прибора. Для определения угла закручивания образца необходимо измерять углы поворота двух поперечных сечений. Поэтому на образце устанавливаются два зеркала 1 и 2 на расстоянии  $l$  друг от друга, а против каждого зеркала на расстоянии  $L$  устанавливают его отсчетную шкалу (рис.2). Расстояние  $l$ , на котором определяют угол закручивания образца, является базой зеркального тензометра.

#### 4. Задание на работу

Нагружая стальной вал серией возрастающих скручивающих моментов, необходимо определить напряжения углы закручивания расчетного участка вала. Полученные значения следует усреднить и на их основе найти модуль сдвига стали. Полученный результат должен быть сверен с табличным, должна быть выполнена оценка погрешности экспериментальных данных. Также необходимо построить график изменения угла закручивания в зависимости от действующего крутящего момента.

#### 5. Ход работы

5.1 Ознакомиться с устройством машины К-50, с устройством , принципом действия и схемой установки зеркальных тензометров для измерения углов поворота сечений образца.

5.2 Измерить диаметр образца и вычислить полярный момент инерции его поперечного сечения.

5.3 Проверить готовность к испытанию испытательной машины и зеркальных тензометров.

5.4 Используя ручной привод нагружающего устройства машины, нагрузить образец начальным крутящимся моментом  $M_{k1}$  ( $\tau = 20 \div 30$ )  $M\ddot{I}$   $\dot{a}$  и произвести первый отсчет по зеркальным тензометрам.

5.5 Нагружать при помощи ручного привода образец несколькими равными ступенями крутящегося момента  $\Delta M_k$ , снимая на каждой ступени нагружения отсчеты по тензометрам. При нагружении необходимо выполнять условие  $\tau < \tau_{i\ddot{o}}$ .

5.6 Разгрузить образец до  $M_k < M_{k1}$ , затем повторно нагрузить его до  $M_k = M_{k1}$  и снять контрольные отсчеты по тензометрам.

## 6. Содержание отчета

Отчет должен быть выполнен на типовом бланке (см. Приложение).

## 7. Список рекомендуемой литературы

1. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов / А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 13 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 292 с.

3. Анциферов С.В., Афанасова О.В., Деев П.В. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: компьютерные лабораторные работы: Учеб. пособие для самост. работы студентов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 78 с.

4. Павлов П.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев. – СПб.: Лань, 2003. – 528 с.

5. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Выща школа, 1986. – 479 с.

Бланк отчета по лабораторной работе № 5

Студент \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА СТАЛИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: опытная проверка закона Гука при кручении, определение модуля упругости при сдвиге.

ДАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытательная машина

Коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$

Тензометры

Диаметр образца  $d =$

Расстояние между сечениями (база), мм  $l =$

Расстояние между зеркалом и шкалой, мм  $L =$

Полярный момент инерции сечения  $J_p = \frac{\pi d^4}{32} =$

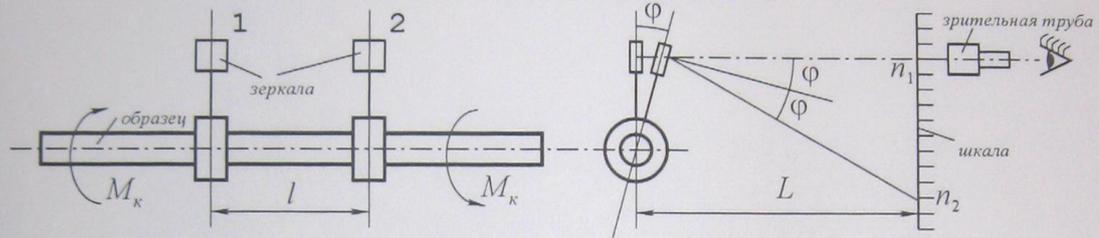
Коэффициент увеличения  $K = 2L$

Материал образца

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

Модуль упругости материала  $E = 2 \times 10^5$  МПа

СХЕМА УСТАНОВКИ ТЕНЗОМЕТРОВ



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

№ отсч.	Крутящий момент $M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	Приращение крутящего момента $\Delta M_k, \text{Н} \cdot \text{м}$	Отсчет по приборам		Приращение отсчета		Разность приращений $\Delta n_2 - \Delta n_1$	Угол закручивания $\varphi = \frac{\Delta n_2 - \Delta n_1}{2L}$
			$n_1$	$n_2$	$\Delta n_1$	$\Delta n_2$		
1								
2								
3								
4								
5								

