

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ДГТУ)

Кафедра «Теоретическая и прикладная механика»

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Рекомендации к выполнению лабораторных работ в лаборатории механических  
испытаний ДГТУ

Ростов-на-Дону

2018

Составители:

д-р физ.–мат. наук, проф. А.Н. Соловьев,  
канд. техн. наук, доц. О.Н. Лесняк,  
канд. техн. наук, доц. И.Н. Вислоусова,  
канд. техн. наук, доц. В.В. Котов,  
канд. техн. наук, доц. Б.И. Кравченко

Лабораторный практикум «Рекомендации к выполнению лабораторных работ в лаборатории механических испытаний ДГТУ» предназначен для студентов 2 курса, изучающих дисциплины: «Сопротивление материалов», «Механика материалов и конструкций», «Прикладная механика», «Техническая механика», «Механика»:/– Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 67 с.

Практикум содержит основные положения теории, описание испытательных установок, методику и указания к выполнению лабораторных работ.

Научный редактор - д-р физ.–мат. наук, проф. А.Н. Соловьев

Рецензент – канд. физ.–мат. наук, доц. А.С. Скалиух

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ.....	4
1. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	6
1.1. Лабораторная работа №1 «Испытание на разрыв стального образца» .....	6
1.2. Лабораторная работа №2 «Испытание на сжатие образцов из стали, и чугуна».....	13
1.3. Лабораторная работа №3 «Определение коэффициента Пуассона ( $\mu$ ) и модуля упругости $E$ для стали при растяжении».....	16
1.4 Лабораторная работа №4 «Испытание на кручение образцов из стали и чугуна».....	21
2. ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ.....	26
2.1 Лабораторная работа №5 «Исследование распределения напряжений при поперечном изгибе».....	26
2.1.1. Электротензометрический метод измерения линейных деформаций.....	29
2.1.2 Экспериментального определения напряжений при использовании механических тензометров.....	34
2.2 Лабораторная работа №6 «Определение перемещений балки при плоском изгибе».....	37
2.3 Лабораторная работа №7 «Внецентренное растяжение».....	44
2.4. Лабораторная работа №8 «Исследование характеристик цилиндрических спиральных пружин при сжатии».....	48
2.5. Лабораторная работа №9 «Определение перемещений консольной балки при косом изгибе» .....	53
2.6 Лабораторная работа №10 «Проверка теорем о взаимности работ и перемещений».....	58
2.7 Лабораторная работа №11 «Исследование потери устойчивости прямолинейного стержня».....	61
ГЛОССАРИЙ.....	66
ЛИТЕРАТУРА.....	69

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Инженеру любой специальности часто приходится изучать устройства и принципы механизмов, производить расчеты на прочность (и/или жесткость), устойчивость, выносливость конструкций. Неправильный расчет может привести к самым тяжелым последствиям, в том числе и к травмам работников на производстве. Поэтому очень важно в процессе подготовки высококвалифицированных кадров по образовательным программам высшего образования использовать комплексный подход к изучению студентами дисциплин, включающий теоретические, практические и лабораторные занятия.

Настоящие рекомендации предназначены для студентов, изучающих такие дисциплины как «Сопротивление материалов», «Механика материалов и машин», «Механика» и «Прикладная механика» и «Техническая механика».

**Цель** методических рекомендаций:

- **привить** студентам навыки по экспериментальному определению механических характеристик различных материалов;
- **ознакомить** с методами исследования прочности и жесткости элементов конструкций с использованием стандартного оборудования;
- **научить** пользоваться аппаратурой для измерения деформаций и напряжений;
- **ознакомить** с методами обработки и представления результатов измерений.

Приведенные темы лабораторных работ из-за ограниченного объема учебных часов, включают лишь основные работы, выполняемые на установках лаборатории механических испытаний ДГТУ

Перед тем как приступить к выполнению заданной лабораторной работы, студент должен:

- **усвоить** краткие теоретические сведения по теме;
- **изучить** принцип работы и устройство испытательной машины или установки, приборов для измерения напряжений и деформаций;
- **усвоить** методику выполнения работы и способы обработки экспериментальных данных.

## ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

К выполнению лабораторных работ студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности, противопожарным мерам и росписи в специальном журнале.

Все механические испытания материалов проводятся учебно-вспомогательным персоналом на испытательных машинах. Студенты самостоятельно выполняют работы только на специальных лабораторных установках под руководством преподавателя.

Студентам категорически запрещается без разрешения преподавателя включать лабораторное оборудование в электросеть и изменять режим его работы.

Все измерения образцов, необходимые для выполнения лабораторных испытаний, проводятся до установки их в захваты испытательных машин, а раз-

меры после испытания можно производить только после снятия образцов с машины. Для визуального осмотра результатов испытаний можно подходить к машине только с разрешения преподавателя. При использовании сменных грузов не следует складывать их на краю стола во избежание падения и, чтобы не травмировать ими окружающих.

При нарушении требований техники безопасности студент отстраняется от дальнейшего выполнения лабораторной работы. Если действия студента не привели к серьезным последствиям, то он может быть вновь допущен к лабораторным занятиям лишь после повторного инструктажа.

# 1. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

## 1.1. Лабораторная работа №1 «Испытание на разрыв стального образца»

**Цель работы:** изучение процесса деформирования при растяжении образца из малоуглеродистой стали, определение основных механических характеристик прочности, пластичности и марки стали.

**Теоретическая часть работы.** Механическими характеристиками материала являются: предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности материала. Они определяются как частное от деления соответствующей нагрузки (полученной экспериментальным путем) на первоначальную (до испытания) площадь поперечного сечения. В результате деления получают условные, а не истинные напряжения. Для вычисления истинных напряжений необходимо нагрузки разделить на действительную площадь поперечного сечения, которая изменяется в процессе эксперимента. Определив истинные напряжения, можно построить истинную диаграмму растяжения материала, которая дает более точные данные о свойствах материала, чем условная диаграмма. Необходимо учитывать, что закон Гука, как и формулы на его основе, справедлив только до предела пропорциональности.

Одним из основных видов испытаний при определении качества конструкционных материалов, выпускаемых промышленностью, являются испытания на растяжение. Результаты испытаний позволяют судить о прочности материалов при статических нагрузках, выбирать материал для проектируемой конструкции и использовать его характеристики при расчетах на прочность деталей машин и элементов конструкций.

### *Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали.*

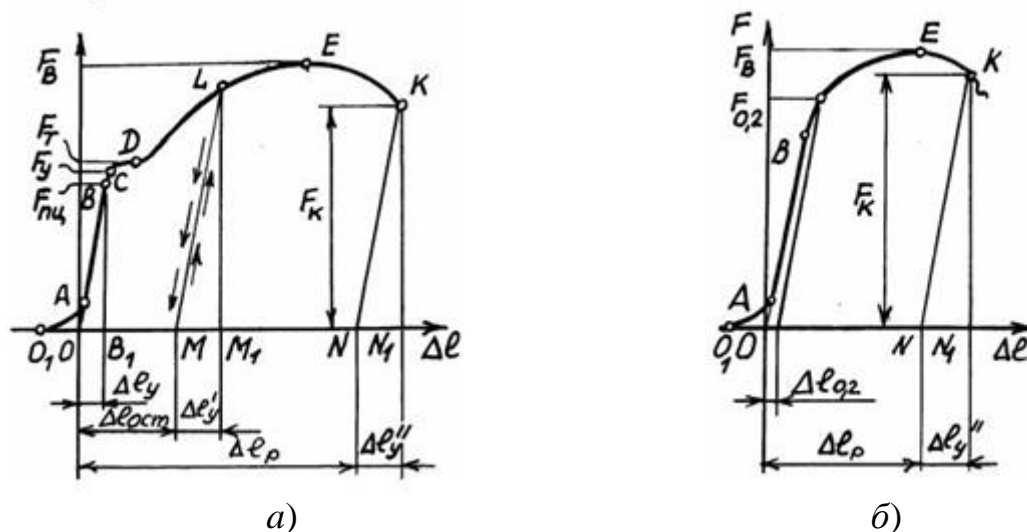
На специальных испытательных машинах получают автоматически диаграмму растяжения стандартного образца в координатах: нагрузка  $F$ - удлинение  $\Delta l$ . На этой диаграмме можно выделить следующие характерные участки (рисунок 1.1.1.). Небольшой криволинейный начальный участок  $O_1A$  является результатом обжатия головок образца в захватах и устранения зазоров в узлах машины. Его исключают, аппроксимируя (удлиняя) участок  $AB$  до пересечения с осью абсцисс, и получают начало координат –  $O$

Участок  $OB$  называют зоной упругости. Здесь материал подчиняется закону Гука и удлинение прямо пропорционально нагрузке до некоторой силы  $F_{пл}$  (точка  $B$ ). После снятия нагрузки деформация  $\Delta l = OB$  исчезает. Деформацию, которая полностью исчезает, после снятия нагрузки называют *упругой деформацией*.

При увеличении нагрузки до  $F_y$  (участок  $BC$ ) начинается отклонение диаграммы от прямой, а после разгрузки появляются остаточные деформации ( $F_y$  фиксируют при появлении остаточных деформаций  $\varepsilon = 0,001-0,005\%$ ).

Участок  $CD$  называют зоной общей текучести, а горизонтальную его часть – *площадкой текучести*. Здесь без заметного увеличения нагрузки  $F_T$  происходит

существенное удлинение образца. Такой процесс деформации, называемый *текучестью материала*, он сопровождается *остаточными (пластическими)* деформациями, не исчезающими после разгрузки образца.



а) малоуглеродистая сталь, б) высокоуглеродистая сталь

Рисунок 1.1.1. – Диаграмма растяжения стали

Деформацию, которая полностью исчезает, после снятия нагрузки называют упругой деформацией. При увеличении нагрузки до  $F_y$  (участок BC) начинается отклонение диаграммы от прямой, а после разгрузки появляются остаточные деформации ( $F_y$  фиксируют при появлении остаточных деформаций  $\varepsilon = 0,001-0,005\%$ ).

Участок CD называют *зоной общей текучести*, а горизонтальную его часть – *площадкой текучести*. Здесь без заметного увеличения нагрузки  $F_T$  происходит существенное удлинение образца. Такой процесс деформации, называемый *текучестью материала*, он сопровождается *остаточными (пластическими)* деформациями, не исчезающими после разгрузки образца.

Участок DE называют зоной упрочнения, т.к. материал вновь способен сопротивляться растяжению с повышением нагрузки до величины

$F_B$  (точка E). Затем на участке EK на образце появляется местное сужение – *шейка*. Участок EK называют зоной местной текучести, т.к. здесь удлинение образца происходит за счет деформации в зоне шейки вплоть до момента разрыва в точке K. Упругая деформация  $\Delta l_{ост} = OM$   $\Delta l_y = NN_1$  при этом исчезнет и образец получит полную остаточную деформацию после разрыва  $\Delta l_p = ON$ .

### Основные механические характеристики материала.

Диаграмма, показанная на рис. 1.1.1, характеризует свойства не материала, а образца, т.к. при испытании нескольких образцов из одного и того же материала, но различных размеров, получают различные подобные по форме диаграммы. Для получения данных о свойствах материала строят диаграмму в координатах  $\sigma - \varepsilon$ .

По диаграмме растяжения (рис. 1.1.1) определяют следующие механические характеристики материала:

**а) характеристики прочности:**

*предел пропорциональности* – максимальное напряжение, до которого материал подчиняется закону Гука ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ):

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}, \quad (1.1)$$

где  $F_{\text{пц}}$  – нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности,  $A_0$  – площадь сечения образца до нагружения;

*предел упругости* (условный) – это напряжение, при котором в материале возникают остаточные деформации не более  $\varepsilon = 0,05\%$ :

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}, \quad (1.2)$$

где  $F_y$  – нагрузка, соответствующая пределу упругости;

*предел текучести* (физический) – это напряжение, при котором происходит рост пластической деформации без заметного увеличения нагрузки

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}, \quad (1.3)$$

где  $F_T$  – нагрузка, соответствующая пределу текучести.

У высокоуглеродистых сталей, цветных металлов, пласт масс и ряда других материалов диаграмма растяжения не имеет площадки текучести. В этом случае, например, для высокоуглеродистой стали (рис. 2.1.1 б)) определяют **условный** предел текучести при нагрузке, соответствующей остаточному удлинению образца  $\varepsilon = 0,2\%$ :

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}; \quad (1.4)$$

*предел прочности* (временное сопротивление) – это отношение максимальной силы, которую может выдержать образец, к его начальной площади

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_0}; \quad (1.5)$$

Кроме того, можно получить **истинное** сопротивление разрыву

$$\sigma_{\text{ви}} = \frac{F_K}{A_{\text{ш}}}, \quad (1.6)$$

где  $A_{\text{ш}}$  – площадь поперечного сечения образца в зоне разрыва шейки.

**б) характеристики прочности:**

*относительное остаточное удлинение* после разрыва

$$\delta = \frac{\Delta l_p}{l_0} 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100\%, \quad (1.7)$$

где  $l_1$  – расстояние между рисками после разрыва, в мм,  $l_0$  – расчетная длина, в мм;

*относительное остаточное сужение* после разрыва



$$\Psi = \frac{\Delta A}{A_0} 100\% = \frac{A_0 - A_{\text{ш}}}{A_0} 100\% . \quad (1.8)$$

**Удельная работа** – характеризует способность материала поглощать энергию при разрыве, вязкость материала и сопротивляемость его воздействию динамических нагрузок:

$$a = \frac{W_F}{V_0} \left[ \frac{H_M}{M^3} \right], \quad (1.9)$$

где  $W_F$ - работа, затраченная на разрыв образца и равная площади диаграммы  $OA\dots EKN_1$ , вычисляется с учетом масштабов нагрузки и удлинения по приближенной формуле:

$$W_F = 0,85 F_B \Delta l; \quad (1.10)$$

где  $V_0 = A_0 l_0$  – объём расчетной части образца до испытания.

Из всех выше перечисленных характеристик в инженерной практике используются основные характеристики:  $\sigma_t$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$ ,  $a$  т.к. их определение не вызывает технических затруднений.

**Влияние повторных нагрузок на механические свойства материалов. Наклеп.**

Если разгрузить образец после достижения в нем напряжений выше предела текучести  $\sigma_t$ , например, в точке  $L$  диаграммы, то перо самописца прочертит линию  $LM$ , параллельную линии  $OB$ . При этом упругая деформация  $\Delta l'_y = MM_1$  исчезнет, а останется пластическая (остаточная) –  $\Delta l_{ост} = OM$ .

При повторном нагружении перо самописца прочертит линию, практически совпадающую с линией разгрузки. В результате получают диаграмму  $MLEK$ . При этом возрастает нагрузка, до которой материал подчиняется закону Гука, и исчезают площадка текучести и часть диаграммы, расположенная левее линии  $ML$ , т.е. начало координат фактически переместится в точку  $M$ . Остаточное удлинение после разрыва будет меньше, чем в образце, не подвергавшемся предварительной пластической деформации, т.е.  $MN < ON$ .

Явление повышения предела пропорциональности после пластической деформации материала при повторном нагружении называется **наклепом**. При этом снижаются пластические свойства материала.

#### **Описание испытательной машины и образцов**

Работу выполняют на универсальной гидравлической испытательной машине марки УГ-20 (или УИМ-60), которая предназначена для испытаний образцов материалов и элементов конструкций статическими нагрузками.

Основными частями машина УГ-20 (рисунок 1.1.2) являются: насосный агрегат, пресс, силоизмеритель.

Насосный агрегат состоит из электродвигателя 1 и масляного насоса высокого давления 2. Насос размещён в баке с залитым маслом. Максимальное давление рабочей жидкости (масла), создаваемое насосом, составляет около 20 МПа. Насос трубопроводами высокого давления сообщается с силовым гидроцилиндром 8 и с гидроцилиндром 11 силоизмерителя.

Пресс имеет основание 3, внутри которого находится червячный редуктор для подъёма и опускания винта 4 вместе с нижним захватом 5. Верхний захват смонтирован в траверсе 7. С помощью захватов 5 закрепляется образец 6, испытываемый на растяжение. Усилие к образцу передаётся от гидроцилиндра 8, перемещающего по направляющим траверсу (стол) 7. Перемещение траверсы через тросик 9 передаётся на барабан 12 для регистрации деформации (удлинения) образца.

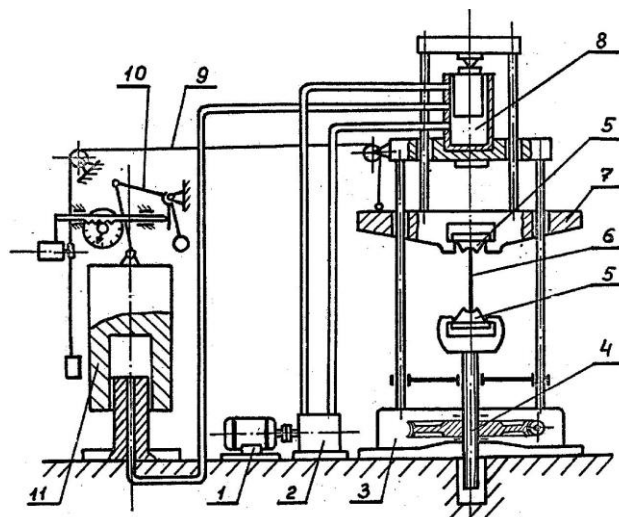


Рисунок 1.1.2 – Схема гидравлической испытательной машины УГ-20

Силовой измеритель через гидроцилиндр 11 передаёт усилие на рычажную систему 10 с противовесом и одновременно на рейку с закреплённым на ней пером самописца и стрелку циферблата, регистрируя нагрузку. Машина снабжена самопишущим диаграммным аппаратом 12 для записи диаграммы в координатах: нагрузка – перемещение.

Образцы для испытаний. Для определения механических характеристик материалов используют стандартные цилиндрические и плоские образцы согласно ГОСТ 1497-73 (рисунок 1.1.3).

Расчетной длиной образца  $l_0$  называется длина его цилиндрической части, в пределах которой производится измерение остаточного удлинения после разрыва. Конические переходы обеспечивают уменьшение **концентрации** напряжений и исключают вероятность разрушения образца у головок. Поверхность образца тщательно обрабатывают.

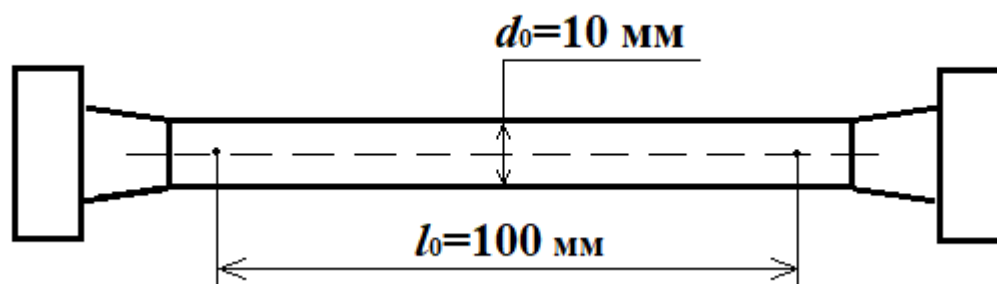


Рисунок 1.1.3. – эскиз цилиндрического образца

### ***Порядок проведения работы.***

1. Для испытания предлагаются круглые или плоские образцы, изготовленные из малоуглеродистой стали. Затем для цилиндрических образцов измеряют штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм в трех сечениях по длине диаметр  $d_0$ , а для плоских – ширину  $b_0$  и высоту  $h_0$  поперечного сечения. По наименьшему из полученных размеров определяют  $A_0$ . Замеряют расчетную длину образцов  $l_0$  также с точностью 0,1 мм и заносят все данные в журнал наблюдений.

2. Вставляют образец в захваты 5 машины. Слегка натянув образец, проверяют диаграммный аппарат и наносят ось абсцисс диаграммы, проворачивая барабан 12 вручную.

3. Включают машину и начинают нагружение. В точке диаграммы сбрасывают нагрузку практически до нуля, а затем  $L$  снова повышают её (демонстрация наклепа) и доводят образец до разрушения. При этом скорость нагружения не должна превышать 0,1 длины образца в минуту, иначе будут получены завышенные значения механических характеристик.

4. Вынимают разрушенный образец из захватов машины, измеряют диаметр его в месте разрыва  $d_{ш}$  и длину после разрыва  $l_1$ , сложив обе его части.

5. Зная масштаб полученной диаграммы, определяют значения,  $F_T$ ,  $F_B$ ,  $F_K$  и вычисляют характеристики прочности по формулам (1.3) и (1.5), а истинное значение сопротивления разрыву  $\sigma_{ви}$  по формуле (1.6).

6. Определяют характеристики пластичности  $\delta$  и  $\Psi$  по формулам (1.7) и (1.8).

7. Вычисляют удельную работу  $a$ , затраченную на разрыв образца, по формуле (1.9).

8. По полученным значениям  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  и  $\delta$  из справочных данных (Таблица 1.1.1) определяют марку стали. Остальные показатели характеризуют, но не определяют марку материала.

