

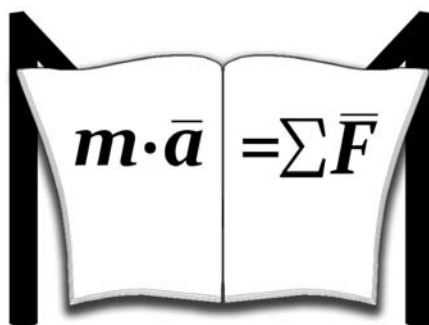
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
15.03.01 «Машиностроение»
очной формы обучения*

Часть 1



Могилев 2021

УДК 539.3/.6
ББК 30.121
С64

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «31» августа 2021 г.,
протокол № 1

Составитель ст. преподаватель Е. Г. Кривоногова

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Науменко

Методические рекомендации составлены в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Сопротивление материалов» для студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» очной формы обучения.

Учебно-методическое издание

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Часть 1

Ответственный за выпуск	Д. И. Якубович
Корректор	Т. А. Рыжикова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать	. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л	. Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2021

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Испытательное оборудование и измерительные приборы.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Определение механических характеристик стали при испытании на растяжение.....	15
3 Лабораторная работа № 3. Определение модуля упругости первого рода и коэффициента Пуассона для стали.....	20
4 Лабораторная работа № 4. Испытание стали и чугуна на сжатие.....	24
5 Лабораторная работа № 5. Испытание на кручение стальных образцов.....	29
6 Лабораторная работа № 6. Испытание на удар. Определение ударной вязкости	34
7 Лабораторная работа № 7. Испытание материалов на срез.....	36
8 Лабораторная работа № 8. Опытная проверка теории изгиба на примере испытания балки, лежащей на двух опорах.....	40
Список литературы.....	44

1 Лабораторная работа № 1. Испытательное оборудование и измерительные приборы

Цель работы

Ознакомление с испытательным оборудованием и приборами для измерения деформаций и напряжений.

Изучение техники безопасности при выполнении лабораторных работ.

1.1 Краткие теоретические сведения

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

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

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

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

1.1.1 Испытательное оборудование.

Лаборатория кафедры оснащена универсальными машинами и специальными лабораторными установками, позволяющими проводить определение механических характеристик материалов, а также изучать сопротивление материалов и образцов при различных видах нагружения:

- испытательные машины производства («ИПО Точмашприбор», Россия, г. Армавир): ПГ-100 (1961 год выпуска); ГРМ-1 (1963); УММ-10 (1964); МУП-20 (1968);

- лабораторные установки: собственного производства; разработанные и изготовленные на предприятии «НТП «Центр» (г. Могилев).

В настоящее время в связи с развитием компьютерной и микропроцессорной техники многие этапы испытаний автоматизированы. В учебном процессе используется современное испытательное оборудование производства КНР:

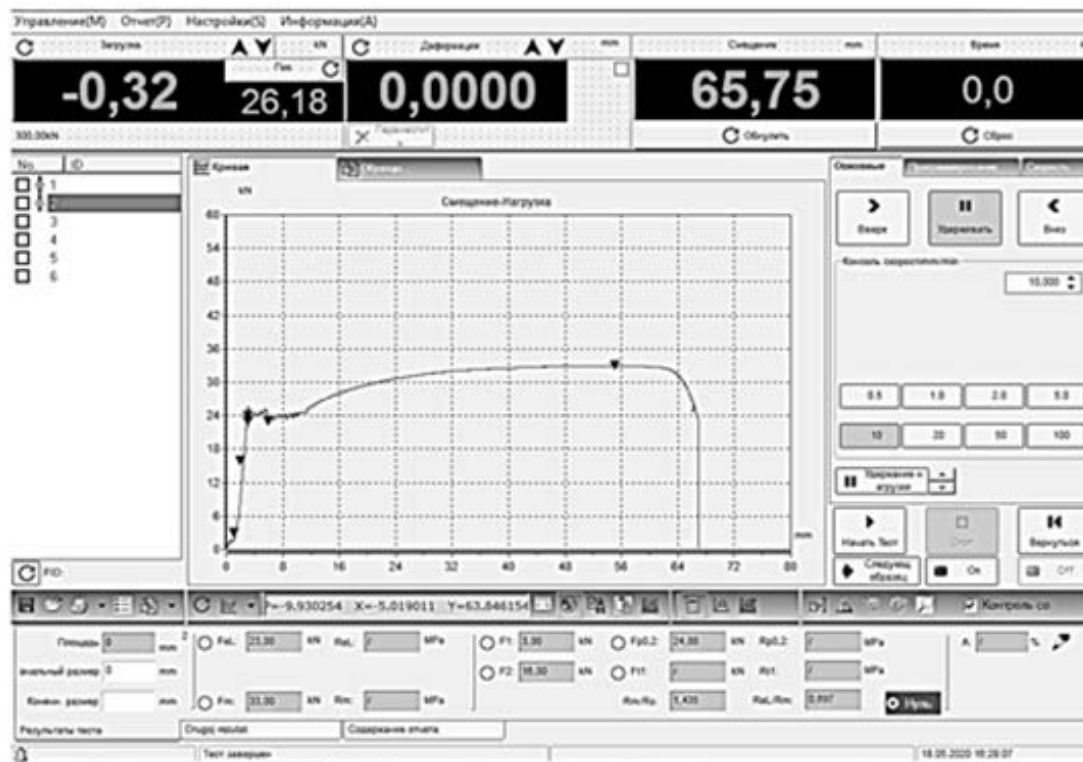
- управляемая компьютером универсальная испытательная машина WAW-300C;

- маятниковый копер JB-300B для испытаний образцов на ударную

ВЯЗКОСТЬ.

Результаты испытаний получают в виде диаграмм растяжения (а также сжатия, кручения, изгиба). На рисунке 1.1, а показано изображение экрана монитора, а на рисунке 1.1, б – вид протокола испытания на растяжение на машине WAW-300С.

а)



б)

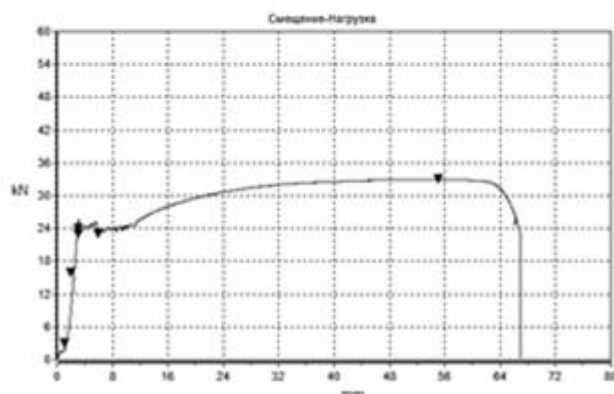
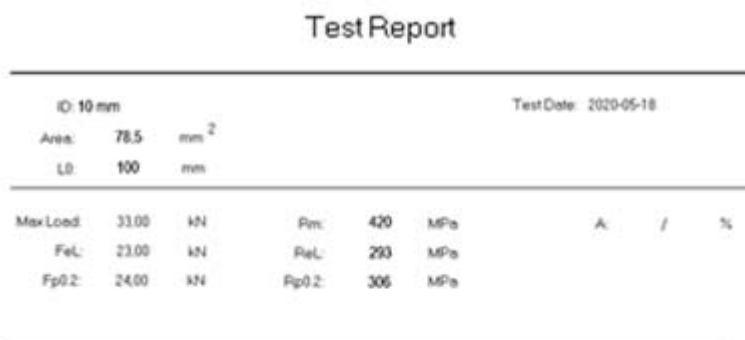


Рисунок 1.1 – Информация о результатах испытаний на машине WAW-300С

1.1.2 Методы исследования напряжений и деформаций.

Истинные значения напряжений и деформаций, возникающих в образцах, деталях и узлах конструкций определяются их формой, механическими характеристиками материалов и особенностями их конструктивного и технологического выполнения.

Для определения истинных значений напряжений и деформаций используются различные экспериментальные методы.

Поляризационно-оптический метод (метод фотоупругости). Установление характера распределения напряжений и их величины теоретическим путем или экспериментально в деталях сложной конфигурации затруднительно. В этом случае используется один из методов теории упругости – поляризационно-оптический метод исследования напряжений.

Сущность метода заключается в том, что исследуемая деталь заменяется геометрически подобной моделью, изготовленной из оптически чувствительного материала (органическое стекло, искусственные смолы и т. д.), обладающего свойством двойного лучепреломления. Через нагруженную модель пропускают поляризованный свет. При этом на экране установки можно наблюдать изображение модели с интерференционной окраской, отвечающей характеру распределения напряжений и их величине в модели и, соответственно, в реальной детали. Особенно полезен оптический метод при исследовании концентрации напряжений в местах резкого изменения формы детали.

Метод лаковых покрытий. Метод рационально применять для выяснения общей картины распределения напряжений и деформаций, а также для определения наиболее напряженных участков на поверхностях деталей сложной конфигурации.

Сущность метода: на чистую поверхность исследуемого объекта наносят тонкий слой специального лака. После его высыхания образуется прочная пленка. При деформировании на покрытии образуются трещины, последовательность возникновения которых характеризует напряженное состояние поверхности объекта.

Количественная оценка напряжений этим методом весьма приближительна.

Аналоговые методы. Методы основаны на аналогии между распределением напряжений в упругой детали и некоторыми другими физическими и электрическими явлениями.

Аналогия позволяет наглядно представить себе закономерности, существующие в детали.

1 Метод пленочной (мембранной) аналогии. Известно, что задача о кручении бруса описывается таким же дифференциальным уравнением, как и задача о равновесии пленки, натянутой на плоский контур, конфигурация которого тождественна форме поперечного сечения изучаемого бруса.

Методом пленочной аналогии можно решать задачи о кручении стержней сложного профиля не только качественно, но и количественно. Для этой цели в настоящее время создано большое количество разнообразных по конструкции экспериментальных установок и приборов.

2 Электрическая аналогия. При кручении круглых брусьев переменного

диаметра имеет место электрическая аналогия.

По распределению электрических потенциалов в модели вычисляют распределение напряжений в брус.

3 Гидродинамическая аналогия. Сущность метода в установлении математической тождественности между задачами теории упругости или сопротивления материалов и задачами гидродинамики. Например:

- аналогия между задачей о кручении стержней произвольного поперечного сечения и задачей о вращательном движении жидкости, заключенном в трубу такого же контура, что и сечение скручиваемого стержня;

- аналогия между задачей о распределении напряжений в растягиваемом стержне и задачей о распределении скоростей идеальной жидкости, движущейся в осевом направлении сосуда с таким же поперечным сечением, что и у растягиваемого стержня.

4 Метод муаровых полос. Муаровый эффект возникает при наложении одной на другую достаточно мелких сеток и состоит в образовании картины чередующихся темных и светлых полос. Эта картина носит название муара. На исследуемый объект наносят достаточно мелкую сетку (состоящую из прямых параллельных линий). При его деформации сетка искажается, т. е. расстояния между линиями изменяются, а сами они искривляются.

При наложении эталонной сетки на деформированную сетку возникает картина муаровых полос (рисунок 1.2). Образующиеся муаровые полосы являются линиями уровня некоторых геометрических величин (перемещений, углов наклона, прогибов, кривизны и т. п.).

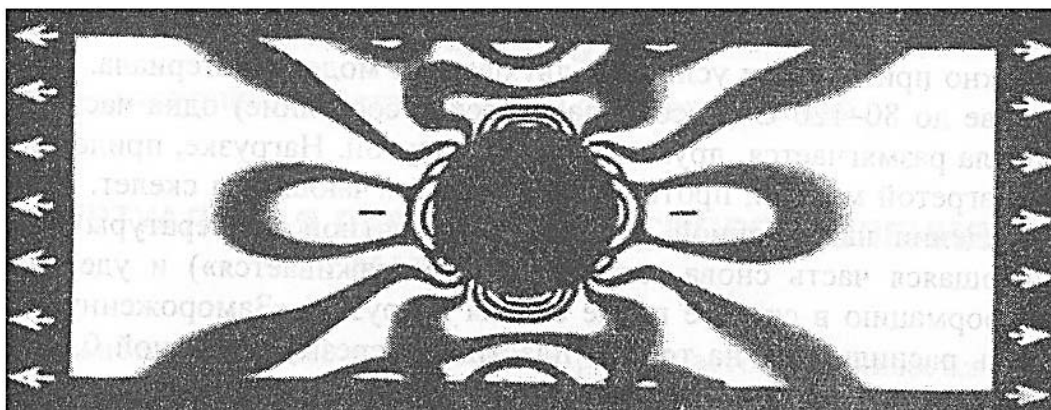


Рисунок 1.2 – Картина муаровых полос

Метод обеспечивает наглядную картину деформации по всей исследуемой поверхности. Вследствие своего чисто геометрического характера позволяет исследовать деформации независимо от их физической природы.

