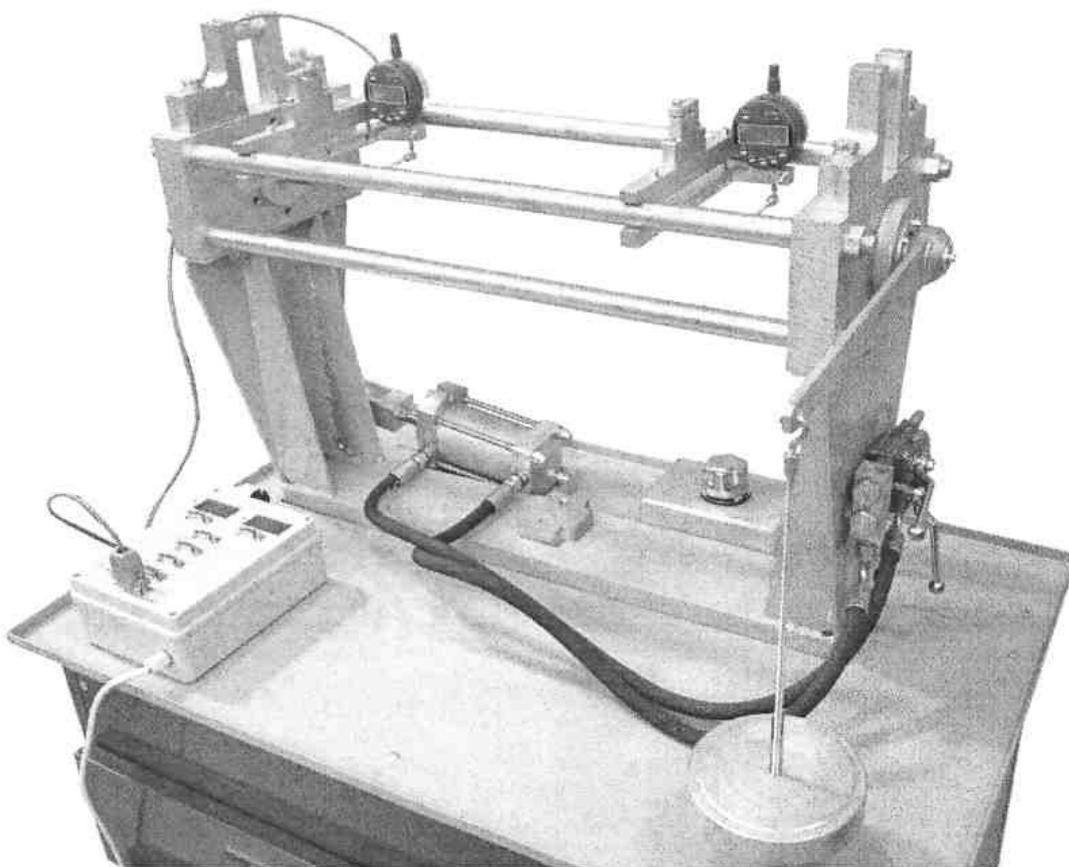


**Г.Д.Асанова**

**Лабораторный практикум  
по дисциплине  
«Сопротивление материалов»**

**Учебное пособие**



Костанай. 2021

Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова

Инженерно – технический институт имени А.Айтмухамбетова

Кафедра машиностроения

Г.Д.Асанова

**Лабораторный практикум по  
дисциплине  
«Сопротивление материалов»**

Учебное пособие

Костанай, 2022

УДК 539.3/.6 (075.8)

ББК 30.121 я73

С64

**Составитель:**

Асанова Гульмира Давидовна, старший преподаватель кафедры машиностроения

**Рецензенты:**

Полищук Юрий Владимирович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Костанайского филиала ТОО «НПЦ агроинженерии»

Жаналинов Базарбай Нургалиевич, кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры машиностроения КРУ имени А.Байтурсынова

Салыков Булат Рахимжанович, кандидат технических наук, профессор кафедры машины, трактора и автомобиля КРУ имени А.Байтурсынова

Асанова Г.Д.

С64 Лабораторный практикум по дисциплине «Сопротивление материалов».

Учебное пособие.– Костанай: КРУ имени А.Байтурсынова 2022. 96 с.

ISBN 978-601-356-106-6

В учебное пособие включены методические указания по выполнению лабораторных работ и задачи для самостоятельного решения с примерами

Учебное пособие предназначено для студентов по образовательной программе «6В07103 Технологические машины и оборудование», «6В07105 Машиностроение».

УДК 539.3/.6 (075.8)

ББК 30.121. я73

С64

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского регионального университета имени А.Байтурсынова,

27 января 2022 г., протокол №1

ISBN 978-601-356-106-6

© Костанайский региональный университет  
имени А.Байтурсынова

© Асанова Г.Д., 2022

## Содержание

Введение		5
Лабораторная работа № 1	Программа «ОСМ измерения».....	6
Лабораторная работа № 2	Экспериментальное определение диаграммы деформирования пластичного материала при растяжении.....	12
Лабораторная работа № 3	Определение модуля упругости и коэффициента Пуассона для стали.....	22
Лабораторная работа № 4.	Определение модуля сдвига.....	28
Лабораторная работа № 5	Испытание пластичных материалов на срез..	36
Лабораторная работа № 6	Определение перемещений при изгибе балки.....	41
Лабораторная работа № 7	Определение напряжений в сечении балки при изгибе.....	48
Лабораторная работа № 8	Определение напряженного состояния в балке при сложном нагружении (при действии изгиба и кручения)	60
Лабораторная работа № 9	Исследование устойчивости сжатого стержня (определение критической силы)....	66
Лабораторная работа № 10	Определение центра изгиба тонкостенного не замкнутого профиля.....	74
Лабораторная работа № 11	Экспериментальная оценка концентрации напряжений около отверстия в растягиваемой полосе.....	84
Лабораторная работа № 12	Теорема взаимности работ.....	89
	Список использованных источников.....	95

## Введение

«Сопротивление материалов» является базовой дисциплиной, вузовским компонентом. В данном курсе рассматриваются вопросы расчета отдельных элементов конструкций и некоторых простейших конструкций на прочность жесткость устойчивость.

Если в теоретической механике все тела считаются абсолютно твердыми, то в сопротивлении материалов учитывают, что элементы конструкций при действии внешних сил изменяют свою форму и размеры, то есть деформируются.

Сопротивление материалов является экспериментально – теоретической наукой, здесь широко используются опытные данные и теоретические исследования.

Успешному освоению пройденного материала способствует качественное выполнение всех лабораторных практикумов.

При выполнении лабораторных работах следует выполнять следующие требования:

- студенты не допускаются к занятиям, если они владеют теоретическим материалом достаточной степени
- к выполнению лабораторных работ приступают только после прочтения руководства к ним.
- прохождение инструктажа по технике безопасности является обязательным для допуск студентов к выполнению лабораторных работ. Каждый обучающийся несет материальную ответственность за поломки и повреждения, возникшие по его вине.

## Лабораторная работа № 1 Программа «ОСМ измерения»

*Цель работы:* познакомиться с программой «ОСМ измерения», общим порядком действий при работе с учебным стендом.

### *Теоретическое обоснование.*

Программа «ОСМ измерения» предназначена для совместной работы с учебным стендом «Основы сопротивления материалов» ОСМ -11ЛР-11.

Работать с программой должен оператор, имеющий базовые навыки работы с персональным компьютером в операционной среде MS Windows 7/8/10. Все файлы, записываемые программой, выбираются оператором, им же указывается их местоположение на жестком диске.

Программа предназначена для работы с операционными системами MS Windows 7/8/10. Программа устанавливается на компьютер простым копированием папки, содержащей три файла: OSM.exe, Lusbapi.dll, koef.dat. Файл koef.dat содержит тарифовочные коэффициенты датчиков. Также для работы программы необходимо установить драйвер для платы АЦП производства фирмы L-card, поставляемый в комплекте. Установка драйвера производится стандартными средствами операционной системы Windows.

При запуске программы на экране появляется окно, показанное на рисунке

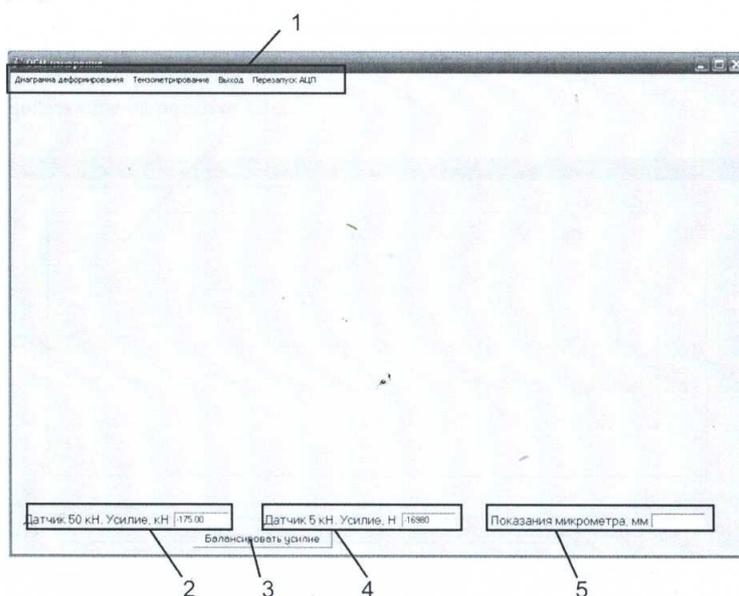


Рисунок 1 - Диалоговое окно программы при запуске

В зоне, обозначенной 1 (рисунок 1), расположено основное меню программы, позволяющее выбирать вид измерения. В зоне, обозначенной 2, отображается текущее значение усилия на силоизмерителе 50 кН, в случае, если силоизмеритель не подключен, отображается нижняя граница диапазона измерения силы. В связи с температурным дрейфом нуля датчика усилия показания могут быть отличны от нуля при отсутствии нагрузки. Для того чтобы сбалансировать (установить на нуль) показания усилия, нужно кнопку 3.

В зоне, обозначенной 4, отображается текущее значение усилия на силоизмерителе 50 кН, в случае, если силоизмеритель не подключен, отображается нижняя граница диапазона измерения силы. В зоне, обозначенной 5, отображается текущее значение показаний микрометрического индикатора с выходом для подключения к ПЭВМ (далее по тексту – *микрометр с цифровым выходом*), в случае если он подключен к измерительно-преобразовательному блоку.

### Пункт меню «*Диаграмма деформирования*»

После выбора данного пункта меню на экране появляется окно, показанное на рисунке 2.

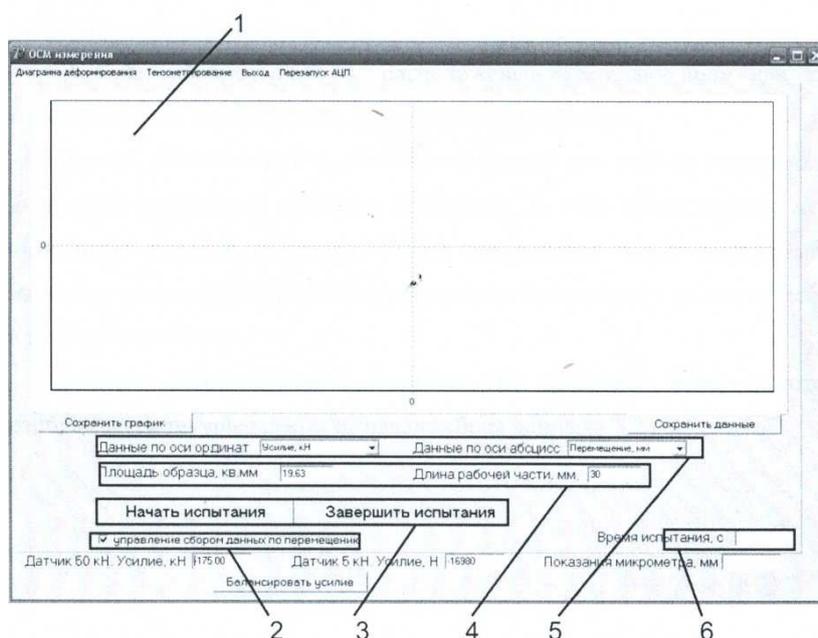


Рисунок 2 - Диалоговое окно «*Диаграммы деформирования*»

В зоне, обозначенной 1 (рисунок 1), расположено графическое поле, на котором отображаются собираемые в ходе испытаний данные. Под графическим полем размещены кнопки, позволяющие сохранить графическую информацию как рисунок или данные, по которым построен график, как текстовый файл.

В зоне, обозначенной 2, расположен флажок выбора типа сбора данных. В случае, если флажок 2 стоит, то в ходе испытаний текущая точка добавляется на диаграмму, только если ее перемещение больше, чем у последней добавленной точки (рекомендуется и установлено по умолчанию). Если флажок 2 убран, то точки на диаграмму добавляются с постоянным шагом по времени, примерно 3 раза в секунду.

В зоне, обозначенной 3, расположены кнопки управления сбором данных в процессе испытания. При нажатии на кнопку «начать испытания» начинается сбор данных. При нажатии на кнопку «завершить испытания» сбор данных прекращается.

В зоне, обозначенной 4, расположены текстовые поля для ввода геометрических характеристик испытываемых образцов.

В зоне, обозначенной 5, расположены поля для выбора выводимых на диаграмму параметров процесса испытания. В ходе сбора данных менять выбранные параметры нельзя. После завершения сбора данных можно изменить выбранные параметры, диаграмма при этом будет перестроена в новых координатах.

В зоне, обозначенной 6, расположено текстовое поле, в котором отображается текущее время от начала сбора данных.

### **Пункт меню «тензометрирование»**

После выбора данного пункта меню на экране появляется окно, показанное на рисунке 3.

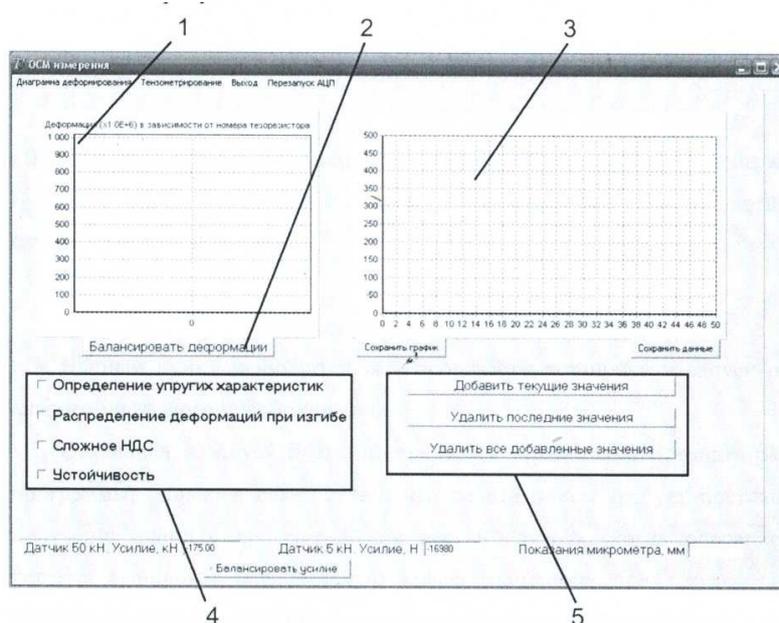


Рисунок 3 - Диалоговое окно «тензометрирование»

В зоне, обозначенной 1 (рисунок 3), расположено графическое поле, на котором в режиме реального времени отображаются показания тензорезисторов.

В зоне, обозначенной 2, расположена кнопка балансировки текущих показаний тензорезисторов (установки на нуль).