Таблица 1.1.1 – Основные механические характеристики для различных марок сталей

Марка стали		Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
Сталь углеродистая обыкновенного качества	Ст. 0	320 – 470	190	22
	Ст. 1	320 – 400	–	33
	Ст. 2	340 – 420	220	31
	Ст. 3	380 – 430	240	27-26
	Ст. 4	420 – 520	260	26-23
	Ст. 5	500 – 620	280	21-19
	Ст. 6	600 – 720	310	15-13
	Ст. 7	700 – 800 и более	–	11-9

Сталь углеродистая качественная конструкционная	30	480	290	21
	35	520	310	20
	40	570	320	19
	45	600	340	16
	50	630	350	14

### **Содержание отчёта:**

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Испытательная машина (тип, марка).
4. Эскизы образцов (до и после испытания).
5. Исходные данные:
  - 5.1. Диаметр образца до испытания  $d_0$
  - 5.2. Площадь поперечного сечения до испытания  $A_0$
  - 5.3. Диаметр образца после испытания в месте шейки  $d_{ш}$
  - 5.4. Площадь поперечного сечения в месте шейки  $A_{ш}$
  - 5.5. Расчётная длина образца до испытания  $l_0$
  - 5.6. Длина образца после испытания  $l_1$

**В выводах** необходимо отметить:

как происходит разрушение образца;  
какова величина относительного удлинения при разрушении;  
совпадает ли диаграмма растяжения с диаграммой истинных напряжений;  
почему истинные напряжения больше условных.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Для чего нужна диаграмма растяжения материала, и в каких координатах она строится?
3. На какой машине проводятся испытания? Опишите её конструкцию.
4. Как работают силоизмерительное и записывающее устройство?
5. Какие образцы применяют при испытании на растяжение? Назовите их основные характеристики.
6. Почему диаграмма растяжения, полученная на машине, имеет начальный криволинейный участок  $O_1A$ ?
7. Что характеризует диаграмма растяжения, построенная в координатах  $F - \Delta l$ : свойства образца данных размеров или свойства материала?
8. Какие зоны имеет диаграмма растяжения? Опишите их.
9. Для какого участка диаграммы справедлив закон Гука?
10. Что понимают под пределом пропорциональности, пределом упругости, пределом текучести и пределом прочности?
11. Для каких материалов определяют условный предел текучести?
13. Какие деформации называют упругими, а какие остаточными (пластическими)? Как их определить на диаграмме растяжения?

14. Чем отличаются друг от друга диаграммы растяжения при пластичном и хрупком разрушении материалов?
  15. Какие характеристики прочности материалов Вам известны?
  16. Какие характеристики пластичности материалов Вам известны?
  17. Что называют наклёпом? Как изменяются механические свойства материала после наклёпа?
  18. Как используют в технике явление наклёпа? Приведите примеры.
  19. Когда появляется шейка на образце?
- Литература: [1-4], [5] - §§13 – 16; [6] - §§ 3.7 - 3.8; [7] - §10.

## 1.2. Лабораторная работа №2 «Испытание на сжатие образцов из стали, и чугуна»

**Цель работы:** изучение поведения пластичных, хрупких и анизотропных материалов при сжатии и определение их механических характеристик.

**Теоретическая часть работы.** Помимо испытания на растяжение вторым основным видом является испытание материалов на сжатие. При этом, так же, как и при растяжении, получают диаграмму в координатах  $F - \Delta l$ . Рассмотрим особенности поведения различных материалов при сжатии (рисунок 1.2.1).

Из диаграммы сжатия стального образца (рисунок 1.2.1, кривая 1) видно, что первоначально наблюдается линейная зависимость между нагрузками и деформациями (подчинение закону Гука). Затем появляется площадка текучести, выраженная не столь ярко, как при растяжении.

Стальной цилиндрический образец при сжатии укорачивается и принимает бочкообразную форму вследствие трения между его торцами и нажимными плитами машины. Влияние трения можно уменьшить путем смазки опорных поверхностей образца или применением образцов специальной формы. Это дает возможность повысить достоверность результатов испытаний.

При дальнейшем деформировании сопротивление образца резко увеличивается, образец расплющивается, иногда с образованием трещин вдоль образующих. Предел прочности для пластичных сталей на сжатие **не существует**. Можно лишь определить **предел текучести** на сжатие по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad \sigma_{\tau}^{\text{сж}} = \frac{F_{\tau}}{A_0}. \quad (1.11)$$

Здесь также, как и при растяжении, в расчетах используется **первоначальная** площадь поперечного сечения образца  $A_0$ .

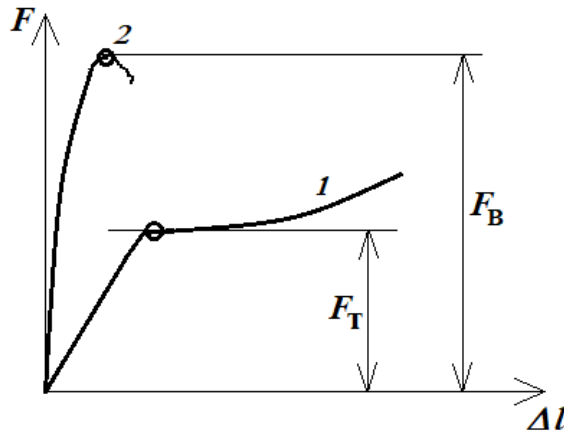


Рис. 1.2.1. – Диаграммы сжатия образцов из различных материалов: 1 – малоуглеродистая сталь; 2 – чугун;

При сжатии чугунного образца (рисунок 1.2.1, кривая 2) линейной зависимости между нагрузками и деформациями не наблюдается практически с начала нагружения. Однако в условиях тех небольших деформаций, при которых чугун работает в деталях машин и сооружений, диаграмму  $F - \Delta l$  принимают прямолинейной и считают, что материал подчиняется закону Гука. При этом на диаграмме четко выражена только разрушающая нагрузка  $F_B$ . Отношение  $F_B$  к первоначальной площади  $A_0$  поперечного сечения образца называют *пределом прочности* (временным сопротивлением) чугуна на сжатие

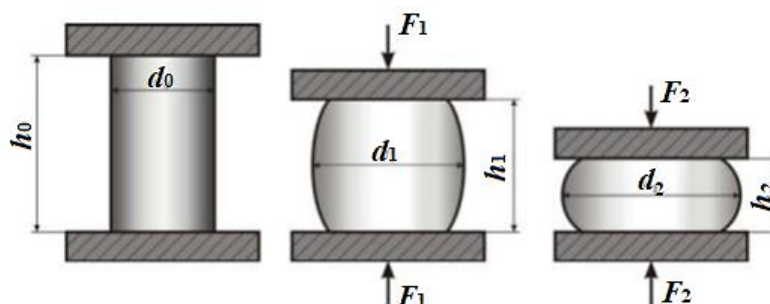
$$\sigma_B^{сж} = \frac{F_B}{A_0}. \quad (1.12)$$

Образец, укорачиваясь незначительно, принимает бочкообразную форму, и разрушается внезапно с образованием трещин, наклонённых к оси образца под углом  $\alpha = (45 - 50)^\circ$  (рис. 1.2.2, б). Образец разрушается под действием максимальных касательных напряжений  $\tau_{max}$ , возникающих на площадках, наклонённых к оси на угол  $\alpha = 45^\circ$ . Нагрузочная способность чугуна при разрушении падает практически мгновенно, что характерно для **хрупких** материалов

#### **Описание испытательной машины и образцов**

Работа выполняется на универсальной испытательной машине, описанной в лабораторной работе 1.1.

Для испытания на сжатие пластичных материалов (малоуглеродистые стали, медь, алюминий) и хрупких (чугун) применяют цилиндрические образцы диаметром  $d_0$  и высотой  $h_0 = (1,5 \dots 2,0) d_0$  (рис. 2.2.2, а, б ).



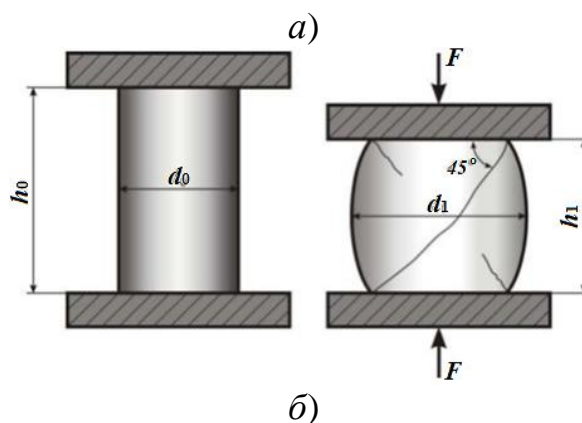


Рис. 1.2.2. – Особенности разрушения образцов из различных материалов:  
а) сталь; б) чугун;

При меньшей высоте образца силы трения, возникающие на торцах, оказывают значительное влияние на развитие деформаций и на прочность материалов. Образцы с большей высотой не рекомендуется применять вследствие влияния продольного изгиба на результаты испытаний.

### **Порядок проведения работы**

1. Штангенциркулем измеряют поперечные размеры и высоту каждого образца с точностью 0,1 мм и записывают в журнал наблюдений.
2. Каждый образец фиксируют на испытательной машине. Опустив перо самописца на диаграммный барабан, проворачивают последний вручную и наносят нулевую отметку – ось  $\Delta l$ . Затем включают машину.
3. При испытании стального образца нагружение продолжают до тех пор, пока полная деформация его не составит примерно  $\Delta h = 1/3$  от первоначальной высоты  $h$ . По диаграмме определяют положение площадки текучести и, зная масштаб нагрузки, вычисляют предел текучести на сжатие по формуле (1.11).
4. При испытании чугунного образца деформирование продолжают до его разрушения. По показанию контрольной стрелки силоизмерителя и по полученной диаграмме определяют разрушающую нагрузку  $F_B$  и вычисляют предел прочности на сжатие  $\sigma_B^{сж}$  по формуле (1.12).

### **Содержание отчёта:**

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Испытательная машина.
4. Эскизы образцов.
5. Основные исходные данные:
  - 5.1. Размеры образцов: диаметр  $d$ ; высота  $h$ ; ширина  $a$ ; длина  $b$ .
  - 5.2. Площади поперечных сечений образцов  $A_0$ .
6. Копии машинных диаграмм сжатия образцов.
7. Результаты испытаний.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какова цель лабораторной работы?
2. На какой машине выполняется работа?
3. Для чего нужна машинная диаграмма сжатия? В каких координатах получают ее при испытаниях?
4. Чем отличаются диаграммы сжатия пластичных и хрупких материалов?
5. Какие материалы называют анизотропными?
6. Приведите пример из техники с рациональным использованием анизотропных свойств материала.
7. Какие явления можно ожидать по сравнению с обычным испытанием стального образца на сжатие, если торцевые поверхности образца смазать машинным маслом?
9. Какие характерные особенности разрушения проявляются у образцов из стали и чугуна при испытании на сжатие?
10. Какие механические характеристики материалов получают при испытании на сжатие пластичных материалов? Хрупких?
11. Отличаются ли значения пределов текучести при сжатии и растяжении образцов из малоуглеродистой стали?
12. 13. Можно ли оценить механические свойства материалов непосредственно по машинной диаграмме?
14. В чем отличие в поведении стального образца при испытании на сжатие и на растяжение?

### 1.3. Лабораторная работа №3 «Определение коэффициента Пуассона ( $\mu$ ) и модуля упругости $E$ для стали при растяжении»

**Цель работы:** экспериментальное определение коэффициента Пуассона и модуля упругости при растяжении.

**Теоретическая часть работы.** По закону Гука абсолютная продольная деформация стержня при растяжении – сжатии силой  $F$  в пределах упругих деформаций определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA} \quad (1.13)$$

где  $N=F$  – продольная (нормальная) сила;  $l$  – расчётная длина стержня;  
 $E$  – модуль продольной упругости (модуль упругости при растяжении);  
 $A$  – площадь поперечного сечения стержня.

Измерив опытным путём величину осевой нагрузки  $F$  и вызванную ею продольную деформацию  $\Delta l$  и зная размеры испытуемого стержня, можно вычислить модуль продольной упругости по формуле, полученной из (1.13).

$$E = \frac{F}{\varepsilon A}; \quad (N = F; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}), \quad (1.14)$$

где  $\varepsilon$  – относительная продольная деформация.

Под воздействием внешней нагрузки изменяются как продольные, так и поперечные размеры стержня, соотношение между которыми при растяжении или сжатии для каждого материала является величиной постоянной в пределах упругих деформаций.



Коэффициентом Пуассона  $\mu$  называют абсолютную величину отношения относительной поперечной деформации  $\varepsilon'$  к относительной продольной деформации  $\varepsilon$ , т. е.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|, \quad (1.15)$$

где  $\varepsilon' = \frac{\Delta b}{b}$ ,  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ;

$b$  и  $l$  – начальные поперечные и продольные размеры бруса, соответственно.

Коэффициент Пуассона можно вычислить, если измерить абсолютные линейные деформации бруса в поперечном  $\Delta b$  и продольном  $\Delta l$  направлениях при заданной осевой нагрузке  $F$ .

Модуль упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$  характеризуют упругие свойства материала и определяются экспериментально. Для различных материалов коэффициент Пуассона изменяется от нуля (для пробки) до величины, близкой к 0,5 (для резины и парафина). Для стали модуль упругости  $E$  принимает значения в пределах  $(1,8 - 2,2) \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu$  – в пределах  $(0,25 - 0,33)$ .

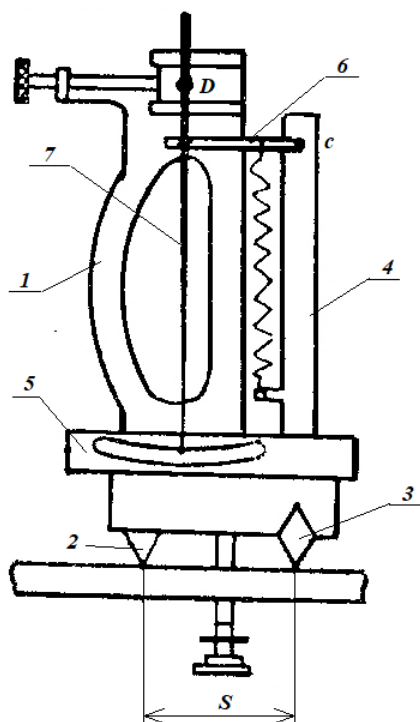
#### ***Описание лабораторной установки.***

Величина абсолютного удлинения и сужения образца определяется при помощи тензометров Гугенбергера (рисунок 1.3.1 )

Механический тензометр Гугенбергера применяется для абсолютного удлинения и сужения образца.

Тензометр Гугенбергера представляет собой рычажную систему смонтированную на корпусе 1 (рисунок 1.3.1), который опирается на поверхность исследуемого элемента двумя призмами: неподвижной 2 и подвижной 3. Расстояние между нижним ребром неподвижной и подвижной призм называется базой тензометра и обозначается  $S$  ( $S=20$  мм). При изменении расстояния  $S$  в результате деформации образца на величину  $\Delta S$  подвижная призма наклоняется, поворачиваясь вокруг её верхнего неподвижного ребра. При этом конец “с” рычага 4, жёстко соединённого с подвижной призмой, смещается в горизонтальном направлении и подводом 6 смещает стрелку 7, шарнирно закреплённую в точке  $D$ . Конец стрелки 7 перемещается вдоль миллиметровой шкалы 5. Цена одного деления шкалы тензометра равна  $10^{-3}$ .

Рисунок 1.3.1. – Механический тензометр Гугенбергера



Растяжение образца производится при помощи разрывной машины ИМ-4Р.

Чтобы исключить влияние неравномерного растяжения образца в случае неточное его установки в захват машины, на образце закрепляют по два тензометра по одному с каждой стороны, как показано на рисунке 1.3.2. При этом  $T_1$  и  $T_2$  тензометры измеряют деформации в продольном направлении, а  $T_3$  и  $T_4$  – в поперечном направлении.

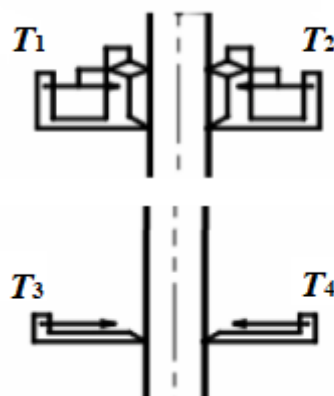
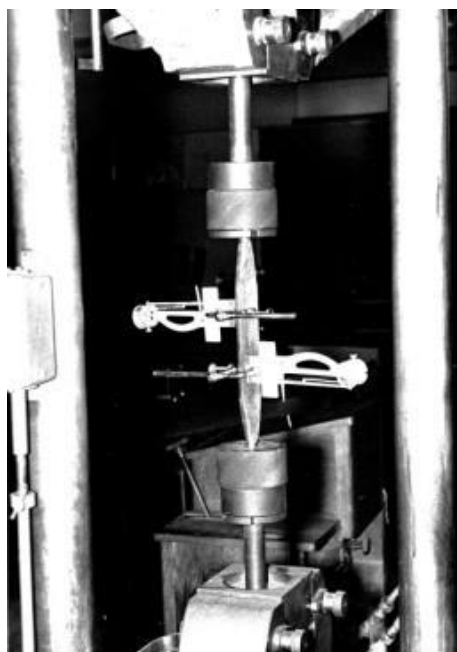


Рисунок – 1.3.2 Схема установки образца на разрывной машины ИМ-4Р

### **Методика проведения опыта и обработки результатов**

1. Штангенциркулем измеряют поперечные размеры образца  $b$  и  $a$  с точностью 0,1 мм, определяют величину ступени нагружения  $\Delta F$  и число опытов  $m$  и записывают эти данные в журнал наблюдений.
2. Нагружают образец ступенями  $\Delta F$ , равными 5 кН и 20 кН и записывают соответствующие показания всех тензометров  $T_i$ .
3. Опыт повторяют трижды.

4. Вычисляют среднюю разность отсчетов по формуле

$$\Delta n_i = \frac{\Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3}{3}$$

5. Определяют абсолютное удлинение (укорочение) на ступень нагружения 15 кН.

6. Вычисляют среднее значение приращений показаний двух тензометров 1,2 для измерения продольных деформаций и двух тензометров 3,4 – для измерения поперечных деформаций по формулам соответственно:

$$\Delta l_{\text{ср}} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{2}$$

$$\Delta l'_{\text{ср}} = \frac{\Delta l_3 + \Delta l_4}{2}$$

7. Определяют относительную деформацию

Продольную  $\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{ср}}}{S}$

Поперечную  $\varepsilon' = \frac{\Delta l'_{\text{ср}}}{S}$

7. Коэффициент Пуассона и модуль упругости стали

Коэффициент Пуассона  $\eta = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|$ , модуль упругости  $E = \frac{\Delta P}{F} \cdot \frac{1}{\varepsilon}$ .

### **Содержание отчёта**

1. Название лабораторной работы.

2. Цель лабораторной работы.

3. Испытательная машина.

4. Исходные данные.

4.1. Поперечное сечение образца:

ширина  $b$ , высота  $a$ , площадь поперечного сечения  $A$ .

4.2. База тензометров  $S$

4.3. Коэффициент увеличения тензометра  $k$ .

4.4. Табличные значения:

- модуль продольной упругости стали  $E$ ;

- коэффициент Пуассона стали  $\mu$ .

### **Обработка результатов эксперимента**

	Расчетная формула	Механические тензо-метры			
		T1	T2	T3	T4
Средняя разность отсчетов (дел.)	$\Delta n_i = \frac{\Delta n_1 + \Delta n_2 + \Delta n_3}{3}$				

Абсолютное удлинение (укорочение) на ступень нагружения 15 кН	$\Delta l_i = \Delta n_i \cdot 10^{-3}$				
Среднее абсолютное удлинение	$\Delta l_{cp} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{2}$				
укорочение, мм	$\Delta l'_{cp} = \frac{\Delta l_3 + \Delta l_4}{2}$				
Относительная продольная (поперечная) деформация	$\varepsilon = \frac{\Delta l_{cp}}{S}$				
	$\varepsilon' = \frac{\Delta l'_{cp}}{S}$				
Коэффициент Пуассона	$\eta = \left  \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right $				
Модуль упругости, МПа	$E = \frac{\Delta P}{F} \cdot \frac{1}{\varepsilon}$				

## 5. Обработка результатов опыта.

5.1. Расчёт опытных значений абсолютной продольной  $\Delta l_{cp}$  и абсолютной поперечной  $\Delta l'_{cp}$  деформаций.

5.2. Расчёт опытных значений относительной продольной  $\varepsilon$  и относительной поперечной  $\varepsilon'$  деформаций.

5.3. Расчёт опытных значений модуля продольной упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\mu$ .

6. Сравнение опытных и теоретических значений.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Как формулируется и записывается закон Гука при растяжении?
3. Что называют модулем продольной упругости материала? Каков его физический смысл?
4. Как записывается формула абсолютного удлинения бруса при растяжении? Что такое жесткость сечения бруса при растяжении?
5. Что происходит с поперечными размерами бруса при его растяжении в продольном направлении?
6. Что такое относительная продольная и относительная поперечная деформации бруса? Как их рассчитывают? Что такое коэффициент Пуассона? Каковы пределы его изменения?
7. Как устроен механический тензомер Гугенбергера? Что им измеряют? Что такое коэффициент увеличения тензометра?
8. Что называют базой тензометра?
11. Что такое ступень нагружения?
12. Как определяется наибольшая нагрузка, прикладываемая к образцу?