$\Delta \varphi_{cp} =$

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЯ

Опытное значение модуля упругости при сдвиге

Расхождение опытной и расчетной величин

$$G = \frac{\Delta M_k \cdot l}{\Delta \varphi_{cp} \cdot J_p} =$$

$$\Delta = \frac{G_{оп} - G}{G} \cdot 100\% =$$

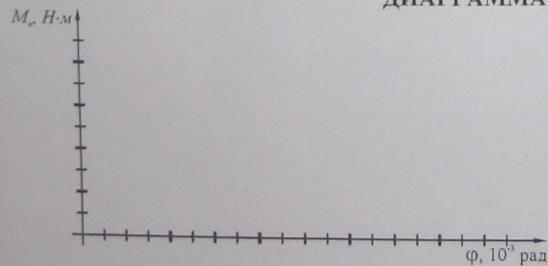
Расчетное значение модуля упругости при сдвиге

Максимальные напряжения в образце

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

$$\tau_{max} = \frac{M_k^{max}}{W_p} =$$

ДИАГРАММА КРУЧЕНИЯ



ВЫВОД:

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Кафедра механики материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 6**

**«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ»**

по дисциплине

**«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

Направления подготовки: 15.05.01, 17.05.01, 17.05.02, 21.05.04, 23.05.01,  
24.05.01, 24.05.02 – специалитет; 08.03.01, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.05,  
15.03.06, 22.03.01, 23.03.02, 24.03.02, 24.03.03, 28.03.02 – бакалавриат.  
Форма обучения – очная, заочная

Тула 2016

## 1. Цель и задачи лабораторной работы

Целью работы является экспериментальное определение величины и направления перемещения свободного конца консольной балки при косом изгибе и сравнение полученных результатов с расчетными данными.

В ходе лабораторной работы должны быть выполнены следующие задачи:

- 1) экспериментальное определение вертикальной и горизонтальной компонент перемещения конца балки;
- 2) определение величины и направления перемещения;
- 3) теоретический расчет величины и направления перемещения;
- 4) сравнение экспериментальных данных с расчетными, определение погрешности.

## 2. Основные теоретические сведения

Косым или сложным называют изгиб, при котором силовая плоскость, в которой расположены внешние силы, изгибающие брус, не совпадает ни с одной из его главных центральных плоскостей. Разложением внешних сил по главным центральным осям соответствующих поперечных сечений балки косой изгиб приводится к геометрической сумме двух плоских изгибов, происходящих в главных центральных плоскостях балки. При косом изгибе нейтральная ось поперечного сечения балки не перпендикулярна к силовой плоскости. Плоскость изгиба, располагающаяся перпендикулярно к нейтральному слою, не совпадает с силовой плоскостью (рис. 10). Различие между углами наклона силовой плоскости и плоскости изгиба по отношению к главной центральной плоскости наибольшей изгибной жесткости балки тем больше, чем больше различие между главными центральными моментами инерции поперечного сечения балки. Направление прогиба поперечного сечения балки при косом изгибе перпендикулярно к нейтральной оси этого сечения. Для вычисления напряжений и перемещений при косом изгибе используют принцип независимости действия сил.

## 3. Объекты исследования, оборудование материалы

Опыт проводится на специальной установке для изгиба. Испытанию подвергается стальная балка прямоугольного сечения, закрепленная по схеме простой консоли и нагружаемая в свободном концевом сечении вертикальной сосредоточенной силой. Главная центральная плоскость наибольшей изгибной жесткости балки образует с силовой вертикальной плоскостью угол  $\beta$  (рис. 1). Нагружение балки производится гириями на специальной подвеске. При опытном определении прогиба  $f$  свободного концевом сечения балки измеряются его вертикальная и горизонтальная составляющие —  $f_a$  и  $f_{\bar{a}}$ .

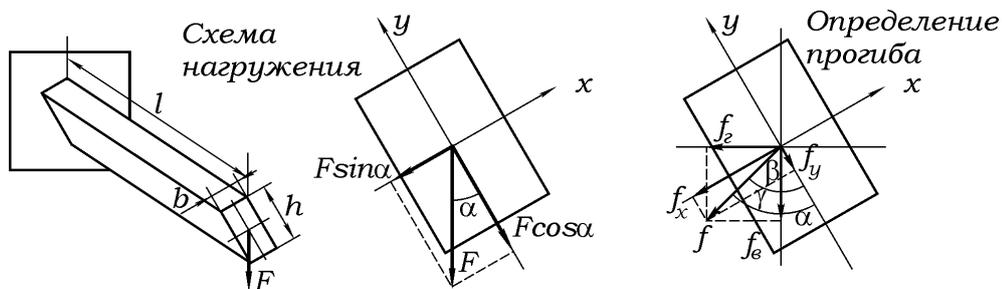


Рис. 1. Схема проведения испытания

$\alpha$  - угол между силовой плоскостью и плоскостью наибольшей жесткости;  
 $\beta$  - угол между направлением прогиба и плоскостью наибольшей жесткости;  
 $\gamma$  - угол между направлением прогиба и вертикалью.