В зоне, обозначенной 3, расположено графическое поле, на которое можно добавлять текущие значения усилия и показания тензорезисторов. Под графическим полем размещены кнопки, позволяющие сохранить графическую информацию как рисунок или данные, по которым построен график, как текстовый файл. Добавление текущих значений на поле 3 осуществляется кнопкой «добавить текущие значения», расположенной в зоне 5. Удалить последние добавленные значения можно кнопкой «удалить последние значения». Кнопка «удалить все собранные значения» удаляет все собранные данные.

В зоне, обозначенной 4, расположены флажки выбора типа испытания.

### ***Пункт меню «выход»***

Для выхода из программы нужно выбрать пункт верхнего меню «выход» при этом появится запрос на подтверждения выхода из программы. В случае если нужно выйти следует нажать кнопку «ок», в противном случае – кнопку «отмена».

### ***Пункт меню «перезапуск АЦП»***

Данный пункт меню позволяет произвести остановку и запуск платы аналого-цифрового преобразования.

Остановка и запуск платы не требуется при штатном режиме работы программы, однако в связи с тем, что работа платы требует постоянного получения данных программой от нее, в случаях, когда операционная система выполняет параллельную задачу (например, при запуске другой программы и т.д.) может происходить рассинхронизация программы и платы. Последствиями такой рассинхронизации является несоответствие данных, получаемых с датчиков программой, и данных, отображаемых преобразователями датчиков.

Таким образом, в случае, если *показания датчиков по программе и по вторичным преобразователям, установленным на стенде, значительно не совпадают. Следует произвести остановку и запуск АЦП.*

## Общий порядок действий при работе со стендом

1. Включить ПЭВМ, дождаться загрузки операционной системы.
2. Установить на силовую раму стенда приспособления и образцы для испытаний в соответствии с проводимой лабораторной работой.
3. Подключить используемый силоизмеритель, тензодатчики и микрометр с цифровым выходом к соответствующим разъемам на измерительно-преобразовательном блоке.
4. Включить питание измерительно-преобразовательного блока кнопкой, расположенной слева на блоке. При этом должны включиться цифровые табло на блоке.
5. Запустить на ПЭВМ программу «ОСМ измерения».
6. В случае проведения лабораторных, требующих использование гидроцилиндра, необходимо установить рукоятку привода ручного насоса. Для этого необходимо совместить вилку на рукоятке с пазами на приводе насоса и надеть рукоятку на вал до упора (рисунок 4)

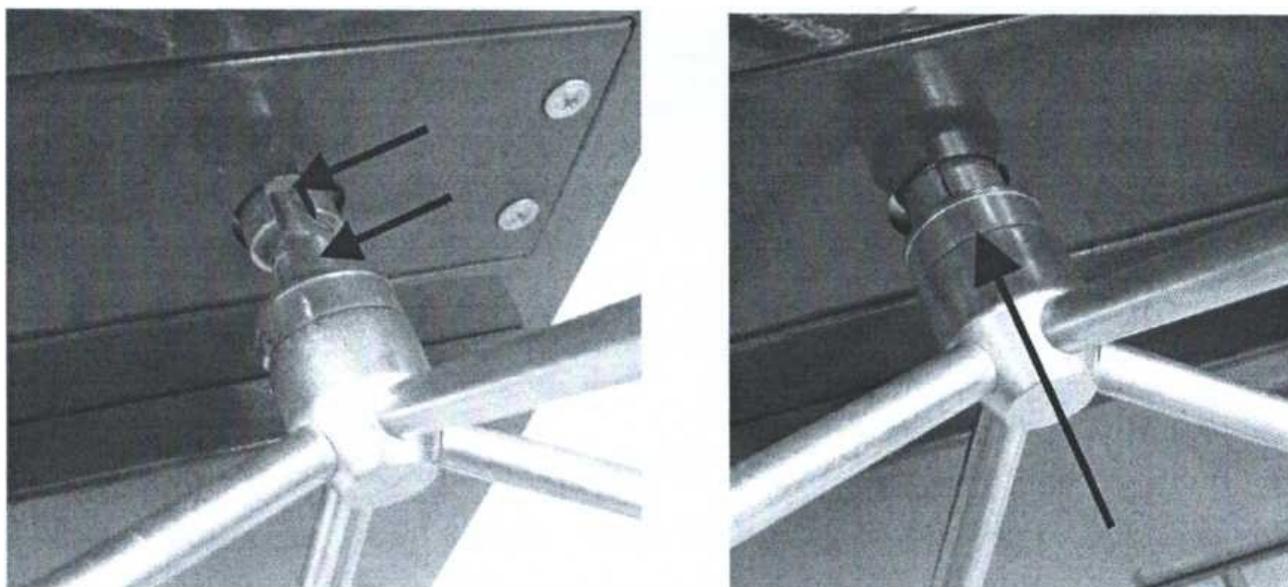


Рисунок 4 - Установка рукоятки ручного насоса

7. Насосная станция работает следующим образом: при вращении рукоятки по ходу часовой стрелки происходит набор жидкости в насос, при вращении рукоятки против хода часовой стрелки происходит вытеснение жидкости из насоса в гидроцилиндр через направляющие краны. В крайних положениях плунжер упирается в корпусные детали и усилие на рукоятке резко возрастает, в связи с этим **в ходе работы с ручной насосной станцией запрещается прикладывать к рукоятке усилие больше 50 Н.**

8. Для направления потока жидкости, обеспечивающего выдвижение (прямой ход) гидроцилиндра, необходимо переключить краны в положение, показанное на рисунке 5.

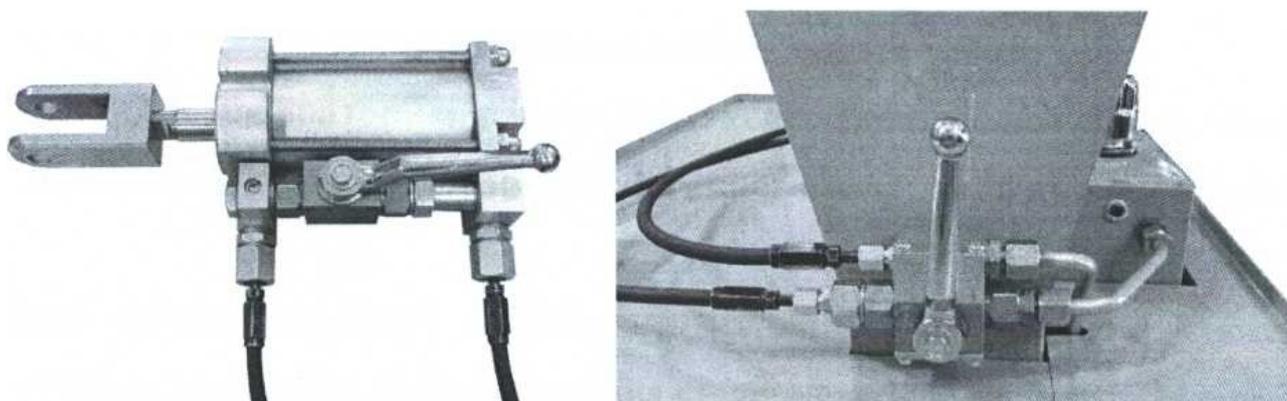


Рисунок 5 - Положение кранов при прямом ходе гидроцилиндра

9. Для направления потока жидкости, обеспечивающего втягивание (обратный ход) гидроцилиндра, необходимо переключить краны в положение, показанное на рисунке 6.

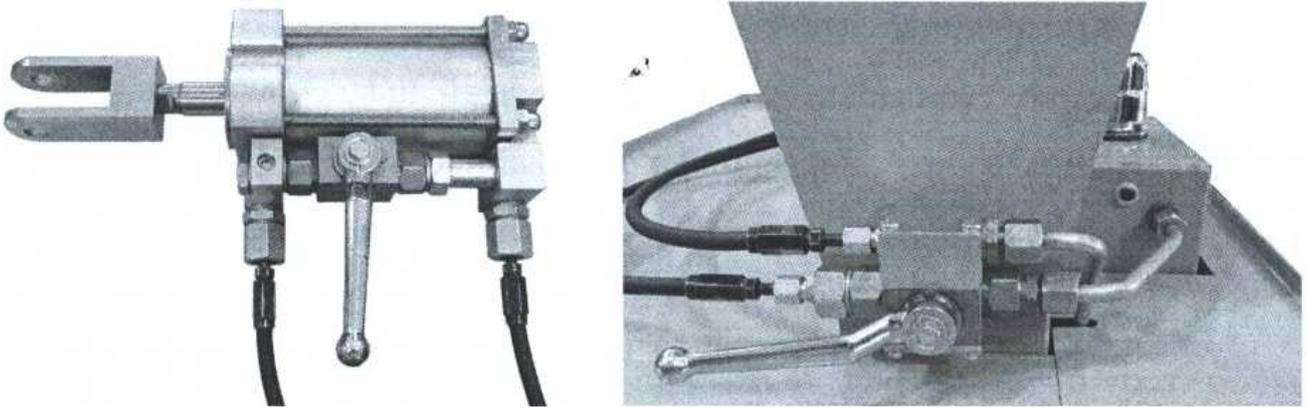


Рисунок 6 - Положение кранов при обратном ходе гидроцилиндра

10. После завершения работы с гидроцилиндром необходимо перевести краны в положение, показанное на рисунке 2 и убрать гидроцилиндр на подставку сзади силовой рамы.

#### Контрольные вопросы

1. Для чего используется программа «ОСМ измерения»?
2. Нарисуйте схему стенда.

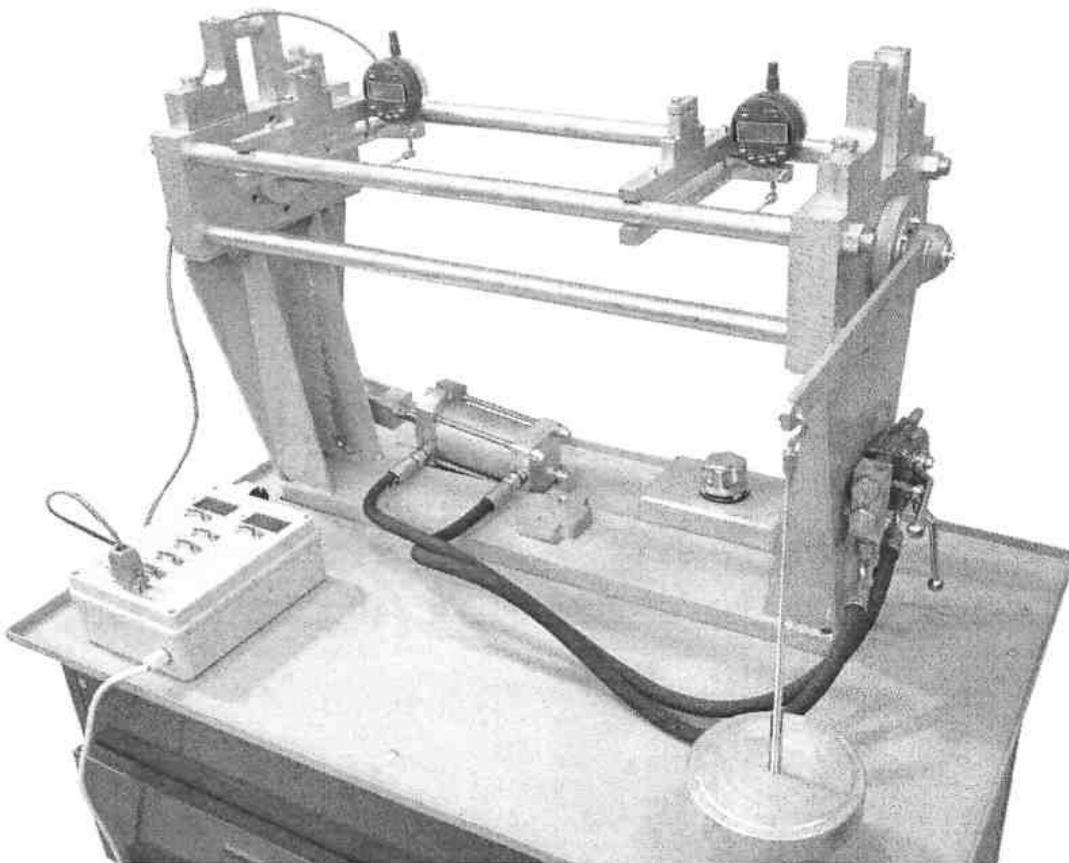


Рисунок 7 – Учебный стенд

## Лабораторная работа №2

### Экспериментальное определение диаграммы деформирования пластичного материала при растяжении

*Цель работы:* изучение способа испытаний материалов на растяжение, изучение диаграммы деформирования стали или алюминиевого сплава при растяжении, определение механических характеристик материалов при растяжении.

#### *Теоретические основы.*

Для испытания на растяжение используются специально изготавливаемые образцы, которые большей частью вытачиваются из прутковых заготовок или вырезаются из листа. Основной особенностью таких образцов является наличие усиленных мест захвата и плавного перехода к сравнительно узкой ослабленной рабочей части.

Длина рабочей части  $l_{\text{раб}}$  выбирается обычно в 15 раз большей диаметра  $d$ . При замерах деформаций используется только часть этой длины, не превышающая десяти диаметров. Существует, однако, и более короткие образцы, у которых отношение  $l_{\text{раб}}/d$  равно 5. Основной задачей испытания на растяжение является построение диаграммы растяжения, т.е. зависимости между силой, действующей на образец, и его удлинением.

На рисунке 8 показана типичная для углеродистой стали диаграмма испытания образца в координатах  $P-\Delta l$ . Полученная кривая условно может быть разделена на следующие четыре зоны.

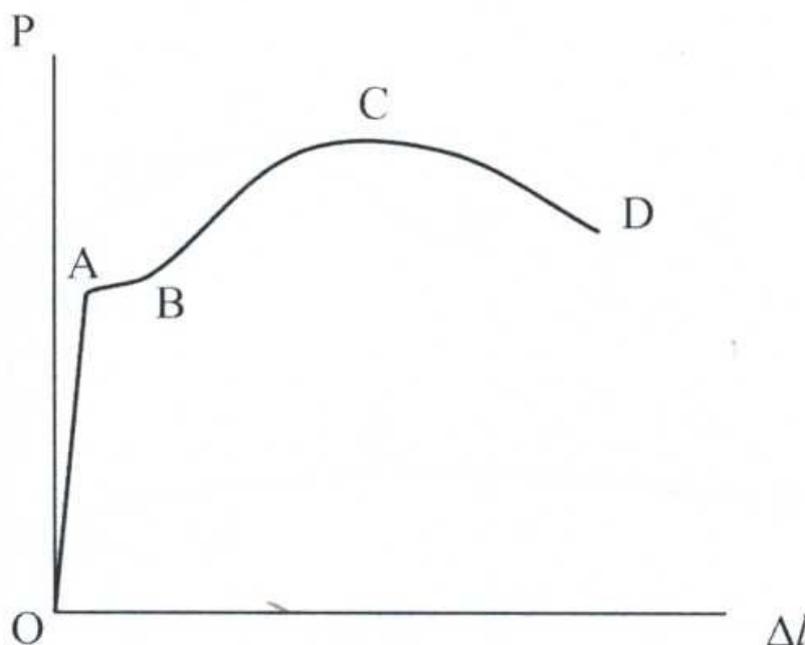


Рисунок 8 - Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

Зона  $OA$  носит название *зоны упругости*. Здесь материал подчиняется закону Гука:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

На рисунке 8 этот участок для большей наглядности показан с отступлением от масштаба. Удлинения  $\Delta l$  на участке  $OA$  очень малы. И прямая  $OA$ , будучи вычерченной в масштабе, совпадала бы в пределах ширины линии с осью ординат. Величина силы, для которой остается справедливым закон Гука. Зависит от размеров образца и физических свойств материала. Для высококачественных сталей эта величина имеет большое значение. Для таких металлов, как медь, алюминий, свинец, она оказывается в несколько раз меньшей.