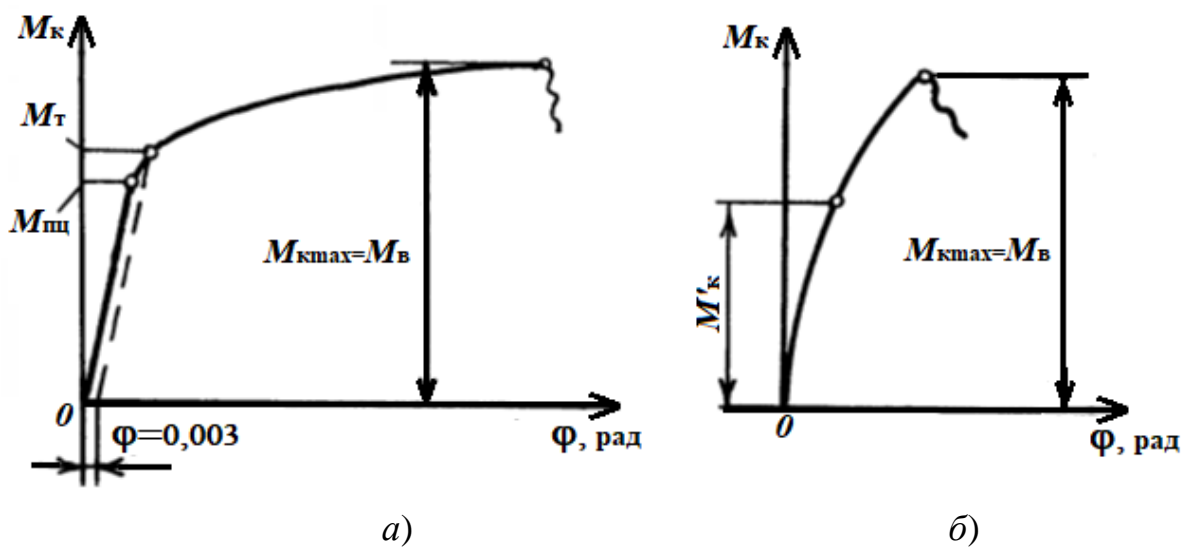
Литература: [5] - §§ 9,12; [6] - § 3.1; [7] - § 10.

#### 1.4 Лабораторная работа №4 «Испытание на кручение образцов из стали и чугуна»

**Цель работы:** определение механических характеристик пластичных и хрупких материалов при кручении.

##### **Теоретическая часть работы.**

В инженерной практике на кручение работают валы машин, витые пружины и др. При кручении стержня круглого и кольцевого поперечных сечений возникает деформация чистого сдвига. При этом максимальные касательные напряжения  $\tau_{\max}$  возникают в поверхностном слое стержня в поперечных и продольных направлениях, а главные нормальные напряжения  $\sigma_1 = \tau_{\max}$ ,  $\sigma_3 = -\tau_{\max}$  лежат в плоскости, касательной к поверхности стержня, и направлены под углом  $\alpha = 45^\circ$  к его образующей (см. рисунок 1.4.1, а). В процессе закручивания стандартных образцов получают диаграммы в координатах крутящий момент  $M_k$  - угол закручивания  $\varphi$ .



а) малоуглеродистая сталь; б) чугун

Рисунок 1.4.1. Диаграммы кручения образцов:

При испытании **стального образца** (рисунок 1.4.1, а) при увеличении крутящего момента от нуля до некоторой величины  $M_{\text{пц}}$  сохраняется прямая пропорциональная зависимость между величиной угла закручивания и крутящим моментом  $M_k$ , т.е. в этом интервале справедлив закон Гука при сдвиге  $\tau = G\gamma$ , и угловую деформацию образца определяют по формуле

$$\varphi = \frac{M_k l_0}{GJ_p} \quad \varphi = \frac{M_k l_0}{GJ_p} . \quad (1.16)$$

Из этой формулы можно получить и опытное значение модуля сдвига.

$$G^0 = \frac{M_k l_0}{\varphi J_p} . \quad (1.17)$$

Теоретическое значение модуля сдвига вычисляют, используя справочные данные, по известной формуле

$$G^T = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1.8)$$

где  $E$  и  $\mu$  – табличные значения модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона для материала образца, соответственно.

### Предел пропорциональности при кручении

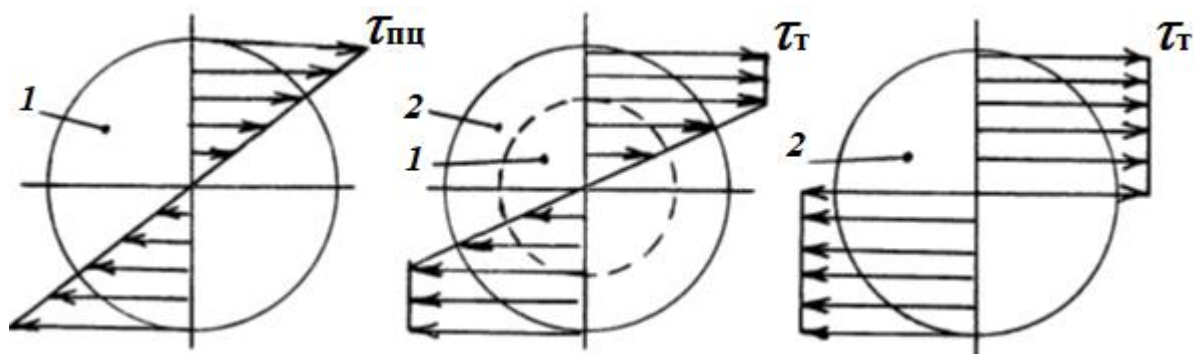
$$\tau_{\text{пл}} = \frac{M_{\text{пл}}}{W_p}, \quad (1.19)$$

где  $\sigma = \frac{M_x}{J_x} y$  – полярный момент сопротивления поперечного сечения стержня с расчетным диаметром  $d_0$ . При этом касательные напряжения в сечении распределяются по линейному закону (рисунок 1.4.2, а). Дальнейшее нагружение образца приводит к нарушению прямой пропорциональности и диаграмма переходит в пологую кривую, т. е. в материале образца развиваются пластические деформации сначала в поверхностном слое при напряжениях, равных пределу текучести  $\tau_T$ , а при дальнейшем деформировании эта зона достигает глубоких слоев, образуя кольцевую зону пластического деформирования. В центральной части сечения напряжения будут ниже  $\tau_T$ , т. е. там остается упругая зона (рисунок 1.4.2 б).

В качестве **предела текучести**  $\tau_T$  условно принимают напряжения, при которых в образце появляются остаточные угловые деформации  $\varphi = 0,003$  рад.

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_p}. \quad (1.20)$$

В пределе пластическая зона заполнит все сечение (рисунок 1.4.2, в), несущая способность материала будет исчерпана и напряжения во всех точках сечения будут равны пределу текучести  $\tau_T$ .



а) упругая стадия; б) стадия пластического деформирования; в) стадия разрушения;  
1 – упругая зона; 2 – пластическая зона.

Рисунок 1.4.2– Эпюры касательных напряжений при кручении

В момент разрушения образца вследствие упрочнения материала условная величина предела прочности  $\tau_B$  может быть определена по формуле:

$$\tau_B = \frac{M_{\max}}{W_{\text{пл}}}, \quad (1.21)$$

где  $W_{\text{пл}} = \frac{\pi d^3}{12}$  – пластический момент сопротивления поперечного сечения при кручении.

Разрушение стального образца происходит по плоскости, перпендикулярной к оси образца, вследствие **сдвига (среза)** от действия  $\tau_{\max}$ . Так разрушаются при кручении все пластичные материалы (рисунок 1.4.3, б).

Чугунный образец с увеличением крутящего момента не совсем строго следует закону Гука, т. е. диаграмма  $M_k - \varphi$  вплоть до разрушения несколько криволинейна (рисунок 1.4.3, б). Разрушение образца происходит вследствие **отрыва** по наклонным винтовым сечениям, расположенным под углом  $\alpha \approx 45^\circ$  к его образующим, под действием главных растягивающих напряжений  $\sigma_1 = \tau_{\max}$ . Зернистый характер излома является следствием разрушения материала путём **отрыва** частиц. А условный **предел прочности** материала равен:

$$\tau_B = \tau_{\max} = \frac{M_{k\max}}{W_p} \quad (1.22).$$

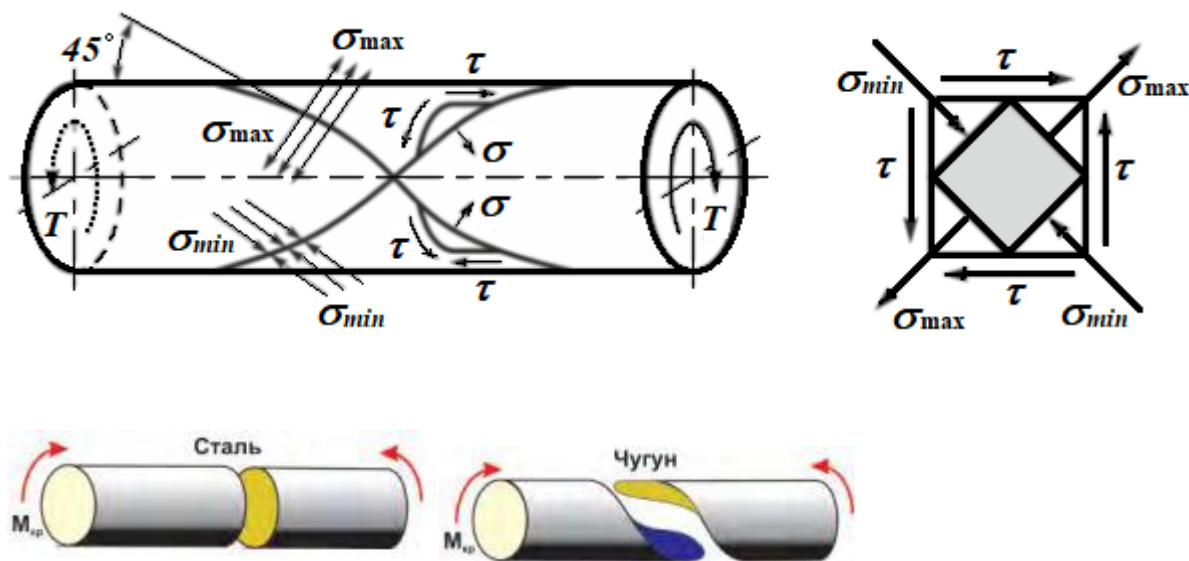


Рисунок 1.4.3 – Напряжённое состояние (а) и характер разрушения образцов (б) при кручении/

#### **Описание испытательной машины и образцов.**

Работа выполняется на машине КМ-50 (рисунок 1.4.5). машина имеет станину, на которой смонтированы механизмы нагружения и силоизмерения.

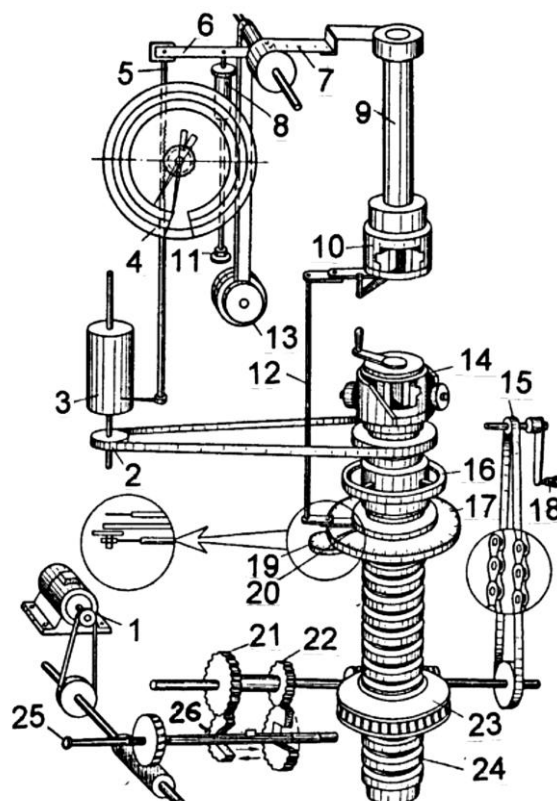


Рисунок 1.4.5 – Кинематическая схема испытательной машины КМ-50

**Механизм нагружения.** Нагружение образца, установленного в нижнем 14 и в верхнем 10 захватах машины, осуществляется следующим образом. Крутящий момент на валу электродвигателя 1 через клиноременную передачу приводит во вращение червячную пару, которая через зубчатые зацепления 21, 22 и 23 вращает ходовой винт 24 с нижним захватом 14. Для ручного нагружения образца машина снабжена также ручным приводом, состоящим из рукоятки 18 и цепной передачи 15, нижнее зубчатое колесо которого вращает через зубчатую передачу 23 ходовой винт 24. Нагружение можно производить при двух скоростях: 1 об/мин и 0,3 об/мин (перемещая стержень 25 со скользящей шпонкой 26 до зацепления ее с зубчатыми колесами 21 или 22). При ручном приводе шпонка 26 вообще выводится стержнем 25 из зацепления с зубчатыми передачами 21 и 22. При закреплении в захватах машины образцов различной длины нижний захват 14 перемещают по высоте, вращая маховик 16. Угол закручивания в пределах 3600 отсчитывают по шкале 17 со стрелочным указателем 20. Для отсчета целого числа оборотов машина снабжена счетчиком 19 с пределом измерения 10 оборотов. Показания угла закручивания по шкале 17 соответствуют относительному углу закручивания нижнего 14 и верхнего 10 захватов машины, что обеспечивается корректором 12.

**Механизм силоизмерения.** При кручении образца верхний захват 10 наматывает на свой вал 9 тонкую гибкую тягу 7, которая отклоняет маятник 13 до тех пор, пока не будет уравновешен крутящий момент, возникающий в образце. При отклонении маятника 13 рычаг 6 перемещает зубчатую рейку 5, приводящую во



вращение зубчатое колесо, насаженное на ось стрелки круговой шкалы 4 моментов. Одновременно перо, закрепленное на рейке 5, записывает на диаграммном аппарате 3 зависимость  $M_k - \varphi$ . Масштаб записи угла закручивания  $\varphi$  можно менять в пределах: 1 мм = 0,5° или 1 мм = 0,1°. Барабан 3 приводится во вращение от ходового винта 24 гибкой связью 2. Для предотвращения резкого падения маятника 5 вниз после разрушения образца к рычагу 6 присоединен шток масляного амортизатора 8. Для регулирования скорости опускания маятника предусмотрен вентиль 11.

**Образцы для испытания на кручение** (рисунок 1.4.6). Длина рабочей цилиндрической части стандартного образца обычно составляет  $l_0 = 10d_0$ . Для закрепления в захватах машины образцы имеют головки с лысками (гранями). С целью уменьшения концентрации напряжений переход от цилиндрической части образца к головкам выполнен по радиусу.

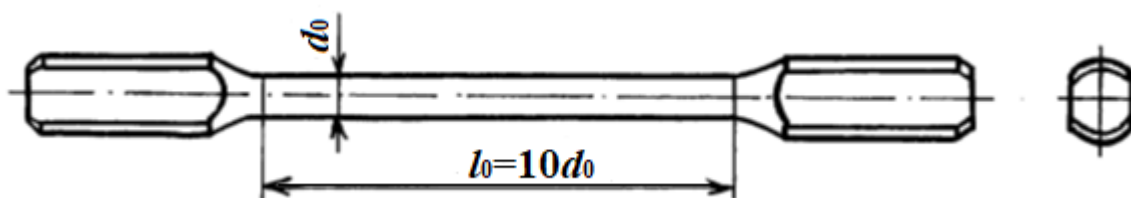


Рисунок 1.4.6. – Образец для испытания на кручение

#### **Методика проведения опыта и обработка результатов:**

1. Измеряют расчетную длину  $l$ , диаметры образцов  $d$  и вычисляют полярные моменты сопротивления сечений  $W_p$ . Результаты заносят в журнал наблюдений.
2. Закрепляют образец в захватах испытательной машины, включают ее и доводят образец до разрушения. При этом фиксируют величину момента  $M_t$ , соответствующего площадке текучести (для стального образца), величину максимального момента  $M_b$  при разрушении образцов и величину максимального угла закручивания  $\varphi_b$ . Результаты заносят в журнал наблюдений.
3. Оценивают характер разрушения образцов.
4. Вычисляют по формулам (1.20; 1.21) пределы текучести  $\tau_t$  и прочности  $\tau_b$  (для стального образца) и по формуле (1.22) предел прочности  $\tau_b$  для чугунного образца. Определяют относительный угол закручивания  $\theta_b$ , результаты заносят в журнал наблюдений.
5. Изображают диаграммы кручения стального и чугунного образцов.

#### **Содержание отчета**

1. Название лабораторной работы.
2. Цель лабораторной работы.
3. Испытательная машина.
4. Эскиз образца до и после испытания.
5. Исходные данные:
  - 5.1. Расчетная длина  $l_0$ .

5.2. Расчетный диаметр  $d_0$

5.3. Полярный момент инерции сечения  $J_p$ .

5.4 Полярный и пластический моменты сопротивления сечения

$W_p$ ;  $W_{пл}$ .

Формы, размеры и геометрические характеристики сечений образцов

Материал образца	Диаметр $d$ мм	Расчетн. длина $l$ , мм	Полярн. мом. инер- ции $J_p$ , мм <sup>4</sup>	Момент со- прот. $W_p$ , мм <sup>3</sup>
Сталь				
Чугун				

## 6. Журнал наблюдений

Нагрузки и деформации Материал образца	$M_t$ , Нм	$M_b$ , Нм	$\Phi_b$ , град	Характер раз- рушения об- разца
Сталь				
Чугун				

7. Вычисления.

8. Диаграммы кручения.

9. Выводы.

## Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?

2. Из каких основных узлов состоит машина КМ-50? Расскажите их назначение и устройство?

3. Какое напряженное состояние возникает в каждой точке образца при кручении?

4. Как формулируется закон Гука при кручении?

5. Как вычисляются напряжения при кручении и как они распределяются в поперечном сечении образца при упругом и при пластическом деформировании?

6. Что называют жесткостью поперечного сечения стержня при кручении?

9. Что называют полярным моментом сопротивления?

7. Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?

8. Какая зависимость существует между величинами  $E$ ,  $G$  и  $\mu$ ?

9. Во сколько раз изменится величина угла закручивания, если диаметр образца уменьшится вдвое?
10. Каковы отличительные особенности диаграмм кручения стержней из пластичных и хрупких материалов?
11. Почему диаграмма кручения стального образца не имеет нисходящего участка?
12. Какие характеристики прочности можно получить при испытании образцов из пластичных и хрупких материалов?
- Литература: [5] - §§ 20,21; [6] - §§ 5.1 – 5.3, 5.5;  
[7] – §§ 26,37,39.

## 2. ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

### 2.1 Лабораторная работа №5 «Исследование распределения напряжений при поперечном изгибе»

**Цель работы:** экспериментальное исследование закона распределения нормальных напряжений по сечению балки и сравнение полученных результатов с нормальным напряжением, вычисленным теоретически.

**Теоретическая часть работы.** Деформация изгиба характеризуется тем, что в поперечных сечениях балки возникают изгибающие моменты и часто, одновременно с последними, - поперечные силы. Изгиб называют чистым, если в сечениях балки возникают только изгибающие моменты. Если же наряду с изгибающими моментами в сечениях балки возникают и поперечные силы, изгиб называют поперечным. Деформация изгиба имеет место в результате действия внешних сил, приложенных перпендикулярно к оси балки, а также от пар сил, плоскость действия которых проходит через ее ось. Плоскости, в которых лежат главные центральные оси инерции поперечных сечений, называют главными плоскостями балки. Если плоскость действия сил (силовая плоскость) проходит через одну из главных плоскостей балки и ось ее деформируется (искривляется) в этой же плоскости, изгиб называют плоским или прямым (рисунок 2.1.1, а).

Чистый изгиб (участок  $a - b$ , рисунок 2.1.1, а) возникает, если в поперечном сечении балки действует только изгибающий момент ( $Q=0$ ,  $M_x = -M = \text{const}$ ). Если в сечении балки действует также и поперечная сила, то имеет место поперечный прямой изгиб (участок  $b - c$ , рисунок 2.1.1, а).

При чистом изгибе справедлива гипотеза плоских сечений: поперечное сечение, плоское до деформации, остается плоским и после деформации. Данная гипотеза вместе с уравнениями статики позволяет получить зависимость для определения напряжений при чистом изгибе (3.1.1).