Для измерения прогибов используются стрелочные индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм.

#### 4. Задание на работу

Нагружая двутавровую балку серией возрастающих нагрузок, необходимо определить напряжения в пяти характерных точках заданного поперечного сечения балки. Полученные результаты должны быть сверены с табличными и выполнена оценка погрешности экспериментальных данных. Также необходимо построить эпюры распределения экспериментальных и расчетных напряжений по высоте балки.

#### 5. Ход работы

5.1. Ознакомьтесь со схемой закрепления и нагружения балки, с обозначением составляющих расчетного прогиба и с обозначением составляющих опытной величины прогиба, а также со схемой измерения опытных составляющих прогиба (рис. 1).

5.2. Вычислить расчетную величину прогиба и угла, определяющего направление прогиба, используя известные формулы для прогиба консольной балки при плоском изгибе

$$f_y = \frac{P \cdot \cos \varphi \cdot l^3}{3EJ_x}; \quad f_x = \frac{P \cdot \sin \varphi \cdot l^3}{3EJ_y}; \quad f = \sqrt{f_y^2 + f_x^2}; \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{f_x}{f_y};$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{f_x}{f_y},$$

где  $J_x = \frac{bh^3}{12}; J_y = \frac{hb^3}{12}.$

5.3. Проверить готовность лабораторной установки и измерительных приборов к проведению опыта.

5.4. Записать начальные показания индикаторов, измеряющих горизонтальное и вертикальное перемещения свободного сечения балки, при отсутствии нагрузки.

5.5. Нагрузить балку вертикальной нагрузкой  $P$  и записать показания индикаторов, измеряющих вертикальное и горизонтальное перемещения свободного сечения балки.

5.6. Разгрузить балку, сняв груз  $P$ , и записать контрольные показания индикаторов при отсутствии нагрузки.

## **6. Содержание отчета**

Отчет должен быть выполнен на типовом бланке (см. Приложение).

## **7. Список рекомендуемой литературы**

1. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов / А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 13 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 292 с.

3. Анциферов С.В., Афанасова О.В., Деев П.В. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: компьютерные лабораторные работы: Учеб. пособие для самост. работы студентов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 78 с.

4. Павлов П.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев. – СПб.: Лань, 2003. – 528 с.

5. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Выща школа, 1986. – 479 с.

Бланк отчета по лабораторной работе № 6

Студент \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6**

**ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ**

Цель работы: экспериментальная проверка теории расчета прогибов балки при косом изгибе

**ДАнные ИСПЫТАНИЯ**

Тип балки: консольная  
 Длина консоли  $l =$  \_\_\_\_\_  
 Размеры прямоугольного сечения  $b =$  \_\_\_\_\_ см,  $h =$  \_\_\_\_\_ см  
 Материал балки: сталь  
 Модуль упругости материала балки  $E = 2 \times 10^5$  МПа  
 Нагрузка  $P =$  \_\_\_\_\_ Н  
 Угол наклона силовой плоскости  $\alpha =$  \_\_\_\_\_  
 Измерительная аппаратура: индикатор часового типа  
 Коэффициент увеличения аппаратуры  $K = 100$

**СХЕМА ИСПЫТАНИЯ**

$\alpha$  - угол между силовой плоскостью и плоскостью наибольшей жесткости;  
 $\beta$  - угол между направлением прогиба и плоскостью наибольшей жесткости;  
 $\gamma$  - угол между направлением прогиба и вертикалью.

**РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ПРОГИБА СВОБОДНОГО СЕЧЕНИЯ БАЛКИ:**

Моменты инерции

$$J_x = \frac{bh^3}{12} = \quad \quad \quad J_y = \frac{hb^3}{12} =$$

Проекции прогиба на конце балки на координатные оси

$$f_x = \frac{P \sin \alpha \cdot l^3}{3EJ_y} = \quad \quad \quad f_y = \frac{P \cos \alpha \cdot l^3}{3EJ_x} =$$

Стрела прогиба

$$f^{(p)} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} =$$

Направление прогиба

$$\operatorname{tg} \beta^{(p)} = \frac{f_x}{f_y} = \quad \quad \quad \beta^{(p)} =$$

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ**

Показания индикаторов		Опытные значения перемещений, мм	
Горизонтальное перемещение	Вертикальное перемещение	$f_G$	$f_B$

**ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА**

Опытная величина прогиба свободного сечения балки

$$f^{(on)} = \sqrt{f_G^2 + f_B^2} =$$

Направление прогиба

$$\operatorname{tg} \gamma^{(on)} = \frac{f_G}{f_B} = \quad \quad \quad \gamma^{(on)} =$$

$$\beta^{(on)} = \gamma^{(on)} + \alpha =$$

Расхождение между опытными и расчетными величинами

$$\Delta_f = \frac{f^{(p)} - f^{(on)}}{f^{(p)}} \cdot 100\% = \quad \quad \quad \Delta_\beta = \frac{\beta^{(p)} - \beta^{(on)}}{\beta^{(p)}} \cdot 100\% =$$

ВЫВОДЫ:

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Кафедра механики материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 7**

**«ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ  
ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ»**

по дисциплине

**«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

Направления подготовки: 15.05.01, 17.05.01, 17.05.02, 21.05.04, 23.05.01,  
24.05.01, 24.05.02 – специалитет; 08.03.01, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.05,  
15.03.06, 22.03.01, 23.03.02, 24.03.02, 24.03.03, 28.03.02 – бакалавриат.  
Форма обучения – очная, заочная

Тула 2016

## 1. Цель и задачи лабораторной работы

Целью работы является экспериментальное определение напряжений в поперечном сечении внецентренно растянутого бруса и сравнение полученных результатов с теоретическими. В ходе лабораторной работы должны быть выполнены следующие задачи:

- 1) экспериментальное определение напряжений в заданных точках поперечного сечения стального бруса;
- 2) вычисление теоретических значений измеренных напряжений;
- 3) сравнение расчетных значений с опытными и определение погрешности измерений.

## 2. Основные теоретические сведения

Внецентренное растяжение (сжатие) прямого бруса возникает при действии растягивающих (сжимающих) продольных сил, линия действия которых параллельна продольной оси бруса. В общем случае внецентренное растяжение (сжатие) бруса приводится к комбинации одновременно действующих осевого растяжения (сжатия) и чистого косоугольного изгиба. Если силовая плоскость, образуемая линией действия растягивающих сил и продольной осью бруса, совпадает с главной центральной плоскостью бруса, то внецентренное растяжение приводится к осевому растяжению и чистому плоскому изгибу. Схема испытания показана на рис. 1.

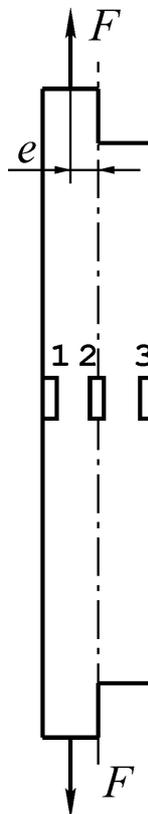


Рис. 1. Схема испытания

В таком случае, используя принцип независимости действия сил, напряжения в поперечном сечении бруса можно определить алгебраическим суммированием напряжений, обусловленных продольной силой и изгибающим моментом.

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_N = \frac{M_y \cdot x}{J_y} + \frac{N}{A} = \frac{P \cdot e \cdot x}{J_y} + \frac{P}{A},$$

где  $M_y = P \cdot e$  – изгибающий момент, действующий вокруг оси  $y$ ;  $N = P$  – продольная сила.

В рассматриваемом случае нагружения бруса нейтральная ось располагается перпендикулярно к силовой плоскости.

Наибольшие растягивающие и сжимающие напряжения действуют в точках сечения 1, 2, наиболее удаленных от нейтральной оси.

$$\sigma_{(1,2)} = \pm \frac{M_y}{W_y} + \frac{P}{A}.$$

В точках главной центральной оси  $y$  (оси симметрии сечения) действуют только напряжения, обусловленные продольной силой.

Все поперечные сечения бруса равноопасны.

### 3. Объекты исследования, оборудование материалы

Опыт проводится на стальном образце прямоугольного поперечного сечения, на испытательной машине Р-5, с использованием механического привода, работающего от руки. Растягивающая сила, имеющая эксцентриситет «е», действует в главной центральной плоскости *хоз*. Для измерения упругих деформаций образца используются рычажные тензометры ТР-1. Нагружение образца в упругой области производится несколькими равными ступенями  $\Delta P$ .