Зона  $AB$  называется *зоной общей текучести*, а участок  $AB$  диаграммы площадкой текучести. Здесь происходит существенное изменение длины образца без заметного увеличения нагрузки. Наличие площадки текучести  $AB$  для металлов не является характерным. В большинстве случаев при испытании на растяжение и сжатие площадка  $AB$  не обнаруживается, и диаграмма растяжения образца имеет вид кривых, изображенных на рисунке 9 кривая 1 типична для алюминия и отожженной меди, кривая 2 – для высококачественных легированных сталей.

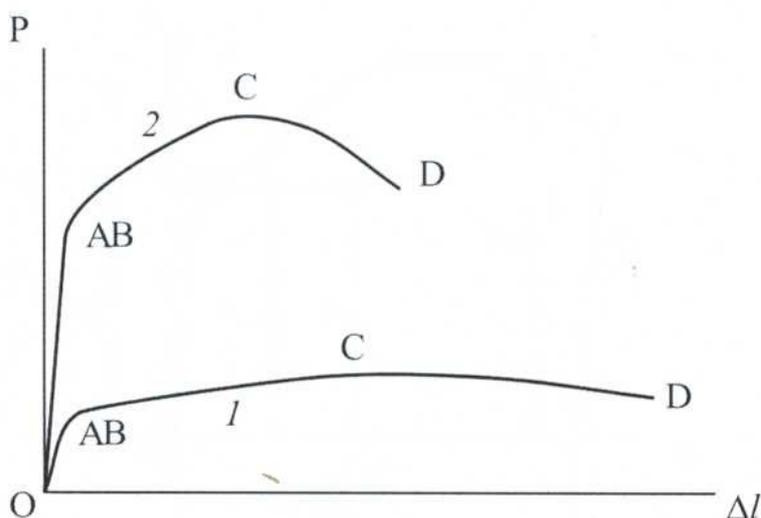


Рисунок 9 - Диаграммы деформирования меди (1) и легированной стали (2)

Зона  $BC$  называется *зоной упрочнения*. Здесь удлинение образца сопровождается возрастанием нагрузки, но неизмеримо более медленным (в сотни раз), чем на упругом участке. В стадии упрочнения на образце намечается место будущего разрыва и начинает образовываться так называемая *шейка* – местное сужение образца. По мере растяжения образца утончение шейки прогрессирует. Когда относительное уменьшение площади сечения сравнивается с относительным возрастанием напряжения, сила  $P$  достигнет максимума (точка  $C$ ). В дальнейшем удлинение образца происходит с уменьшением силы. Хотя среднее напряжение в поперечном сечении шейки и возрастает. Удлинение образца носит в этом случае местный характер, и поэтому участок кривой  $CD$  называется *зоной местной текучести*. Точка  $D$  соответствует разрушению образца. У многих материалов разрушение происходит без заметного образования шейки.

Для количественной оценки свойств материала диаграмму растяжения  $P-f(l)$  перестраивают в координатах  $\sigma$  и  $\varepsilon$ . Для этого необходимо уменьшить в  $A$  раз ординаты и в  $l$  раз абсциссы, где  $A$  и  $l$  – соответственно площадь поперечного сечения и рабочая длина образца до нагружения. Так как эти величины постоянны, то диаграмма  $\sigma = f(\varepsilon)$  (рисунок 10) имеет тот же вид, что и диаграмма растяжения, но будет характеризовать уже не свойства образца, а свойства материала.

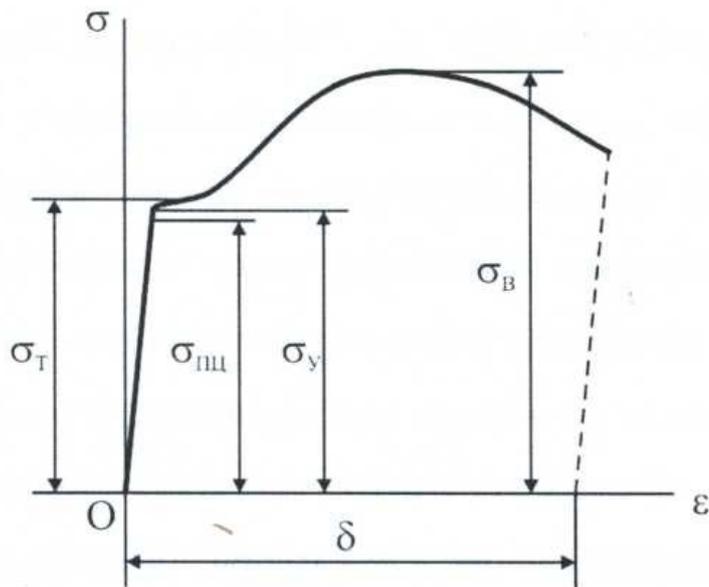


Рисунок 10 - Диаграмма деформирования (напряжение - деформация)

*Наибольшее напряжение, до которого материал следует закону Гука называется пределом пропорциональности  $\sigma_{ПЦ}$ .*

Величина предела пропорциональности зависит от той степени точности, с которой начальный участок диаграммы можно рассматривать как прямую. Степень отклонения кривой  $\sigma = f(\varepsilon)$  от прямой  $\sigma = E\varepsilon$  определяют по величине угла, который составляет касательная к диаграмме с осью  $\sigma$ . В пределах закона Гука тангенс этого угла определяется величиной  $1/E$ . обычно считают, что если величина  $d\varepsilon/d\sigma$  оказалась на 50% больше, чем  $1/E$ , то предел пропорциональности достигнут.

Упругие свойства материала сохраняются до напряжения, называемого пределом упругости. *Под пределом упругости  $\sigma_{у}$  понимается такое наибольшее напряжение, до которого материал не получает остаточных деформаций.*

Для того чтобы найти предел упругости, необходимо после каждой дополнительной нагрузки образец разгружать и следить, не образовалась ли остаточная деформация. Так как пластические деформации в отдельных кристаллах появляются уже в самой ранней стадии нагружения, ясно, что величина предела упругости, как и предела пропорциональности, зависит от требований точности, которые накладываются на производимые замеры. Обычно остаточную деформацию, соответствующую пределу упругости,

принимают в пределах , т.е.  
Соответственно этому допуску предел упругости обозначается через  $\sigma_{0,001}$  или  $\sigma_{0,005}$ .

Предел упругости и предел пропорциональности трудно поддаются определению и резко меняют свою величину в зависимости от условно принятой нормы на угол наклона касательной и на остаточную деформацию. Поэтому величины  $\sigma_{ПЦ}$  и  $\sigma_{У}$  в справочные данные по свойствам материалов обычно не включаются.

Под *пределом текучести* понимается то напряжение, при котором происходит рост деформации без заметного увеличения нагрузки. В тех случаях, когда на диаграмме отсутствует явно выраженная площадка текучести, за предел текучести условно принимается величина напряжения, при котором остаточная деформация или 0,2% (рисунок 11). В некоторых случаях устанавливается предел

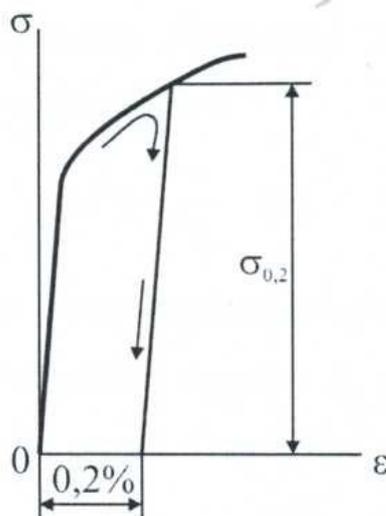


Рисунок 11 - Определение условного предела текучести.

Условный предел текучести обозначается через  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_{0,5}$  в зависимости от принятой величины допуска на остаточную деформацию. Предел текучести легко поддается определению и является одной из основных механических характеристик материала.

*Отношение максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения носит название предела прочности, или временного сопротивления и обозначается  $\sigma_{ВР}$ .*

Временное сопротивление  $\sigma_{ВР}$  не есть напряжение, при котором разрушается образец. если относить растягивающую силу не к начальной площади сечения образца, а к наименьшему сечению в данный момент, можно обнаружить, что среднее напряжение в наиболее узком сечении образца перед разрывом существенно больше, чем  $\sigma_{ВР}$ . Таким образом, предел прочности также является условной величиной.

*Удлинение при разрыве  $\delta\%$  представляет собой величину средней остаточной деформации, которая образуется к моменту разрыва на*

определенной стандартной длине образца. Определение  $\delta\%$  производится следующим образом.

Перед испытанием на поверхность образца две риски на расстоянии  $l_0 = 10d$  или  $l_0 = 5d$ . После того как образец испытан и разорван, обе его части составляются по месту разрыва. Далее, по имеющимся на поверхности рискам измеряют величину среднего удлинения на стандартной длине. Удлинение при разрыве будет следующим:

$$\text{---} \quad (2)$$

Диаграмма растяжения с учетом уменьшения площади  $A$  и местного увеличения деформации, называется *истинной диаграммой растяжения* (кривая  $OC'D'$  на рисунке 12).

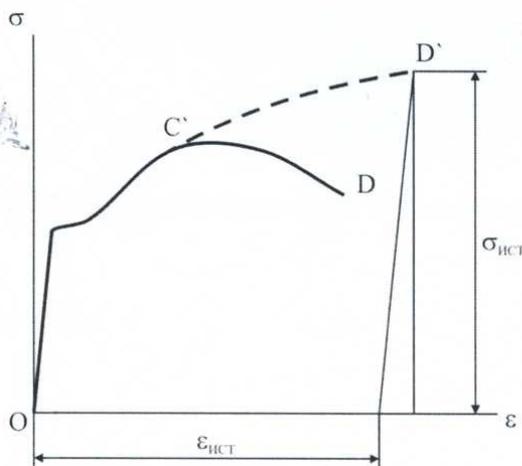
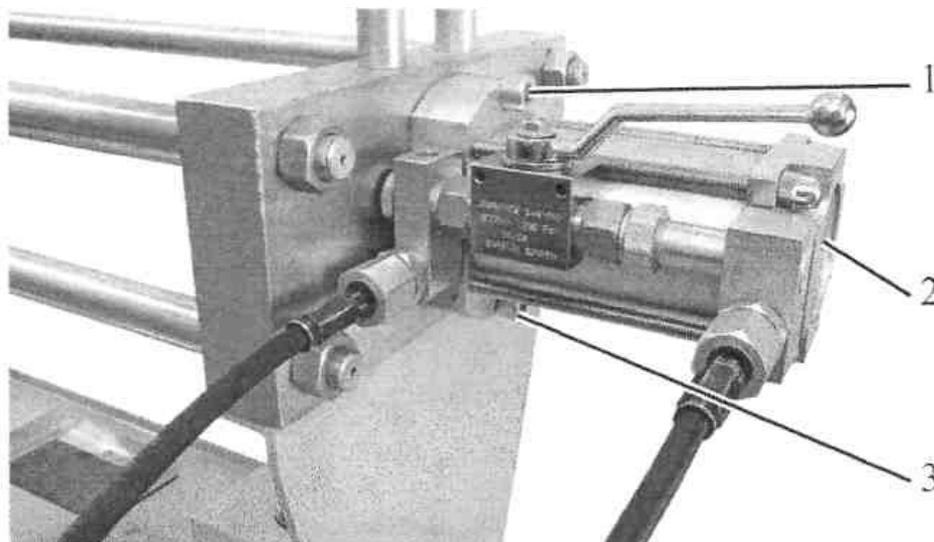


Рисунок 12 - Истинная диаграмма растяжения

### Экспериментальная часть.

1. Установить гидроцилиндр 2 на силовую раму станда (рисунок 13). Завернув два винта 1 и 3 на М10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.



### Рисунок 13 - Установка гидроцилиндра

2. установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рисунок 14) на силовую раму станда (рисунок 8). Наворачивание и затяжку необходимо производить «от руки». Применение гаечного ключа не требуется.

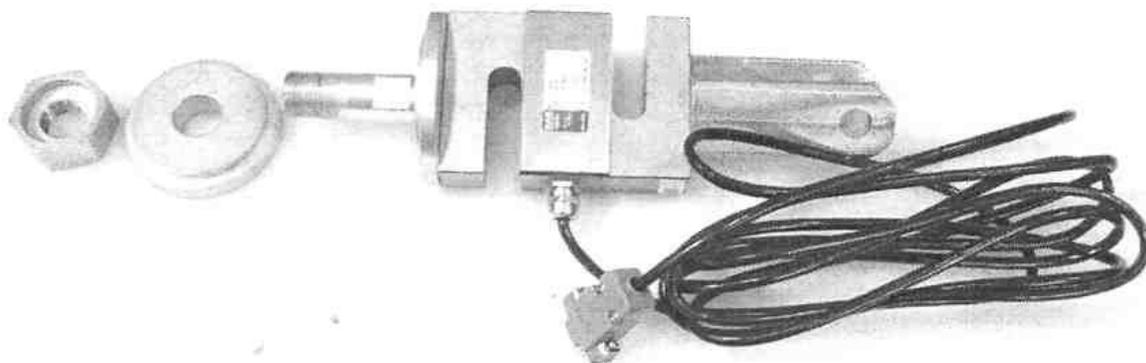


Рисунок 14 - Силовизмеритель на 50 кН с держателем

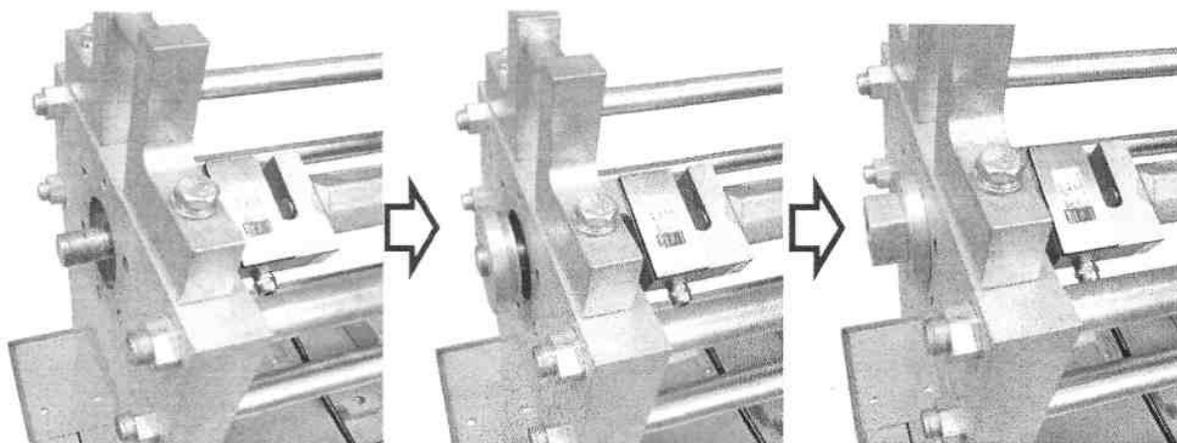
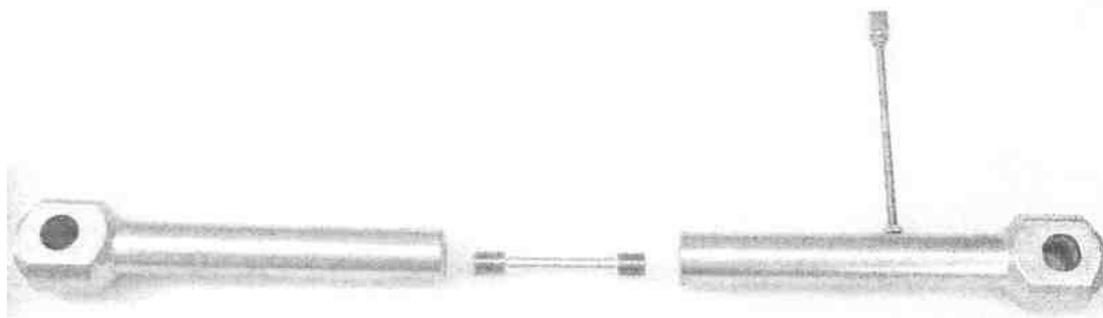


Рисунок 15 - Монтаж силоизмерителя на 50 кН

3. Измерить диаметр  $d$  образца и его рабочую длину  $l$  (длину тонкой цилиндрической части), вычислить площадь поперечного сечения  $A_0$ , занести данные в таблицу 1. Тонким маркером (например, для CD дисков) нанести на тонкую цилиндрическую часть две метки на расстоянии  $l_0 = 5d$  (можно нанести метки разметочным штангенциркулем).