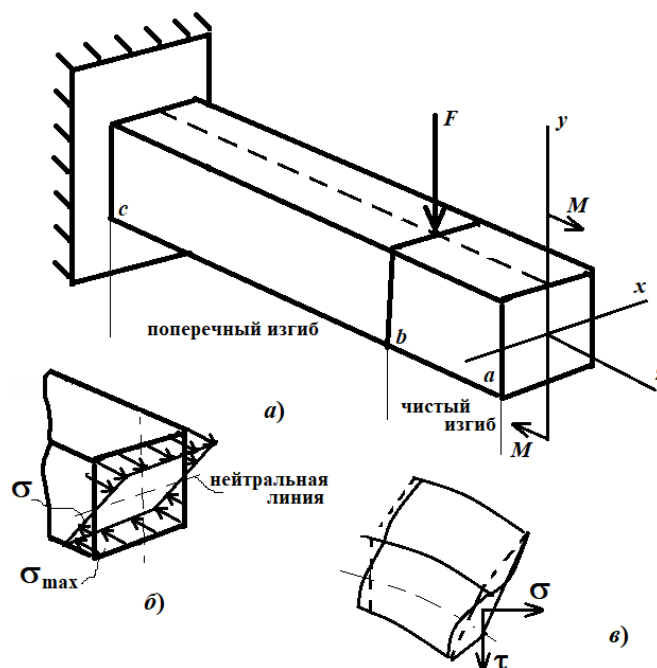


Рисунок 2.1.1 – Деформация изгиба

$$\sigma = \frac{M_x}{J_x} y, \quad (2.1)$$

где  $M_x$  – изгибающий момент в рассматриваемом сечении балки;  $J_x$  – осевой момент инерции сечения балки относительно нейтральной линии;  $y$  – расстояние от нейтральной линии до точки, в которой определяется напряжение.

Из выражения (2.1) видно, что нормальные напряжения зависят от величины "  $y$  " линейно. На рисунке 2.1.1, б показана эпюра распределения нормальных напряжений при чистом изгибе. Наибольшей величины ( $\sigma_{\max}$ ) напряжения достигают в точках (волокнах) наиболее удаленных от нейтральной линии, т.е. при  $y = y_{\max}$ , а на нейтральной линии они равны нулю.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{J_x} y_{\max} = \frac{M_x}{W_x}, \quad (2.2)$$

где  $W_x = \frac{J_{\max}}{y_{\max}}$  – осевой момент сопротивления поперечного сечения.

При поперечном изгибе в поперечном сечении балки возникает не только изгибающий момент  $M_x$ , но и поперечная сила  $Q_y$ , а, значит, наряду с нормальными напряжениями  $\sigma$ , появляются также и касательные  $\tau$ . По закону парности касательных напряжений последние возникают и в продольных сечениях балки, вызывая деформацию поперечного сечения. В результате гипотеза плоских сечений при поперечном изгибе нарушается, плоские до деформации сечения слегка искривляются (рисунке 2.1.1, в). Теоретические и экспериментальные исследования этого вопроса показали, что влияние указанного эффекта невелико и поэтому влиянием сдвигов на закон распределения нормальных напряжений пренебрегают. Таким образом, гипотеза плоских сечений условно распространяется также

и на поперечный изгиб. Для определения нормальных напряжений при поперечном изгибе используют зависимость (2.1).

При выводе расчетной формулы (2.1) предполагалось, что волокна материала при поперечном изгибе испытывают только продольное растяжение или сжатие. Это допущение позволяет выразить зависимость между нормальным напряжением и деформацией законом Гука для одноосного растяжения.

Таким образом, при опытном определении напряжений в заданном слое балки измеряют упругие линейные деформации  $\Delta l$ , а затем, воспользовавшись законом Гука ( $\sigma = E\varepsilon$ ), определяют искомые напряжения.

Определение напряжений по измеренной деформации называют **тензометрированием**.

### **2.1.1. Электротензометрический метод измерения линейных деформаций.**

Основан на том, что деформация проводника вызывает изменение некоторых его электрических параметров (сопротивления, емкости, индуктивности). Элемент, воспринимающий деформацию тела, называют **датчиком**. Изменение электрического параметра передается на **регистрирующее устройство**. Наиболее широко используют в качестве электро- тензометров проволочные датчики омического сопротивления.

Основными преимуществами электротензометров являются: высокая точность измерения, малые размеры тензометров, возможность передачи показаний на расстояние и выдачи результатов на ЭВМ, возможность измерять деформации на поверхностях сложной конфигурации и в труднодоступных местах, практически полная без инерционность аппаратуры, возможность регистрации быстроизменяющихся процессов. Эти преимущества компенсируют недостатки электротензометрирования: сложность и значительную стоимость измерительной аппаратуры, необходимость высокой квалификации персонала.

Точность измерения деформации при помощи проволочных тензодатчиков несколько меньше, чем при измерении механическим или оптическим тензометром, но практически она вполне достаточна для надежного вычисления напряжений. В основе метода лежит зависимость омического сопротивления  $R$  проводника от его геометрических размеров – длины  $l$  и площади поперечного сечения  $A$ .

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (2.3)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника.

Чем длиннее проводник датчика, тем больше изменение омического сопротивления  $\Delta R$  при деформации и тем точнее результаты измерений. В тоже время при неравномерной деформации исследуемого тела возникает необходимость проводить измерения на возможно меньшей длине (базе измерений). Конструктивно эта задача была решена путем укладки длинного проводника в виде петель на малой базе.

Тензодатчик представляет собой плоский элемент (рисунок 2.1.2), состоящий из тонкой (0,015 – 0,03 мм) проволоки (или фольги) 3, материал которой

обладает высоким омическим сопротивлением (константан, нихром). Проволока укладывается зигзагообразно между двумя полосками специальной тонкой (0,002 – 0,005 мм) бумаги или полимерной пленки 2. К концам проволоки сваркой либо пайкой, что менее предпочтительно, присоединены латунные выводы 1 для соединения с регистрирующей аппаратурой.

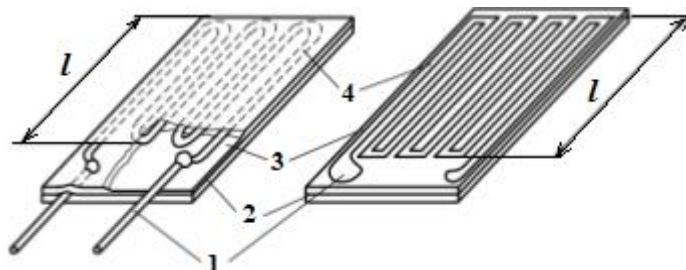


Рис. 2.1.2 Схема тензодатчика

Датчик вследствие зигзагообразной укладки проволоки реагирует на деформации только в продольном направлении и не чувствителен в поперечном направлении. **Базой тензодатчика** называют длину  $l$  прямолинейных участков проводника, из которого он изготовлен. Промышленность выпускает проволоочные, а также фольговые датчики с базой  $l = 5, 10, 20, 30$  мм и сопротивлением  $R = 50, 100, 200, 300$  Ом. Следует учитывать, что с уменьшением базы датчика снижается его тензочувствительность из-за увеличения влияния криволинейных участков (петель датчика). Поэтому без необходимости применять датчики с малой базой не рекомендуется.

Место установки тензодатчика тщательно зачищают и обезжиривают спиртом или ацетоном. Тензодатчик наклеивают на поверхность балки при помощи специальных клеев (БФ-2 и др.) так, чтобы направление его базы  $l$  совпадало с направлением измеряемой деформации. При нагружении балки вместе с ней деформируется и тензодатчик, сопротивление которого изменится и его величина будет зарегистрирована специальной аппаратурой, основой которой является мостовая схема – мостик Уитстона (рисунок 2.1.3).

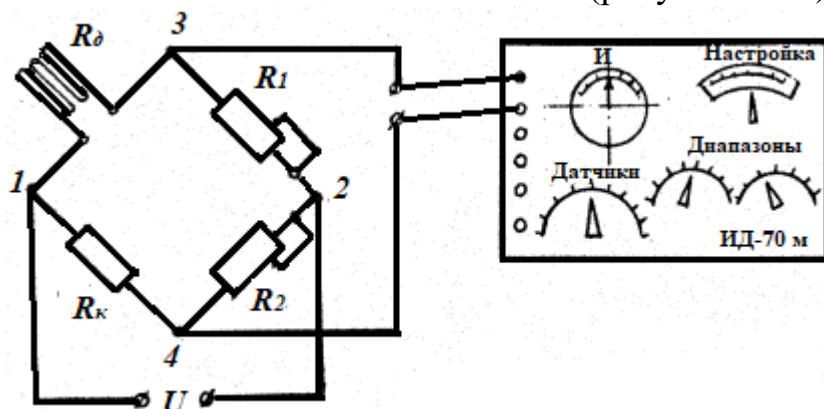


Рисунок 2.1.3 – Схема измерения прибором ИД-70М

**Экспериментальная установка** представляет собой шарнирно опертую балку двутаврового поперечного сечения (рисунок 2.1.4). Нагружение осуществляют вручную с помощью подвеса (I) и набора грузов (II). Положение подвеса с грузами по длине балки можно изменять.

Для замера нормальных напряжений в пяти точках заданного поперечного сечения “С” на балке (параллельно ее оси) наклеены 7 проволочных тензодатчиков активного сопротивления (рисунок 2.1.4. а). Тензодатчики 1 и 1' наклеены на наружной поверхности верхней полки двутавра и при обработке результатов измерений берется среднее значение показаний этих датчиков. Аналогично поступают с показаниями тензодатчиков 5 и 5', наклеенных на нижней полке двутавра. Датчик 3 расположен на нейтральном слое, а датчики 2 и 4 - на расстоянии 1/4 высоты поперечного сечения от нейтрального слоя. Все тензодатчики имеют сопротивление 200 – 200,1 Ом и базу 20 мм, т. к. взяты из одной партии.

При плотной приклейке тензодатчика к поверхности детали (двутавра) проволока удлиняется (укорачивается) вместе с волокнами исследуемого объекта.

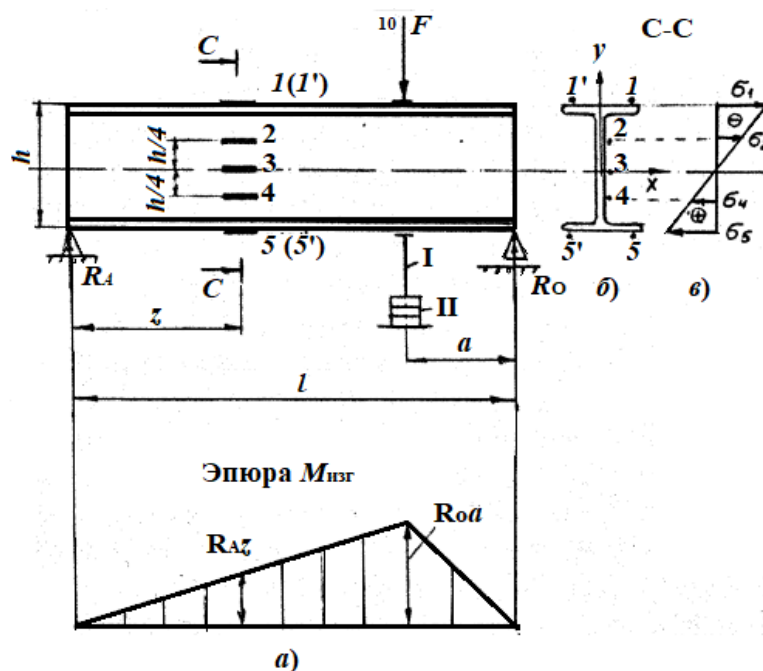


Рисунок 2.1.4 – Схема нагружения балки

В результате омическое сопротивление датчика изменяется и регистрируется как показатель деформации, т.к. относительное изменение омического сопротивления  $\sigma_i^T$  пропорционально относительному удлинению (укорочению)  $\varepsilon$ .

$$\frac{\Delta R_0}{R_0} = \gamma_0 \varepsilon \quad (2.4)$$

Где  $\gamma_0$  – коэффициент тензочувствительности датчика (безразмерная величина, зависящая от свойств материала тензодатчика).

Изменение начального сопротивления датчика  $R_0$  при измерении деформаций составляет обычно 0.3 – 0.5%. Поэтому для более точного замера такого изменения тензодатчик соединен с измерительным прибором по мостовой схеме, показанной на рисунке 2.1.3 (мост Уитстона).

Переменные резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и источник питания "U" моста расположены в корпусе измерителя деформаций ИД-70 М.

Чтобы исключить влияние колебаний температуры на величину сопротивления датчика  $R_0$ , используется компенсационный тензодатчик  $R_k$ . Его сопротивление примерно равно  $R_0$ . Он наклеен вблизи датчика  $R_0$  в месте не подверженном деформациям.

Величины сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  подбирают так, чтобы при отсутствии деформации детали (при  $F=0$ ) мост был сбалансирован, т.е. при подаче напряжения "U" на одну диагональ моста (1–2), в другой (3–4) сила тока равнялась бы нулю. Для этого необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\frac{R_0}{R_k} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.5)$$

Выполнение условия (2.5) достигается путем поворота ручек "Диапазон" и «Настройка» (рисунок 2.1.3). Если мост сбалансирован (при  $F=0$ ), то стрелка индикатора «И» остановится против нулевого деления шкалы. При нагружении балки мост разбалансируется, что приводит к появлению тока в измерительной диагонали (3–4) моста. В результате стрелка индикатора отклонится вправо или влево от нуля. Это отклонение пропорционально величине напряжений  $\sigma$  в детали в месте наклейки тензодатчика  $R_0$ .

Выводы от всех тензодатчиков, наклеенных на балку, соединены с измерителем деформаций ИД-70 М. Подключая поочередно тензодатчики 1-5 к измерителю деформаций (с помощью переключателя «Датчики»), можно определить величину нормальных напряжений  $\sigma$  в различных точках поперечного сечения балки.

### **Порядок проведения эксперимента**

1. Включают измеритель деформаций ИД-70 М в электросеть и прогревают в течение 15 минут.

2. Ручкой «Датчики» подключают к измерителю деформаций тензодатчик 1' (при  $F=0$ ).

3. Балансируют мост, вращением ручек «Диапазон» и «Настройка» совмещают стрелку индикатора «И» с нулевым делением на шкале. Показания индикатора записывают в таблицу 2.1.1.

4. Производят поочередное подключение остальных датчиков и (без балансировки моста) записывают показания индикатора в таблицу 2.1.1. При отклонении стрелки влево от нулевого значения показания индикатора записывают со знаком "минус", а при отклонении вправо - со знаком "плюс".

5. Нагружают балку заданной силой  $F$ , и, подключая поочередно тензодатчики, записывают показания индикатора (с учетом знака) в таблицу 2.1.1. (графа 4).

Таблица 2.1.1 – Журнал наблюдений

NN дат- чиков		Показания индика- тора		Напряжение в МПа	Отклонение в %
------------------	--	---------------------------	--	---------------------	-------------------



	Положение исследуе- мых волокон $y_i$ , мм	без нагрузки $n_0$	с нагруз- кой $n_n$	Разность от- счетов $\Delta n_i =$ $n_n - n_0$	экс- пери- мент. $\sigma$	тео- ре- тич. $\sigma$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1'							
1							
2							
3							
4							
5							
5'							

### Обработка результатов измерений

1. Вычисляют для каждого тензодатчика разность показаний  $\Delta n_i$  индикатора в нагруженном и начальном (без нагрузки) состояниях балки.
2. Определяют величину нормальных напряжений в каждой точке поперечного сечения балки.

$$\sigma_i = \Delta n_i m,$$

где  $m$  – масштабный коэффициент определяется тарировкой тензодатчиков). Значение “ $m$ ” можно определить из выражения

$$m = \frac{\sigma_{\max}}{\Delta n_{cp}}$$

где  $\sigma_{\max} = \frac{R_A \cdot z}{W_x}$  – расчетное напряжение в точках 1 и 1'.

Здесь  $R_A$  – реакция левой опоры балки (см. рисунок 2.1.4).

$\Delta n_{cp} = \frac{\Delta n_1 + \Delta n'_1}{2}$  – среднее значение разности отсчетов датчиков 1 и 1' (графа 5 табл. 1).

3. Строят эпюры распределения напряжений по высоте сечения балки.
4. Вычисляют погрешности эксперимента, сравнивая теоретические и экспериментальные значения напряжений.

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
- Цель работы.
- Схема лабораторной установки.
- Электрическая схема мостика Уитстона.
- Исходные данные.
- Величина ступени нагружения  $\Delta F$
- Длина пролёта балки  $l$ , расстояние «а» от правой опоры до силы  $F$ .
- Расстояния до слоев, в которых определяются напряжения  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$ .
- Расстояние до сечения, в котором определяется напряжение  $Z$ .

Осевой момент инерции сечения  $I_x$ .

6. Теоретический расчёт величины изгибающего момента в сечении «С» и напряжений в заданных слоях балки  $\sigma_i^T$ .

7. Экспериментальные значения напряжений в заданных слоях поперечного сечения балки  $\sigma_i^Э$ .

8. Заполненную таблицу 1.

9. Сравнение опытных и теоретических значений. Выводы.

### 2.1.2 Экспериментального определения напряжений при использовании механических тензометров.

Экспериментальное исследование закона распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки проводится на универсальной гидравлической испытательной машине УГ-20. Для этого балка устанавливается на траверсе на специальных опорах. Схема шарнирно-опертой балки прямоугольного поперечного сечения, нагруженной сосредоточенной силой  $F$ , показана на рисунок 2.1.5.

Экспериментально значения нормальных напряжений определяются в точках 1, 2, 3 по высоте сечения. В этих точках устанавливаются рычажные тензометры (рисунок 2.1.6) для замера деформаций. Тензометры устанавливаются так, чтобы длина базы тензометра ( $l_0$ ) совпадала с направлением измеряемой деформации — вдоль оси балки. Размещение трех тензометров в одном сечении неосуществимо, поэтому используя симметрию нагружения сечений 1, 2 вдоль длины балки ( $M_1=M_2$ , рисунок 2.1.5), тензометры  $T_1$ ,  $T_2$  закрепляют соответственно на верхней и нижней поверхностях прямоугольного сечения. Место расположения вдоль оси балки тензометра  $T_3$  на нейтральной линии балки принципиального значения не имеет. При указанном расположении тензометров, мы будем иметь значения деформаций (следовательно, напряжений  $\sigma=E\varepsilon$ ) по высоте сечения.

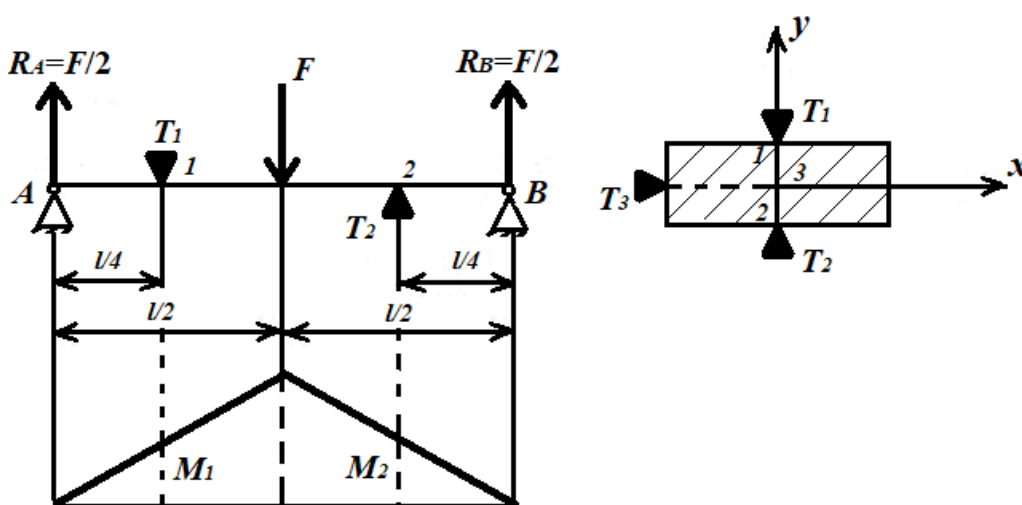
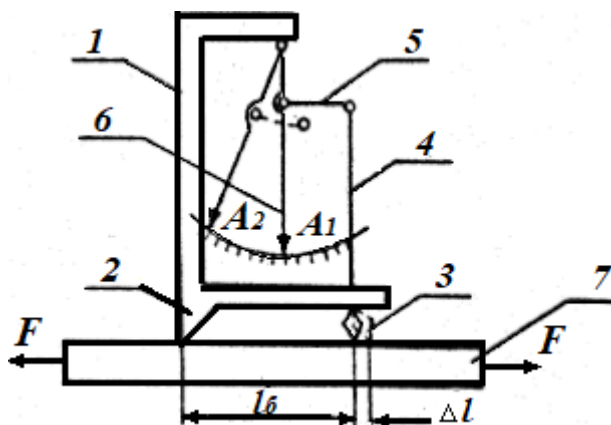


Рисунок 2.1.5 – Схема нагружения балки и установки тензометров

#### Устройство рычажного тензометра.

Рычажным тензометром измеряют малые линейные деформации. Схема тензометра показана на рисунке 2.1.6. Тензометр прижимают к испытываемому образцу 7 при помощи струбцины двумя ножами: неподвижным 2 и подвижным 3. Расстояние ( $l_6$ ) между ножами является базой тензометра, она равна  $l_6 = 20\text{ мм}$ . При деформации образца расстояние между ножами изменяется. Подвижный нож 3 поворачивается и отклоняет рычаг 4. Отклонение рычага 4 через коромысло 5 передается на стрелку 6, которая поворачивается вокруг оси, закрепленной на рамке тензометра 1. Разность отсчетов  $\Delta A = A_2 - A_1$  ( $A_2, A_1$  – начальный и конечный отсчеты) пропорциональна абсолютной деформации  $\Delta l$ . Система рычагов обеспечивает увеличение деформации  $\Delta l$  (мм) в тысячу раз ( $K = 10^3$  – коэффициент увеличения тензометра).