Показания каждой пары тензометров осредняются. Общий вид и схема рычажного тензометра ТР-1 показаны на рис. 2 и рис. 3. Тензометр при помощи струбцины прижимается призмами 1 и 2 к образцу. Расстояние между ребрами призм является базой тензометра  $l_0$ , т.е. длиной волокна, удлинение которого измеряется. При растяжении образца и увеличении длины  $l_0$  на величину  $\Delta l_0$  подвижная призма 1 поворачивается вокруг верхнего ребра. Вместе с призмой поворачивается рычаг 5 и при помощи тяги 4 отклоняет стрелку 7, которая показывает на шкале 6 некоторый отсчет  $\Delta n = A\tau A_1$ , пропорциональный удлинению  $\Delta l_0$ . Все детали тензометра

смонтированы на жесткой рамке 3. Коэффициент увеличения тензометра

$k = \frac{\Delta l}{\Delta l_0}$  определяется соотношением плеч рычагов:

$$k = \frac{h_2 \cdot h_4}{h_1 \cdot h_3}.$$

Для рычажного тензометра ТР-1 коэффициент увеличения  $k = 1000$ , база  $l_0 = 20$  мм.

Для повышения точности отсчетов шкала прибора снабжена прорезью с зеркалом. При выполнении отсчетов глаз располагают так, чтобы стержень стрелки совпадал с его отражением в зеркале.

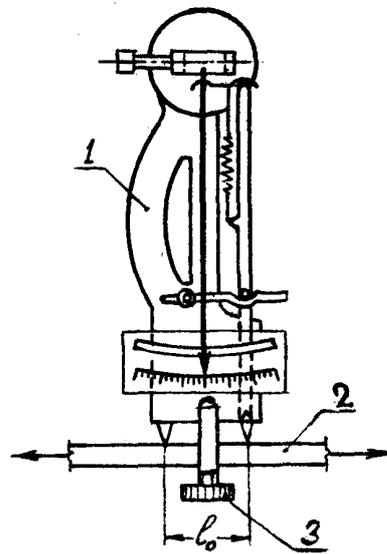


Рис. 2 Общий вид тензометра ТР-1:  
1 — тензометр; 2 — образец; 3 — струбцина.

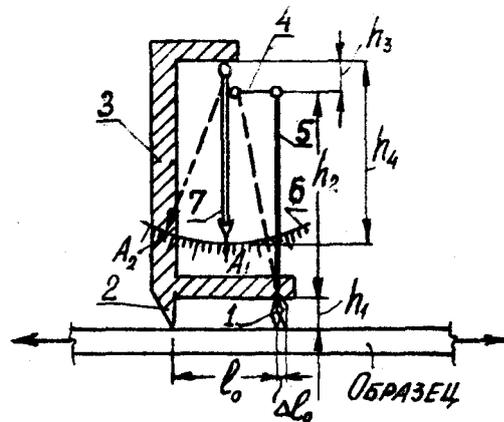


Рис. 3. Схема тензометра ТР-1: 1 — подвижная призма; 2 — неподвижная призма; 3 — рамка; 4 — тяга; 5 — рычаг; 6 — шкала; 7 — стрелка.

#### 4. Задание на работу

Нагружая брус серией возрастающих нагрузок, необходимо определить напряжения в трех характерных точках поперечного сечения бруса. Далее должны быть найдены расчетные значения напряжений в указанных точках, и выполнено сравнение результатов. Также необходимо построить эпюры распределения экспериментальных и расчетных напряжений по ширине бруса..

#### 5. Ход работы

5.1. Ознакомиться со схемой нагружения образца и установки тензометров.

5.2. Вычислить расчетные величины нормальных напряжений в исследуемых точках 1, 2, 3 поперечного сечения (рис. 12) на ступень нагружения

$$\sigma_{(1,2)} = \pm \frac{\Delta M}{W_y} + \frac{\Delta P}{A}, \quad \sigma_{(3)} = \frac{\Delta P}{A},$$

где  $\Delta M = \Delta P \cdot e$ ;  $W_y = \frac{hb^2}{6}$ .

5.3. Проверить готовность испытательной машины и тензометров к проведению испытания.

5.4. Используя ручной привод испытательной машины, сообщить образцу небольшую начальную нагрузку  $P_0$  и при этой нагрузке произвести первые отсчеты по всем трем тензометрам.