5 Метод делительных сеток. Сущность метода: на поверхность исследуемого объекта наносят (царапаньем, травлением или накаткой) сетку ячеек определенной формы и известных размеров. По изменению формы ячеек, связанному с деформированием образца, судят о характере и распределении пластической деформации. Измерением ячеек сетки после деформирования получают коли-

ческие характеристики деформированного состояния. Экспериментальным путем могут быть определены как величины главных напряжений, так и их направления.

Наиболее часто метод делительных сеток применяют при исследовании распределения упругих деформаций на моделях из низкомодульных материалов (резины), а также при изучении процессов обработки материалов давлением, связанных с образованием больших пластических деформаций.

Электрический метод измерения деформаций (тензометрический метод). Позволяет регистрировать не только статические, но и динамические деформации и передавать измеренные данные на расстояние.

Малогабаритный датчик сопротивления можно устанавливать в труднодоступных местах, на движущихся деталях машин. Кроме того, появляется возможность регистрации показаний ряда датчиков, установленных в разных точках детали.

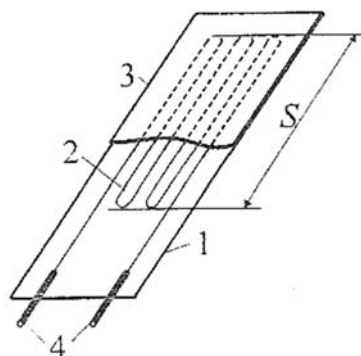
Наибольшее распространение в экспериментальных исследованиях получил проволочный датчик омического сопротивления – **тензорезистор** (от англ. *ten-sos* – сила и *resistor* – сопротивление).

В основе этого метода лежит зависимость омического сопротивления материала (специального сплава – *константана* или *манганина*) от геометрических размеров элемента, изготовленного из этого материала.

Константан – сплав меди (60 %) и никеля (40 %), *манганин* – сплав меди (84 %), никеля (4 %) и марганца (12 %).

Электрические тензометры сопротивления обладают достаточной линейной зависимостью электросопротивления от степени деформации, высокой тензочувствительностью, малой длиной контакта с деталью или образцом и малой массой.

Чувствительным элементом датчика (рисунок 1.3) является тонкая константановая или манганиновая проволока 2, зигзагообразно уложенная между полосками тонкой бумаги или фольги 3 и приклеенная к ней. 4 – выводные проводники. Длина зигзагообразного участка S называется базой тензорезистора.



1 – тензорезистор; 2 – константановая или манганиновая проволока; 3 – полоски тонкой бумаги или фольги; 4 – выводные проводники

Рисунок 1.3 – Схема проволочного тензорезистора

Наиболее часто датчики изготавливаются с базой 30; 20; 15; 10,5 и 2,5 мм.

Относительное изменение омического сопротивления тензорезистора $\Delta R/R$ при растяжении и сжатии прямо пропорционально его относительной деформации $\Delta l/l$, т. е.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta l}{l} = k\varepsilon,$$

где k – коэффициент тензочувствительности тензорезистора, является постоянной безразмерной величиной, которая обычно равна 1,8...2,3.

В исследованиях применяются и другие датчики омического сопротивления (рисунок 1.4).

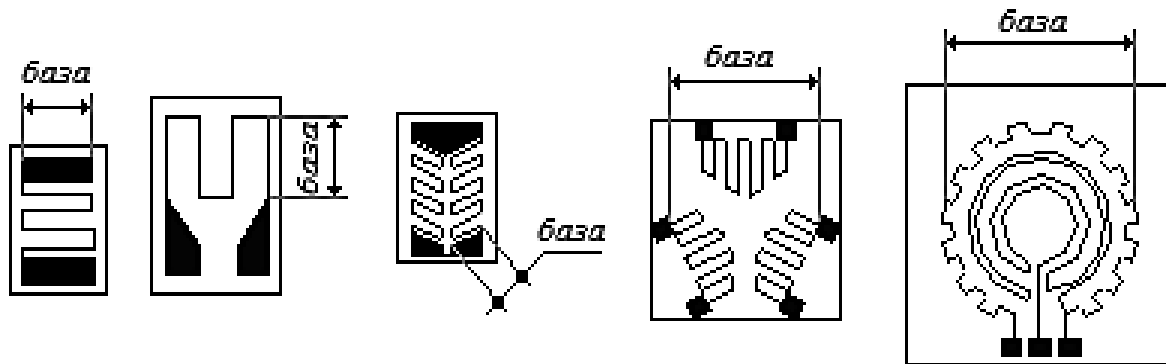


Рисунок 1.4 – Некоторые конструкции тензорезисторов

При растяжении (сжатии) электрического проводника изменяется его сопротивление, которое прямо пропорционально деформации. Изменение сопротивления наклеенного датчика характеризует деформацию детали. Сопротивление наклеенного датчика при упругих деформациях изменяется на малую величину. Малое изменение сопротивления датчика преобразуется в изменение электрического напряжения с помощью мостика Уинстона.

Тензорезисторы используются также для измерения других механических величин (сил, ускорений, перемещений, давлений), однозначно связанных с деформацией.

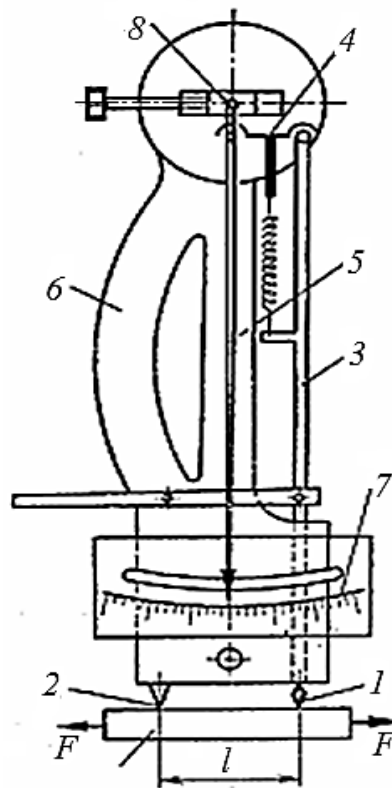
1.1.3 Приборы для измерения деформаций и напряжений.

Механические тензометры.

1 *Тензометр Гуггенбергера* (рисунок 1.5) – наиболее распространенный среди рычажных тензометров. Измерение деформаций осуществляется следующим образом: тензометр с помощью трубки крепится к образцу так, что он ножкой 2 и призмой 1 вдавливается в поверхность этого образца. При растяжении образца подвижная призма 1 смещается и расстояние l между опорами прибора (база прибора) изменяется на величину Δl .

За счет рычага 3 это смещение увеличивается в k раз, и по шкале прибора

простым глазом будет видно отклонение ΔA стрелки 5. Для более точного отсчета стрелка прибора совмещается с ее отражением в зеркале шкалы. Цена деления шкалы – 1 мм.



1 – призма ромбическая; 2 – неподвижная ножка; 3 – рычаг; 4 – поперечина (якорь); 5 – стрелка; 6 – фасонный выступ; 7 – шкала; 8 – шарнир

Рисунок 1.5 – Тензомер Гуггенбергера

Коэффициент увеличения прибора $k = 1000$.

База прибора $l = 20$ мм. Абсолютная деформация образца Δl .

2 *Тензомер Аистова*. В тензомере Аистова, в отличие от тензомера Гуггенбергера, вместо стрелки используется микрометрический винт с лимбом. Отношение высоты призмы к длине рычага равно 1:5 (замеряемое удлинение увеличивается в 5 раз). База тензомера s имеет максимальное значение 60 мм. Цена деления шкалы равна 0,001 мм.

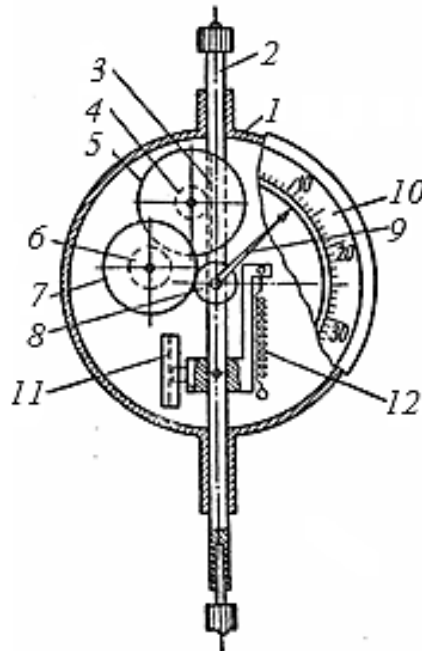
3 *Индикаторы часового типа* (рисунок 1.6) широко используются в лабораторных исследованиях для непосредственного измерения линейных деформаций образцов.

Основанием прибора является корпус 1, внутри которого в диаметральной плоскости может перемещаться мерительный стержень 2. На мерительном стержне нарезаны зубья, образующие зубчатую рейку 3.

При поступательном движении мерительного стержня зубья рейки приводят во вращение систему зубчатых колес (4–8). На оси последнего зубчатого колеса 8 укреплен указательная стрелка 9, передвигающаяся по круговому

циферблату 10.

Передаточные числа зубчатой рейки и системы зубчатых колес подобраны таким образом, что при перемещении мерительного стержня на 0,01 мм стрелка передвигается на одно деление кругового циферблата.



1 – корпус; 2 – мерительный стержень; 3 – зубчатая рейка; 4–8 – зубчатые колеса; 9 – стрелка; 10 – круговой циферблат; 11 – винт; 12 – пружина

Рисунок 1.6 – Индикатор часового типа

Круговой циферблат разбит на 100 делений. Следовательно, при перемещении мерительного стержня на один миллиметр указательная стрелка описывает полный круг.

На оси зубчатых колес 4 и 5 укреплен малая стрелка (на рисунке 1.6 не показана). Один оборот малая стрелка совершает при перемещении мерительного стержня на 10 мм. Циферблат малой стрелки разбит на 10 делений; цена одного деления – 1 мм.

Таким образом, стрелочный индикатор измеряет линейные перемещения до 10 мм с точностью 0,01 мм.

Тензометрические приборы.

Прибор, измеряющий деформацию детали электрическим методом, называется *электрическим тензометром*. Он состоит из воспринимающего устройства (датчика), усилителя и регистрирующего прибора.

Тензорезисторы наклеиваются на поверхность образца и деформируются вместе с ним. При этом изменение сопротивления тензорезистора может быть зарегистрировано с помощью *моста сопротивлений* как изменение электрического тока.

Мост сопротивления (*мост Уинстона*) содержит четыре сопротивления: R_1, R_2, R_3, R_4 , соединенных в виде квадрата (рисунок 1.7).

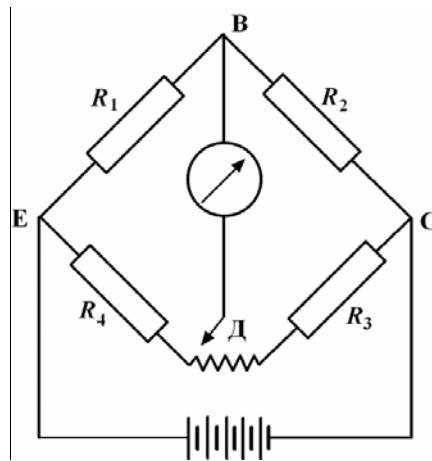


Рисунок 1.7 – Мост сопротивлений (мост Уинстона)

Диагональ моста BD является измерительной – в нее включен чувствительный гальванометр. Диагональ EC является питающей, т. к. к ней подводится напряжение от батареи или выпрямителя. Сопротивление R_1 представляет собой рабочий тензорезистор, наклеенный на исследуемый образец. Сопротивление R_2 равно по величине R_1 и является компенсационным тензорезистором, наклеенным на такой же материал, что и R_1 и находящийся рядом с рабочим датчиком, т. е. при таких же температурных условиях. Сопротивления R_1 и R_2 образуют внешний полумост, благодаря которому компенсируются температурные деформации, которые могут возникнуть в рабочем датчике и повлиять на точность измерения. Одинаковые по величине сопротивления R_3 и R_4 образуют внутренний полумост, смонтированный внутри измерительного прибора.