1 - рамка тензометра, 2 - неподвижный нож, 3 - подвижный нож (ромбическая призма), 4 - рычаг, 5 - коромысло, 6 - стрелка, 7 - образец.

Рисунок 2.1.6 – Схема рычажного тензометра

### **Порядок проведения эксперимента**

1. После замера поперечных размеров и длины балки вычисляется максимальное значение нагрузки  $F = F_{\max}^*$ , обеспечивающее упругие деформации балки при проведении эксперимента. Это условие выполняется, если  $M_{\max}^* \leq \sigma_{\text{пл}} W_x$ .

Из эпюры изгибающих моментов на рисунке 2.1.5

$M_{\max}^* = \frac{F_{\max}^* l}{4}$  и, следовательно, получаем

$$F_{\max}^* = \frac{4\sigma_{\text{пл}} W_x}{l}. \quad (2.6)$$

2. Балка с закрепленными на ней рычажными тензометрами устанавливается на траверсе испытательной машины УГ- 20.

3. Балка нагружается начальной нагрузкой  $F_0$  и снимаются показания тензометров. Первоначальное нагружение необходимо для устранения возможного проскальзывания ножей рычажного тензометра относительно поверхности балки, а также для устранения возможных люфтов и зазоров в системе балка - испытательная машина.

4. Осуществляется ступенчатое нагружение балки (в пределах пропорциональности) силами  $F_1=F_0+\Delta F$ ,  $F_2=F_1+\Delta F$ ,  $F_3=F_2+\Delta F$  ( $F_3 < F_{\max}$ ) и снимаются соответствующие показания тензометров  $A_i$ . Каждая ступень нагружения равносильна одной повторности эксперимента с нагрузкой  $\Delta F$  (рис.3.1.7).

5. Определяется среднее значение абсолютной продольной деформации  $\Delta l_{\text{ср}}$  по каждому тензометру и величина относительной продольной деформации  $\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{ср}}}{l_0}$

6. По закону Гука вычисляют напряжения в каждой точке  $\sigma_y = E\varepsilon$ .

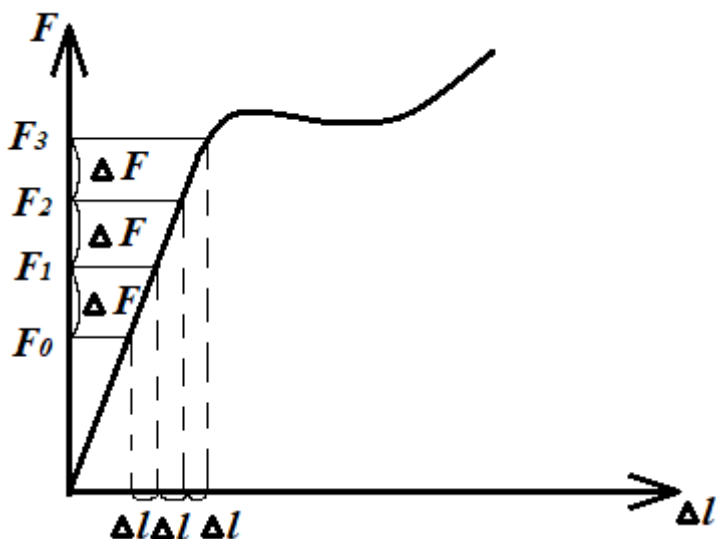


Рисунок 2.1.7 – Экспериментальная зависимость  $F-\Delta l$  при ступенчатом нагружении балки

### **Содержание отчета:**

1. Цель работы.
2. Схему балки с нагрузкой и указанием точек закрепления рычажных тензометров как вдоль ее длины, так и по высоте сечения.
3. Вычисления теоретических значений нормальных напряжений ( $\sigma_1^T, \sigma_2^T, \sigma_3^T$ ).
5. Вычисления, соответствующие обработке результатов эксперимента.
6. Эпюры распределения нормальных напряжений по высоте сечения, построенную по результатам теоретических вычислений и эксперимента.
7. Выводы;

В выводах необходимо отметить какой закон распределения нормальных напряжений по высоте сечения наблюдается при прямом изгибе, и применима ли теоретическая зависимость (2.1).

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Каково устройство лабораторной установки?
3. Какой изгиб называют поперечным? Плоским?
4. Как теоретически определяют нормальные напряжения при плоском изгибе в любом слое поперечного сечения балки?

5. Как определяют максимальные нормальные напряжения в сечении балки при плоском изгибе?
6. Как распределяются нормальные напряжения по высоте сечения балки при плоском изгибе? Покажите эпюру?
7. Что называют тензометрированием?
8. На чем основан метод электротензометрирования?
10. Как устроен тензодатчик?
11. Что называют базой тензодатчика?
12. Какие соображения должны учитываться при обосновании выбора базы тензодатчика?
13. Как подключается тензодатчик в измерительную систему? Опишите её?
14. Что понимают под балансом моста?
15. Как определяют тарировочные коэффициенты?
16. Как проводят определение напряжений при помощи тензодатчиков в исследуемой балке?
17. Для чего применяют компенсационный датчик, где и как он должен быть расположен?

## 2.2 Лабораторная работа №6 «Определение перемещений балки при плоском изгибе»

**Цель работы:** экспериментальное определение линейных и угловых перемещений двухпоперной балки и сравнение их с теоретическими значениями, полученными с использованием ЭВМ.

### *Теоретическая часть работы.*

При действии на балку внешних сил в плоскости одной из главных центральных осей инерции сечения ось балки искривляется в той же плоскости. Такой изгиб называют плоским изгибом. Искривлённую ось балки называют изогнутой осью или упругой линией.

При изгибе имеют место два вида перемещений поперечного сечения балки: линейное – прогиб « $Y$ » и угловое – угол поворота « $\theta$ » (рис. 7.1).

Теоретически перемещения сечений балки определяют методом интегрирования приближённого дифференциального уравнения упругой линии, методом начальных параметров, методом Мора, способом Верещагина.

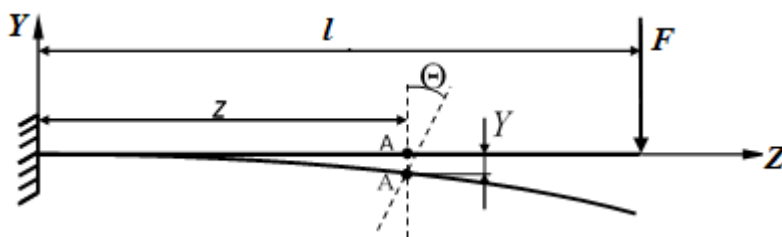


Рисунок 2.2.1 – Схема нагружения балки

В данной работе необходимо определить прогибы и углы поворота сечений двухопорной балки с консолью при различном приложении сосредоточенной нагрузки – на консоли и в пролёте. Расчётная схема балки представлена на рис. 2.2.2. Прогибы определяются в точке  $A$  с координатой  $Z_A$  на консоли и в точке  $C$  с координатой  $Z_C$  в пролёте, углы поворота определяются в точках  $B$  и  $E$  на опорах балки.

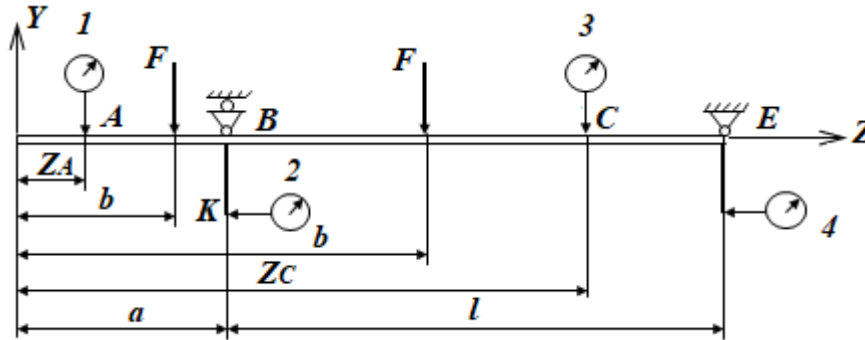


Рисунок 2.2.2 Расчётная схема балки

Любой из теоретических методов даёт для определения перемещений заданных сечений балки следующие формулы:

1. Сила  $P$  действует на консоли ( $0 \leq b \leq a$ )

$$Y_A = \frac{P}{6EJ_x} \left[ (a-b)^3 - 3(a-b)^2 \cdot a - 2(a-b)al \right];$$

$$Y_C = \frac{P(a-b)l^2}{16EJ_x};$$

$$\theta_B = \frac{P(a-b)l}{3EJ_x};$$

$$\theta_E = -\frac{P(a-b)l}{6EJ_x}.$$
(2.7)

2. Сила  $P$  действует в пролёте ( $a \leq b \leq a+l$ )

$$Y_A = -\frac{Pa}{6EJ_x l} \left[ (a-b)^3 + 3(a-b)^2 l + 2(a-b)l^2 \right]$$

$$Y_C = \begin{cases} \frac{P}{48EJ_x} \left[ -4(a-b)^3 + 3(a-b)l^2 \right] & \text{при } b \leq Z_C \\ \frac{P}{48EJ_x} \left[ 4(a-b)^3 + 12(a-b)^2 l + 9(a-b)l^2 + l^3 \right] & \text{при } b \geq Z_C \end{cases}$$

$$\theta_B = \frac{P}{6EJ_x \cdot l} \left[ (a-b)^3 + 3(a-b)^2 l + 2(a-b)l^2 \right]$$
(2.8)

$$\theta_E = \frac{P}{6EJ_x \cdot l} [(a-b)^3 - (a-b)l^2]$$

где:  $b$  – расстояние от начала координат до точки приложения силы  $P$ , может принимать любое значение в пределах  $0 \leq b \leq a+l$ ;

$E$  – модуль упругости материала балки;

$J_x$  – осевой момент инерции поперечного сечения балки.

### **Описание испытательной установки**

Для проведения работы используется испытательная установка, представленная на рис. 2.2.3. Установка состоит из исследуемой балки 1, основания 2, подвижной 3 и неподвижной 4 опор, двух индикаторных стоек 5, гиревого подвеса 6, набора грузов 7, индикаторов часового типа 8.

Исследуемая балка изготовлена из стальной полосы (модуль упругости  $E=2 \cdot 10^5$  МПа) прямоугольного поперечного сечения (ширина  $B=40$  мм, высота  $H=7$  мм) и установлена на шарнирных опорах. Длина пролёта  $l=700$  мм, длина консоли  $a=300$  мм. Эти параметры можно изменять в пределах полной длины балки ( $l+a=1000$  мм).

Нагружение балки сосредоточенной силой осуществляется с помощью гиревого подвеса и набора грузов. Изменение точки приложения нагрузки осуществляется перемещением гиревого подвеса по балке. Определение расстояний  $b$  от левого конца балки (начала координат) до точки приложения нагрузки производится по шкале, нанесённой на поверхности балки.

Перемещения балки можно определять для случаев приложения нагрузки на расстояниях от начала координат  $b=0, 100, 200$  мм (на консоли) и  $b=400, 500, 600, 700, 800, 900$  мм (в пролёте) – это отметки 0, 10, 20, 40, 50, 60, 70, 80, 90 на балке. Возможны и другие значения расстояний  $b$  в пределах длины балки.

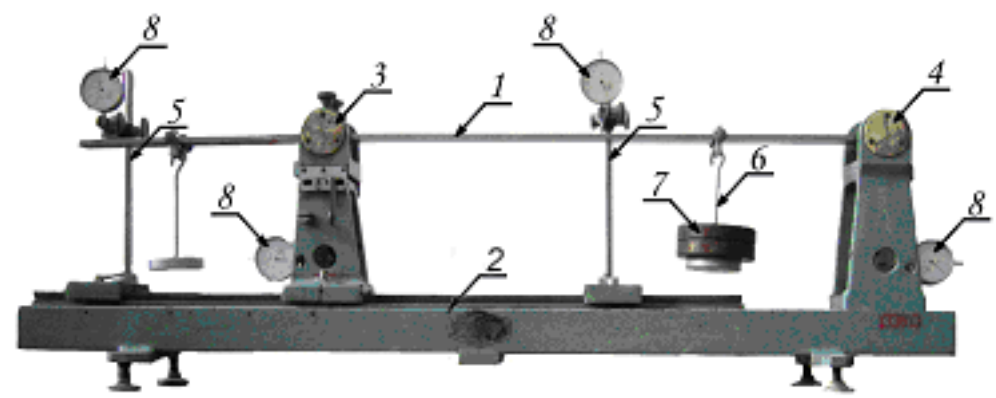


Рисунок 2.2.3 – Испытательная установка

При проведении эксперимента количество точек приложения нагрузки может быть уменьшено и может не совпадать с количеством таких точек при теоретическом определении перемещений.

Измерение прогибов и углов поворота опорных сечений балки производится с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Прогибы измеряются непосредственно по показаниям индикаторов. Углы поворота на опорах измеряются при помощи стержня  $BK$ , перпендикулярного оси балки и жёстко соединённого с опорами (рисунок 2.2.2 и 2.2.4). При повороте сечения на некоторый угол  $\theta$ , на такой же угол повернётся стержень (рис. 7.4.). Индикатор, установленный на расстоянии  $BK=L=150$  мм от оси балки, показывает при этом линейное перемещение  $KK_1=\Delta T=L \cdot \operatorname{tg}\theta$ . Деформации балки малы, поэтому  $\operatorname{tg}\theta \approx \theta$  и углы поворотов можно определять по формуле:

$$\theta \approx \frac{\Delta T}{L} . \quad (2.9)$$

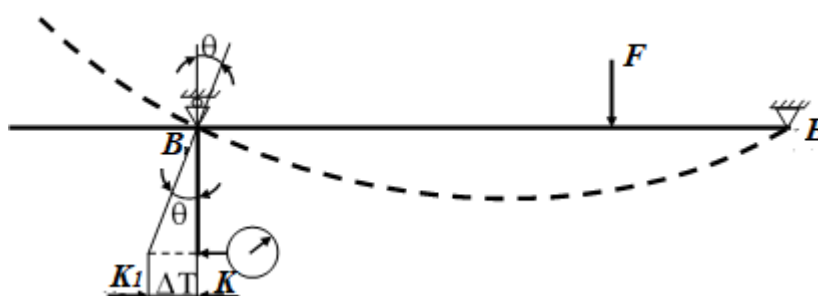


Рисунок 2.2.4 – Схема нагружения и деформации балки

### **Порядок проведения эксперимента**

1. Установить призму с гиревым подвесом на расстоянии  $b$  от начала координат (от левого конца балки).
2. Установить большие стрелки всех индикаторов на «0» и записать показания  $T_0$  в соответствующей графе таблицы 2.2.1. Индикаторы №1 и №3 служат для определения прогибов, а №2 и №4 – для определения углов поворотов сечений балки.
3. Нагрузить балку силой  $F = 20$  Н, устанавливая грузы на подвес.
4. Записать показания индикаторов в таблицу 2.2.1.
5. Разгрузить балку.
6. Прикладывая нагрузку на консоли и в пролёте при разных значениях  $b$ , повторить опыты по п. 2. – 5. Для сокращения времени на проведение эксперимента количество точек приложения нагрузки может быть меньше десяти (тогда в таблице 2.2.1. могут быть заполнены не все строки).

Таблица 2.2.1 – Журнал наблюдений

Положение нагрузки	Номера и показания индикаторов в мм			
	1	2	3	4



№ п/п	$b^i$ , мм	$T_0$	$T$	$\Delta T$	$T_0$	$T$	$\Delta T$	$T_0$	$T$	$\Delta T$	$T_0$	$T$	$\Delta T$
1	0												
2	100												
3	200												
4	400												
5	500												
6	600												
7	650												
8	700												
9	800												
10	900												

7. Вычислить разности показаний индикаторов  $\Delta T$  и определить прогибы и углы поворота сечений балки

$$Y_A = \Delta T_1, \quad Y_C = \Delta T_3,$$

$$\theta_B = \frac{\Delta T_2}{l} \quad \theta_E = \frac{\Delta T_4}{l}$$

Результаты вычислений записать в таблицу 2.2.2

Сравнить значения перемещений сечений балки при изменении точки приложения нагрузки. Таблица 2.2.2. должна содержать столько строк, сколько было заполнено в таблице 2.2.1 при проведении эксперимента.

Таблица 2.2.2 Сравнение экспериментальных и теоретических значений перемещений.

Поло- жение нагрузк и	$Y_A$ , мм			$\theta_B$ , рад.			$Y_C$ , мм			$\theta_E$ , рад.		
	экс- пер.	тео- рет.	Рас- хож- де- ние, %	экс- пер.	тео- рет.	Рас- хож- де- ние, %	экс- пер.	тео- рет.	Рас- хож- де- ние, %	экс- пер.	тео- рет.	Рас- хож- де- ние, %
$b^i$ , мм												
0												
100												
200												
400												

500												
600												
650												
700												
800												
900												

8. Определить теоретические значения прогибов и углов поворота в рассматриваемых сечениях по формулам (2.7) и (2.8) с помощью ЭВМ (см. ниже).

Результаты вычислений записать в таблицу 2.2.2.

9. Сравнить экспериментальные и теоретические значения перемещений сечений балки, вычислив расхождения

$$\delta_y = \left| \frac{Y_T - Y_{\text{Э}}}{Y_T} \right| \cdot 100\%, \quad \delta_{\theta} = \left| \frac{\theta_T - \theta_{\text{Э}}}{\theta_T} \right| \cdot 100\%,$$

где  $Y_T$ ,  $\theta_T$  – теоретические значения перемещений сечений;  $Y_{\text{Э}}$ ,  $\theta_{\text{Э}}$  – экспериментальные значения перемещений.

Результаты вычислений занести в таблицу 2.2.2.

10. Построить графики зависимости перемещений от положения точек приложения нагрузки (формы упругой линии балки для разных значений расстояний  $b_i$ ). Сравнить с графиками, полученными на ЭВМ.

11. Оформить отчет.

### **Определение теоретических значений перемещений с использованием ЭВМ**

По формулам (2.7.) и (2.8) разработана программа расчёта перемещений в различных сечениях балки на ПК в зависимости от положения и величины нагрузки при различных значениях параметров  $a$ , и  $l$  в пределах полной длины балки  $a+l=1000\text{мм}$ . Программа позволяет получить прогибы в любых точках балки вне опор и углы поворотов на опорах. Общее число точек приложения нагрузки - 10. По итогам расчёта программа выдает в виде таблицы значения перемещений (прогибов в точках  $A$  и  $C$  и углов поворота в точках  $B$  и  $E$ ) для десяти случаев нагружения балки. Кроме этого программа для десяти случаев нагружения строит непрерывные графики зависимости перемещений ( $Y_A$ ,  $Y_C$ , и  $\theta_B$ ,  $\theta_E$ ) от величины и расположения действующих нагрузок для всех 10 вариантов нагружения.

Программа работает в операционной системе «Windows». Результаты расчетов и графики можно вывести на печать.

### **Порядок использования программы расчёта перемещений.**

1. Включить ПК в сеть.
2. На рабочем столе монитора последовательно открыть папки «Мои документы», «Mechanics», «Sopromat», «lab 07».
3. В папке «lab 07» открыть файл «lab 07.exe». На экране появляется окно с названием работы «Определение перемещений при изгибе». Развернуть окно. В окне

представлены четыре вкладки для работы с программой, расчётная схема балки и таблица для заполнения исходных данных. При этом активирована вкладка «Исходные данные».

4. Последовательно заполнить все строки таблицы согласно принятой схеме нагружения, например:  $a=300\text{мм}$ ,  $l=700\text{мм}$ ,  $P=10\text{Н}$ ,  $Z_A=0$ ,  $Z_C=650\text{мм}$ ,  $b_1=0$ ,  $b_2=100\text{мм}$ ,  $b_3=200\text{мм}$ ,  $b_4=400\text{мм}$ ,  $b_5=500\text{мм}$ ,  $b_6=600\text{мм}$ ,  $b_7=650\text{мм}$ ,  $b_8=700\text{мм}$ ,  $b_9=800\text{мм}$ ,  $b_{10}=900\text{мм}$ . При этом параметры  $a$ ,  $l$ ,  $Z_A$ ,  $Z_C$  и некоторые значения  $b_i$  должны совпадать с параметрами при проведении эксперимента.

5. Открыть вкладку «Графики и таблицы». В этом окне появляются цветные графики – формы упругой линии при заданной нагрузке в зависимости от координат точек приложения  $b_i$  ( $i=1,2,\dots,10$ ). Эти графики наглядно показывают зависимость прогибов балки от изменения точек приложения нагрузки.

Ниже графиков представлена таблица теоретических значений прогибов  $Y_A$  и  $Y_C$  в миллиметрах и углов поворота  $\theta_B$  и  $\theta_E$  в радианах при заданных значениях координат  $b_i$ .

6. Из таблицы перемещений выбрать те значения, которые соответствуют схеме, принятой при проведении эксперимента. Записать эти значения в табл. 2.2.2.

7. Распечатать графики на принтере.