5.5. Плавно нагружать образец равными ступенями нагрузки  $\Delta P$  (4÷5 ступеней). На каждой ступени снимать обсчеты по всем тензометрам. Наибольшая нагрузка при испытании должна отвечать условию  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{i\ddot{o}}$  (где  $\sigma_{i\ddot{o}} = 200 \dot{I} \ddot{a}$ )

5.6. Плавно разгрузить образец до  $P < P_0$ , после чего повторно нагрузить образец до  $P = P_0$  и снять контрольные отсчеты по тензометрам.

#### 6. Содержание отчета

Отчет должен быть выполнен на типовом бланке (см. Приложение).

## 7. Список рекомендуемой литературы

1. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов / А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 13 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 292 с.
3. Анциферов С.В., Афанасова О.В., Деев П.В. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: компьютерные лабораторные работы: Учеб. пособие для самост. работы студентов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 78 с.
4. Павлов П.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев. – СПб.: Лань, 2003. – 528 с.
5. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Выща школа, 1986. – 479 с.

Бланк отчета по лабораторной работе № 7

Студент \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_ Дата \_\_\_\_\_

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

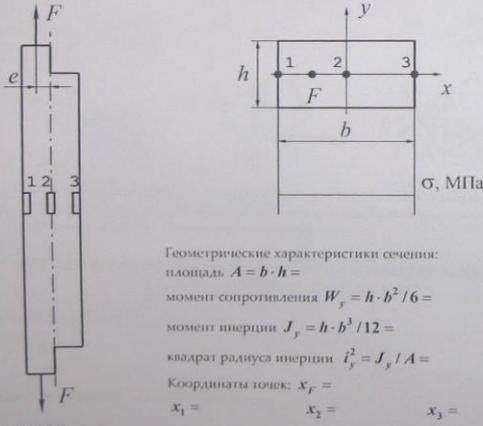
ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное определение напряжений при внецентренном растяжении прямого бруса и сравнение этих напряжений с расчетными значениями

ДАнные ИСПЫТАНИЯ

Испытательная машина Р-5  
 Измерительная аппаратура ИТЦ-01  
 Параметры проволочных датчиков: База  $l = 20$  мм, сопротивление  $R = 200$  Ом  
 Коэффициент увеличения регистрирующего прибора  $K = 1,0 \times 10^6$   
 Размеры и характеристики поперечного сечения бруса  $h =$  см,  $b =$  см,  
 Модуль упругости  $E = 2 \times 10^5$  МПа

СХЕМА ИСПЫТАНИЯ



Вывод:

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

№ п.п.	Нагрузка		Отсчеты по тензодатчикам (мм)					
	$F, \text{кН}$	$\Delta F, \text{кН}$	$n_1$	$\Delta n_1$	$n_2$	$\Delta n_2$	$n_3$	$\Delta n_3$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
			$\Delta n_1^{exp} =$		$\Delta n_2^{exp} =$		$\Delta n_3^{exp} =$	

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Теоретические значения

Расчетные значения

$$\sigma_j^{(an)} = E \cdot \epsilon_j = E \frac{\Delta n_j^{exp}}{K}$$

$$\sigma_j^{(m)} = \frac{N}{A} \left( 1 + \frac{x_j \cdot x_F}{i_y^2} \right)$$

$$\sigma_1^{(an)} =$$

$$\sigma_1^{(m)} =$$

$$\sigma_2^{(an)} =$$

$$\sigma_2^{(m)} =$$

$$\sigma_3^{(an)} =$$

$$\sigma_3^{(m)} =$$

Расхождение между опытными и теоретическими значениями

$$\Delta_1 = \frac{\sigma_1^{(an)} - \sigma_1^{(m)}}{\sigma_1^{(an)}} \cdot 100\% =$$

$$\Delta_2 = \frac{\sigma_2^{(an)} - \sigma_2^{(m)}}{\sigma_2^{(an)}} \cdot 100\% =$$

$$\Delta_3 = \frac{\sigma_3^{(an)} - \sigma_3^{(m)}}{\sigma_3^{(an)}} \cdot 100\% =$$

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Тульский государственный университет»

Кафедра механики материалов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 8**

**«ИСПЫТАНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-  
СЖАТОГО СТЕРЖНЯ БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ»**

по дисциплине

**«СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

Направления подготовки: 15.05.01, 17.05.01, 17.05.02, 21.05.04, 23.05.01,  
24.05.01, 24.05.02 – специалитет; 08.03.01, 15.03.01, 15.03.02, 15.03.05,  
15.03.06, 22.03.01, 23.03.02, 24.03.02, 24.03.03, 28.03.02 – бакалавриат.  
Форма обучения – очная, заочная

Тула 2016

## 1. Цель и задачи лабораторной работы

Целью работы является опытное распределение критической силы при осевом сжатии стержня большой гибкости и сравнение ее величины с расчетным значением. В ходе лабораторной работы должны быть выполнены следующие задачи:

- 1) определение гибкости стойки;
- 2) экспериментальное определение критической силы;
- 3) определение расчетной критической силы и сравнение результатов.