Переменное сопротивление в точке D называется реохордом и служит для балансировки моста. В этом случае до приложения нагрузки ток в измерительной диагонали BD будет отсутствовать. При деформации образца сопротивление тензорезистора R_1 изменится на некоторую величину ΔR , которая будет зафиксирована.

Для определения действительных величин деформаций производится *тарировка* измерительного прибора, т. е. определяется цена одного деления шкалы или цена одной единицы показаний на табло прибора. Для этого производят одновременное измерение деформации в том же месте другими средствами, например рычажным тензомером.

Тензометрические датчики наклеиваются на поверхность образца в направлении измеряемой деформации.

Выходные сигналы датчиков обрабатываются при помощи приборов, имеющих общее название: *тензометрические приборы или станции*.

1 Тензометрический датчик деформации ДДТ (рисунок 1.8). Он предназначен для измерения деформации образцов материалов при испытании на растяжение/сжатие и относится к датчикам контактного типа (навесным).

2 Измеритель деформаций цифровой ИДЦ-1. Так как ИДЦ-1 не имеет устройства для балансировки мостовой схемы, то при подключении даже ненагруженного тензорезистора на табло появляется число, которое следует считать нулевой

отметкой. Разность между последующим Δn и предыдущим $\Delta n'$ показаниями прибора является величиной, пропорциональной измеряемой деформации:

$$\varepsilon = \Delta n \cdot m; \quad \varepsilon' = \Delta n' \cdot m,$$

где m – цена одного деления или тарифовочный коэффициент ИДЦ-1.



Рисунок 1.8 – Тензометрический датчик деформации ДДТ

3 Тензостанция TS32L01. Прибор разработан в Институте прикладной физики Академии наук Беларуси. Обеспечивает одновременное измерение напряжений в 32 точках. Электрический сигнал с тензорезисторов подается на тензостанцию. Результаты измерений обрабатываются на компьютере. Данные опыта получают в мегапаскалях (цена деления прибора – 1 МПа).

1.2 План выполнения лабораторной работы

- 1 Ознакомление с оборудованием и приборами, которые будут использоваться при выполнении лабораторных работ.
- 2 Изучение цели работы и теоретических сведений.
- 3 Ознакомление с вопросами охраны труда и техники безопасности.
- 4 Демонстрация видеороликов на усмотрение преподавателя (видеоролики размещены на ноутбуке лаборатории: папка «Видеоролики к лабораторной работе №1»).

1.3 Охрана труда и техника безопасности при выполнении лабораторных работ

- 1 На первом лабораторном занятии преподаватель проводит инструктаж и проверку знаний по ОТ и ТБ, о чем производится запись в журнале регистрации инструктажа. Каждый студент ставит в журнале свою подпись.
- 2 Включать испытательное оборудование имеет право сотрудник, прошедший специальную подготовку. **Студентам запрещено включать и выключать**

испытательные машины.

3 Студенты занимают рабочие места в соответствии с указанием преподавателя.

4 На рабочем месте студенты:

- изучают методические указания по выполнению лабораторной работы;
- получают у преподавателя исходные данные (нагрузки, размеры образца и т. п.);
- выполняют необходимые теоретические расчеты, которые заносят в журнал лабораторных работ.

5 Во время работы машины, оборудования и т. п. не допускается:

- прикасаться к токоведущим частям электрооборудования, трубопроводам высокого давления, открывать дверцы электрошкафов и гидрооборудования;
- прикасаться руками или одеждой к испытываемым образцам, а также к подвижным частям.

6 При выполнении лабораторной работы студентам запрещается:

- устанавливать и снимать образец, перемещать специальное ограждение при включенной машине;
- находиться в пределах опасной зоны при проведении работ, связанных с разрушением образцов (лабораторные работы № 2, 4, 6, 7);
- при испытаниях в зоне упругих деформаций ((лабораторные работы № 3, 5, 8, 10, 11, 13, 15) прикладывать к образцу нагрузку, выше установленного предела;
- трогать провода и тензорезисторы;
- самовольно передвигать и переставлять измерительные приборы;
- резко вращать ручки приборов;
- оставлять (**после проведения опыта**) машину с нагрузкой и прибор в рабочем состоянии.

7 При проведении лабораторных работ на установках (лабораторные работы № 5, 10, 13, 14, 15) студенты нагружают образец вручную тарированными грузами, причем прорези грузов должны быть направлены в разные стороны.

После проведения испытаний грузы следует снять с кронштейна (подвеса).

8 Выполнение лабораторных работ проводится после проверки знаний студентов по технике безопасности.

2 Лабораторная работа № 2. Определение механических характеристик стали при испытании на растяжение

Цель работы

Изучение поведения низкоуглеродистой стали при растяжении и определение ее основных механических характеристик.

2.1 Краткие теоретические сведения

При расчетах деталей машин и элементов инженерных сооружений конструктор должен располагать числовыми величинами прочностных и пластических свойств материалов. Характеристики пластичных материалов, как правило, определяют в результате испытаний на растяжение, хрупких материалов – на сжатие.

Низкоуглеродистая сталь является пластичным конструкционным материалом. Испытания образцов из этого материала осуществляют на специальных разрывных или универсальных машинах. Образец, закрепленный в захватах машины, удлиняется под действием растягивающей силы. Нагружение можно считать *статическим*, если скорость перемещения захватов постоянна и не превышает 20 мм/мин.

В процессе испытаний автоматически вычерчивается *машинная диаграмма растяжения образца* (рисунок 2.1), которая представляет собой график зависимости между силой F , действующей на образец, и его удлинением Δl .

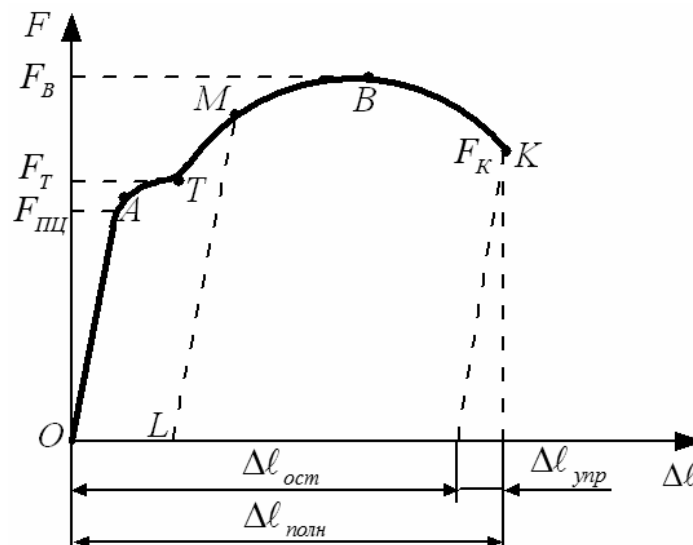


Рисунок 2.1 – Диаграмма растяжения образца

Диаграмму растяжения условно разбивают на четыре участка.

Участок OA называется *зоной упругости*, т. к. здесь в материале развиваются только упругие деформации. На большей части зоны упругости соблюдается *закон Гука*, т. е. зависимость удлинения от силы является линейной:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A},$$

где $E \cdot A$ – жесткость поперечного сечения образца (E – модуль упругости первого рода материала; A – площадь поперечного сечения образца).

Если в этой зоне разгрузить образец, то он придет в первоначальное состояние. *Свойство материала восстанавливать первоначальную форму и размеры после снятия приложенной нагрузки называется упругостью.*

Участок AT называется *зоной общей текучести*, а горизонтальный участок в пределах этой зоны – *площадкой текучести* (при испытании материалов на высокочувствительных машинах диаграмма в этой зоне характеризуется зубчатостью, что объясняется поликристаллической структурой металлов и особенностью их деформирования). Весь объем материала образца охватывается пластической (остаточной) деформацией, величина которой в конце зоны общей текучести в несколько раз выше упругой составляющей. *Способность материала получать большие остаточные деформации, не разрушаясь при этом, называется пластичностью.*

В процессе текучести на поверхности полированного образца появятся полосы Чернова – Людерса, наклоненные к его оси под углом 45° . Появление этих линий связано со скольжением материала по плоскостям, на которых действуют максимальные касательные напряжения. Температура стали повышается, изменяется ее электропроводность и магнитные свойства.

Участок TB называется *зоной упрочнения*. После стадии общей текучести материал вновь приобретает способность сопротивляться дальнейшей деформации. В этой зоне удлинение образца сопровождается ростом нагрузки, хотя и медленнее, чем в зоне упругости. Образец сохраняет первоначальную форму, а его удлинение равномерно распределяется по рабочей длине.

Опыт показывает, что если образец, нагруженный до точки M , разгрузить, то процесс разгрузки пойдет приблизительно по линии ML , параллельной линии OA . Отрезок OL на диаграмме будет равен остаточной деформации. При повторном нагружении образца линия нагрузки совпадает с линией ML , зона упругости увеличится, а зона пластических деформаций уменьшится (материал становится более жестким, но менее пластичным). *Явление повышения упругих свойств материала в результате предварительного пластического деформирования называется наклепом.* Наклеп может быть как положительным, так и отрицательным явлением. К наклепу прибегают в тех случаях, когда необходимо снизить деформативность элементов. Например, для устранения провисания проводов, для уменьшения нежелательного удлинения проволочных канатов, грузовых цепей в процессе их эксплуатации. При необходимости наклеп устраняют термической обработкой.

Участок BK называется *зоной местной текучести*. Она характерна тем, что на образце в месте будущего разрыва образуется местное сужение, так называемая шейка, и деформация образца носит локальный характер (в области шейки).

Машинная диаграмма растяжения в координатах $F-\Delta l$ существенно зависит

от размеров образца. Чтобы диаграмма деформирования характеризовала механические свойства материала, ее строят в относительных координатах σ - ε (нормальное напряжение – относительная продольная деформация):

$$\sigma = \frac{F}{A_0}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0},$$

где A_0 – первоначальная площадь поперечного сечения образца;

l_0 – контрольная длина в средней части образца (область однородного напряженного состояния в соответствии с принципом Сен-Венана).

Размеры образцов регламентированы соответствующими стандартами на проведение испытаний. Чаще всего применяются цилиндрические образцы с начальным диаметром d_0 : нормальные ($l_0 / d_0 = 10$) и укороченные ($l_0 / d_0 = 5$).

В результате получается *условная диаграмма растяжения материала* (рисунок 2.2), на которой значения напряжения и относительной деформации по мере приближения к последнему участку все более отличаются от истинных, т. к. не учитывается изменение размеров образца по мере его растяжения.

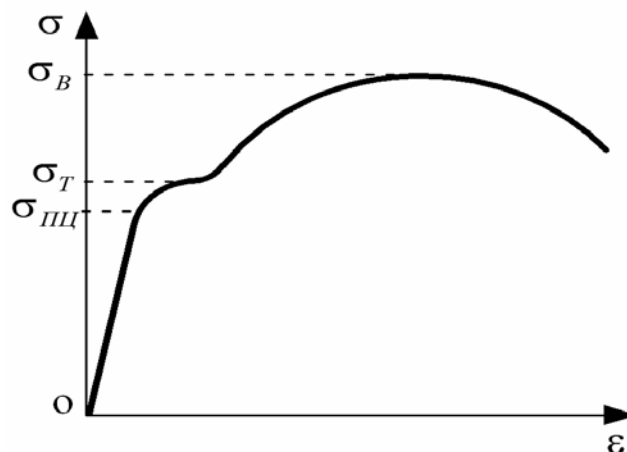


Рисунок 2.2 – Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

Основными *механическими характеристиками прочности материала* являются следующие ординаты условной диаграммы растяжения σ - ε :

а) *предел пропорциональности* $\sigma_{пл}$ – это максимальное напряжение, до которого материал подчиняется закону Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$;

б) *предел текучести* σ_t – минимальное напряжение, при котором происходит интенсивный рост пластической деформации без заметного изменения нагрузки;

в) *временное сопротивление* σ_v – это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, выдержанной образцом.