4. Установить образец в резьбовые захваты (рисунок 16)



### Рисунок 16 - Образец с резьбовыми захватами

5. Установить модуль крепления микрометров на направляющие (рисунок 17). Для этого частично отвернуть винты 2 и 5 (полностью выворачивать винты не нужно). При этом между пластинами 3 и 4 образуется зазор, после чего их с поворотом нужно одеть на направляющие 1. После установки пластин 3 и 4 перпендикулярно к направляющим 1 следует завернуть винты 2 и 5.

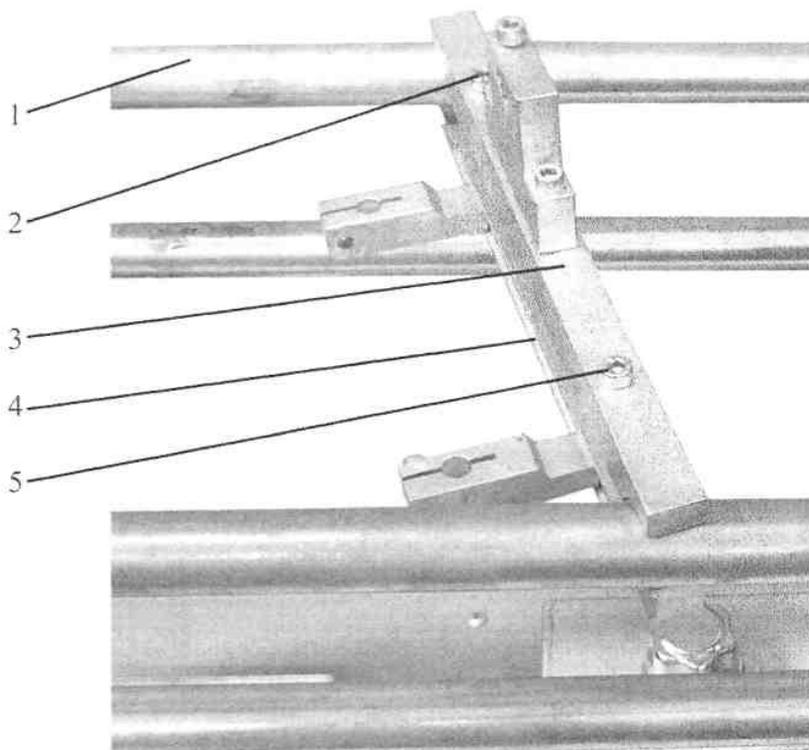


Рисунок 17 - Установка держателя микрометра

6. Установить образец с захватами 2 в вилки на силоизмерителе и гидроциindre 8 (рисунок 18) с помощью пальцев 1 и 7. Для установки образца с захватами следует установить захват без упора для микрометра в вилку силоизмерителя с помощью пальца 1. После этого следует с помощью насоса сдвинуть гидроцилиндр в положение, обеспечивающее возможность установки пальца 7. Работа с насосом описана в пунктах 6-8. Установить микрометр 3 с электронным выходом в держатель микрометра 6 и зафиксировать его с помощью винта 4. Сдвинуть держатель микрометра 6 так, чтобы ножка микрометра задвинулась на 9-11мм и упиралась в упор 5. При необходимости рукой повернуть вилку гидроцилиндра 8 для совмещения упора 5 с осью ножки микрометра. При этом вилка должна встать в положение, соответствующее вертикальному положению пальца, что не позволяет захвату с упором упасть после разрушения образца. Вращать вилку гидроцилиндра следует только по ходу часовой стрелки, если смотреть со стороны вилки.

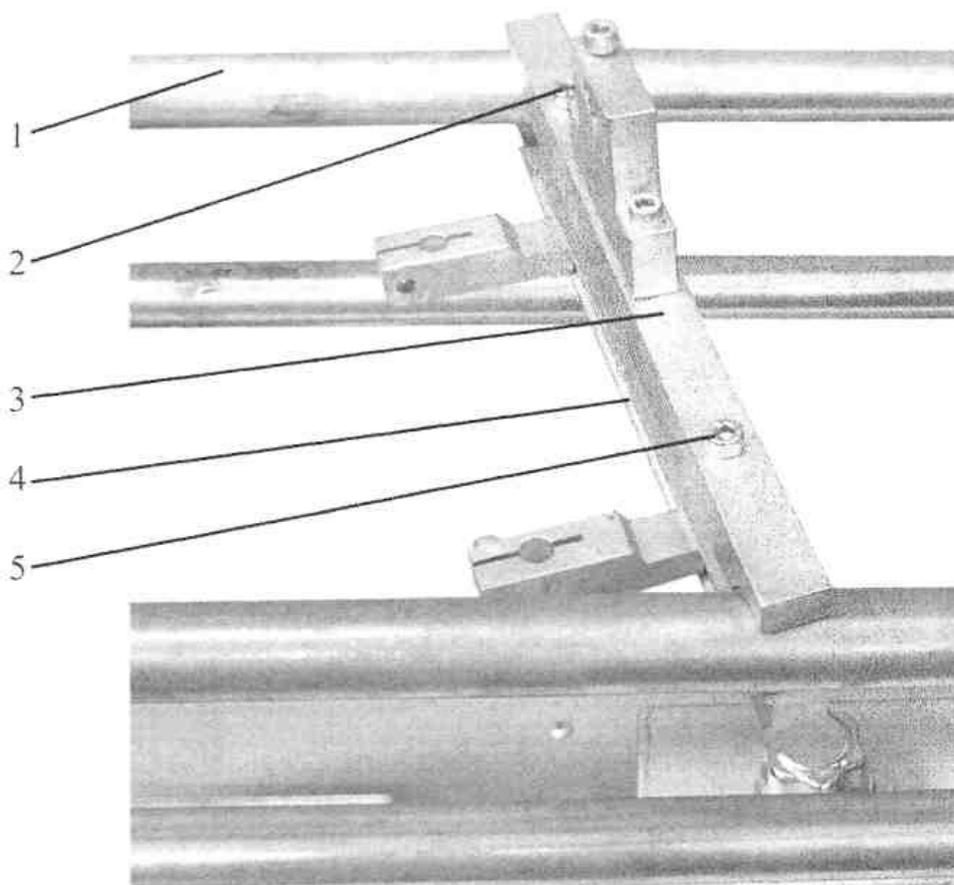


Рисунок 18 - Сборка стенда для проведения лабораторной работы

7. подключить разъемы силоизмерителя на 50 кН и микрометра к измерительно-преобразовательному блоку.
8. Выполнить пункты 3-5.
9. В программе выбрать пункт меню «Диаграмма деформирования».
10. Ввести в программу геометрические характеристики образца: площадь поперечного сечения  $A_0$  и длину рабочей части  $l$ .
11. Выполнить всасывание жидкости в насос путем вращения рукоятки по ходу часовой до упора.
12. Переключить краны в положение, соответствующие втягиванию гидроцилиндра.
13. Установить микрометр на «0» путем кратковременного нажатия на кнопку «zero».
14. Нажать кнопку «начать испытание», после этого начнется сбор данных. Наибольшая продолжительность испытаний составляет 30 минут, по истечении этого времени сбор данных прекращается.
15. Начать плавно вращать рукоятку гидроцилиндра против хода часовой стрелки. Гидроцилиндр начнет втягивать шток, образец при этом подвергается растяжению.

16. После разрушения образца необходимо нажать кнопку «завершить испытание».
17. Сохранить диаграммы и данные в файлы для написания отчета.
18. Снять резьбовые захваты и вывернуть части образца.
19. Демонтировать гидроцилиндр, силоизмеритель, кронштейн микрометра и разложить все элементы на их места в ящиках и на стенде. Выключить питание измерительно-преобразовательного блока. Выйти из программы.
20. Все дальнейшие измерения и результаты вычислений следует заносить в таблицу 1.
21. Измерить диаметр  $d_K$  частей образца в самом тонком месте (шейке), вычислить площадь поперечного сечения  $A_K$ .
22. Сложить части образца вдоль его оси с минимально возможным зазором, измерить расстояние  $l_K$  между нанесенными метками.
23. Вычислить относительное удлинение после разрыва

(3)

и относительное сужение после разрыва

(4).

24. По диаграмме сила-перемещение определить усилие, действующее на образец в момент разрыва  $F_K$ . Рассчитать истинное разрыву

$$\sigma_{\text{ИСТ}} = P_K / A_K. \quad (5)$$

25. По диаграмме напряжение-деформация определить временное сопротивление  $\sigma_{\text{ВР}}$  и предел текучести- физический  $\sigma_{\text{T}}$  или условный  $\sigma_{0,2}$ .
26. Сделать выводы о характере работы пластичных материалов при растяжении, об участках диаграммы деформирования, на которых деформации в материале обратимы, на которых возникают остаточные деформации, на которых начинается неустойчивое деформирование, ведущее к разрушению.

Таблица 1.- Протокол испытаний

$l$ , мм					
$l_0$ , мм		—, %			
$l_K$ , мм					
$d$ , мм		—, мм <sup>2</sup>		—, %	
$d_K$ , мм		—, мм <sup>2</sup>			
$P_K$ , Н				$\sigma_{\text{ИСТ}} = P_K / A_K$ , МПа	
$\sigma_{\text{В}}$ , МПа					
$\sigma_{\text{T}}$ ( $\sigma_{0,2}$ ), МПа					

## Контрольные вопросы

- 1 Нарисуйте диаграмму растяжения образца из малоуглеродистой стали (Ст.3). Какой участок показывает основные деформации удлинения образца? Что происходит с образцом? Назовите нагрузки в данный момент, действующие на образец?
- 2 Расскажите почему продолжается растяжение при все уменьшающейся нагрузке уже после образования шейки?
- 3 Укажите механические характеристики материала на растяжение. Какие характеристики относятся к прочности и пластичности?
- 4 Что называют пределом пропорциональности
- 5 Что называют пределом упругости
- 6 Что называют пределом текучести. Если отсутствуют площадки текучести можно ли определить предел текучести.
- 7 Дайте определение упругим и остаточным деформациям.
- 8 После разрушения образца остаточную деформацию каким образом определить?
- 9 На диаграмме растяжения образца покажите максимальную силу.
- 10 Дайте определение явлению наклеп. Укажите конечное значение предела пропорциональности для материалов, которое можно получить с помощью наклепа?
- 11 Определите работу при разрушении образца? Удельная работа на какое свойство материала указывает при поломке образца?
- 12 Каким способом можно определить марку стали в процессе лабораторных испытаний и допускаемые напряжения?
- 13 Укажите отличии условной диаграммы от диаграммы истинных напряжений?
- 14 Как используя диаграмму напряжений определить модуль упругости материала?
- 15 Определение работы при деформации текучести лабораторного образца?

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

*Цель работы:* изучение способа измерения модуля упругости и коэффициента Пуассона, определение упругих констант стали.

*Теоретические основы.*

При растяжении стержня в нем возникают продольные напряжения  $\sigma_z$  и продольные  $\varepsilon_z$  и поперечные  $\varepsilon_x$ . При растягивающих усилиях, соответствующих напряжениям, не превышающим предел текучести, продольные напряжения и деформации связаны соотношением, называемым законом Гука:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (6)$$

где  $E$  - *модуль упругости*, который также называют модулем Юнга.

Кроме продольных деформаций, в стержне возникают деформации в плоскости, перпендикулярной его оси (поперечные деформации), величину

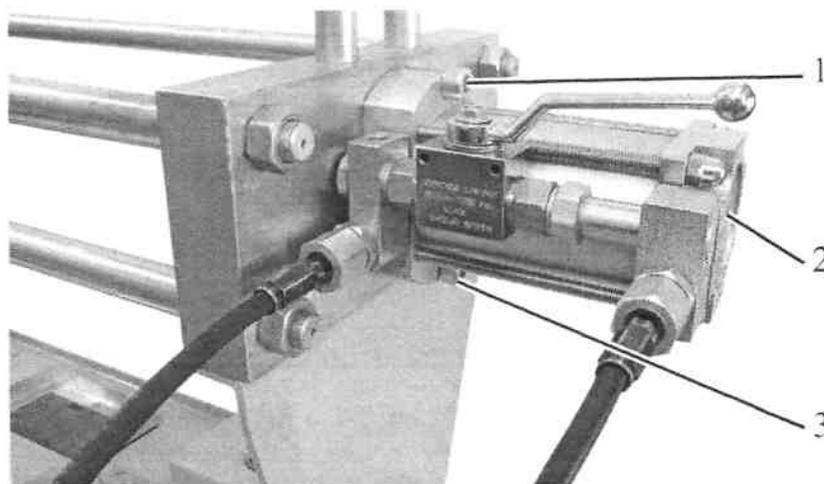
$$\mu = -\varepsilon_x / \varepsilon_z \quad (7)$$

называют *коэффициентом Пуассона*.

При нагружении стержня в пределах упругой области коэффициент Пуассона является постоянной величиной и связь между продольными и поперечными деформациями в стержне линейна.

*Экспериментальная часть.*

1. Установить гидроцилиндр 2 на силовую раму стенда (рисунок 19), завернув два винта 1 и 3 на М10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.



### Рисунок 19 - Установка гидроцилиндра

2. Установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рисунок 20) на силовую раму стенда (рисунок 21). Наворачивание и затяжку гайки необходимо производить «от руки», применение гаечного ключа не требуется.

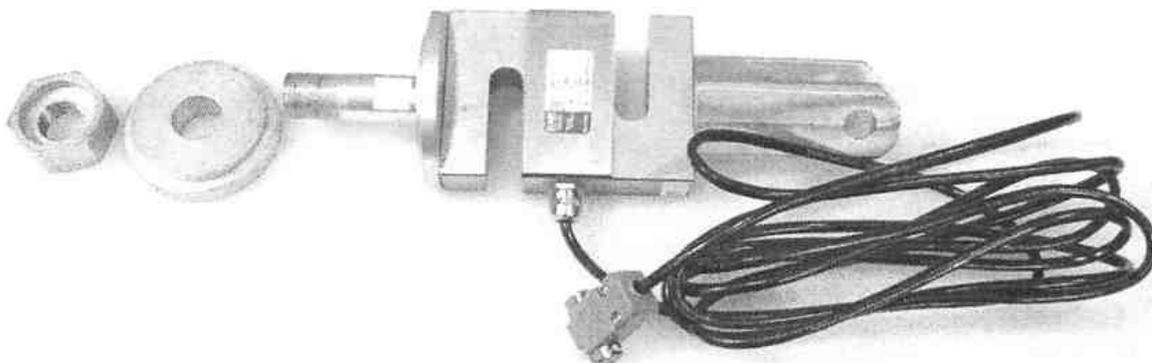


Рисунок 20 - Силовый измеритель на 50 кН с держателем

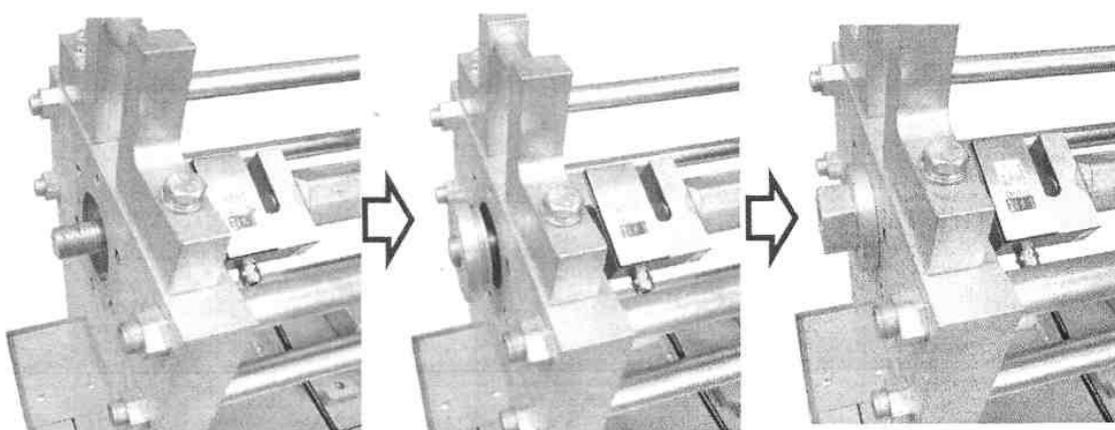


Рисунок 21 - Монтаж силового измерителя на 50 кН

3. Измерить ширину  $b$  и толщину  $t$  образца, вычислить площадь поперечного сечения  $A_0$ , занести данные в таблицу 2.