## 2. Основные теоретические сведения

При центральном сжатии прямого стержня, если сжимающая сила меньше некоторого определенного значения, называемого критическим, прямолинейная форма упругого равновесия стержня является устойчивой. Если сжимающая сила достигает критической величины, то прямолинейная форма равновесия становится неустойчивой. При величине сжимающей силы, большей критической хотя бы на величину второго порядка малости, происходит так называемая потеря устойчивости центрально сжатого стержня, характеризующаяся возникновением больших непрерывно нарастающих поперечных перемещений сечений стержня при его искривлении и резким, скачкообразным изменением напряженного состояния стержня в связи с присоединением к осевой сжимающей силе непрерывно возрастающих изгибающих моментов.

Для стержней, имеющих большую гибкость  $\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}$ , отвечающую условию  $\lambda \geq \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{гд}}}}$ , потеря устойчивости при центральном сжатии происходит в упругой области, при критических напряжениях, не превышающих предела пропорциональности материала стержня  $\sigma_{\text{гд}} = \frac{P_{\text{г}}}{A} \leq \sigma_{\text{гд}}$ . для таких стержней большой гибкости критическую силу можно определить по формуле Эйлера  $P_{\text{г}} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2}$ , где  $\mu$  — коэффициент приведения длины стержня, зависящий от характера закрепления его концов.

## 3. Объекты исследования, оборудование материалы

Опыт проводится на специальной лабораторной установке. Испытанию подвергается вертикальный стальной стержень прямоугольного поперечного сечения, имеющий большую гибкость. Нижнее сечение стержня жестко заземлено, верхнее — свободно. Осевое сжатие осуществляется грузами при

помощи специальной симметричной подвески, вес которой входит в состав нагрузки. Оценка устойчивости стержня выполняется визуально, при кратковременных малых его отклонениях от вертикального положения, осуществляемых вручную. Схема испытания показана на рис. 1, а схема лабораторной установки и нагружения стержня — на рис. 1, б.

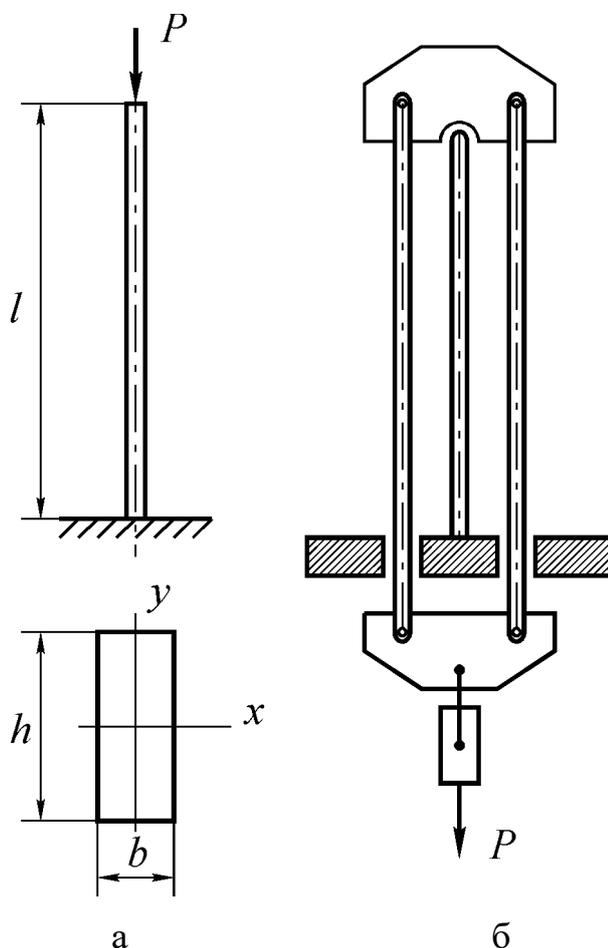


Рис. 1. Схема лабораторной установки (а) и схема нагружения стержня (б)

#### 4. Задание на работу

Необходимо экспериментально определить критическую силу для центрально-сжатого стержня большой гибкости. Затем следует определить гибкость стержня и рассчитать теоретическое значение критической силы, выполнить сравнение результатов.