Используя данные диаграммы растяжения образца (см. рисунок 2.1), характеристики прочности материала определяют по следующим формулам:

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{F_{\text{пл}}}{A_0}; \quad \sigma_T = \frac{F_T}{A_0}; \quad \sigma_B = \frac{F_B}{A_0}.$$

Величина $F_{\text{пл}}$ определяется по точке, где начинается отклонение диаграммы растяжения от ее прямолинейного упругого участка; величина силы F_T соответствует площадке текучести; F_B – максимальная нагрузка по рисунку 2.1, которую выдержал образец.

Для стали временное сопротивление σ_B является **условным пределом прочности**, т. к. определяется исходя из первоначальной площади поперечного сечения образца A_0 и не является максимальным напряжением.

Наибольшее напряжение возникает в материале в момент его разрушения; σ_K (*истинное сопротивление разрыву*) и определяется по формуле

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A_K},$$

где A_K – площадь поперечного сечения шейки образца в месте разрыва;

F_K – сила в момент разрушения образца.

Характеристика σ_K является истинным пределом прочности стали, но не применяется в инженерных расчетах, т. к. соответствует полному исчерпанию несущей способности материала.

Пластические свойства материала характеризуют две величины, определяемые при испытании на растяжение:

– **относительное остаточное удлинение при разрыве**

$$\delta = \frac{\Delta l_{\text{ост}}}{l_0} \cdot 100 \% = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100 \% ,$$

где $\Delta l_{\text{ост}}$ – остаточное удлинение контрольной длины образца к моменту разрушения;

– **относительное остаточное сужение при разрыве**

$$\psi = \frac{A_0 - A_K}{A_0} \cdot 100 \% .$$

Чем больше δ и ψ , тем более пластичным считается материал. Для хрупких материалов $\delta < 5 \%$. Для низкоуглеродистой стали характеристики пластичности определяются в пределах

$$\delta = (25...45) \% ,$$

$$\psi = (50...70) \% .$$

Комплексной характеристикой прочностных и пластических свойств материала является **удельная работа деформации**:

$$w = \frac{W_{расч}}{V_0} = \frac{F_B \cdot (l_K - l_0) \cdot \eta}{A_0 \cdot l_0},$$

где $W_{расч}$ – работа, затраченная на деформацию и разрушение расчетной длины образца, объемом V_0 , численно равная площади диаграммы растяжения образца; η – коэффициент полноты диаграммы (для низкоуглеродистой стали $\eta = 0,85$).

Удельную работу также называют «*статической вязкостью*». Она является чувствительной характеристикой изменения структурного состояния материала, способности материала поглощать энергию при разрыве, сопротивляться действию динамических нагрузок, развитию трещин.

Помимо низкоуглеродистой стали, диаграммы растяжения с явно выраженной площадкой текучести имеют, например, такие пластичные материалы, как медь, латунь, некоторые виды бронзы.

У многих пластичных и малопластичных материалов на диаграмме растяжения отсутствует площадка текучести. Для них определяется *условный предел текучести* $\sigma_{0,2}$ – это напряжение, при котором пластическая (остаточная) деформация равна 0,2 %.

Диаграмма растяжения хрупких материалов не имеет зоны текучести. При испытаниях определяют одну механическую характеристику прочности – временное сопротивление σ_B , которое в данном случае является действительным пределом прочности.

2.2 План выполнения лабораторной работы

- 1 Измерить штангенциркулем диаметр ($d_0 = 6...40$ мм) в средней части.
- 2 Отметить на образце контрольную длину $l_0 = 10 d_0$.
- 3 Рассчитать начальную площадь поперечного сечения A_0 .
- 4 Ознакомиться с принципом работы машины WAW-300C с электрогидравлическим сервоприводом. Максимально допустимая нагрузка машины – 300 кН, разрешение – 0,1 кН. Машина укомплектована компьютером и принтером.
- 5 Заполнить протокол испытания.
- 6 Наблюдать за процессом деформирования образца, закрепленного инженером лаборатории в тисках машины WAW-300C.
- 7 После разрыва образца получить у инженера лаборатории его части и распечатку диаграммы упругопластического деформирования образца. На распечатке указываются значения силы в характерных точках диаграммы ($F_{пл}$, F_T , F_B и F_K).
- 8 Произвести замеры образца (d_K и l_K).
- 9 Выполнить необходимые вычисления согласно форме отчета.
- 10 Вычертить диаграмму растяжения образца в масштабе.
- 11 Определить характеристики прочности и пластичности низкоуглеродистой стали.

- 12 Сформулировать вывод по работе.
- 13 Подписать отчет по лабораторной работе у преподавателя.

Контрольные вопросы

- 1 Что называется пределом пропорциональности, пределом текучести, пределом прочности материала и какова их размерность?
- 2 В каких координатах строится диаграмма растяжения материала?
- 3 Отличие диаграммы растяжения пластичного и хрупкого материалов?
- 4 Как определить на диаграмме растяжения упругую и пластическую деформации в любой момент нагружения?
- 5 Что такое площадка текучести?
- 6 Что называется удельной работой деформации?
- 7 Какие деформации называются упругими и какие пластическими (остаточными)?
- 8 Для какого участка диаграммы растяжения справедлив закон Гука?
- 9 Какие величины характеризуют прочность материала?
- 10 Какие величины характеризуют пластичность материала?
- 11 Что такое наклеп?
- 12 Какие напряжения действуют в поперечном сечении образца при растяжении?
- 13 Каким выражением обозначается жесткость поперечного сечения при растяжении ?
- 14 В каких единицах измеряются напряжения, абсолютная и относительная деформации при растяжении материала?
- 15 Как выглядит закон Гука при растяжении?

3 Лабораторная работа № 3. Определение модуля упругости первого рода и коэффициента Пуассона для стали

Цель работы

Изучение метода тензометрирования.

Проверка справедливости закона Гука и определение упругих постоянных стали (модуль упругости первого рода E и коэффициент Пуассона μ).

3.1 Краткие теоретические сведения

Закон Гука гласит: между напряжением, не превышающим предела пропорциональности, и относительной деформацией существует линейная зависимость.

Закон Гука для растяжения-сжатия имеет вид:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon,$$

где E – модуль упругости I рода;

ε – относительная продольная деформация;

σ – нормальные напряжения, возникающие в поперечном сечении образца под действием силы F .

На диаграмме растяжения низкоуглеродистой стали участок, на котором материал деформируется в соответствии с законом Гука, очерчен прямой линией (рисунок 3.1).

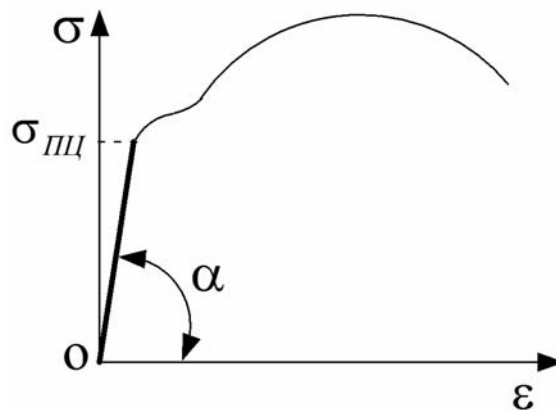


Рисунок 3.1 – Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали

Модуль упругости I рода E (модуль продольной упругости, модуль Юнга) является важной физической константой материала, характеризует его упругие свойства и широко применяется в расчетах.

Для большинства сталей $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Модуль упругости E численно равен $\operatorname{tg} \alpha$ на диаграмме растяжения материала (см. рисунок 3.1), т. к. определяется из закона Гука по выражению

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}.$$

При растяжении образец деформируется не только в продольном, но и в поперечном направлении. Опыты показывают, что для большинства материалов поперечная деформация в три или четыре раза меньше, чем продольная. Абсолютное значение отношения поперечной относительной деформации ε' и относительной продольной деформации ε называется *коэффициентом Пуассона* или *коэффициентом поперечной деформации*:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|.$$

Для различных материалов μ изменяется в пределах от 0 до 0,5. Для большинства металлов $\mu = 0,3$ (для стали $\mu = 0,28$). Коэффициент μ для сталей

не зависит от знака нагрузки, т. е. одинаков и при растяжении, и при сжатии. Для изотропных материалов постоянные E и μ полностью характеризуют их упругие свойства. Для анизотропных материалов (дерево, бумага, пластмасса и т. д.) эти величины для разных направлений деформации различны.

В ходе выполнения работы используют *электротензометрический метод* определения деформаций. В основе этого метода лежит зависимость омического сопротивления тензодатчика от его геометрических размеров.

Наибольшее распространение в экспериментальных исследованиях получил проволочный датчик омического сопротивления – *тензорезистор*. Чувствительным элементом датчика является тонкая константановая проволока, зигзагообразно уложенная между полосками тонкой бумаги и приклеенная к ней. Длина зигзагов b называется базой тензорезистора. Относительное изменение омического сопротивления тензорезистора $\Delta R / R$ при растяжении и сжатии прямо пропорционально его относительной деформации $\Delta b / b$, т. е.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta b}{b} = k \cdot \varepsilon,$$

где k – коэффициент тензочувствительности тензорезистора, постоянная безразмерная величина, которая обычно равна от 1,8 до 2,3.

Тензорезисторы наклеиваются на поверхность образца и деформируются вместе с ним. При этом изменение сопротивления тензорезистора может быть зарегистрировано с помощью *моста сопротивлений* как изменение электрического тока.

Для определения действительных величин деформаций производится *тарировка* измерительного прибора, т. е. определяется цена одного деления шкалы или цена одной единицы показаний на табло прибора. Для этого производят одновременное измерение деформации в том же месте другими средствами, например рычажным тензомером.

В данной лабораторной работе на поверхность образца в продольном и поперечном направлении приклеены два тензометрических датчика ПКБ-20-200 (проволочный константановый тензорезистор на бумажной основе с базой 20 мм и сопротивлением 200 Ом).

Выходные сигналы датчиков обрабатываются при помощи тензометрической станции TS32L1, которая тарирована в единицах измерения относительной деформации.

Разность между последующим и предыдущим показанием прибора (Δn , $\Delta n'$) является величиной, пропорциональной измеряемой деформации при изменении силы на величину ΔF :

$$\varepsilon = \Delta n \cdot m;$$

$$\varepsilon' = \Delta n' \cdot m,$$

где m – цена одного деления или тарифовочный коэффициент тензостанции.

3.2 План выполнения лабораторной работы

- 1 Определить площадь поперечного сечения образца и нагрузку, соответствующую пределу пропорциональности $F_{пл}$.
- 2 Назначить нагрузки на образец с постоянным шагом увеличения.
- 3 Ознакомиться со схемой нагружения образца, порядком работы с прибором TS32L1, принципом работы машины УММ-10.
- 4 Заполнить протокол испытаний.
- 5 Нагрузить образец (**выполняется инженером лаборатории**).
- 6 Для каждой ступени нагружения образца записать в журнал показания тензометрической станции TS32L1 (n и n').
- 7 Произвести все вычисления согласно форме отчета.
- 8 Построить график зависимости σ – ϵ .
- 9 Определить упругие постоянные E и μ материала образца. Сравнить их величину с общеизвестными значениями для стали.
- 10 Сделать общий вывод по работе.
- 11 Подписать отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

- 1 Как формулируется закон Гука? Как он выражается математически?
- 2 Какие напряжения действуют в поперечном сечении бруса при растяжении?
- 3 До какого напряжения справедлив закон Гука?
- 4 Что характеризует модуль упругости материала и какова его размерность?
- 5 Как определяется модуль упругости материала по диаграмме растяжения?
- 6 Что такое коэффициент Пуассона и в каких пределах колеблются его значения для разных материалов, для стали?
- 7 Что называется жесткостью стержня при растяжении, сжатии?
- 8 Какие деформации, возникающие при осевом растяжении (сжатии), больше – продольные или поперечные?
- 9 Какой метод определения деформаций используется в работе?
- 10 Какие величины связывает между собой коэффициент тензочувствительности тензорезистора?
- 11 Как компенсируются температурные деформации в мостовой схеме сопротивления?
- 12 На каком оборудовании и с помощью каких приборов проводилась экспериментальная часть лабораторной работы?