8. Открыть вкладку «Зависимость  $Y$  от  $b$ ». В этом окне представлены цветные графики зависимости прогибов  $Y_A$  (на конце консоли) и  $Y_C$  (посередине пролёта) от координат  $b_i$ .

9. Открыть вкладку «Зависимость  $\theta$  от  $b$ ». В этом окне представлены графики зависимости углов поворота на опорах  $\theta_B$  и  $\theta_E$  от координат  $b_i$ .

10. Заккрыть окно файла и предыдущих папок и выключить компьютер.

### **Содержание отчёта:**

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Схема нагружения балки
4. Форма упругой линии балки
5. Результаты испытаний и расчётов.

**В выводах** необходимо отметить:

- а) как изменяются перемещения сечений балки при изменении точек приложения нагрузки;
- б) каковы расхождения расчётных и экспериментальных значений перемещений.

### **Контрольные вопросы.**

1. Что называется упругой линией балки?
2. Какие перемещения получают сечения балки при плоском изгибе?
3. Какие существуют теоретические методы для определения прогибов и углов поворотов сечений балки?
4. Как экспериментально определяются перемещения сечений балки?

5. Как изменяются перемещения консольной части балки при изменении точки приложения нагрузки?
6. Как изменяются перемещения в пролёте балки при изменении точки приложения нагрузки?

Литература: [5] - § 29; [6] - § 6.2; [7] - § 52, [9].

### 2.3 Лабораторная работа №7 «Внецентренное растяжение»

**Цель работы:** Определить опытным путем нормальные напряжения в крайних волокнах поперечного сечения бруса при внецентренном растяжении и сравнить их с напряжениями, вычисленными теоретически.

**Теоретическая часть работы.** Внецентренным растяжением называют такой вид деформации, при котором внешние продольные силы  $F$  приложены с некоторым эксцентриситетом  $e$  относительно центра тяжести поперечного сечения бруса (рисунок 2.3.1).

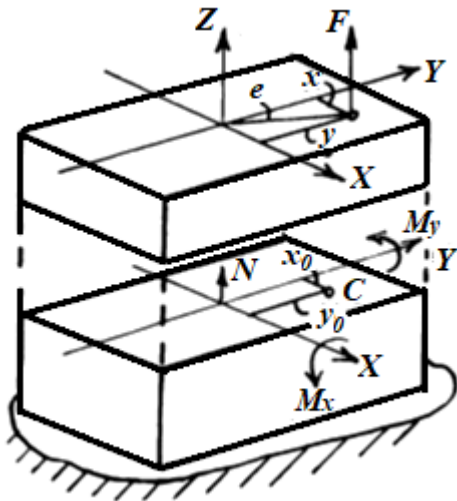


Рисунок 2.3.1 – Схема для определения внутренних силовых факторов

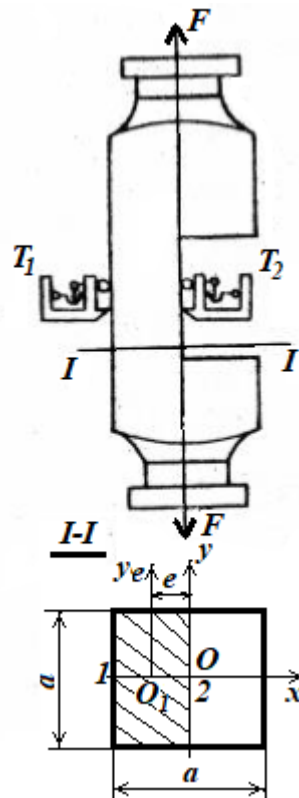


Рисунок 2.3.2 – Размещение рычажных тензометров

На основании принципа независимости действия сил нормальные напряжения в любой произвольной точке  $C$  поперечного сечения бруса (рисунок 2.3.1), имеющей координаты  $X_0$  и  $Y_0$  будут складываться из напряжений от продольной силы  $N$  и напряжений от чистого изгиба моментами  $M_X$  и  $M_Y$ :

$$\sigma_C = \sigma_C^N + \sigma_C^{M_X} + \sigma_C^{M_Y} \quad (2.10)$$

При этом знаки в формуле выбирают на основании анализа расчетной схемы. Если в бресе прямоугольного поперечного сечения (рисунка 2.3.2) точка приложения растягивающей силы  $F$  будет находиться на одной из главных осей поперечного сечения, например, на оси  $X$ , то напряжения в крайних волокнах (в точках 1 и 2) от продольной силы  $N=F$  будут одинаковы, т.е.

$$\sigma_1^N = \sigma_2^N = \frac{N}{A} = \frac{F}{\frac{a^2}{2}} \quad (2.11)$$

От изгибающего момента в точке 2 возникают растягивающие напряжения, а в точке 1 - сжимающие. Тогда получают:

$$\sigma_{1,2}^M = \pm \frac{M}{W_y} \quad (2.12)$$

где  $M_y = F \frac{a}{2}, \quad W_y = \frac{a \left( \frac{a}{2} \right)^2}{6}$

Суммарные напряжения в точках 1 и 2 с учетом формул (2.11) и (2.12) будут равны:

$$\sigma_1 = \frac{2F}{a^2} - \frac{F}{4a^2} \quad (2.13)$$

$$\sigma_2 = \frac{2F}{a^2} + \frac{3F}{4a^2} \quad (2.14)$$

В итоге получают: наибольшие напряжения возникают, как и при изгибе, в наиболее удаленных от нейтральной оси точках.

Наибольшую нагрузку  $F_{\max}$ , которую можно приложить к образцу, определяют из (2.15), учитывая, что максимальные напряжения не должны вызывать пластических деформаций, т. е.  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{пл}}$ . Тогда с учетом формулы (2.15) получают

$$\sigma_{\max} = \frac{2F}{a^2} + \frac{3F}{4a^2} \leq \sigma_{\text{пл}} \quad (2.15)$$

### ***Описание лабораторной установки***

Работа выполняется на машине УГ-20. Фрагмент испытательной машины с установленным на ней образцом показан на рисунок 2.3.3.

Образец для испытания имеет в ослабленном сечении прямоугольную форму (рисунок 2.3.3). Растягивающая нагрузка прикладывается с эксцентриситетом  $e$ , взятым вне ядра сечения, чтобы получить в крайних волокнах напряжения разных знаков.

Для измерения деформаций в крайних волокнах на образце установлены два рычажных тензометра (рисунок 2.3.4), применяемые для измерения малых линейных деформаций. Тензометр прижимают к образцу при помощи струбцины. Расстояние между двумя ножами: неподвижным – 2 и подвижным – 3 называется базой тензометра, она равна  $l_6 = 20\text{ мм}$ . При деформации образца расстояние между ножами изменяется. Подвижный нож 3 поворачивается и отклоняет рычаг 4. Отклонение рычага 4 через коромысло 5 передается на стрелку 6, которая поворачивается вокруг оси, закрепленной на рамке тензометра 1. Система рычагов обеспечивает увеличение деформации в тысячу раз ( $k=10^3$  – коэффициент увеличения тензометра).

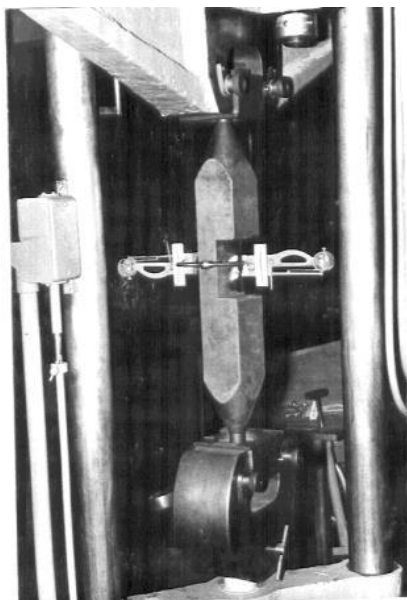


Рисунок 2.3.3 – Фото образца с рычажными тензометрами

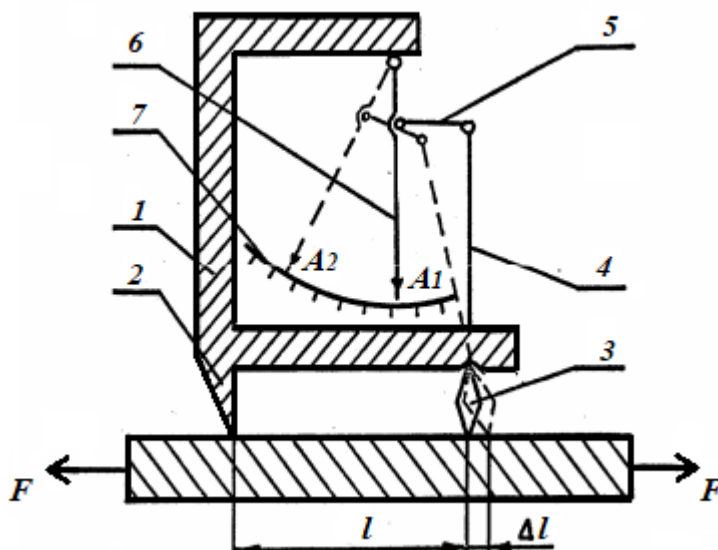


Рисунок 2.3.4 – Схема тензометра

### **Методика выполнения опыта и обработка результатов**

1. Штангенциркулем с точностью 0,1 мм измеряют размеры поперечного сечения образца, а также эксцентриситет  $e$  приложения нагрузки. Эти величины, а также значения модуля продольной упругости  $E$  и базу тензометров и заносят в журнал наблюдений.
2. Из формулы (3.2.7) определяют максимальную нагрузку  $\max F$  и, приняв начальную нагрузку  $F_0$ , определяют величину ступени нагружения  $\Delta F$  такой, чтобы можно было выполнить 3 – 4 нагружения образца. Затем прикладывают начальную нагрузку  $F_0$  для выбора всех зазоров. Снимают показания тензометров  $T_1$  и  $T_2$  и записывают в таблицу журнала наблюдений.
3. Увеличивают нагрузку равными ступенями 3 – 4 раза, снимают показания тензометров и заносят в таблицу.

4. Определяют среднее значение абсолютной продольной деформации  $l_{\text{ср}} = \frac{\Delta T_{\text{ср}}}{k}$

по каждому тензомеру и величину относительной продольной деформации  $\varepsilon = \frac{\Delta l_{\text{ср}}}{l_0}$


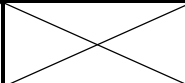
5. По закону Гука вычисляют напряжения в каждой точке  $\sigma^3 = E\varepsilon$

6. Вычисляют теоретические значения напряжений в точках 1 и 2 ( $\sigma_1^T$  и  $\sigma_2^T$ ) по формулам (2.3.4, 2.3.5) при ступени нагружения  $\Delta F$ , строят совмещенные эпюры нормальных напряжений по опытным и теоретическим данным и сравнивают полученные значения напряжений.

### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Испытательная машина.
4. Измерительные приборы.
5. Схема установки.
6. Исходные данные.
  - 6.1. Модуль продольной упругости  $E$ .
  - 6.2. Размеры поперечного сечения образца  $h$  и  $b$ .
  - 6.3. База тензометров  $l_0$ .
  - 6.4. Цена деления шкалы тензометров  $C$ .
  - 6.5. Координаты приложения силы  $x, y$ .
  - 6.6. Площадь поперечного сечения образца  $A$ .
  - 6.7. Осевой момент сопротивления сечения  $W_y$ .
7. Результаты эксперимента.

№ п/ п	Нагрузка $F$ , Н	Приращение нагруз- ки $\Delta F$ Н	Показания тензометров		Приращение показаний тензометров	
			$T_1$	$T_2$	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$
Средние значения		$\Delta F_{\text{ср}}$			$\Delta T_1^{\text{ср}}$	$\Delta T_2^{\text{ср}}$

приращений					
------------	--	---	--	--	--

8. Опытное определение напряжений  $\sigma_1^3$  и  $\sigma_2^3$
9. Теоретическое определение напряжений  $\sigma_1^T$  и  $\sigma_2^T$
10. Сравнение опытных и теоретических значений.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Какой случай сложного сопротивления называют внецентренным растяжением (сжатием)? Чем отличается частный случай внецентренного растяжения (сжатия) от общего? Приведите примеры.
3. Какие внутренние силовые факторы возникают в поперечном сечении бруса при внецентренном растяжении (сжатии)?
4. По какой формуле можно теоретически определить напряжения в любой точке сечения при внецентренном растяжении (сжатии)?
5. Какая линия называется нейтральной и как она располагается?
6. Как определить опытным путем напряжения в крайних волокнах сечения бруса?
7. Как устроен рычажный тензомер?
8. Почему брус нагружают равными ступенями? С какой целью прикладывается начальная нагрузка?
9. В каких точках поперечного сечения бруса возникают наибольшие напряжения при внецентренном растяжении (сжатии)?

Литература: [5] - § 36; [7] - § 80.

### **2.4. Лабораторная работа №8 «Исследование характеристик цилиндрических спиральных пружин при сжатии»**

**Цель работы:** Экспериментальное определение осадки и жёсткости – характеристик цилиндрических пружин и сравнение их с теоретическими значениями.

#### **Теоретическая часть работы.**

Пружины являются одним из наиболее распространенных упругих элементов современных механизмов и машин. Наибольшее применение получили цилиндрические спиральные пружины, работающие на растяжение и сжатие. Цилиндрическая спиральная пружина может рассматриваться как пространственно изогнутый брус, осевая линия которого, в простейшем случае, представляет собой винтовую линию. Форма осевой линии пружины определяется диаметром витка  $D$ , числом витков  $n$  и шагом пружины  $S$ , который зависит от угла подъема  $\alpha$  (рисунок 2.4.1). Упругие свойства пружины зависят от параметров  $D$ ,  $n$ , формы и размеров сечения витка. Обычно пружины изготавливаются (навиваются) из круглой стальной проволоки с поперечным сечением диаметром  $d$ .



При действии на пружину центрально приложенной нагрузки происходит перемещение её концов – осадка пружины  $\lambda$ . Осадка пружины определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{8PD^3n}{Gd^4}, \quad (2.16)$$

где  $F$  – внешняя сила;  $D$  – средний диаметр пружины;  $d$  – диаметр проволоки пружины;  $n$  – число витков пружины;  $G$  – модуль упругости при сдвиге материала пружины.

Помимо осадки характеристикой пружины является её жёсткость. Жёсткость пружины  $C$  – это величина силы  $F$ , при которой осадка пружины равна единице длины (например, 1 см). С учётом формулы (2.16) жёсткость пружины равна:

$$C = \frac{F}{\lambda} = \frac{Gd^4}{8D^3n}. \quad (2.17)$$

Между осадкой  $\lambda$  и силой  $F$  существует линейная зависимость (рисунок 2.4.2). Поэтому жёсткость пружины  $C$  является постоянной и определяется по формуле:

$$C = \frac{\Delta F}{\lambda_{\text{ср}}} \quad (2.18)$$

где  $\Delta F$  – нагрузка, соответствующая ступени нагружения;  $\lambda_{\text{ср}}$  – среднее значение осадки пружины на ступень нагружения.

Для экспериментального определения жёсткости необходимо получить зависимость осадки  $\lambda$  от силы  $F$ .

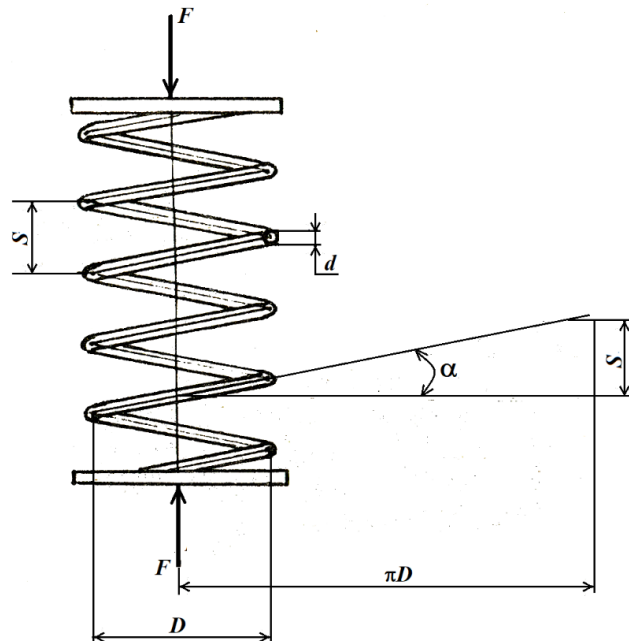


Рисунок 2.4.1 – Геометрические характеристики пружины

### **Описание лабораторной установки.**

Для проведения лабораторной работы используется испытательная установка, схема которой приведена на рисунке 2.3.3.

Установка состоит из исследуемой пружины 1, цилиндрической направляющей стойки 2, основания 3 и подвижного нагружающего фланца 4. Исследуемые пружины изготовлены из стальной проволоки круглого поперечного сечения. Модуль упругости при сдвиге материала проволоки  $G = 8 \cdot 10^5 \text{ кгс} / \text{см}^2 = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ .

Нагружение пружины осуществляется через фланец 4 с помощью набора грузов 5. Измерение осадки пружины производится с помощью штангенциркуля 6. Получаемая при этом точность измерений 0,1 мм.

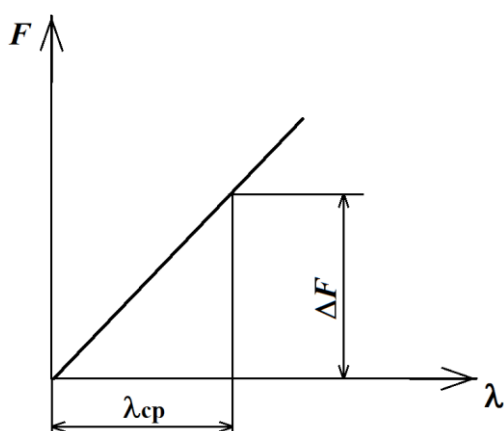


Рисунок 2.4.2 – График зависимости осадки  $\lambda$  от силы  $F$

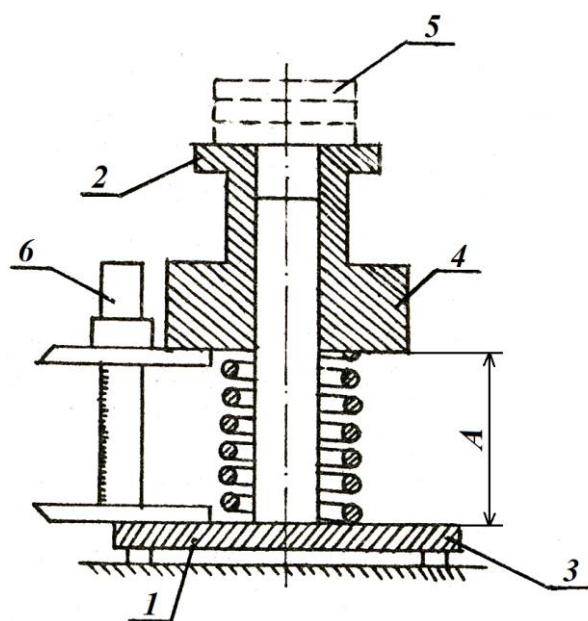


Рисунок 2.4.3 – Схема испытательной установки

### **Порядок выполнения работы.**

1. Для двух исследуемых пружин необходимо: измерить геометрические параметры - наружный диаметр пружины  $D_H$ ; внутренний диаметр пружины  $D_B$ ; диаметр проволоки пружины  $d$ ; вычислить средний диаметр пружины:  $D = 1/2 \cdot (D_H + D_B)$ ; посчитать число витков пружины  $n$ .

Результаты измерений занести в таблицу 2.4.1.

Таблица 2.4.1 Параметры исследуемых пружин

№	Наименование параметров	Пружина №1	Пружина №2
1	Материал проволоки		

2	Наружный диаметр пружины $D_H$ (мм)		
3	Внутренний диаметр пружины $D_B$ (мм)		
4	Средний диаметр пружины $D$ (мм)		
5	Диаметр проволоки $d$ (мм)		
6	Число витков $n$		

2. Установить пружину на испытательную установку. Надеть подвижный фланец. Нагрузку на пружину от веса фланца принять за нулевую. С помощью штангенциркуля измерить расстояние  $A$  от основания до нижней границы нагружающего фланца (рисунок 2.4.3).

3. Выбрать нагрузку  $F$ , соответствующую ступени нагружения: для пружин большого диаметра  $F = (0,5 \dots 1,5)$  кг =  $(5 \dots 15)$  Н, для пружин малого диаметра  $F = (2 \dots 3)$  кг =  $(20 \dots 30)$  Н.

4. Последовательно нагружая пружину нагрузкой  $F$ ,  $2F$ ,  $3F$ , измерить расстояние  $A$  (рисунок 2.4.3), соответствующее каждой нагрузке. Результаты измерений занести в таблицу 2.4.2 (первое нагружение).

5. Разгрузить пружину. Повторить опыт. Результаты измерений занести в табл. 2.4.2 (второе нагружение).