#### 5. Ход работы

5.1. Вычислить расчетную величину критической силы по формуле Эйлера

$$P_{\text{к}} = \frac{\pi^2 EJ_{\text{мин}}}{(\mu l)^2}, \quad \text{где } J_{\text{мин}} = J_y = \frac{hb^3}{12}; \mu = 2.$$

5.2. Вычислить гибкость стержня и оценить возможность использования формулы Эйлера, приняв для стали  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma_{\text{г}} = 200 \text{ МПа}$ ,

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\text{мин}}}, \quad \text{где } i_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{J_{\text{мин}}}{A}}; \quad A = b \cdot h,$$

(должно быть  $\lambda \geq 100$ )

5.3. Ознакомьтесь с лабораторной установкой, методикой нагружения стержня и проверки устойчивости его равновесия. Вертикальность положения оси стержня оценивается при помощи отвеса.

5.4. На поддон подвески положить груз, дающий совместно с весом подвески осевую силу, заведомо меньшую критической величины.

5.5. Проверить устойчивость стержня. Для этого слегка отклонить его рукой от вертикального положения, а затем освободить его от этого воздействия. Если после нескольких затухающих колебаний стержень возвратится в исходное вертикальное положение, то его прямолинейная форма равновесия является устойчивой.

5.6. Прodelать указанную операцию несколько раз при постепенно увеличивающейся нагрузке, получаемой установкой дополнительных гирь. Если при некоторой очередной проверке устойчивости стержень не возвратится в исходное вертикальное положение, то соответствующую силу следует считать критической. При приближении к критической нагрузке ступени увеличения силы должны быть небольшими. О приближении нагрузки к критическому значению можно судить по уменьшению частоты колебаний стержня при очередных проверках его устойчивости.

5.7. Разгрузить стержень, сняв грузы с подвески.

## 6. Содержание отчета

Отчет должен быть выполнен на типовом бланке (см. Приложение).

## 7. Список рекомендуемой литературы

1. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов / А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.

2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учебник для вузов / В.И. Феодосьев. – 13 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 292 с.

3. Анциферов С.В., Афанасова О.В., Деев П.В. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов: компьютерные лабораторные

работы: Учеб. пособие для самост. работы студентов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – 78 с.

4. Павлов П.А. Сопротивление материалов: учеб. пособие для вузов / П.А. Павлов, Л.К. Паршин, Б.Е. Мельников, В.А. Шерстнев. – СПб.: Лань, 2003. – 528 с.

5. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Под ред. Писаренко Г.С. – Киев: Выща школа, 1986. – 479 с.

Бланк отчета по лабораторной работе № 8

Студент \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИСПЫТАНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТОГО СТЕРЖНЯ БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: экспериментальное подтверждение возможности расчета критической силы для стержней большой гибкости по формуле Эйлера

Таблица 1

Данные испытания

Материал стержня	Длина стержня $l$ , см	Коэффициент приведения длины $\mu$	Высота сечения $h$ , см	Ширина сечения $b$ , см	Модуль упругости $E$ , МПа

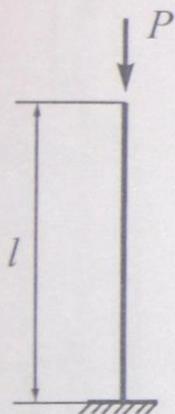
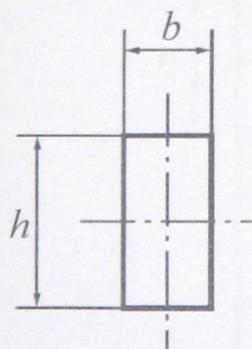


Схема испытания



Вычисление критической силы по Эйлеру

$$A = bh =$$

$$J_y = \frac{hb^3}{12} =$$

$$i_y = \sqrt{\frac{J_y}{A}} =$$

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_y} =$$

$$P_{кр}^{теор} = \frac{\pi^2 EJ_y}{(\mu l)^2} =$$

Экспериментальное определение критической силы

$$P_{кр}^{оп} = P_{II} + P_{Г} =$$

Расхождение между расчетной и опытной величинами критической силы

$$\Delta = \frac{P_{кр}^{теор} - P_{кр}^{оп}}{P_{кр}^{оп}} \cdot 100\% =$$

ВЫВОД:

Подпись преподавателя \_\_\_\_\_