4 Лабораторная работа № 4. Испытание стали и чугуна на сжатие

Цель работы

Определение механических характеристик стали и чугуна при сжатии.

4.1 Краткие теоретические сведения

Проведение испытаний на сжатие связано с необходимостью изучения поведения различных материалов в условиях сжатия. Кроме того, в результате эксперимента появляется возможность определить численные значения механических характеристик различных материалов.

Испытания на сжатие являются основными при определении механических характеристик хрупких материалов (чугун, фарфор, искусственные и естественные строительные материалы).

На качество проведения испытаний существенное влияние оказывают первоначальные размеры и форма образца. Для указанных испытаний наиболее предпочтительна цилиндрическая форма образца с соотношением между размерами образца $h_o \geq 3 \cdot d_o$ (рисунок 4.1).

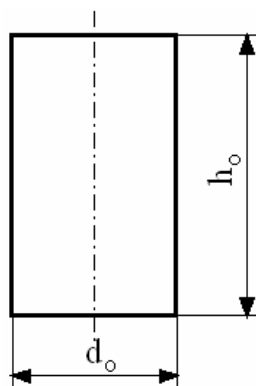


Рисунок 4.1– Эскиз образца

Испытания производятся путем сжатия образца непрерывно и плавно возрастающей нагрузкой F (рисунок 4.2, а). Одновременно с ростом нагрузки увеличиваются силы трения $F_{тр}$ на торцах образца (рисунок 4.2, б). Поэтому затрудняется поперечная деформация торцов и материал не имеет возможности расширяться в горизонтальном направлении. Образец принимает бочкообразную форму.

Поведение образцов в процессе сжатия зависит от свойств материала, из которого они изготовлены. В данной лабораторной работе предлагается определить механические характеристики двух различных по свойствам материалов: углеродистой стали и чугуна.

Пластичные материалы (малоуглеродистые стали). Опытная диаграмма деформирования образца представляет собой график зависимости между деформирующей нагрузкой F и абсолютным укорочением образца Δh (рисунок 4.3).

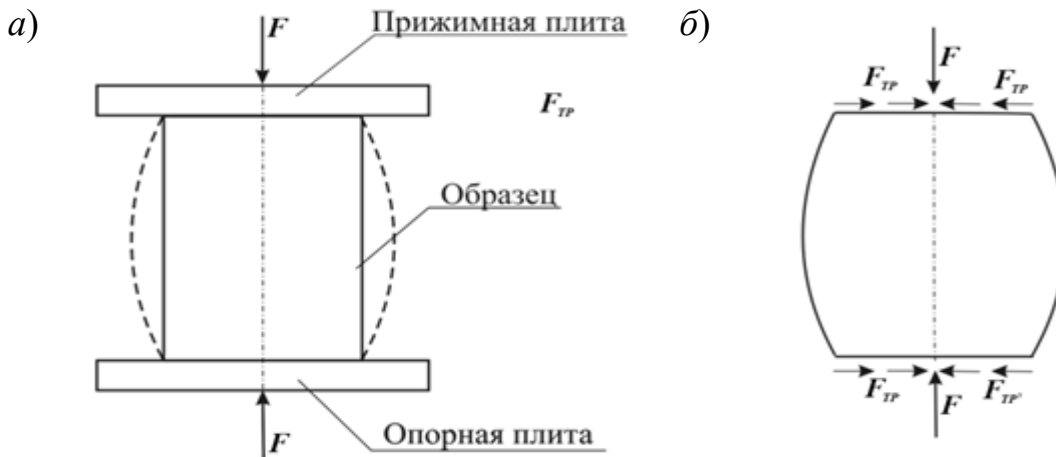


Рисунок 4.2 – Характер деформирования и нагрузки, действующие на образец

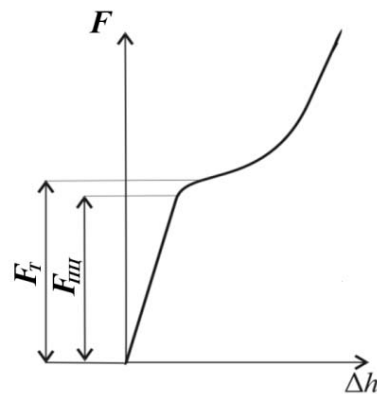


Рисунок 4.3 – Диаграмма сжатия стального образца

Деформации сжатия до некоторой нагрузки $F_{пл}$ носят упругий характер. После достижения нагрузки, соответствующей пределу пропорциональности, обнаруживается значительный рост деформаций, опережающий рост нагрузок (вплоть до появления текучести). Следует обратить внимание, что на диаграмме сжатия площадка текучести слабо выражена. Появление текучести можно обнаружить во время испытаний, наблюдая за стрелкой силоизмерителя. Кратковременная остановка стрелки будет свидетельствовать о наличии текучести. Зафиксированная в этот момент нагрузка F_T позволит определить предел текучести при сжатии. Дальнейшее деформирование образца сопровождается значительными пластическими деформациями. Образец укорачивается, а диаметр его поперечного сечения возрастает (рисунок 4.4). Увеличение площади поперечного сечения требует увеличивать нагрузку для дальнейшего проведения опыта.

Процесс сжатия малоуглеродистой стали имеет характерную особенность: в результате испытаний не удастся определить величину разрушающей нагрузки F_B , т. к. следов разрушения в деформированном образце не наблюдается.

Обработка опытных данных позволит рассчитать величину предела текучести:

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_o},$$

где F_T – нагрузка, соответствующая пределу текучести стали при сжатии;
 A_o – площадь поперечного сечения недеформированного образца.

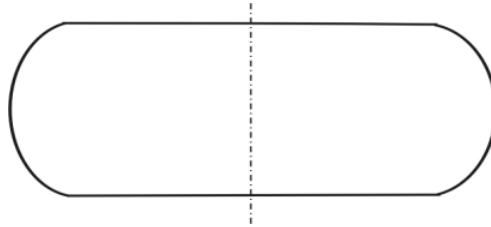


Рисунок 4.4 – Эскиз стального образца после испытаний

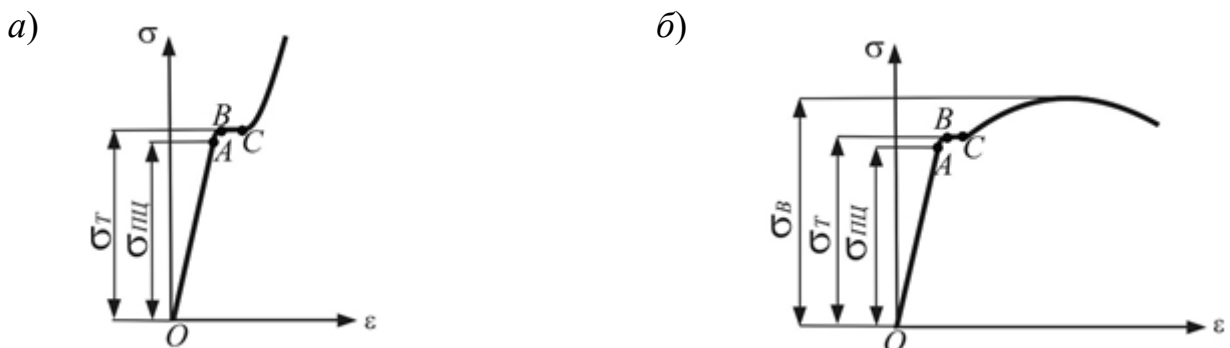
Опытным путем установлено, что величины предела текучести и предела пропорциональности при сжатии и при растяжении практически одинаковы. Следовательно, можно записать

$$\sigma_T^{сж} \approx \sigma_T^{раст}; \quad \sigma_{ПЦ}^{сж} \approx \sigma_{ПЦ}^{раст},$$

где $\sigma_T^{сж} \approx \sigma_T^{раст}$ – предел текучести стали при сжатии и растяжении соответственно;

$\sigma_{ПЦ}^{сж} \approx \sigma_{ПЦ}^{раст}$ – предел пропорциональности стали при сжатии и растяжении соответственно.

Характер деформирования стального образца в процессе сжатия можно представить также в виде зависимости между относительной деформацией ε и нормальным напряжением σ (рисунок 4.5, а). Характерные участки указанной диаграммы соответствуют аналогичным участкам диаграммы растяжения стали (рисунок 4.5, б).



а – диаграмма сжатия; б – диаграмма растяжения

Рисунок 4.5 – Диаграммы деформирования стали

Участок OA – упругий участок работы материала, на котором наблюдается линейная зависимость между напряжением и деформацией. Участку соответствуют упругие деформации.

Участок BC – площадка текучести, на которой наблюдается значительный рост деформаций при постоянстве напряжений. Участку соответствуют пластические деформации, которые охватывают весь объем образца. Хрупкие материалы (чугуны). Диаграмма сжатия образца показана на рисунке 4.6. До момента разрушения на диаграмме отсутствуют характерные точки и участки, имеющие место на диаграмме сжатия стального образца. Обрыв диаграммы свидетельствует о том, что материал образца утратил способность сопротивляться внешним нагрузкам и начал разрушаться. На поверхности образца появляются трещины, расположенные под углом 45° к оси образца (рисунок 4.7). Причиной такого разрушения является действие максимальных касательных напряжений по этим направлениям.

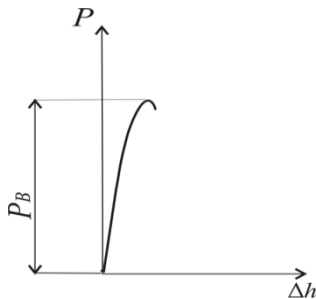


Рисунок 4.6 – Опытная диаграмма сжатия образца

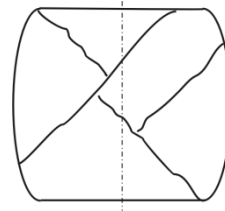


Рисунок 4.7 – Эскиз чугунного образца после испытаний

Непосредственно перед разрушением образца фиксируется нагрузка F_B , которая позволяет определить предел прочности чугуна при сжатии:

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_o}.$$

Экспериментально доказано, что предел прочности чугуна при сжатии $\sigma_B^{сж}$ превышает предел прочности чугуна при растяжении $\sigma_B^{раст}$ (рисунок 4.8).



а – диаграмма сжатия; б – диаграмма растяжения

Рисунок 4.8 – Диаграммы деформирования чугуна

4.2 План выполнения лабораторной работы

- 1 Измерить первоначальные размеры образцов, рассчитать необходимые исходные данные, заполнить протокол испытаний.
- 2 Ознакомиться с вопросами техники безопасности.
- 3 Установить образец строго по центру на неподвижную плиту машины, подать нагрузку на образец (выполняется лаборантом или преподавателем).
- 4 Записать в журнал нагрузки, соответствующие пределу текучести для стального образца F_T , пределу прочности для чугунного образца F_B .
- 5 Разгрузить образец, выключить машину, снять образец с машины (выполняется лаборантом или преподавателем).
- 6 Произвести замеры образца после испытаний. Результаты замеров занести в журнал. Показать эскизы деформированных образцов.
- 7 Произвести все вычисления согласно форме отчета, показать диаграммы сжатия стали и чугуна.
- 8 Определить примерно марку материала, из которого выполнены образцы для испытания. Написать вывод по работе.
- 9 Подписать отчет у преподавателя.