4. Установка образца показана на рисунке 22. Образец установить левой частью в вилку 1 с помощью пальца 2. После этого следует с помощью насоса сдвинуть гидроцилиндр в положение, обеспечивающее возможность установки пальца 9. Работа с насосом описана в пунктах 6-8. При необходимости повернуть вилку 10. Вращать вилку гидроцилиндра следует только по ходу часовой стрелки, если смотреть со стороны вилки.

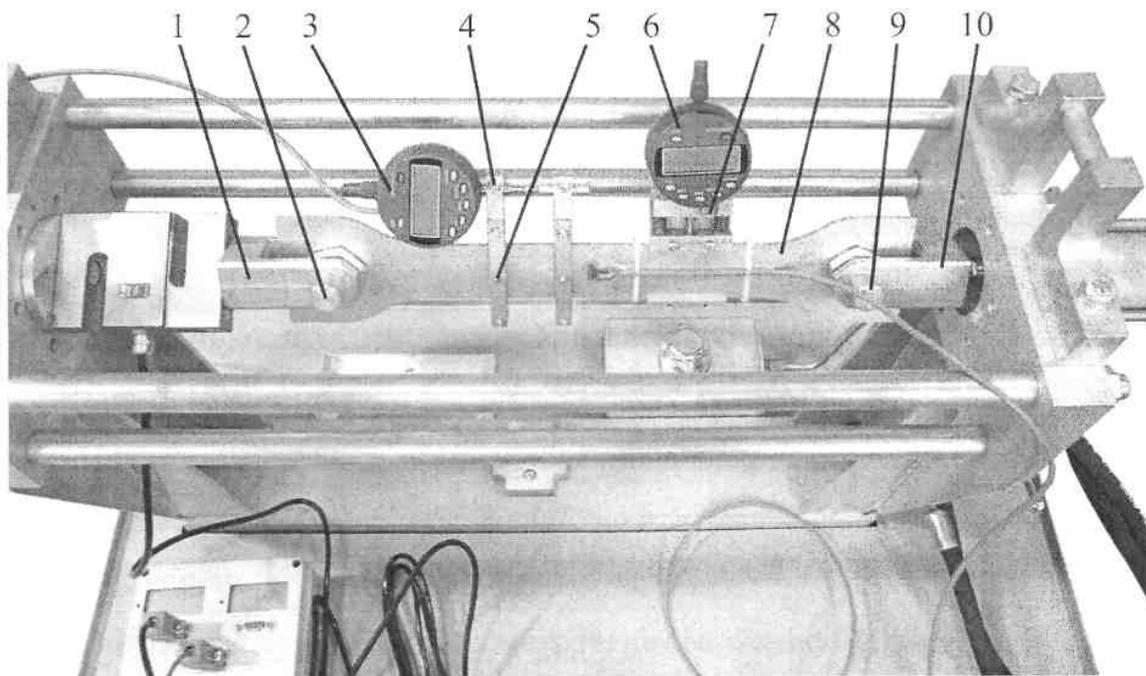


Рисунок 22 - Сборка стенда для проведения лабораторной работы

5. Установить (рисунок 22) микрометр 3 с цифровым выходом в держатель микрометра 5 и зафиксировать его с помощью винта 4. Установить второй держатель с упором микрометра. Расстояние между держателя для установки микрометра, измеряющего продольные перемещения, должно быть равно примерно 40 мм, а сами держатели должны быть параллельны. Установка держателей осуществляется путем стопорного винта 5 в середине пружинной части держателя.
6. После установки микрометра необходимо измерить рабочую длину  $l$  (расстояние между стопорными винтами двух опор), занести данные в таблицу 2а.
7. Установить (рисунок 22) микрометр 6 в держатель для измерения поперечных перемещений, зафиксировав его с помощью винта 7.
8. Подключить разъемы силоизмерителя на 50 кН, микрометра и тензодатчиков, установленных на образце к измерительно-преобразовательному блоку.
9. Выполнить пункты 3-5.
10. В программе выбрать пункт меню «тензометрирование».
11. Установить флажок напротив пункта «определение упругих характеристик». Подождать пока значения деформаций (по тензорезисторам), отображаемые программой не перестанут меняться (произойдет перегрев тензоусилителей и тензорезисторов). Это может занять 5-10 минут.
12. В программе нажать кнопку «балансировать деформации».
13. Перевести краны в положение, соответствующее втягиванию штока гидроцилиндра.
14. обнулить показания микрометров, нажав кнопку «zero».

15. Начать прикладывать нагрузку к образцу плавно вращая рукоятку привода насоса против часовой стрелки. Увеличить усилие, действующее на образец, на 3 кН. Текущее значение усилия следует наблюдать по программе «ОСМ измерения».

16. записать значение усилия, показания микрометров (продольного  $\Delta_z$  и поперечного  $\Delta_x$ ) и значения деформации, измеренных тензорезисторами в таблицу 2б. Продольная деформация измеряется тензорезисторами №2, поперечная №1 (по обозначениям в программе «ОСМ измерения»).

17. Выполнить действия по п.п. 15-16 до значения усилия в 27 кН.

18. Снять нагрузку с образца, для этого следует установить ручки вдоль обоих корпусов кранов.

19. Вынуть стопорные пальцы и снять образец.

20. Ослабить стопорные винты и демонтировать микрометры с образца.

21. Демонтировать гидроцилиндр, силоизмеритель, и разложить все элементы на их места в ящиках и на стенде. Выключить питание измерительно-преобразовательного блока. Выйти из программы.

22. Рассчитать для каждого значения нагрузки значение действующего осевого напряжения, продольной и поперечной деформации.

$$\sigma = N/A_0, \quad (8)$$

$$(9)$$

$$(10)$$

Сравнить значения деформаций, полученные по микрометрам и по тензорезисторам.

23. Построить график зависимости  $\sigma(\epsilon)$ . Методом наименьших квадратов провести через полученные точки прямую линию и определить ее угловой коэффициент. Данный угловой коэффициент равен модулю упругости  $E$ . Данное построение выполнить для деформаций определенных по микрометрам и по тензорезисторам.

24. Построить график зависимости  $\epsilon(\sigma)$ , методом наименьших квадратов провести через полученные точки прямую линию и определить ее угловой коэффициент. Данный угловой коэффициент, взятый с обратным знаком, равен коэффициенту Пуассона  $\mu$  (построение графиков и проведение прямой рекомендуется выполнять средствами Excel или аналогичных программ). Данное построение выполнить для деформаций определенных по микрометрам и по тензорезисторам.

Таблица 2а - Геометрические параметры образца

$t$ , мм	$b$ , мм	$l$ , мм	$A$ , мм <sup>2</sup>

Таблица 2б - Протокол испытаний

Измеренные величины				Рассчитанные величины			
$F$ , кН	$\Delta_z$ , мкм	$\Delta_x$ , мкм			$\sigma$ , МПа		

### Контрольные вопросы

1. Какое отличие имеет диаграмма сжатия стали от диаграммы растяжения?
2. Диаграмма сжатия стали указывает на механические характеристики. Какие?
3. Различия диаграмм сжатия чугуна, бетона? Опишите характер разрушения образцов хрупких материалов?
4. Назовите механические характеристики для хрупких материалов при испытании на сжатие?
5. Какие механические характеристики по диаграмме сжатия дерева вдоль волокон можно определить?
6. Опишите разрушение дерева при сжатии вдоль и поперек волокон. Механические свойства в каком направлении лучше?
7. При испытании на сжатие укажите характеристики материалов: малоуглеродистая сталь, чугун, бетон, дерева.
8. Какие образцы приобретают бочкообразную форму? Что происходит у бетонных образцов?
9. Сформулируйте закон Гука для линейного напряженного состояния. Каким образом можно ограничить верхнюю максимальную нагрузку?
10. Укажите границы применимости закона Гука?
11. Раскройте понятие модуль упругости  $E$ .
12. Метод определения  $E$  по диаграмме напряжений?
13. Что дает использование двух тензодатчиков при определении деформаций растянутого образца?

Задачи для самостоятельного решения

*Пример.* Одна ветвь стальной цепи разностного полиспаста (цепной тали) при подъеме шахтного трансформатора несет нагрузку 1 Т (тонна-сила), имея при этом четырехкратный запас прочности. Определить диаметр звена цепи, если предел прочности стали, из которой изготовлена цепь, 80 кГ/мм<sup>2</sup>.



Дано:  
 $F = 1\text{ Т}$   
 $K = 4$

Решение:  
 Допускаемое напряжение

— —

Площадь поперечного сечения звена цепи

— —

Диаметр звена цепи

— —

Ответ: 5,65 мм

1. Определить, какой диаметр должны иметь элементы звеньев скребковой цепи, рассчитанной на натяжение 2Т, чтобы обеспечить шестикратный запас прочности. Предел прочности стали, из которой изготовлена цепь, 70 кГ/мм<sup>2</sup>

Ответ: 10,5 мм

2. Звенья цепи скребкового конвейера имеют площадь поперечного сечения 200 мм<sup>2</sup> и изготовлены из стали с пределом прочности 60 кГ/мм<sup>2</sup>. При нагрузке конвейера испытывает усилие 1200 кГ. Определить, с каким запасом прочности работают звенья.

Ответ: 10



3. Определить необходимую площадь поперечного сечения подъемного каната, который должен воспринимать максимальную нагрузку 16 Т и иметь десятикратный запас прочности. Канат изготовлен из стальных проволок с пределом прочности 170 кГ/мм<sup>2</sup>.

Ответ : 941 мм<sup>2</sup>

4. Определить, с какой нагрузкой работает стальной канат откаточной лебедки на терриконе, если известно, что площадь поперечного сечения каната 150 мм<sup>2</sup>, запас прочности 5, предел прочности 120 кГ/мм<sup>2</sup>.



Террикон - отвал, искусственная насыпь из пустых пород, извлечённых при подземной разработке месторождений угля и других полезных ископаемых, насыпь из отходов от различных производств и сжигания твёрдого топлива.

Ответ: 3600 кГ

Лабораторная работа №4.  
**Определение модуля сдвига.**

*Цель работы:* изучение способа испытаний материалов на чистый сдвиг, определение модуля сдвига стали.

*Теоретические основы.*

Существует такое напряженное состояние, когда на гранях выделенного элемента возникают только касательные напряжения  $\tau$  (рисунок 23). Такое напряженное состояние называют *чистым сдвигом*.

*Кручением* называется такой вид деформации, при котором в поперечных сечениях бруса возникает только один внутренний силовой фактор – крутящий момент  $T$ . Кручение возникает в валах, винтовых пружинах и других элементах конструкций. Кручение прямого бруса происходит при нагружении его внешними скручивающими моментами  $M$  (парами сил), плоскости действия которых перпендикулярны к его продольной оси. Кручение криволинейных брусков может возникать и при других видах нагружения.

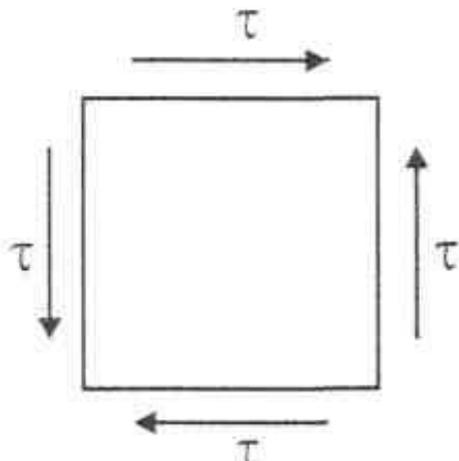


Рисунок 23 - Чистый сдвиг

Наиболее просто однородный чистый сдвиг может быть осуществлен нагружением тонкостенной цилиндрической трубки моментами, приложенными в торцевых плоскостях (рисунок 24). Величина напряжения  $\tau$  определяется из условий равенства момента равномерно распределенных по поперечному сечению внутренних сил моменту  $M$ :

$$\tau = M / (2\pi R^2 \delta), \quad (11)$$

где  $R$  – радиус трубки,  $\delta$  – ее толщина.

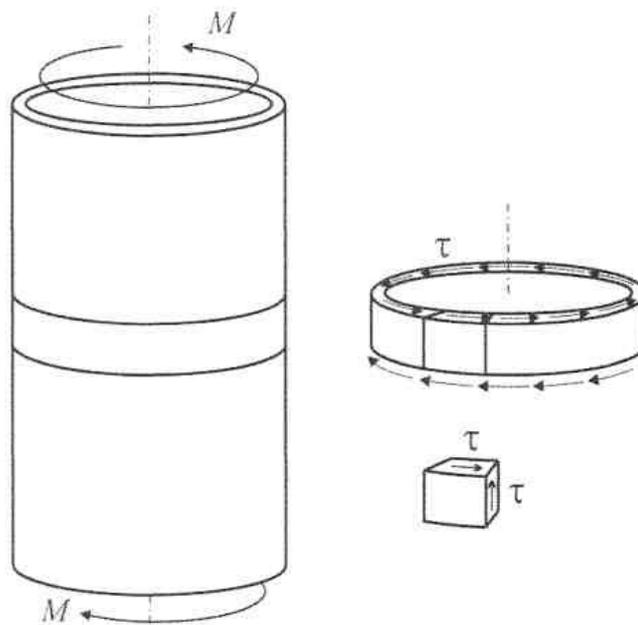


Рисунок 24 - Кручение тонкостенной трубы

Касательное напряжение  $\tau$  связано с угловой деформацией  $\gamma$  соотношением

$$\tau = G\gamma, \quad (12)$$

где  $G$  — модуль сдвига или модуль упругости второго рода.