Таблица 2.4.2 Результаты измерений осадки пружины №1

Таблица 2. Результаты измерения осадки при нагружении					
№, п/п	Нагрузка, $F$ (кг, Н)	Первое нагружение		Второе нагружение	
		отсчет $A$ (мм)	разность отсчетов $\Delta A$ (мм)	отсчет $A$ (мм)	разность от- счетов $\Delta A$ (мм)
Среднее значение осадки для каждого нагружения		$\lambda_1 = \Delta A_{\text{ср}} =$		$\lambda_2 = \Delta A_{\text{ср}} =$	
Среднее значение осадки на ступень нагружения		$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$			

6. Для каждого нагружения определить разность отсчётов  $\Delta A$  - осадку пружины, соответствующую ступени нагружения. Вычислить среднее значение осадки пружины для каждого нагружения и результаты занести в таблицу 2.4.2. По результатам двух нагружений определить среднее значение осадки пружины, приходящееся на ступень нагружения. Результат занести в таблицу 2.4.1 и таблицу 2.4.3.

Таблица 2.4.3 Результаты измерений осадки пружины №2

№, п/п	Нагрузка, $F$ (кг, Н)	Первое нагружение		Второе нагружение	
		отсчет $A$ (мм)	разность отсчетов $\Delta A$ (мм)	отсчет $A$ (мм)	разность от- счетов $\Delta A$ (мм)
Среднее значение осадки для каждого нагружения		$\lambda_1 = \Delta A_{\text{ср}} =$		$\lambda_2 = \Delta A_{\text{ср}} =$	
Среднее значение осадки на ступень нагружения		$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$			

7. Пункты 2 - 6 проделать для второй пружины. Результаты измерений занести соответственно в таблицу 2.4.2 и таблицу 2.4.3.

8. По формулам (2.16) и (2.17) определить теоретические значения осадки и жёсткости для обеих пружин при нагрузках, равных ступеням нагружения эксперимента. Результаты занести в таблицу 2.4.4.

9. По формуле (2.18) вычислить экспериментальные значения жесткости  $C$  для обеих пружин. Результаты занести в таблицу 2.4.4.

10. Определить расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями осадки и жёсткости обеих пружин в процентах по формулам:

$$\delta_{\lambda} = \frac{|\lambda_{\text{теор}} - \lambda_{\text{эксп}}|}{\lambda_{\text{теор}}} \cdot 100\%; \quad \delta_C = \frac{|C_{\text{теор}} - C_{\text{эксп}}|}{C_{\text{теор}}} \cdot 100\%.$$

Результаты занести в таблицу 2.4.4.

Таблица 2.4.4 Результаты исследования

Характеристики пружины	Пружина №1			Пружина №2		
	Теоретическое	Эксперимент.	Расхождение, %	Теоретическое	Эксперимент.	Расхождение, %
Осадка пружины $\lambda$ на ступень нагружения, (см)						
Жёсткость $C$ (кг/см, Н/см)						

11. По экспериментальным данным первого нагружения для обеих пружин построить графики зависимости осадки  $\lambda$  от силы  $F$ .

12. Оформить отчет

## *Содержание отчета*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Испытательная машина.
4. Схема установки.
5. Исходные данные.
6. Определение теоретических значений осадки и жёсткости пружин №1 и №2 (формулы (2.4.1) и (2.4.2)).
7. Определение экспериментального значения жёсткости пружин №1 и №2 (формула (2.4.3)).
8. Сравнение экспериментальных и теоретических значений
9. Графики зависимости осадки  $\lambda$  от силы  $F$
10. Выводы

Примечание: в выводах необходимо отметить следующее:

как зависит осадка пружины от внешней нагрузки; какие основные характеристики пружины определены в работе; каковы расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями осадки и жёсткости пружин и чем эти расхождения можно объяснить.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Какие внутренние силовые факторы возникают в поперечных сечениях витых цилиндрических пружин растяжения (сжатия) при их нагружении?
2. Каковы основные параметры цилиндрических спиральных пружин?
3. Какой внутренний силовой фактор является определяющим при исследовании деформированного и напряженного состояния цилиндрических спиральных пружин, работающих на растяжение (сжатие)?
4. Как зависят осадка и жесткость пружин от ее конструктивных размеров и упругих свойств материала пружины?

## **2.5. Лабораторная работа №9 «Определение перемещений консольной балки при косом изгибе»**

**Цель работы:** определить опытным путем величину и направление прогиба свободного конца консоли при косом изгибе и сравнить полученные результаты с величинами, вычисленными теоретически.

**Теоретическая часть работы.** Косым изгибом называют такой вид изгиба, при котором плоскость действия внешних нагрузок (силовая плоскость) не совпадает ни с одной из главных центральных осей инерции поперечного сечения бруса.

Косой изгиб представляют в виде двух прямых изгибов относительно главных центральных осей инерции поперечного сечения (рис. 3.4.1). При этом сила  $F$  раскладывается на две составляющие:

$$F_x = F \sin \alpha; \quad F_y = F \cos \alpha; \quad (2.19)$$

Эти силы вызывают соответствующие прогибы свободного конца балки  $f_x$  и  $f_y$ , которые определяют, например, способом Верещагина. Результирующий прогиб  $f$  (рисунок 2.5.1) определяют геометрическим суммированием прогибов по формуле:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (2.20)$$

При этом максимальные напряжения в брус не должны превышать предел пропорциональности ( $\sigma \leq \sigma_{\text{пл}}$ ). Угол  $\varphi$  между направлением прогиба  $f$  и осью  $Y$  (рисунок 2.5.1) определяется так же, как и угол  $\beta$  (угол наклона нейтральной линии к оси  $X$ ) из формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{f_x}{f_y} = \frac{J_x}{J_y} \operatorname{tg} \alpha; \quad \varphi = \beta. \quad (2.21)$$

Таким образом, перемещение центра тяжести любого поперечного сечения при косом изгибе происходит в плоскости, перпендикулярной к нейтральной линии и не совпадает с силовой плоскостью (рис. 3.4.1).

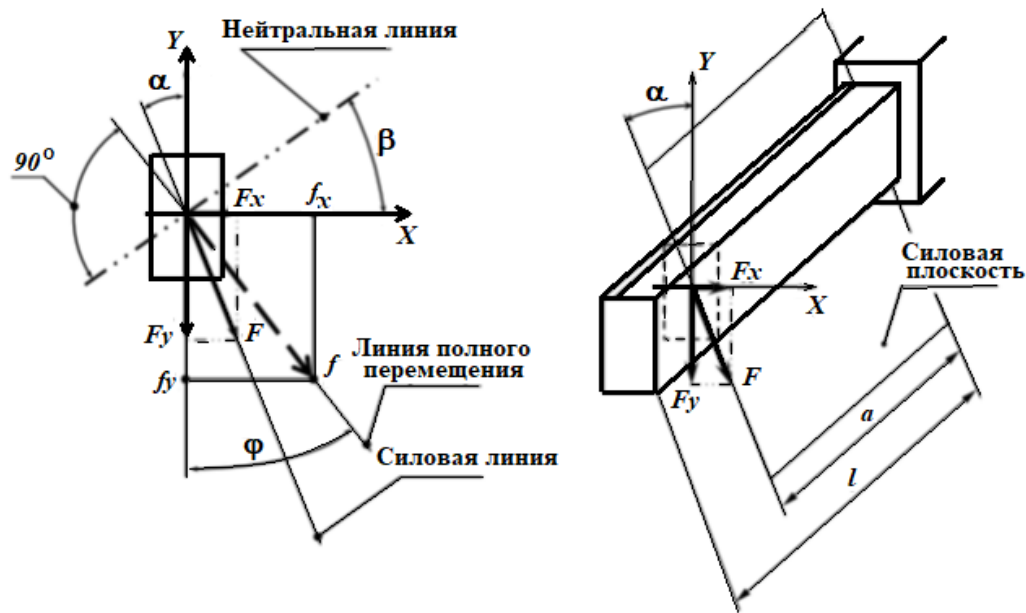


Рисунок 2.5.1 – Сложный вид деформации – Косой изгиб.

Величины прогибов свободного конца консольной балки при приложении внешней силы на расстоянии  $a$  от заземления и длине консоли  $l$  (рисунок 2.5.1) определяют по формулам:

$$f_y = \frac{F_y \cdot a^2 \cdot (3l - a)}{6EJ_x} = \frac{F \cdot a^2 \cdot (3l - a) \cdot \sin \alpha}{6EJ_x} \quad (2.22)$$

$$f_x = \frac{F_x \cdot a^2 \cdot (3l - a)}{6EJ_y} = \frac{F \cdot a^2 \cdot (3l - a) \cdot \cos \alpha}{6EJ_y}.$$

### Описание лабораторной установки.

Для проведения работы используется испытательная установка, представленная на рисунке 2.5.2. Установка состоит из исследуемой балки 1, левый конец которой зашкреплён в неподвижной опоре 2; основания 3; гиревого подвеса 4 и набора грузов 5. Гиревой подвес может перемещаться вдоль оси балки и содержит шарикоподшипник, обеспечивающий вертикальное приложение нагрузки при повороте сечения балки. Неподвижная опора содержит зажим, управление которым осуществляется при помощи винта 6. Отпуская зажим поворотом винта 6, можно повернуть сечение балки рукояткой 7 на угол в пределах от 0 до 90°. Угол поворота устанавливается по шкале 8. Измерение вертикальной  $f_y$  и горизонтальной  $f_x$  составляющих полного прогиба  $f$  осуществляют индикатором часового типа 9 с ценой деления 0,01 мм. Индикаторы крепятся специальными удлинителями 10 к штативной стойке 11. Суммарный прогиб свободного конца балки можно также приближенно определить по шкале 12, закрепленной на штативной стойке. Шкала выполнена из оргстекла и снабжена сеткой вертикальных и горизонтальных линий с ценой деления 2 мм. Отсчет по этой шкале осуществляют при помощи втулки с кольцевым выступом и иглой 13, которые закреплены на свободном конце балки.

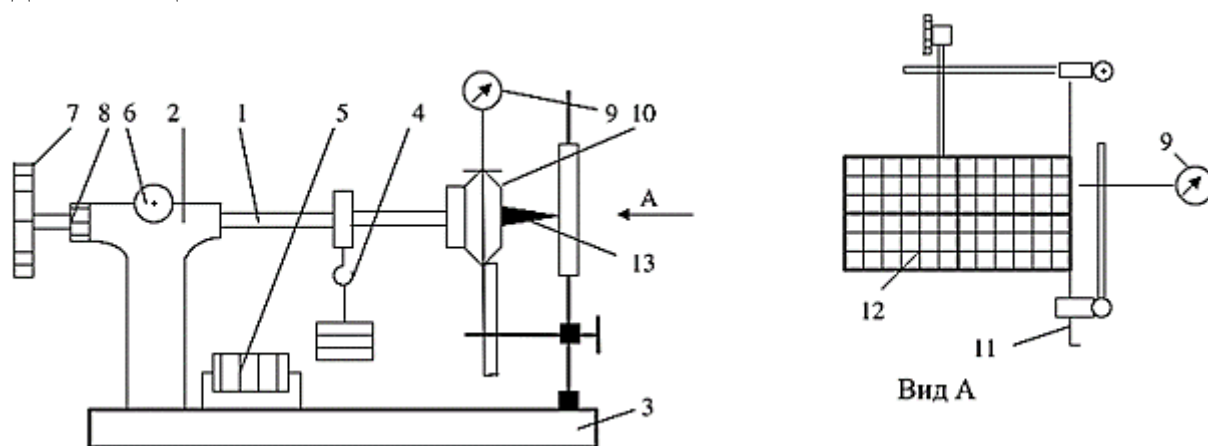


Рисунок 2.5.2 – Экспериментальная установка

### Методика выполнения опыта и обработка результатов эксперимента

1. Штангенциркулем измерить размеры поперечного сечения бруса  $b$  и  $h$  с точностью 0,1 мм и длину консоли  $l$ .
2. Установить по шкале зажима заданный угол  $\alpha$ , поворачивая рукоятку на этот угол от первоначального положения 90 град.
3. На исследуемой балке установить расстояние  $a$ , перемещая гиревой подвес вдоль балки до нужной отметки на поверхности балки.
4. Установить большие стрелки индикаторов на ноль.
5. С помощью гиревого подвеса и набора грузов осуществить три нагружения балки (до  $F = 3\text{ кг} = 30\text{ Н}$ ) равными ступенями силы  $\Delta F = 1\text{ кг} = 10\text{ Н}$ .
6. После каждой ступени нагружения записывать в журнал наблюдений показания индикаторов  $T_{\text{верт}}$  и  $T_{\text{гор}}$ .
7. Разгрузить балку.

8. Вычислить:

а) разности показаний индикаторов  $\Delta T_{\text{верт}}$  и  $\Delta T_{\text{гор}}$ ;

б) средние значения разностей показаний индикаторов  $\Delta T_{\text{иср}}$ ;

в) средние значения величин приращений составляющих прогиба в вертикальной  $\Delta f_{\text{верт}}$  и горизонтальной  $\Delta f_{\text{гор}}$  плоскостях. Результаты занести в табл. (результаты испытаний и расчётов).

8. Определить значение полного прогиба  $f_3$  и занести его в таблицу.

9. Определить угол  $\varphi_3$  между плоскостью изгиба и силовой плоскостью и занести его величину в таблицу.

10. Определить теоретические значения полного прогиба по формулам (2.20) и (2.22), а также углы  $\beta$  и  $\varphi$  (2.21). Результаты занести в таблицу.

11. Определить расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями прогиба  $f$  и угла  $\varphi$  по формулам:

$$\delta_f = \frac{f_{\text{т}} - f_3}{f_{\text{т}}} \cdot 100\%, \quad \delta_\varphi = \frac{\varphi_{\text{т}} - \varphi_3}{\varphi_{\text{т}}} \cdot 100\%.$$

### Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

1. Цель работы.

2. Расчётную схему.

3. Схему установки и исходные данные.

Длина балки, мм	Размеры поперечного сечения, мм		Моменты инерции поперечного сечения балки, мм <sup>4</sup>		Модуль упругости, МПа	Координата приложения силы, мм.	Угол наклона силы, град.	Угол наклона нейтральной линии, град.
$l$	$b$	$h$	$J_x$	$J_y$	$E$	$a$	$\alpha$	$\beta$

### 4. Результаты испытаний и расчётов

Нагрузка, Н	$\alpha = \_\_\circ$			
$F$	Отсчет по индикатору $T_{\text{верт}}$	Разность отсчетов $\Delta T_{\text{верт}}$	Отсчет по индикатору $T_{\text{гор}}$	Разность отсчетов $\Delta T_{\text{гор}}$
0				
10				
20				
30				
$\Sigma \Delta T_i$				



$\Delta T_{icp} = \frac{\sum \Delta T_i}{3}$		
$\Delta f_{верт} = 10^{-2} \cdot \Delta T_{icp}$		
$\Delta f_{гор} = 10^{-2} \cdot \Delta T_{icp}$		
$f_{\Sigma} = \sqrt{\Delta f_{верт}^2 + \Delta f_{гор}^2}$		
$\varphi_{\Sigma} = \arctg \frac{\Delta f_{гор}}{\Delta f_{верт}}$		

### 5. Сравнение экспериментальных и теоретических значений.

Угол $\alpha$ , град.	Прогиб $f$ , мм			Угол $\varphi$ , град.		
	$f_T$	$f_{\Sigma}$	$\delta_f, \%$	$\varphi_T$	$\varphi_{\Sigma}$	$\delta_{\varphi}, \%$
$\alpha = \quad ^\circ$						

### 6. Выводы.

#### Вопросы для самоконтроля.

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Как устроена лабораторная установка?
3. Какой изгиб называют косым? Какие виды изгибов Вы еще знаете?
4. Что называют плоскостью изгиба? Силовой плоскостью?
5. Что называют нейтральной (нулевой) линией при косом изгибе балки и как она расположена относительно плоскости действия изгибающего момента (силовой плоскости)?
6. Как расположена линия полного прогиба по отношению к плоскости действия изгибающего момента? По отношению к нулевой линии сечения?
7. Как вычислить теоретически составляющие и суммарный прогиб конца консольной балки при косом изгибе?
8. Как будет изменяться суммарный прогиб конца консоли от действия постоянной нагрузки при увеличении угла  $\alpha$ ? При его уменьшении?
9. Как определяют положение нулевой линии?
10. Как определяют угол между суммарным прогибом и силовой плоскостью?
11. Какие силовые факторы действуют в поперечных сечениях балки при косом изгибе?
12. Как определить суммарный прогиб опытным путем?
13. Как изменится соотношение величин прогибов, если прямоугольное сечение балки заменить круглым, квадратным?
14. Назовите формы поперечных сечений балок, для которых невозможен косой изгиб.

Литература: [5] - §§ 34; [7] - §§ 75.

## 2.6 Лабораторная работа №10 «Проверка теорем о взаимности работ и перемещений»

**Цель работы** – экспериментальное подтверждение теорем о взаимности работ и перемещений.

**Теоретическая часть работы.** Теорема о взаимности работ гласит, что работа первой силы на перемещении точки ее приложения под действием второй силы равна работе второй силы на перемещении точки ее приложения под действием первой силы, т.е.

$$F_1 y_{12} = F_2 y_{21} = W \quad (2.23)$$

Если силы равны, то теорема переходит в теорему о взаимности перемещений: перемещение первого сечения под действием силы, приложенной во втором сечении, равно перемещению второго сечения под действием той же силы, но приложенной в первом сечении.

$$y_{12} = y_{21} \quad (2.24)$$

### *Описание испытательной установки*

Для проведения работы используется испытательная установка, представленная на рисунке 2.6.1.

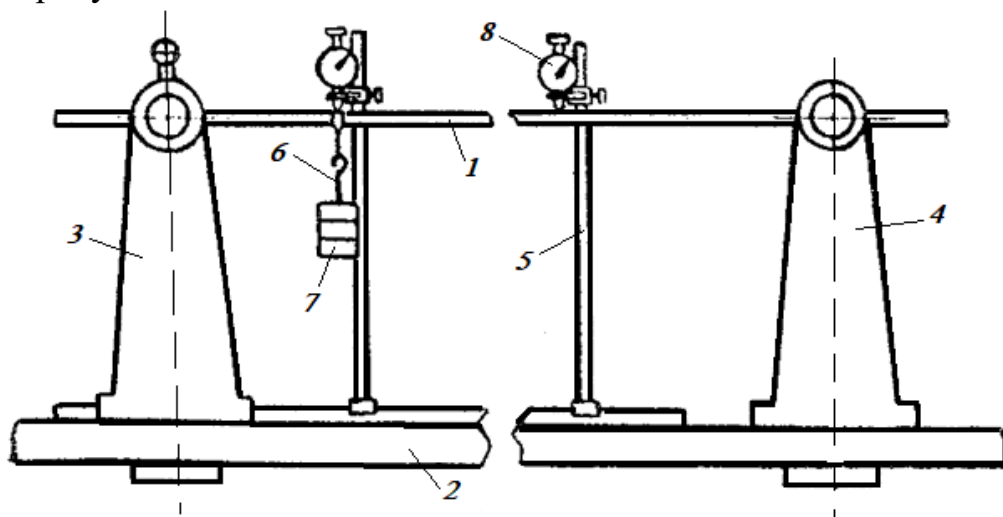


Рисунок 2.6.1 – Испытательная установка

Установка состоит из исследуемой балки 1, основания 2, подвижной 3 и неподвижной 4 опор, двух индикаторных стоек 5 и двух гиревых подвесов 6.

Балка изготовлена из стальной полосы ( $E = 2 \cdot 10^5$  МПа), прямоугольного поперечного сечения (ширина 40 мм, высота 7 мм) и установлена на шарнирных опорах, длина пролета  $l=1$  м.

Нагружение балки осуществляется с помощью гиревых подвесов (масса каждого подвеса  $m=0,5$  кг.) и набора грузов 7. Нагрузка прикладывается сосредоточенно в сечениях 1 и 2, отстоящих на расстоянии  $a=0,2$  м и  $b=0,3$  м от опор балки. В этих сечениях определяются прогибы балки. Измерение прогибов осуществляется при помощи двух индикаторов часового типа 8 с ценой деления 0,01 мм.