Контрольные вопросы

- 1 Чем отличаются диаграммы сжатия стали и чугуна?
- 2 Какие механические характеристики определяются при сжатии стали?
- 3 Какие механические характеристики определяются при сжатии чугуна?
- 4 Приведите примеры пластичных материалов.
- 5 Приведите примеры хрупких материалов.
- 6 Как изменяются продольные размеры при сжатии?
- 7 Как изменяются поперечные размеры при сжатии?
- 8 Чем отличаются диаграммы сжатия пластичных и хрупких материалов?
- 9 Чем объяснить разрушение хрупких материалов по наклонным площадкам?
- 10 Чему равен угол наклона площадок, по которым разрушается хрупкий материал при сжатии?
- 11 Чем объяснить, что при сжатии пластичных материалов не происходит разрушение образца?
- 12 Как изменилась форма образца из пластического материала при испытании на сжатие?
- 13 Какая существует зависимость между напряжением, нагрузкой и поперечным сечением образца при сжатии?
- 14 Как изменится величина разрушающей нагрузки при увеличении диаметра поперечного сечения в два раза?
- 15 Какую зависимость от нагрузок предусматривает закон Гука при сжатии для определения абсолютной деформации?
- 16 Какую зависимость от напряжений предусматривает закон Гука при сжатии для определения относительной деформации?
- 17 Какую зависимость от длины предусматривает закон Гука при сжатии для

определения абсолютной деформации?

18 Что такое относительная деформация?

19 Что такое абсолютная деформация?

20 Дать определение пластичности и хрупкости.

5 Лабораторная работа № 5. Испытание на кручение стальных образцов

Цель работы

Определение величины модуля упругости второго рода и проверка справедливости закона Гука при кручении.

5.1 Краткие теоретические сведения

Кручение – это такой вид деформации, который возникает под действием пары сил, расположенной в плоскости, перпендикулярной к оси стержня. Эти силы создают внешние (скручивающие) моменты m , от которых в поперечном сечении стержня возникает внутренний силовой фактор – крутящий момент M_k (рисунок 5.1).

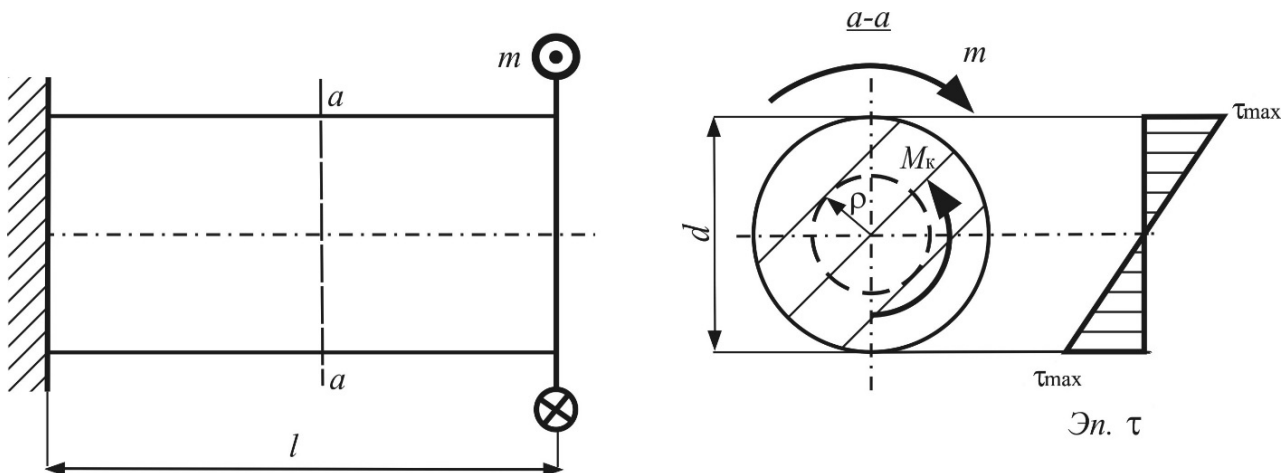


Рисунок 5. 1 – Схема нагружения и эпюра касательных напряжений

Стержни, работающие на кручение, называют валами. При упругих деформациях в круглых валах поперечные сечения остаются плоскими, неизменного радиуса, они только проворачиваются относительно друг друга как жесткие диски. В этом случае на их поверхности возникают только касательные напряжения τ , величина которых определяется по формуле

$$\tau = \frac{M_k}{I_p} \cdot \rho,$$

где I_p – полярный момент инерции поперечного сечения;
 ρ – радиальная координата искомой точки.

Касательные напряжения распределяются в сечении по линейному закону и максимальное значение приобретают в точках, наиболее удаленных от оси вала при $\rho = \rho_{\max}$ (см. рисунок 5.1):

$$\tau_{\max} = \frac{M_k}{I_p} \cdot \rho_{\max} = \frac{M_k}{W_p},$$

где W_p – полярный момент сопротивления сечения, м^3 .

При кручении наблюдается частный случай плоского напряженного состояния – чистый сдвиг, при котором касательные напряжения действуют в плоскости сечения и вдоль продольных волокон вала. Нормальные напряжения по этим направлениям отсутствуют. Закон Гука для чистого сдвига имеет вид:

$$\tau = G \cdot \gamma,$$

где γ – угол сдвига.

Мысленно представим сетку линий нанесенную на поверхность вала до деформирования его, с выделенным прямоугольным элементом – $ABCD$ (рисунок 5.2, а). Под действием внешнего момента все образующие повернулись на один и тот же угол. Вследствие поворота линии сетки образовали параллелограммы (рисунок 5.2, б).

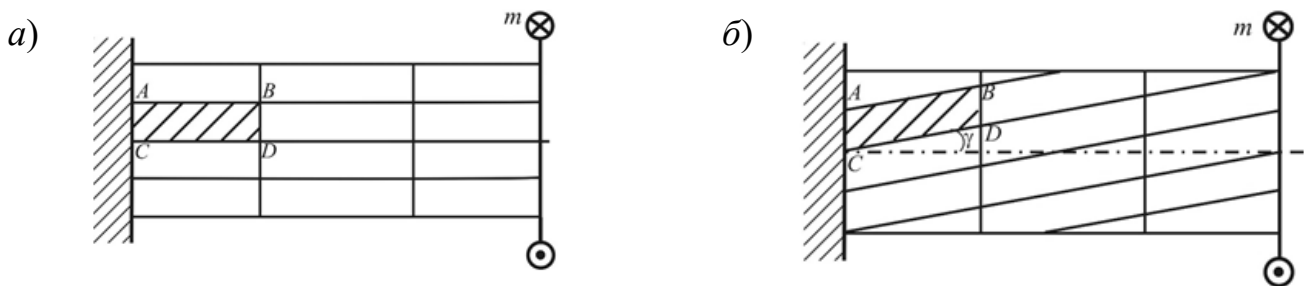


Рисунок 5.2 – Деформация вала

При этом напряженно-деформированном состоянии деформацию вала оценивают при помощи абсолютного угла закручивания поперечного сечения (рисунок 5.3), величина которого определяется по формуле

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

где M_k – крутящий момент на участке вала, $\text{Н} \cdot \text{м}$;
 l – длина участка, м ;

G – модуль сдвига (модуль упругости второго рода);

I_p – полярный момент инерции поперечного сечения участка вала, м^4 .

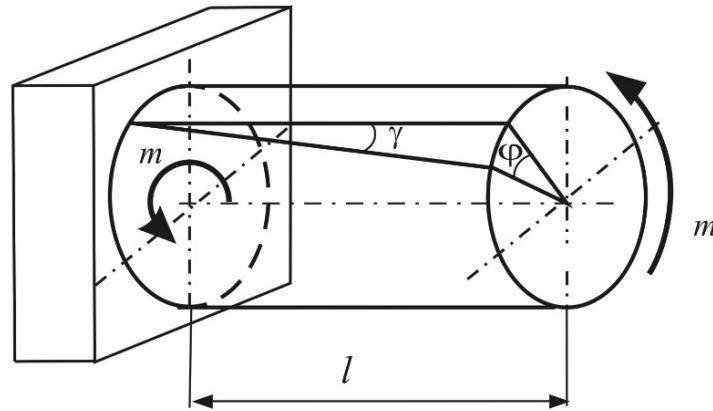


Рисунок 5.3 – К определению абсолютного угла закручивания

Гука при кручении гласит: существует прямая зависимость между внутренним силовым фактором M_k и абсолютным углом закручивания φ .

Величина GI_p называется жесткостью вала при кручении. Чем больше величина жесткости, тем меньше деформация стержня.

Угол закручивания, приходящийся на единицу длины, называется *относительным углом закручивания* и определяется по формуле

$$\Theta = \frac{\varphi}{l} = \frac{M_k}{G \cdot I_p}.$$

Наряду с проверкой справедливости закона Гука, в данной работе определяется модуль упругости второго рода G , который представляет собой одну из основных характеристик упругих свойств материала при сдвиге. Этот параметр связан с модулем упругости первого рода E и коэффициентом Пуассона μ следующей зависимостью:

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

Опытное значение модуля сдвига G определяется по формуле

$$G = \frac{\Delta M_{cp} \cdot l}{I_p \cdot \Delta \varphi_{cp}},$$

где ΔM_{cp} и $\Delta \varphi_{cp}$ – средние шаговые изменения крутящего момента и угла

закручивания, определяемые путем обработки экспериментальных данных.

l – расчетная длина образца, равная расстоянию между фиксированными сечениями вала.

Указанное выше соотношение справедливо только для прямолинейного участка диаграммы кручения образца (рисунок 5.4).

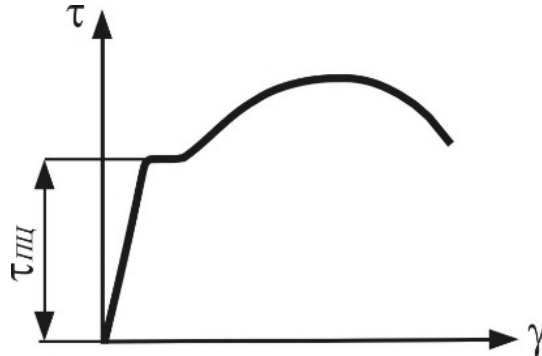


Рисунок 5.4 – Диаграмма деформирования образца

При этом наибольшее значение крутящего момента определяется в предположении, что напряжения в образце не превышали величины предела пропорциональности при сдвиге $\tau_{пл}$:

$$M_{пл} = \tau_{пл} \cdot W_p,$$

где W_p – полярный момент сопротивления поперечного сечения.

Чтобы проверить справедливость закона Гука при кручении, крутящий момент необходимо увеличивать равными приращениями. Абсолютный угол закручивания при этом измеряется на каждую ступень нагрузки. При проведении опыта следует обратить внимание, что равным приращениям нагрузки ΔM_k должны соответствовать равные приращения деформации $\Delta \varphi$.

5.2 План выполнения лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с методическими рекомендациями.
- 2 Ознакомиться с содержанием отчета по лабораторной работе и схемой нагружения образца.
- 3 Записать в журнале лабораторных работ исходные данные: размеры образца и значения нагрузок (информацию выдает преподаватель).
- 4 Произвести вычисления теоретических значений исследуемых величин.
- 5 Ознакомиться с вопросами техники безопасности.
- 6 Ознакомиться с устройством установки.
- 7 Установить стрелку индикатора часового типа на нуль путем поворота обода прибора.
- 8 Нагрузить образец заданными нагрузками. Для каждого нагружения

фиксировать показания прибора.

9 Разгрузить образец путем снятия грузов.

10 Произвести все вычисления согласно форме отчета.

11 Сообщить преподавателю о выполнении лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1 Какие напряжения возникают в поперечном сечении бруса при кручении?

2 Как распределяются напряжения по площади круглого сечения при кручении?

3 Как формулируется закон Гука при сдвиге и кручении?

4 Что называется жесткостью сечения при кручении?

5 Как определяется абсолютный угол закручивания при кручении вала круглого поперечного сечения?

6 Что называется моментом сопротивления при кручении? В каких единицах измеряется?

7 Чему равен момент сопротивления круглого сечения?

8 Чему равен полярный момент инерции круглого поперечного сечения?

9 Какой стержень более экономичный при кручении: кольцевого сечения или сплошного? Почему?

10 Что называется модулем сдвига? Какие свойства материала он характеризует?

11 Какова единица измерения модуля сдвига?

12 Как определить величину модуля сдвига теоретическим путем?

13 Какую форму имеет поперечное сечение испытуемого образца?

14 С какой целью определяется величина момента, соответствующего пределу пропорциональности?

15 Возникают ли при кручении нормальные напряжения?

16 Какой модуль упругости меньше: E или G ?

17 Какая существует зависимость между тремя упругими постоянными материала E, G, μ ?

18 Какую зависимость можно установить, нагружая образец равными ступенями?