В результате возникающих деформаций торцевые сечения трубки (рисунок 25) получают взаимные угловые смещения  $\varphi$ . Характер возникающих смещений показан на рисунке 5, причем

$$\varphi = \gamma l / R. \quad (13)$$

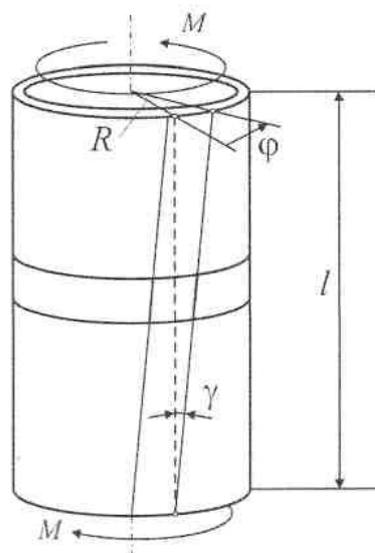


Рисунок 25 - Перемещения при кручении

Для случая трубы со стенкой конечной толщины взаимный угол закручивания  $\varphi$  двух сечений, расположенных на расстоянии  $l$  определяется следующим образом:

$$\varphi = M l / (G J_P), \quad (14)$$

где  $J_P$  – полярный момент инерции сечения трубы. Для случая трубы с внутренним диаметром  $d$  и внешним  $D$

$$J_P = \pi(D^4 - d^4)/32 \quad (15)$$

Взаимный угол поворота двух сечений может быть определен как разность двух углов поворота каждого из сечений относительно некоторого неподвижного основания, тогда

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (16)$$

Если к скручиваемой трубе радиально прикрепить тонкий стержень (рисунок 26), то при малых углах поворота величина угла поворота может быть определена следующим образом:

$$\varphi_1 = \Delta_1 / a \quad (17)$$

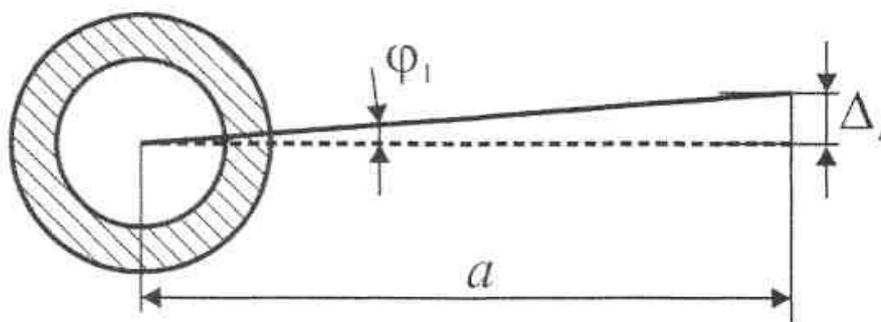


Рисунок 26

Таким образом, задавая различный крутящий момент и измеряя линейные перемещения двух упоров, установленных на стержнях на расстоянии  $a$  от оси трубы, можно определить модуль сдвига материала трубы по следующей формуле:

$$G = 32 M l a / [\pi(\Delta_1 - \Delta_2)(D^4 - d^4)]. \quad (18)$$

#### Экспериментальная часть.

1. Установить в левую опорную плиту силовой рамы образец с захватом для испытаний на кручение. Для этого его необходимо в наклонном состоянии вставить в центральное отверстие правой плиты (рисунок 27), привести образец

в горизонтальное состояние (рисунок 28). Совместить паз на захвате с штифтом в левой плите и сдвинуть до плотного прилегания захвата к внутренней плоскости левой плиты. Установить (рисунок 29) клиновой упор 1 в паз на захвате 2, между осью в захвате и опорной плитой 3. Убедиться, что клиновой упор прилегает к плите силовой рамы над захватом и под захватом, после чего нанести легкий удар по клину молотком массой 0,1 кг (в комплекте стенда) в направлении стрелки, показанной на рисунке 27.

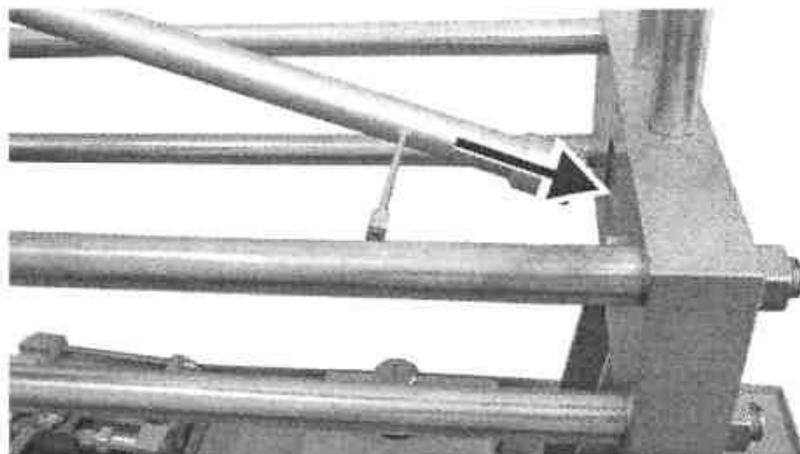


Рисунок 27 - Установка образца для испытаний на кручение

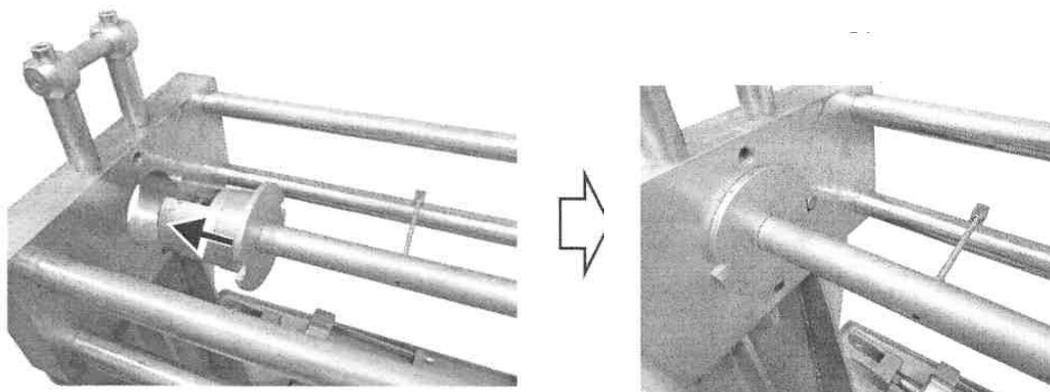


Рисунок 28 - Установка образца для испытаний на кручение

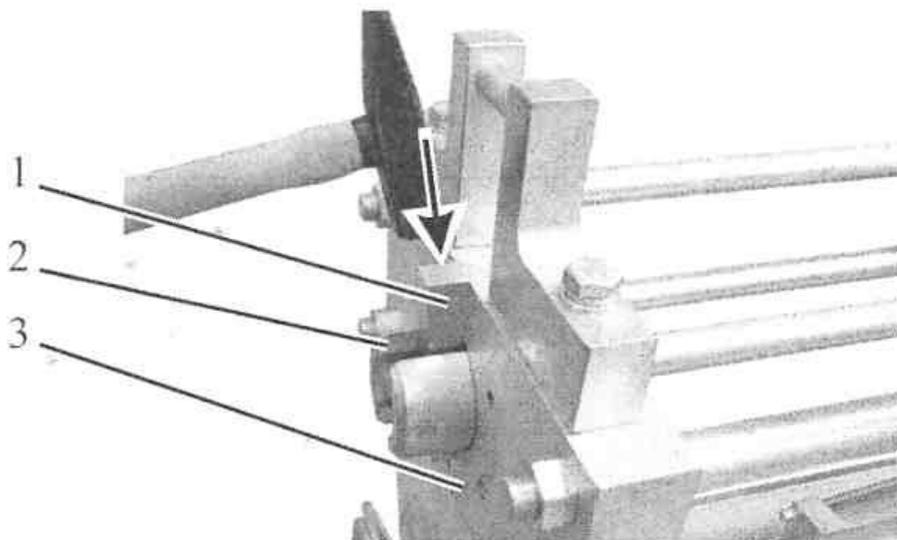


Рисунок 29 - Установка клинового упора

2. Установить устройство нагружения для испытаний на кручение в правую плиту силовой рамы стенда (рисунок 30). Совместить отверстие в образце с валом нагружающего устройства, шпонку на валу нагружающего устройства со шпоночным пазом, выполненном в образце, после чего вставить нагружающее устройство в плиту до упора.

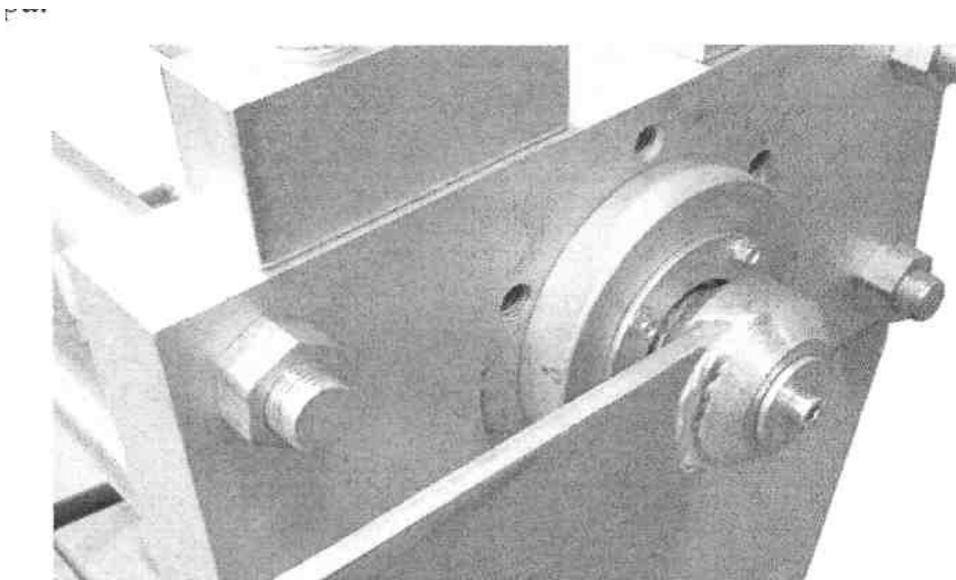


Рисунок 30 - Установка нагружающего устройства

3. Установить (рисунок 31) модуль крепления микрометра 5 так, чтобы отверстие в кронштейне 3 располагалось над упором 4 (при необходимости нужно переставить кронштейн 3 на соседнее отверстие в модуле 5). Установить микрометр 1 в кронштейне 3 и зафиксировать с помощью винта 2. Аналогичные действия выполнить для второго микрометра.

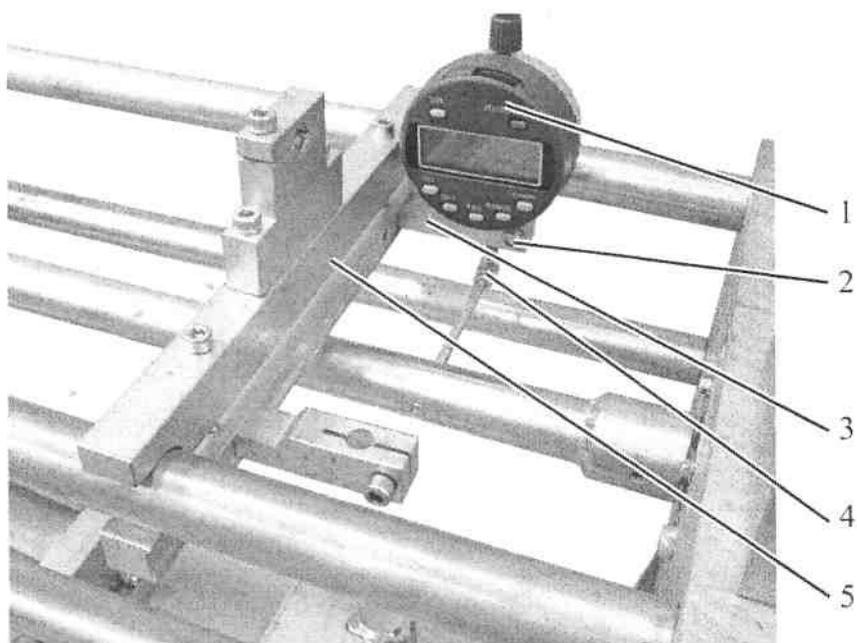


Рисунок 31 - Установка микрометров

4. Установить в рычаг нагружающего устройства подвес для грузов на 2,5 кг. Установить на подвес один груз на 2,5 кг для выбора зазора в соединениях. Вид верхней части стенда после подготовки к проведению лабораторной работы показан на рисунке 32.

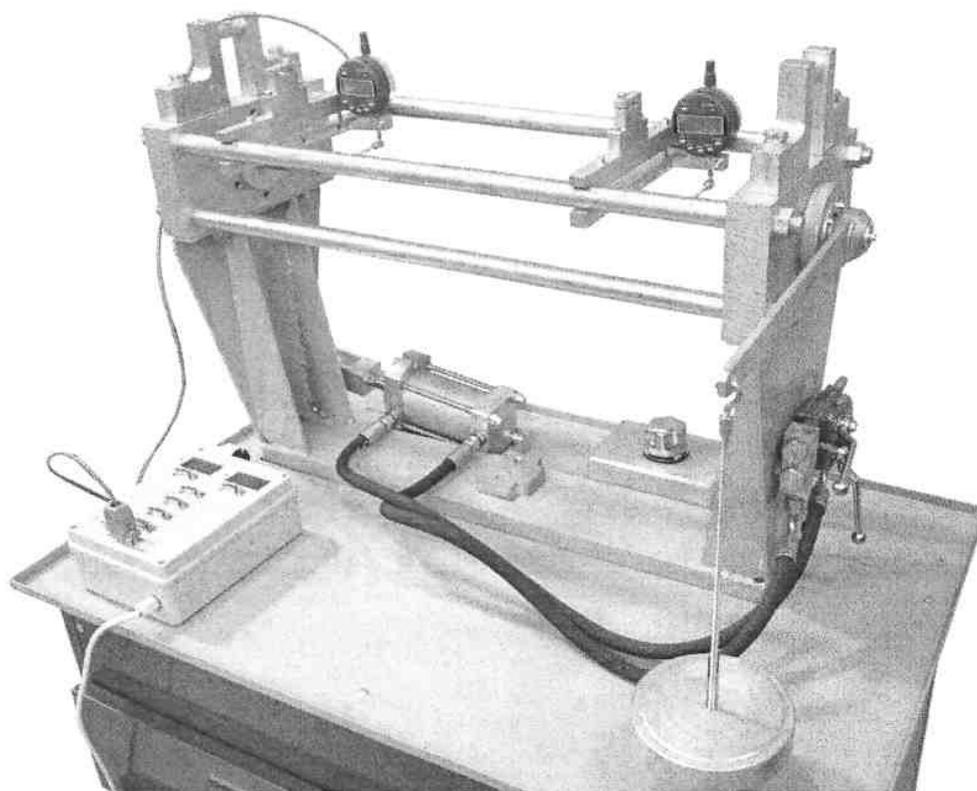


Рисунок 32 - Сборка стенда для проведения лабораторной работы

5. Установить показания микрометров на «0», нажав кнопку «zero».
6. Приложить к образцу дополнительный крутящий момент, установив на подвес дополнительный груз на 2,5 кг.
7. Занести показания микрометров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в таблицу 3б.
8. Повторить действия по пунктам 7-8 для пяти дополнительных грузов.
9. Снять и разместить в ящиках стенда грузы и элементы, установленные при подготовке к измерениям.
10. По данным таблицы 1б построить график зависимости  $M(\varphi J_P/l)$  (точечный), методом наименьших квадратов провести через полученные точки прямую линию и определить ее угловой коэффициент. Данный угловой коэффициент, равен модулю сдвига (построение графиков и проведение прямой рекомендуется выполнять средствами Excel или аналогичных программ).
11. Провести оценку точности полученного результата, сравнить его с литературными данными для стали. Сделать выводы.