### *Порядок проведения эксперимента*

1. Установить призмы для гиревых подвесов в сечениях 1 и 2 балки на расстоянии  $a=0,2$  м и  $b=0,3$  м от опор (отметки 20 и 70 на шкале балки).
2. Установить большие стрелки обоих индикаторов на 0 и записать показания  $T_1$  и  $T_2$  в соответствующих графах таблицы 2.6.1 при нулевой нагрузке.
3. Установить гиревой подвес в сечении 1 и нагрузить балку в этом сечении нагрузкой  $F_1=25$  Н (с учетом веса гиревого подвеса) (рисунок 2.6.2, а). Записать показания  $T_2$  индикатора в сечении 2. Разгрузить балку, снять гиревой подвес.
4. Установить гиревой подвес в сечении 2 и нагрузить балку в этом сечении нагрузкой  $F_2=35$  Н (с учетом веса гиревого подвеса) (рисунок 2.6.2, б). Записать показания  $T_1$  индикатора в сечении 1. Разгрузить балку, снять гиревой подвес.
5. Повторить опыт (пп. 2-4) дважды, записать соответствующие данные в таблицу 2.6.1.
6. Определить прогибы балки в сечениях 1 и 2, вычисляя разности показаний индикаторов для каждого нагружения:  
 $\Delta T_1 = \Delta_{12}, \Delta T_2 = \Delta_{21}.$

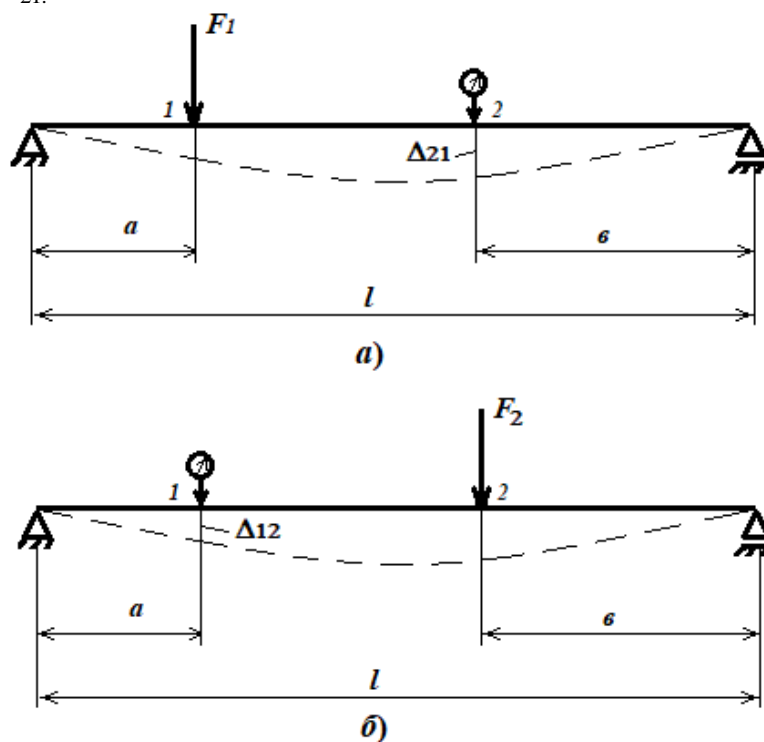


Рисунок 2.6.2 – Схема нагружения

Таблица 2.6.1 – Результаты испытаний

Сечение 1			Сечение 2			Работа	Работа	Расхождение
$F_1$ , Н	Отсчет	Прогиб $\Delta T_1 = \Delta_{12}$	$F_2$ , Н	Отсчет	Прогиб $\Delta T_2 = \Delta_{21}$	$A_1 = F_1 \cdot \Delta_{12}$	$A_2 = F_2 \cdot \Delta_{21}$	$\delta, \%$

	$T_1$ , дел.			$T_2$ , дел.				
0			0					
25			35					
0			0					
25			35					
0			0					
25			35					

7. Вычислить работу силы  $F_1$  на перемещении  $\Delta_{21}$  сечения 2, вызванной силой  $F_2$ :

$$A_1 = F_1 \cdot \Delta_{12} ,$$

и работу силы  $F_2$  на перемещении  $\Delta_{12}$  сечения 1, вызванной силой  $F_1$ :

$$A_2 = F_2 \cdot \Delta_{21} .$$

Результаты занести в таблицу 2.6.1.

8. Проверить справедливость теоремы о взаимности работ, т.е. выполнение равенства (2.23), вычисляя расхождение:

$$\delta = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100\% . \text{ Результат занести в таблицу 2.6.1.}$$

9. Повторить опыт по п.п.2–5, прикладывая в сечениях 1 и 2 балки равные нагрузки  $F_1 = F_2 = 25$  Н и, записывая соответствующие показания в таблицу 2.6.2.

10. Определить прогибы балки в сечениях 1 и 2, вычисляя разности показаний индикаторов для каждого нагружения:

$$\Delta T_1 = \Delta_{12}, \Delta T_2 = \Delta_{21}. \text{ Результаты занести в таблицу 2.6.2.}$$

11. Проверить справедливость теоремы о взаимности перемещений, т.е. выполнение равенства (2.23), вычисляя расхождение:  $\delta = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100\% .$

Результаты занести в таблицу 2.6.2.

12. Оформить отчет.

Таблица 2.6.2 -

Сечение 1			Сечение 2			Работа	Рас- хож- де- ние
$F_1$ , Н	От- счет $T_1$ , дел.	Прогиб $\Delta T_1$ , м	$F_2$ , Н	От- счет $T_2$ , дел.	Прогиб $\Delta T_2$ , м	$A_1 = F_1 \cdot \Delta_{12}$	$\delta, \%$
0			0				
25			35				

0			0				
25			35				
0			0				
25			35				

### **Содержание отчета**

Отчет по работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Расчётную схему.
3. Схему установки и исходные данные.
4. Результатами измерений.
5. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими.
6. Выводы.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Сформулируйте теорему о взаимности работ и взаимности перемещений.
2. Поясните, как можно проверить теорему о взаимности перемещений в лабораторных условиях. Изложите порядок проведения работы.
3. Где можно использовать свойства теоремы о взаимности перемещений?

## **2.7 Лабораторная работа №11 «Исследование потери устойчивости прямолинейного стержня»**

**Цель работы:** экспериментальное определение критической силы и сравнение с теоретическим значением.

**Теоретическая часть работы.** Если прямолинейный стержень сжимать центрально приложенной силой  $F$ , то с возрастанием этой силы стержень вначале только укорачивается, сохраняя свою прямолинейную форму, а затем наступает явление потери устойчивости – стержень изогнется (рисунок 1).

Наименьшая центрально приложенная сжимающая сила, которая выводит стержень из прямолинейного устойчивого равновесия называется **критической силой**. Ее можно определить по формуле Эйлера

$$F_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 EJ_{\text{min}}}{(\mu l)^2}, \quad (2.25)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости материала;

$l$  – длина стержня;

$J_{\text{min}}$  – минимальный момент инерции сечения;

$\mu$  – коэффициент приведения длины, зависящий от способов закрепления стержня.

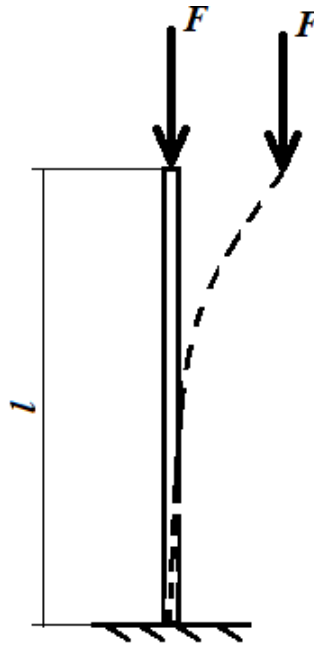


Рисунок 2.6.1 – Явление потери устойчивости продольно сжатого стержня.

Формула Эйлера применима лишь в том случае, если потеря устойчивости стержня происходит при напряжениях, меньших предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пл}}$ , т.е. когда справедлив закон Гука

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{F_{\text{кр}}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_{\text{пл}} . \quad (2.26)$$

Здесь  $A$  - площадь поперечного сечения;

$\lambda$  – гибкость стержня, определяемая как

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\text{min}}} , \quad (2.27)$$

где  $i_{\text{min}}$  – минимальный радиус инерции сечения.

Предельная гибкость, начиная с которой можно использовать формулу Эйлера, определяется по формуле

$$\lambda_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{\text{пл}}}} \quad (2.28)$$

и зависит лишь от физико-механических свойств. Она является постоянной для данного материала. Так, например, для стали Ст.3  $\lambda_{\text{пред}} = 100$ , для древесины  $\lambda_{\text{пред}} = 110$ , для чугуна  $\lambda_{\text{пред}} = 80$ , для дюралюминия  $\lambda_{\text{пред}} = 60$ .

Стержни, у которых  $\lambda > \lambda_{\text{пред}}$ , называются стержнями большой гибкости.

При меньших значениях гибкости (стержни средней гибкости) критические напряжения  $\sigma_{кр} > \sigma_{пц}$  определяются по эмпирическим формулам или соответствующим им таблицам (графикам). Например, формула Ясинского для определения критических напряжений имеет вид

$$\sigma_{кр} = a - b\lambda, \quad (2.29)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты.

Например, для стали Ст.3  $a = 310$  МПа,  $b = 1,14$  МПа, для древесины (сосна)  $a = 28,7$  МПа,  $b = 0,19$  МПа.

Эмпирические формулы, особенно для древесины, дают лишь приближенный результат.

Для стержней малой гибкости, у которых  $\sigma_{кр}$ , подсчитанные по формуле Ясинского, получаются больше, чем опасные (предельные) напряжения, принимают:  $\sigma_{кр} = \sigma_T$  – для пластичных материалов;  $\sigma_{кр} = \sigma_{пч}$  – для хрупких материалов.

Итак, теоретические значения критического напряжения ( $\sigma_{кр}$ ) и критической силы  $F_{кр}$ , при которых происходит потеря устойчивости определяют по формулам:

$$\begin{aligned} \text{если} \quad & 0 < \lambda < 40, \text{ то } \sigma_{кр} = \sigma_T; \\ & 40 < \lambda < \lambda_{пред}, \text{ то } \sigma_{кр} = a - b\lambda; \\ & \lambda > \lambda_{пред}, \text{ то } \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Критическая сила

$$F_{кр} = \sigma_{кр} A. \quad (2.31)$$

### ***Описание испытательной установки***

Определение критической силы производится для стержня, нижний конец которого зашпелен, а верхний свободен (см. рисунок 2.6.1).

Установка (рисунок 2.6.2) состоит из стального стержня 1 с жестко прикрепленной к нему пятой 2, опирающейся на станину 3 при помощи винтов 4, служащих для жесткого закрепления стержня в пяте.

Для передачи нагрузки на стержень служит коромысло 6 с двумя тягами 5, к которым с помощью поперечины 7 подвешена грузовая площадка 8 для установки гирь.

Верхний конец стержня под нагрузкой может отклоняться, увлекая за собой коромысло с тягами и грузовой площадкой.

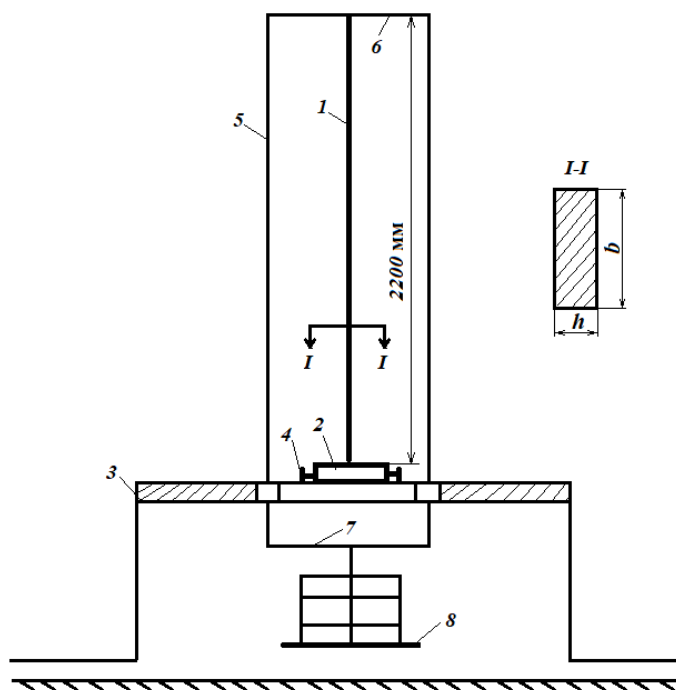


Рисунок 2.6.2 – Экспериментальная установка

**Методика выполнения опыта и обработка результатов исследования.**

**1. Определение теоретической критической силы.**

1.1 Определяется гибкость стержня  $\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}$ ,

для чего:

- определяют коэффициент  $\mu$ , учитывающий способы закрепления концов стержня;
- замеряют, длину стержня  $l$  и размеры поперечного сечения;
- вычисляют главный центральный (наименьший) момент инерции сечения  $J_{\min}$ ;
- определяют площадь поперечного сечения стержня  $A$ ;
- находят наименьший радиус инерции  $i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}}$ .
- вычисляют гибкость  $\lambda$ .

1.2 Непосредственно в зависимости от гибкости, используя формулы (2.30) и (2.31) определяют теоретически силу  $F_{\text{кр}}$ .

**Примечания:**

1) при определении гибкости, критического напряжения и критической силы, необходимо иметь одинаковую размерность величин.

2) Если стержень изготовлен из прокатной стали, необходимо определить его номер (по замеренным поперечным размерам) и из ГОСТ выписать необходимые данные ( $A$ ,  $J_{\min}$ ,  $i_{\min}$ ).

Результаты фиксируются в таблицу (2.6.1).

Таблица 2.6.1 – Исходные данные



№, п/п	Характеристики стержня	Значения величин
1	Материал СТ.5	
2	Модуль упругости $E$ , МПа	
3	Длина $l$ , м.	
4	Площадь поперечного сечения $F=bh$ , м <sup>2</sup> $b=115$ мм, $h=40$ мм.	
5	Минимальный момент инерции сечения $J_{\min} = \frac{hb^3}{12}$ , м <sup>4</sup>	
6	Минимальный радиус инерции сечения $i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}}$ , м.	
7	Гибкость стержня $\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}$ , $\mu=2$	

## 2. Определение экспериментальной критической силы.

Для экспериментального определения критической силы на грузовую площадку 8 (рисунок ) укладывают гири до момента потери устойчивости. Величина критической силы определяется как сумма веса гирь, уложенных на грузовую площадку и веса устройства для передачи нагрузки на стержень, масса которого равна 6,5 кг.

3. Определяется процент расхождения между теоретическим и экспериментальным значением критической силы:

$$4. \delta = \frac{F_{\text{кр}}^{\text{т}} - F_{\text{кр}}^{\text{э}}}{F_{\text{кр}}^{\text{т}}} \cdot 100\% .$$

5. Результаты фиксируются в таблицу 2.6.2.

Таблица 2.6.2 – Сравнение теоретических и экспериментальных результатов

Величина критической силы		Расхождение $\delta$ , %
Теоретическая $F_{\text{кр}}^{\text{т}}$	Экспериментальная $F_{\text{кр}}^{\text{э}}$	

## Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема установки.
3. Определение теоретических значений критической силы.
4. Результаты испытаний и расчетов.
5. Отклонение теоретических значений от экспериментальных в %.
6. Выводы.

## Вопросы для самоконтроля

1. Какой изгиб называется продольным?
2. Что понимается под критической силой?

3. От чего зависит величина критической силы?
  4. Когда применима формула Эйлера?
  5. Что такое коэффициент приведения длины и чему он равен при различных случаях закрепления концов сжатых стержней?
  6. Как определяется критическое напряжение, если формула Эйлера не применима?
  7. Чему равна гибкость стержня?
  8. Как определить предельную гибкость?
  9. Как опытным путем определить значение критической нагрузки?
- Литература: [5] - §§ 81-84; [6] - §§ 15.1 – 15.4; [7] - §§ 86- 89.

## ГЛОССАРИЙ

### ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Условные обозначения	Термин	Единицы измерения в СИ
$D, d$	Диаметр	м
$E$	Модуль продольной упругости	Па
$A$	Площадь поперечного сечения бруса	м <sup>2</sup>
$f$	Стрела прогиба	м
$[f]$	Допускаемая стрела прогиба	м
$G$	Модуль сдвига	Па
$J_x, J_y$	Осевые моменты инерции плоского сечения	м <sup>4</sup>
$I_{xy}$	Центробежный момент инерции плоского сечения	м <sup>4</sup>
$J_{max}, J_{min}$	Главные моменты инерции плоского сечения	м <sup>4</sup>
$J_p$	Полярный момент инерции плоского сечения	м <sup>4</sup>
$i_x, i_y$	Радиусы инерции поперечного сечения относительно осей $z$ и $y$ .	м
$i_{min}$	Минимальный радиус инерции поперечного сечения	м
$l_{расч}$	Расчетная (приведенная) длина бруса	м
$\Delta l$	Абсолютное удлинение бруса	м

$\Delta a$	Абсолютное поперечное сужение бруса	м
$\varepsilon$	Относительная продольная деформация бруса	—
$\varepsilon'$	Относительная поперечная деформация бруса	—
$M_{\text{и}}$	Изгибающий момент	Н·м
$M_y, M_z$	Изгибающие моменты относительно главных центральных осей инерции сечения $y$ и $z$	Н·м
$M_{\text{к}}$	Крутящий момент	Н·м
$N$	Продольная сила	Н
$F$	Сосредоточенная сила	Н
$F_{\text{кр}}$	Критическая сила	Н
$[F]$	Допускаемая сила	Н
$Q_y, Q_x$	Поперечная сила	Н
$q$	Интенсивность распределенной по длине нагрузки	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$
$S_y, S_x$	Статические моменты площади фигуры	$\text{м}^3$
$W_y, W_x$	Осевые моменты сопротивления относительно осей $y$ и $z$	$\text{м}^3$
$W_p$	Полярный момент сопротивления	$\text{м}^3$
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	Деформации в направлении главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	—
$\mu$	Коэффициент Пуассона	—
$\sigma$	Нормальное напряжение	Па
$\sigma_{\text{шц}}, \sigma_y, \sigma_{\text{т}}, \sigma_{\text{в}}$	Предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности	Па
$[\sigma]$	Допускаемое нормальное напряжение	Па
$\tau$	Касательное напряжение	Па
$[\tau]$	Допускаемое касательное напряжение	Па
$\varphi$	Угол закручивания	
$\omega$	Угловая скорость	$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$

## НЕКОТОРЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ ПО СОПРОТИВЛЕНИЮ

## МАТЕРИАЛОВ

1. Брус – тело, одно из измерений которого (длина) много больше двух других. Брус может иметь сечение постоянное или переменное вдоль оси. Брус, имеющий прямолинейную ось, называется стержнем. Стержень, работающий главным образом на изгиб, называется балкой, на кручение – валом.
2. Внешние силы – силы, действующие на систему со стороны, других тел, не входящих в рассматриваемую систему.
3. Внутренние силы – силы, действующие на точки или тела системы со стороны тел, входящих в данную систему.
4. Выносливость материала (детали) – способность сопротивляться действию многократных переменных нагрузок.
5. Геометрические характеристики плоских сечений – площадь, статические моменты плоских сечений, моменты инерции.
6. Гипотеза плоских сечений – плоские сечения, нормальные к оси стержня до деформации, остаются и после деформации плоскими и нормальными к его оси.
7. Деформация – изменение формы и размеров твердого тела под действием внешних сил.
8. Жесткость – способность конструкций и ее элементов не испытывать значительных деформаций при действии внешних нагрузок.
9. Изгиб – вид деформации при котором в поперечных сечениях балки возникают изгибающие моменты и часто, одновременно с последними, поперечные силы.
10. Кручение – вид деформации, когда в поперечных сечениях бруса возникают крутящие моменты.
11. Напряжение – мера внутренних сил, возникающих в деформируемом теле под влиянием внешних воздействий.
12. Пластика – тело, у которого одно из измерений (толщина) много меньше двух других. Искривленная пластинка в одном или двух направлениях называется оболочкой.
13. Прочность – способность конструкций и ее элементов воспринимать внешние нагрузки без разрушения.
14. Растяжение (сжатие) – вид деформации, когда при нагружении в поперечных сечениях бруса возникают только продольная растягивающая или сжимающая сила.
15. Сдвиг – угловая деформация, которая численно равна изменению величины первоначально прямого угла в радианах и обозначается  $\gamma$ .
16. Сложное сопротивление – в поперечных сечениях бруса возникает несколько внутренних силовых факторов.
17. Сопротивление материалов – это наука о расчете элементов конструкций на прочность, жесткость и устойчивость.
18. Устойчивость – способностью тел сохранять первоначальную форму равновесия.

19. Эпюра – схематический график, показывающий как при нагружении конструкции внешними силами, распределяются величины: усилие, напряжение, деформация.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лабораторный практикум по курсу «Сопротивление материалов» /Под ред. Мачихина Ю. А., Данилова В. Н. – М.: Изд. Моск. техн. ин-та пищ. пром, 1974. – 133 с.
2. Афанасьев, А. М. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. / А. М. Афанасьев, В. А. Марьин – М.: Наука, 1975. – 288 с.
3. Сопротивление материалов: Лабораторный практикум: Учебное пособие / М.Д. Подскебко, О.И. Мисуно, С.А. Легенький. – Мн.: Амалфея, 2001. – 272 с.
4. Цурпал, И. А., Сопротивление материалов. Лабораторные работы / И. А. Цурпал, Н. П. Барабан, В. М. Швайкс – Киев: Вища школа, 1978. – 192 с.
5. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов /В.И. Феодосьев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
6. Александров, А.В. Сопротивление материалов: учеб. для вузов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин – М.: Высш. шк., 1995. - 560 с.: ил.
7. Костенко, Н.А. Сопротивление материалов: учебное пособие / Н.А. Костенко, С.В. Балясникова, Ю.Э. Волошановская и др.; под. ред. Н.А. Костенко. – М.: Высш. шк., 2000. – 430 с.
8. Пирогов, А.Н.. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: Учебное пособие/ А.Н. Пирогов, В.Н. Грачев, А.И. Яремчук и др. – Кемерово, 2004. - 125 с.: ил.
9. Соловьев, А.Н. Методические указания к выполнению лабораторных работ по сопротивлению материалов. (Лабораторные работы № 5, 6, 7, 8) / А.Н. Соловьев, Л.М. Грошев, В.П. Большенко и др. – Ростов-н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2009.–26 с.