19 Каким прибором измеряется угол закручивания образца?

6 Лабораторная работа № 6. Испытание на удар. Определение ударной вязкости

Цель работы

Ознакомление с методикой проведения испытаний по определению ударной вязкости материалов.

6.1 Краткие теоретические сведения

Механические свойства материалов существенно зависят от скорости деформирования изделия в процессе нагружения. Статистические испытания материалов не всегда воспроизводят реальные условия нагружения деталей. В ряде случаев работа деталей в машинах и механизмах связана с приложением ударных нагрузок, которые вызывают соответствующие напряжения, называемые динамическими. При этом предел текучести может повышаться на 20 %...70 %, предел прочности на 10%...30 % по сравнению со статическим растяжением, а пластичность убывает. Даже при сравнительно невысоких скоростях нагружения у пластичных материалов наблюдается склонность к хрупкому разрушению.

Для определения механических характеристик металлов при динамическом нагружении проводят динамические (ударные) испытания.

Благодаря простоте выполнения и точности результатов наиболее распространенными являются испытания динамической нагрузкой на изгиб. При этих испытаниях образец устанавливают на две опоры и посередине наносят удар.

Механической характеристикой, снимаемой при ударных испытаниях, является ударная вязкость.

Для определения ударной вязкости используется один из образцов, определенных стандартом (рисунок 6.1).

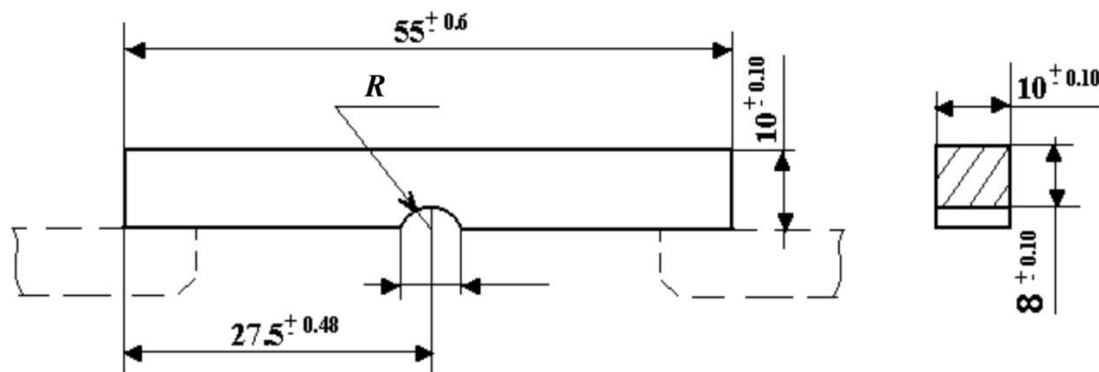


Рисунок 6.1 – Образец для испытаний

Специальный надрез облегчает хрупкое разрушение материала. Удар наносится строго против разреза с противоположной стороны образца. Испытания проводятся на маятниковом копре. На рисунке 6.2 изображена работа маятникового копра.

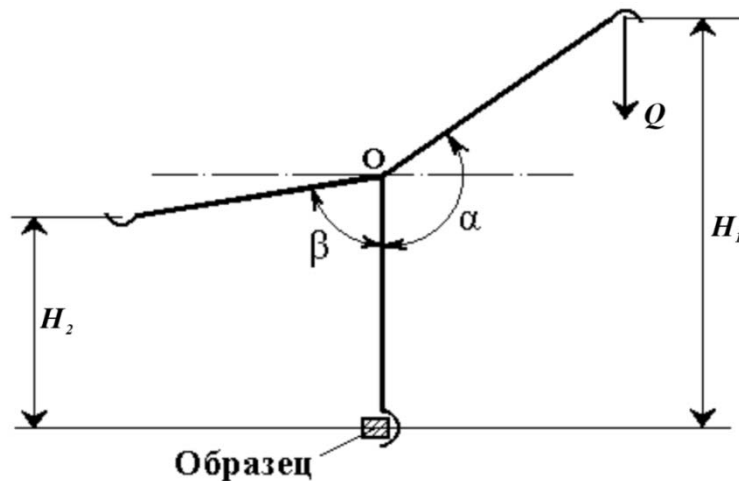


Рисунок 6.2 – Схема работы маятникового копра

Маятник весом Q поднимается на некоторую высоту H_1 . Поворачиваясь при падении на угол α , он приобретает кинетическую энергию. После разрушения образца маятник поворачивается на меньший угол β и поднимается на меньшую высоту H_2 .

Работа, затраченная на разрушение образца, будет равна разности потенциальной энергии маятника до разрушения и оставшейся после разрушения образца:

$$A_k = U_n - U_k.$$

Тогда удельная ударная вязкость – это работа A_k , расходуемая для ударного излома образца, отнесенная к рабочей площади его поперечного сечения:

$$a = \frac{A_k}{A},$$

где A – площадь поперечного сечения образца в месте разрушения.

6.2 План выполнения лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с устройством маятникового копра JB-300B.
- 2 Произвести замер образца. Исходные данные записать в журнал.
- 3 Ознакомиться с вопросами техники безопасности.
- 4 Зарегистрировать работу, затраченную в процессе эксперимента, на разрушение образца.
- 5 Произвести вычисления согласно форме отчета.
- 6 Сообщить преподавателю о выполнении лабораторной работы.

Контрольные вопросы

- 1 Как зависит предел текучести и предел прочности материала от скорости деформирования изделия?
- 2 Как зависит пластичность материала от скорости деформирования образца?
- 3 Как выглядит образец, на котором производятся испытания?
- 4 Для каких целей выполняется надрез на образце?
- 5 Как называется установка, на которой производятся испытания?
- 6 Как устанавливается образец в установке при проведении испытаний?
- 7 Как определяется ударная вязкость материала?
- 8 Как изменяется ударная вязкость материала по мере снижения температуры?

7 Лабораторная работа № 7. Испытание материалов на срез

Цель работы

Определение предела прочности стали при срезе и сравнение его с временным сопротивлением при растяжении.

7.1 Краткие теоретические сведения

При анализе работоспособности деталей машин часто приходится проводить расчёты различных соединений, в которых элементы испытывают *сдвиг*. Разрушение от сдвига металлических элементов обычно называют *срезом*.

Взаимодействие между отдельными фрагментами конструкции может быть охарактеризовано величинами нормальных и касательных напряжений в каждой точке элемента.

Вся совокупность нормальных и касательных напряжений, действующих по всем площадкам, проходящим через рассматриваемую точку, называется ***напряженным состоянием в этой точке***. Если на одной площадке, проходящей через рассматриваемую точку тела, нормальные и касательные напряжения, перпендикулярные этой площадке, равны нулю, то в этой точке имеет место плоское напряженное состояние. Бесконечно малый элемент, выделенный из тела, принято изображать в виде параллелепипеда. Плоское напряженное состояние принято изображать в виде проекции элементарного параллелепипеда на плоскость, перпендикулярно которой все компоненты напряжений равны нулю. Эта проекция представляет собой прямоугольник или квадрат (рисунок 7.1).

Если известны напряжения на трех взаимно перпендикулярных площадках, то всегда можно найти напряжения, действующие на любой другой площадке проходящей через рассматриваемую точку. Кроме того, было показано, что для любого напряженного состояния в точке исследуемого объекта можно найти три взаимно перпендикулярные площадки, на которых действуют только

нормальные напряжения, а касательные напряжения равны нулю. Эти площадки называются *главными*, а действующие на них нормальные напряжения называются *главными напряжениями*.

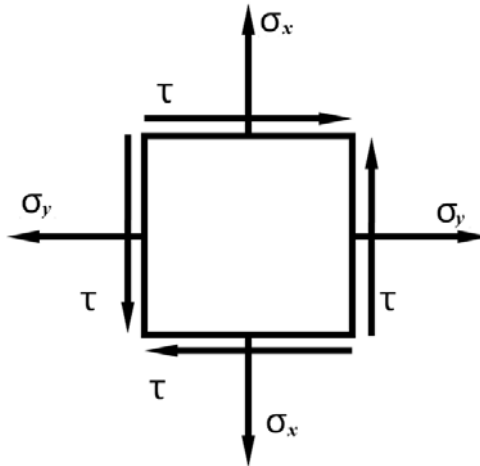


Рисунок 7.1 – Схема плоского напряженного состояния в точке

Главные напряжения обозначаются $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и связаны между собой следующей зависимостью:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3.$$

Главные напряжения являются экстремальными напряжениями, используя которые удобно вести прочностной расчет.

Положение главных площадок для плоского напряженного состояния можно определить, используя следующее соотношение:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2\tau}{\sigma_x - \sigma_y}.$$

Значения главных (минимальных и максимальных) напряжений определяются выражением

$$\sigma_{\min}^{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2}.$$

Методика расчета элементов, работающих на срез, опирается на теорию *чистого сдвига*. Это частный случай плоского напряженного состояния, при котором по двум взаимно перпендикулярным площадкам, проходящим через данную точку, действуют только касательные напряжения (рисунок 7.2, а), а нормальные равны нулю

$$\sigma_x = 0; \quad \sigma_y = 0.$$

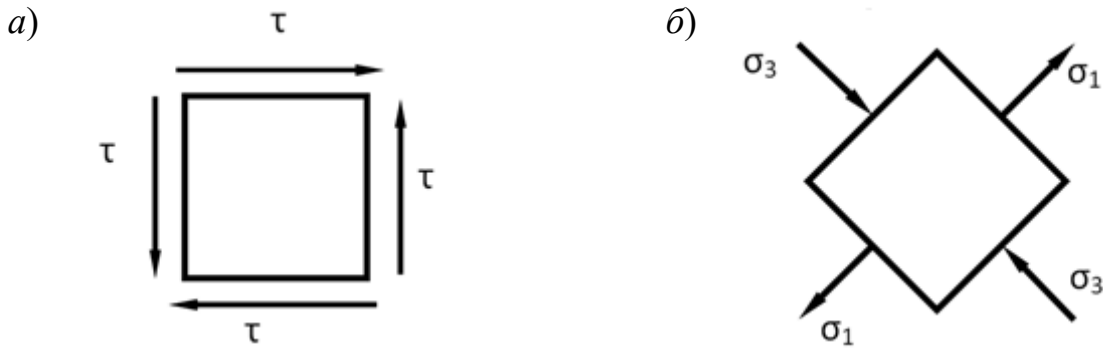


Рисунок 7.2 – Эскиз напряженного состояния при чистом сдвиге

Эти напряжения являются экстремальными касательными напряжениями, а грани, на которые они действуют, называются *площадками чистого сдвига*. Площадки чистого сдвига образуют с главными площадками углы, равные 45° (рисунок 7.2, б).

Главные напряжения при чистом сдвиге определяются как

$$\sigma_1 = \tau, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -\tau.$$

Касательные напряжения связаны с угловыми деформациями следующим соотношением (закон Гука при сдвиге):

$$\tau = G \cdot \gamma,$$

где γ – относительный сдвиг (угловая деформация);

G – модуль упругости второго рода (модуль сдвига).

Такой вид нагружения соответствует действию на стержень двух равных, но противоположно направленных и близко расположенных внешних сил, вызывающих срез по плоскости, находящейся между силами.

При срезе явление чистого сдвига осложняется изгибом и смятием испытуемого образца, поэтому испытания на срез дают приближенную оценку металла. Вследствие этого испытания на срез применяют преимущественно для сравнения разных партий одного и того же металла, предназначенного для изготовления однотипных деталей (например, заклепок, болтов и т. д.).

В работе проводится испытание на двойной срез стержня круглого поперечного сечения. Используется пресс гидравлический ПГ-100А (см. описание машины и руководство по эксплуатации, представленное в лаборатории 09). В процессе испытаний фиксируется максимальная нагрузка F_B , достигнутая при разрушении образца. На основании полученных данных предел прочности данного материала на срез τ_A определяется соотношением

$$\tau_B = \frac{F_B}{2A_o},$$

где A_o – площадь поперечного сечения образца.

Известно, что в случае среза теоретическая величина допускаемого напряжения составляет примерно 60 %...80 % от допускаемого напряжения на растяжение.

$$\tau_B = (0,6...0,8) \cdot \sigma_B \Rightarrow \sigma_B = \tau_B / (0,6...0,8),$$

где σ_B – предел прочности материала при растяжении.