Таблица 3а - Геометрические параметры образца

$D$ , мм	$d$ , мм	$l$ , мм	$a$ , мм
22,0	17,0	400	80

Таблица 3б - Протокол испытаний

№ груза	$M$ , Нмм	$\Delta_1$ , мм	$\Delta_2$ , мм	$\varphi = (\Delta_1 - \Delta_2) / a$
1	7350			
2	14700			
3	22050			
4	29400			
5	36750			

### Контрольные вопросы

- 1 При кручении возникают ли напряжения? Какие, их направление? Какому закону они подчиняются?
- 2 Напишите формулу для напряжений в поперечном сечении.
- 3 Если ли в продольных сечениях вала напряжения, которые проходят через его ось? Можно ли это доказать, при их наличии?
- 4 Опишите напряженное состояние возникающее при кручении круглого бруса в каждой точке?
- 5 Нормальные напряжения могут ли здесь присутствовать?

**Пример.** Шпонка приводного вала скребкового конвейера имеет длину 70 мм и ширину 20 мм. Диаметр вала  $d = 70$  мм. Вал передает мощность 14,2 кВт при скорости вращения 120 об/мин. Определить величину касательного напряжения в материале шпонки.

*Дано:*

$$l = 70 \text{ мм}$$

$$b = 20 \text{ мм}$$

$$d = 70 \text{ мм}$$

$$P = 14,2 \text{ кВт}$$

$$n = 120 \text{ об/мин}$$

*Решение:*

Крутящий момент на валу конвейера

—;

— —————

Усилие, действующее на шпонку

- ———

Площадь шпонки, подвергающаяся срезу,

Напряжение в материале шпонки

- ——— кГ/см<sup>2</sup>

Ответ: 236 кГ/см<sup>2</sup>

1. Определить касательное напряжение, возникающее в упорном выступе металлической стойки, если выступ имеет длину 146 мм и ширину 80 мм и воспринимает касательную нагрузку 46,8 Т.

Ответ: 400 кГ/см<sup>2</sup>

2. Сцепка вагонетки диаметром 20 мм работает с пятикратным запасом прочности. Определить, при какой нагрузке произойдет срез сцепки, если допустимое напряжение на срез 720 кГ/см<sup>2</sup>.

Ответ: 11300 кГ

3. Шпильки приводной цепи породопогрузочной машины диаметром 18 мм воспринимают нагрузку 1200 кг. Определить, чему равно напряжение на срез и запас прочности, с которым работает цепь. Предел прочности стали на срез 45 кГ/мм<sup>2</sup>.

Ответ: 4,7 кГ/мм<sup>2</sup>; 9,6

4. Шплинтовое соединение приводной цепи должно воспринимать нагрузку на срез 1,2 Т. Определить, какой диаметр должен иметь шплинт, считая, что шплинт имеет две возможные площади среза. Предел прочности стали шплинта на срез 45 кГ/мм<sup>2</sup>, коэффициент запаса прочности 6.

Ответ: 10,1 мм

Лабораторная работа №5  
**Испытание пластичных материалов на срез.**

*Цель работы:* изучение способа испытаний материалов на срез, определение прочности на срез.

*Теоретические основы.*

Деформация среза может быть получена в случае, когда на брус с противоположных сторон на весьма близком расстоянии друг от друга действуют две равные силы, перпендикулярные к оси бруса и направленные в противоположные стороны. Примером такого действия сил может быть разрезание материала ножницами, а также болтовые и заклепочные соединения, нагруженные поперечными силами (рисунок 33)

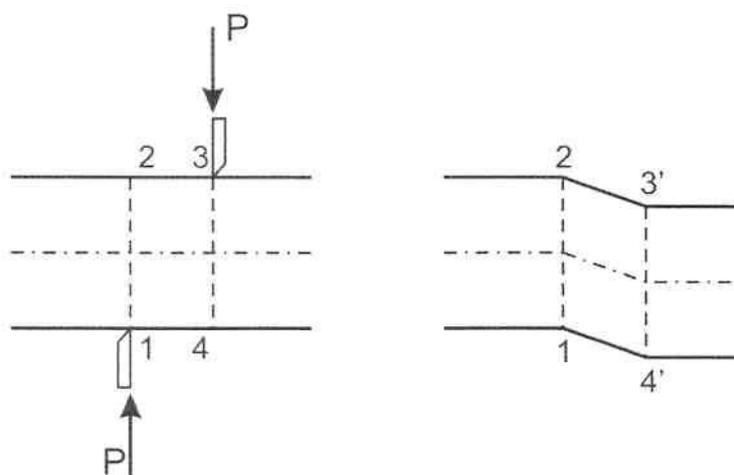


Рисунок 33 - Односторонний срез

Для случая нагружения, показанного на рисунке 33, поперечная сила на участке 1-4 может быть определена с помощью метода сечений и будет равна

$$Q = F \quad (19)$$

Для пластичного материала в случае интенсивных пластических деформаций, охватывавших все поперечное сечение бруса, касательные напряжения могут быть приняты равномерно распределенными по площади поперечного сечения  $A$ . В таком случае касательные напряжения среза будут равны

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (20)$$

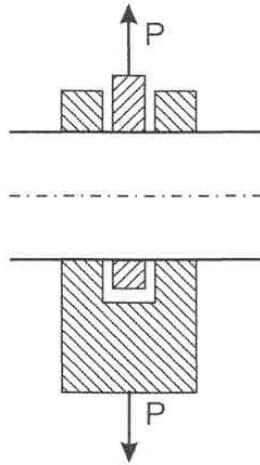


Рисунок 34 - Двухсторонний срез

### *Экспериментальная часть*

1. Установить гидроцилиндр 2 на силовую раму стенда (рисунок 35), завернув два винта 1 и 3 на М10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.

по внутреннему шестиграннику

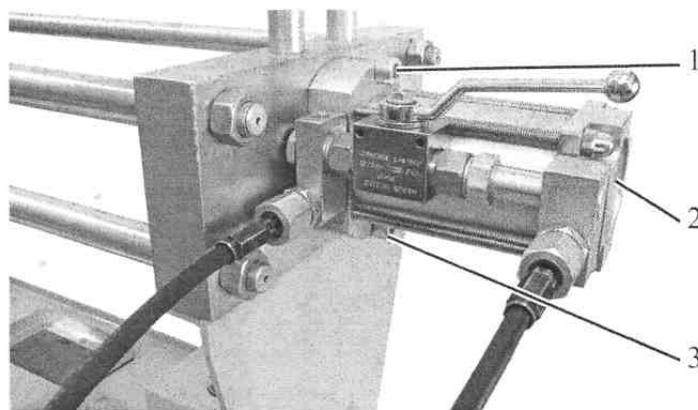


Рисунок 35 - Установка гидроцилиндра

2. Установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рисунок 36) на силовую раму стенда (рисунок 37). Наворачивание и затяжку гайки необходимо производить «от руки», применение гаечного ключа не требуется.

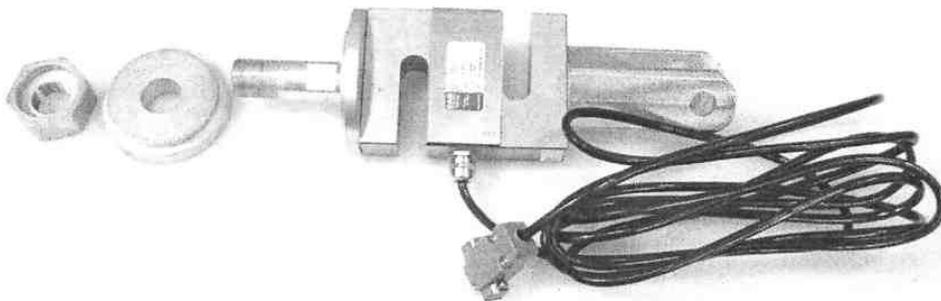


Рисунок 36 - Силовизмеритель на 50 кН с держателем

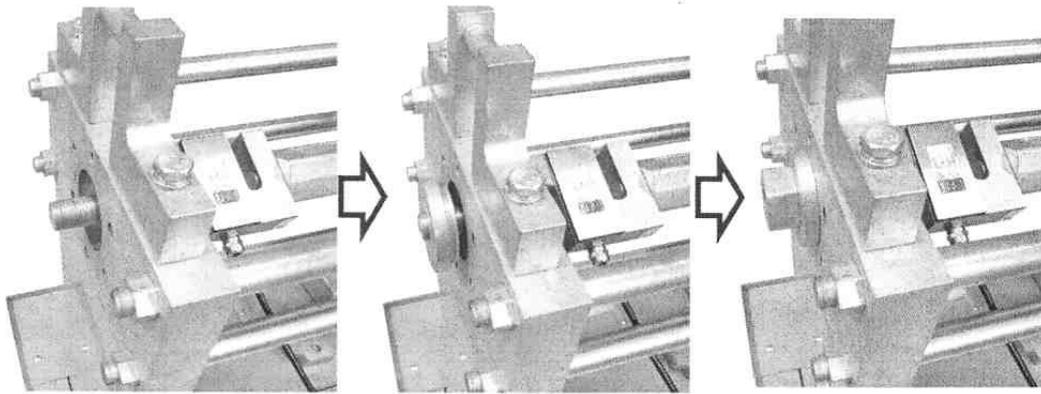


Рисунок 37 - Монтаж силоизмерителя на 50 кН

3. Измерить диаметр  $d$  образца, вычислить площадь поперечного сечения  $A_0$ , занести данные в таблицу 4.
4. Вставить образец в захваты для испытаний на срез (рисунок 38).

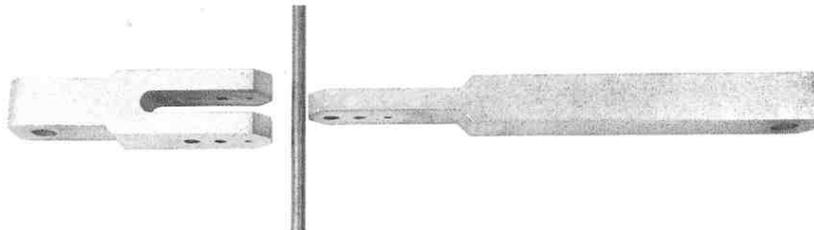


Рисунок 38 - Захваты для испытаний на срез

5. Установить образец с захватами 3 в вилки на силоизмерителе 1 и гидроцилиндре 5 (рисунок 39) с помощью пальцев 2 и 4. Для установки образца с захватами следует установить захват в форме вилки для микрометра в вилку силоизмерителя с помощью пальца 2. После этого следует с помощью насоса сдвинуть гидроцилиндр в положение, обеспечивающее возможность установки пальца 4. Работа с насосом описана в пунктах 6-8. При необходимости рукой повернуть вилку гидроцилиндра 5 для обеспечения параллельности боковой плоскости захвата 3 с внутренней плоскостью захвата 5. Вращать вилку гидроцилиндра следует только по ходу часовой стрелки, если смотреть со стороны вилки.

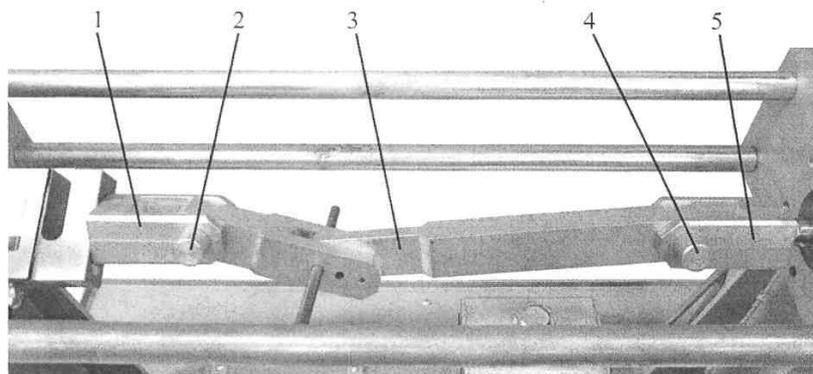


Рисунок 39 - Сборка стенда для проведения лабораторной работы

6. Выполнить всасывание жидкости в насос, путем вращения рукоятки по ходу часовой до упора.
7. Переключить краны в положение, соответствующие втягиванию гидроцилиндра.
8. В программе «ОСМ измерения» выбрать пункт меню «Диаграмма деформирования». Убрать флажок «Сбор данных по перемещению». Выбрать для отображения на диаграмме параметры «Усилие, кН» от «Время, с»
9. Ввести в программу геометрические характеристики образца: площадь поперечного сечения  $A_0$ . Понятие длины рабочей части образца при срезе не имеет смысла, поэтому можно ввести любое число большее нуля, например диаметр.
10. Нажать кнопку «начать испытание», после этого начнется сбор данных. Наибольшая продолжительность испытаний составляет 30 минут, по истечении этого времени сбор данных прекращается.
11. Начать плавно вращать рукоятку гидроцилиндра против хода часовой стрелки. Гидроцилиндр начнет втягивать шток, образец при этом подвергается срезу.
12. После разрушения образца необходимо нажать кнопку «Завершить испытание».
13. Сохранить диаграммы и данные в файлы, для написания отчета.
14. Снять захваты и вынуть части образца.
15. Демонтировать гидроцилиндр, силоизмеритель и разложить все элементы на их места в ящиках и на стенде. Выключить питание измерительно-преобразовательного блока. Выйти из программы.
16. По диаграмме сила – время определить наибольшее усилие, действующее на образец в процессе среза  $F_{max}$ . Рассчитать сопротивление срезу, занести данные в таблицу 1.
17. Сделать выводы о характере работы пластичных материалов при срезе.

Таблица 4. Протокол испытаний

$d$ , мм		$A_0 =$	, мм <sup>2</sup>
$F_{max}$ , Н			, МПа

#### Контрольные вопросы

1. При испытаниях цилиндрических образцов на срез какие задачи решаются?
2. В чем разница между соотношениями  $\tau_{пч}/\sigma_{пч}$  и  $[\tau] / [\sigma]$ ?

### Задачи для самостоятельного решения

**Пример.** Сколько заклепок диаметром 8 мм требует для соединения элементов рамы конвейера, несущей нагрузку 1,5 Т, чтобы напряжение в материале заклепок не превышало допускаемую величину. Материал заклепок – ст 2, отверстия под заклепки сверлёные.

Дано:

$$d = 8 \text{ мм}$$

$$F = 1,5 \text{ Т}$$

$z$  - ?

Решение:

Площадь поперечного сечения одной заклёпки

— ———

Необходимая площадь сечения всех заклепок

- ———

Необходимое число заклепок — ———

Ответ: 2 штуки

1. К концам желоба ленточного рештака вибрационного конвейера с помощью десяти заклёпок диаметром 10 мм прикреплены проушины, которыми рештаки соединяются друг с другом. При работе конвейера возникают касательные напряжения в  $700 \text{ кГ/см}^2$ . Определить, какое усилие действует на заклёпочное соединение.

Ответ: 5495 кГ

2. Клёпанная конструкция рамы привода ленточного конвейера несет нагрузку 18 т. В конструкции применены пятьдесят заклёпок диаметром 10 мм. Определить напряжение в материале заклёпок.

Ответ:  $460 \text{ кГ/см}^2$

3. Днище скипа должно быть прикреплено к боковым стенкам заклёпками диаметром по 10 мм. Определить требующееся число заклёпок, чтобы при загрузке скипа 12 Т угля напряжения в стержнях заклёпок не превышало  $1000 \text{ кГ/см}^2$ .

Ответ: 15 штук

4. Клёпанная конструкция рамы толкателя передаёт на 24 заклёпки диаметром 6 мм нагрузку 1,2 Т. определить напряжение в стержнях заклёпок.

Ответ:  $177 \text{ кГ/см}^2$

5. Определить, сколько заклёпок диаметром 8 мм должно быть в заклёпочном соединении компенсатора высоты, чтобы при общей нагрузке 2,3 Т напряжение в заклёпках не превышало допускаемой величины. Материал заклепок – ст 2, отверстия под заклёпки просверлены.