7.2 План выполнения лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с принципом работы установки, порядком подготовки, включения и выключения машины ПГ-100А.
- 2 Ознакомиться с устройством приспособления для проведения испытания.
- 3 Ознакомиться с вопросами ТБ.
- 4 Произвести замеры образца. Исходные данные записать в журнал.
- 5 Установить образец в приспособление для испытаний (образец устанавливается с участием лаборанта).
- 6 Включить машину, подать нагрузку на образец (**выполняется лаборантом или инженером лаборатории**).
- 7 Записать в журнал нагрузку, разрушившую образец.
- 8 После разрушения образца выключить машину.
- 9 Произвести вычисления согласно форме отчета.
- 10 Определить марку стали, из которой изготовлен образец (таблица в методических указаниях), сформулировать вывод по работе.
- 11 Сообщить преподавателю о выполнении лабораторной работы.
- 12 Изучить контрольные вопросы к лабораторной работе и подготовить на них ответы.

Контрольные вопросы

- 1 Какую характеристику материала определяют при испытании на срез?
- 2 Какие деформации сопровождают разрушение образца при срезе?
- 3 Почему при вычислении предела прочности разрушающую нагрузку делят на удвоенную площадь поперечного сечения образца?
- 4 Какое соотношение между пределом прочности при растяжении и пределом прочности при срезе для сталей?
- 5 Какую размерность имеет предел прочности при срезе?
- 6 Какой тип машины используется для испытаний?
- 7 Каким измерительным инструментом производился обмер образца?
- 8 Какая величина определялась непосредственно при проведении опыта?
- 9 Из какого материала выполнен образец для испытаний?
- 10 Напишите закон Гука при сдвиге.

11 От чего зависит жесткость бруса при сдвиге?

12 По какой формуле определяется напряжение при сдвиге?

8 Лабораторная работа № 8. Опытная проверка теории изгиба на примере испытания балки, лежащей на двух опорах

Цель работы

Исследование закона распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при прямом изгибе.

8.1 Краткие теоретические сведения

Под изгибом понимается такой вид нагружения бруса, при котором в его поперечных сечениях возникают изгибающие моменты. Если изгибающий момент в сечении является единственным силовым фактором, а поперечная сила отсутствует ($Q = 0$, $M \neq 0$), такой изгиб называется *чистым*. Однако в большинстве случаев в поперечных сечениях бруса возникают и поперечные силы, и изгибающий момент. Такой изгиб называется *поперечным*.

При построении эпюр изгибающих моментов и поперечных сил руководствуются следующими правилами:

- изгибающий момент M положителен, если относительно выбранного сечения, создающие его нагрузки, сжимают верхние волокна;
- поперечная сила Q положительна, если внешняя сила стремится повернуть балку относительно рассматриваемого сечения по ходу часовой стрелки.

В машиностроительных расчетах (рисунок 8.1, а) эпюру изгибающих моментов принято строить на сжатых волокнах (положительная ордината откладывается вверх от нейтральной оси, отрицательная ордината – вниз), в строительных расчетах эпюра изгибающих моментов строится на растянутых волокнах (положительная ордината откладывается вниз от нейтральной оси, отрицательная ордината – вверх).

При прямом изгибе балка изгибается в плоскости действия внешних сил, а нормальные напряжения σ в поперечном сечении балки (рисунок 8.1) определяются по формуле Навье

$$\sigma = \frac{M_x \cdot y}{I_x},$$

где M_x – изгибающий момент в данном сечении при действии вертикальной нагрузки;

I_x – осевой момент инерции сечения балки относительно его нейтральной линии, совпадающей с главной центральной осью инерции сечения (ось x);

y – расстояние от нейтральной линии (ось x) до слоя поперечного сечения, в котором определяется напряжение.

Данная формула выражает **линейный закон распределения напряжений** по высоте поперечного сечения балки, который графически представлен эюрой, показанной на рисунке 8.2. Величина и знак напряжений зависят от изгибающего момента, осевого момента инерции сечения и от расположения исследуемого слоя относительно нейтральной линии.

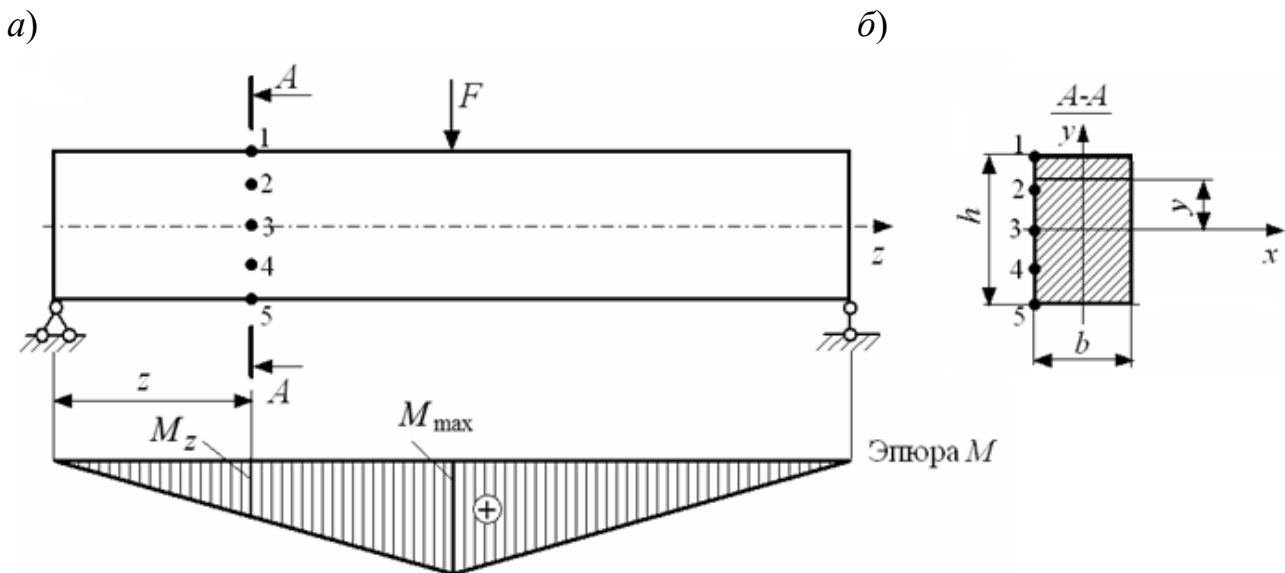


Рисунок 8.1 – Схема балки, ее поперечное сечение

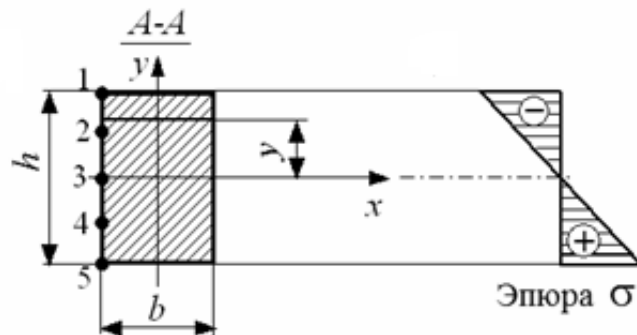


Рисунок 8.2 – Эюра распределения нормальных напряжений по высоте балки

Наибольшие нормальные напряжения соответствуют точкам, наиболее удаленным от нейтральной линии:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{I_x} \cdot y_{\max} = \frac{M_x}{W_x},$$

где W_x – осевой момент сопротивления сечения.

Для прямоугольного сечения

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12};$$

$$W_x = \frac{I_x}{|y_{\max}|} = \frac{b \cdot h^3}{12} : \frac{h}{2} = \frac{b \cdot h^2}{6}.$$

Тогда условие прочности балки на изгиб для машиностроительных расчетов можно представить как

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x^{\max}}{W_x} \leq [\sigma],$$

где $[\sigma]$ – допустимое нормальное напряжение.

Условие прочности балки на изгиб для строительных расчетов можно представить как

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x^{\max}}{W_x} \leq R \cdot \gamma_c,$$

где R – расчетное сопротивление;

γ_c – коэффициент условий работы.

Для подтверждения теоретических суждений о линейном законе распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки проводится эксперимент. В заданных точках по высоте балки (см. рисунок 8.1, а) наклеены тензорезисторы, с помощью которых определяют величину относительных деформаций в соответствующих слоях балки. Показания тензорезисторов фиксируются тензометрической станцией TS32L1, по специальной программе пересчитываются в напряжения и отражаются на экране монитора компьютера.

Для повышения надежности результатов опыта к балке прикладывают несколько нагрузок равными ступенями. Разность между последующим и предыдущим значениями напряжений является величиной напряжения соответствующей ступени нагрузки.

После определения опытных значений напряжений их следует сравнить с теоретическими значениями и определить процент экспериментальной погрешности.

При построении эпюры σ необходимо помнить, что на сжатых волокнах нормальные напряжения отрицательны (как и продольная сила при сжатии), на растянутых – положительные.

8.2 План выполнения лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с целью работы и теоретическими сведениями.
- 2 Произвести необходимые теоретические расчеты в отчете к лабораторной работе.
- 3 Ознакомиться с инструкцией по охране труда при проведении лабораторной работы.
- 4 Ознакомиться со схемой закрепления образца на машине, найти пять точек на балке, где приклеены датчики.
- 5 Ознакомиться с тензометрической станцией TS32L1 и машиной МУП-20 по инструкции и с помощью лаборанта.
- 6 Нагрузить образец сосредоточенной силой с равномерным шагом (включает и выключает машину МУП-20 лаборант).
- 7 Снять показания напряжений с монитора ПК для пяти точек при каждой нагрузке.
- 8 Разгрузить образец, выключить машину и измерительный прибор (производится лаборантом).
- 9 Произвести обработку экспериментальных данных.
- 10 Построить эпюру нормальных напряжений.
- 11 Определить погрешность опыта и сделать вывод по работе.
- 12 Сообщить преподавателю о выполнении работы, подписать отчет.

Контрольные вопросы

- 1 Как вычисляется изгибающий момент в поперечном сечении балки?
- 2 Как вычисляется поперечная сила в поперечном сечении балки?
- 3 По какой формуле определяются нормальные напряжения в поперечном сечении балки и как они меняются по высоте балки?
- 4 Запишите условие прочности при изгибе.
- 5 Какой тип тензометрического прибора применяется при испытании балки?
- 6 Какие правила знаков приняты для изгибающих моментов, поперечных сил и нормальных напряжений?
- 7 Для чего в работе определяется нагрузка $F_{пл}$?
- 8 Какой линией очерчивается эпюра нормальных напряжений по высоте сечения балки при изгибе?
- 9 Какова цель лабораторной работы?
- 10 Как определяются нормальные напряжения, значения которых нельзя превышать при проведении испытаний?
- 11 По каким формулам определяются осевые моменты сопротивления различных поперечных сечений?
- 12 В каком слое поперечного сечения балки нормальные напряжения максимальны?
- 13 Покажите опасное сечение балки.
- 14 Где проходит нейтральный слой в балке и какое положение занимает нейтральная линия в поперечном сечении?

- 15 Как закрепляются тензорезисторы на балке?
- 16 Какой вид нагружения называется чистым изгибом?
- 17 Какой вид нагружения называется поперечным изгибом?
- 18 Покажите на балке зону сжатия и зону растяжения.
- 19 По какой оси направлены нормальные напряжения?
- 20 Как выражается жесткость поперечного сечения при изгибе и от чего она зависит?

Список литературы

- 1 Сопротивление материалов: лабораторный практикум / Под ред. Ю. П. Подлеснова. – Брянск: БГТУ, 2010. – 119 с.
- 2 Методика и техника инженерного эксперимента: учебное пособие / Г. Л. Антипенко [и др.]; под общ. ред. В. П. Березиенко и В. Г. Лупачева. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 278 с.
- 3 **Цурпал, И. А.** Сопротивление материалов / И. А. Цурпал, Н. П. Барабан, В. М. Швайко. – Киев: Вища школа, 1988. – 245 с.
- 4 **Афанасьев, А. М.** Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / А. М. Афанасьев, В. А. Марьин. – Москва: Физматгиз, 1975. – 287 с.