Ответ: 3 штуки

Лабораторная работа № 6.  
**Определение перемещений при изгибе балки.**

*Цель работы:* экспериментальное измерение перемещений упругой балки под действием изгибающих нагрузок, сравнение полученных результатов с расчетными значениями.

*Теоретические основы.*

При нагружении балки, лежащей на двух опорах, сосредоточенной силой в ней возникает изгибающий момент (рисунок 40).

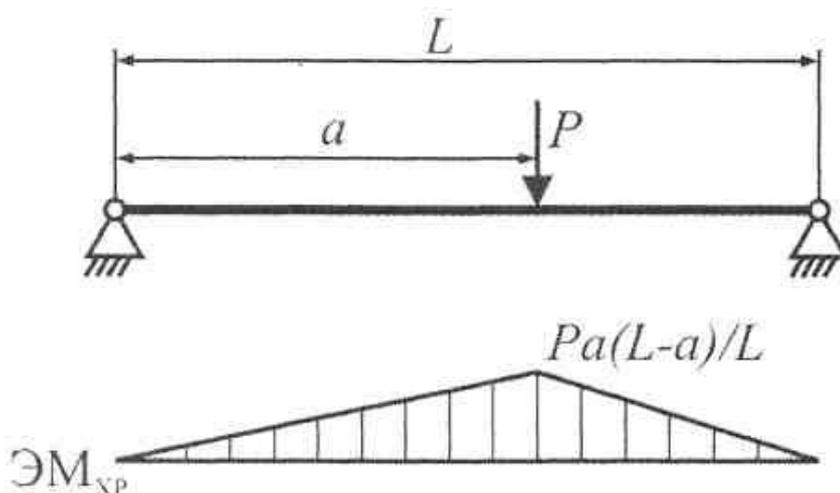


Рисунок 40 - Схема нагружения и эпюра изгибающего момента.

Определение линейных и угловых перемещений можно определить с помощью интеграла Мора. Линейное перемещение в произвольной точке на расстоянии  $b$  от левой опоры определяется

$$\Delta = \frac{1}{EJ} \int_0^L M(x) m(x) dx \tag{21}$$

где  $M(x)$  – момент от единичной силы, приложенной в рассматриваемой точке;  
 $E$  – модуль упругости материала балки;  
 $J$  – момент инерции сечения относительно горизонтальной оси.  
 Угловое перемещение в правой опоре определяется

$$\theta = \frac{1}{EJ} \int_0^L M(x) m'(x) dx \tag{22}$$

где  $m'(x)$  – момент от единичного момента, приложенного в рассматриваемой точке.

Эпюра изгибающего момента от единичной силы показана на рисунке 41. Эпюра изгибающего момента от единичного момента, приложенного в правой опоре, показана на рисунке 42.

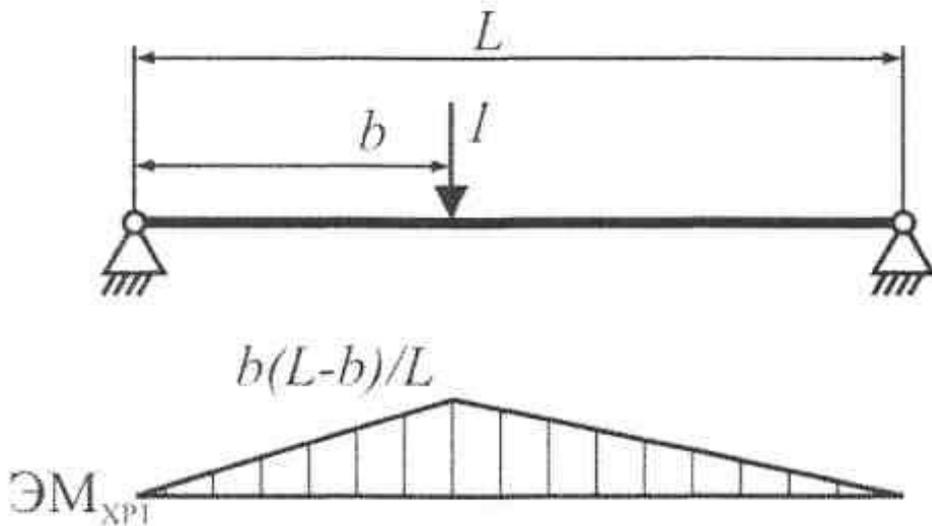


Рисунок 41 - Эпюра изгибающего момента от действия единичной силы

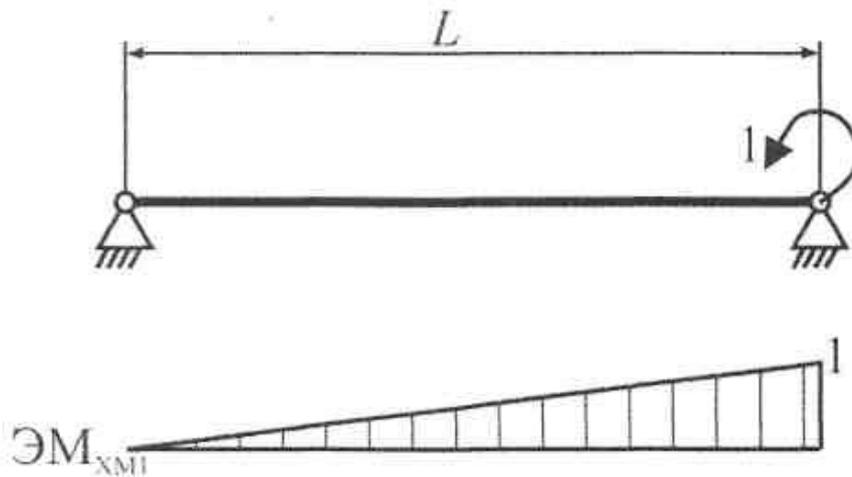


Рисунок 42 - Эпюра изгибающего момента от действия единичного момента

*Экспериментальная часть.*

1. Установить в правую опорную плиту 3 силовой рамы захват 2 для испытаний на изгиб (рисунок 43). для этого его необходимо вставить в центральное отверстие плиты, совместить паз на захвате с штифтом в плите и сдвинуть до плотного прилегания захвата к внутренней плоскости плиты. Установить клиновидный упор 1 в паз на захвате, между осью в захвате и опорной плитой. Убедиться, что клиновидный упор прилегает к плите силовой рамы над захватом и под захватом, после чего нанести легкий удар по клину молотком массой 0,1 кг (в комплекте стенда) в направлении стрелки, показанной на рисунке 43.

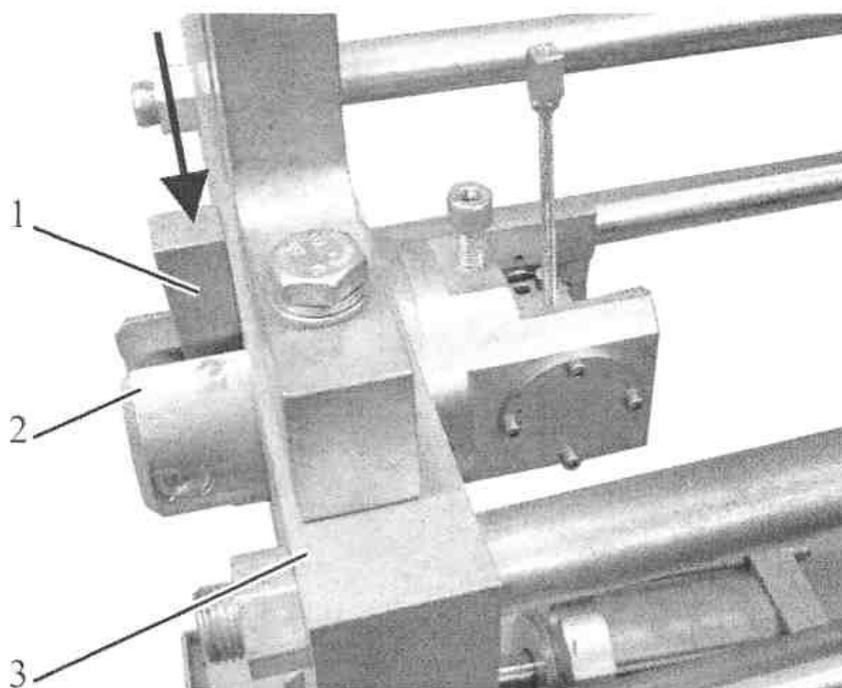


Рисунок 43. - Установка захвата для испытаний на изгиб

2. Установить в левую опорную плиту силовой рамы второй захват для испытаний на изгиб аналогично пункту 1.
3. Измерить ширину  $b$  и толщину  $t$  образца. Вычислить момент инерции поперечного сечения , занести данные в таблицу 5.
4. Установить образец 5 в захваты (рисунок 44). для этого ослабить винты 3 и вставить образец 5 пол пластину 4. Задвинуть образец в захват, после чего ослабить аналогичные винты на противоположном захвате и установить образец в него.

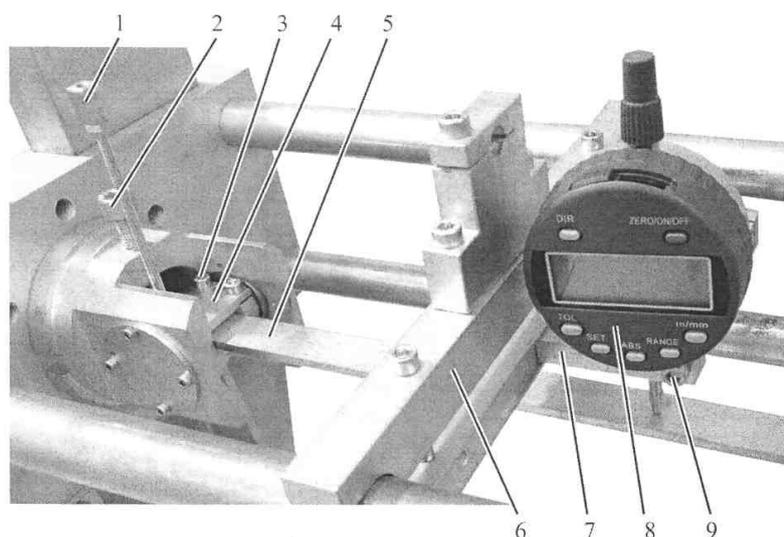


Рисунок 44 - Установка образца для определения перемещений при изгибе

5. выбрать точку  $b$  на образце, в которой следует измерять перемещение, записать расстояние от этой точки до оси левой опоры в таблицу 5. Установить (рисунок 44) модуль крепления микрометра 6 так, чтобы отверстие в кронштейне 7 располагалось над выбранной точкой на балке 5 (при необходимости нужно переставить кронштейн 7 на нужное отверстие в модуле 5). Установить микрометр 8 в кронштейн 7 и зафиксировать с помощью винта 9. Аналогичные действия выполнить для второго микрометра.
6. Установить второй модуль крепления микрометра (рисунок 45) для определения углового перемещения в правой опоре.
7. Выбрать расстояние  $a$  для установки подвеса от оси левой опоры (рекомендуемое расстояние от  $\frac{1}{4}$  до  $\frac{3}{4}$  длины расстояния между опорами). Записать расстояние  $a$  в таблицу 6.
8. Отмерить при помощи рулетки выбранное расстояние и установить подвес на балку (рисунок 46), затянуть винты на подвесе.

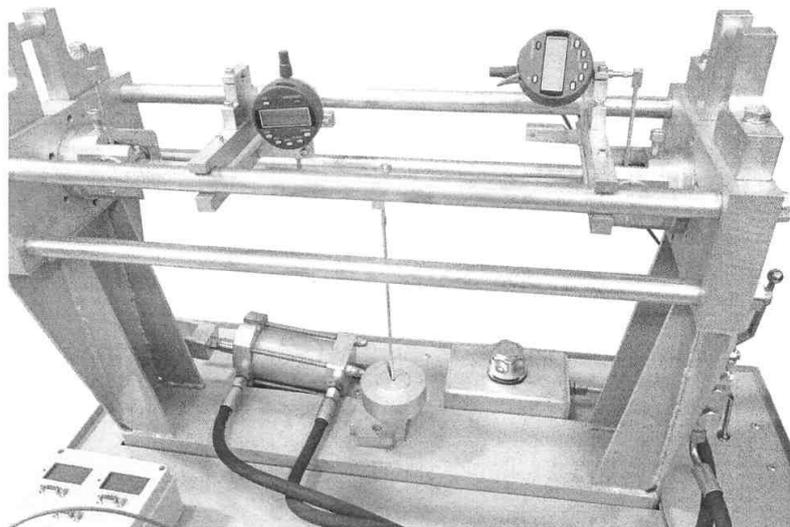


Рисунок 45 - Сборка стенда для проведения лабораторной работы

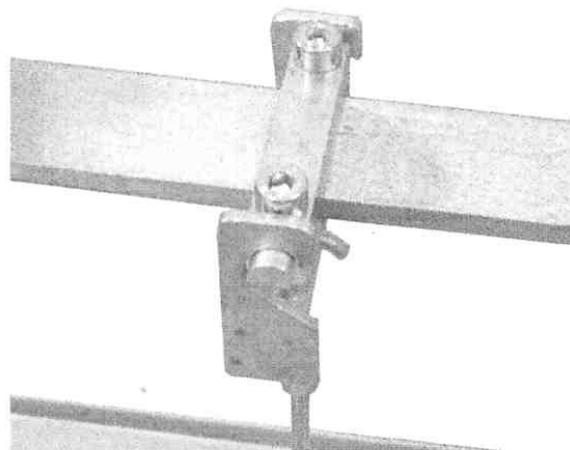


Рисунок 46 - Установка подвеса на балку

9. Установить показания микрометров на «0», нажав кнопку «zero».
10. Выбрать величину нагрузки  $F$  на образец (шаг по нагрузке 4,9Н). величина нагрузки не должна превышать 30Н.
11. Установить на подвес грузы в соответствующие выбранной нагрузке.
12. Занести показания микрометров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в таблицу 6.
13. Несколько раз изменить точку замера перемещения, выполняя действия по пункту 12.
14. Снять и разместить в ящиках стенда грузы и элементы, установленные при подготовке к измерениям.
15. Произвести расчет перемещения в выбранных точках и угла поворота в правой опоре. Сравнить с экспериментально измеренными. Сделать выводы.

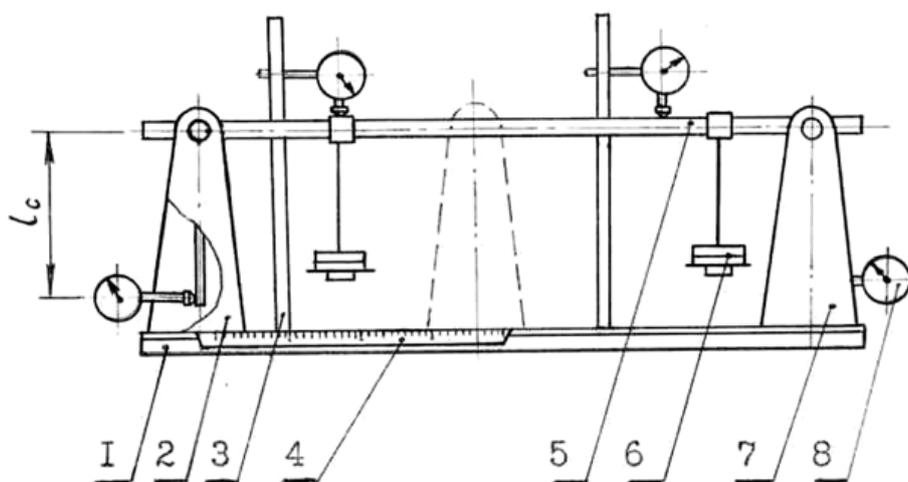


Рисунок 47- Установка для определения перемещений при изгибе

- 1- Основание; 2- подвижная стойка; 3- стержень; 4- шкала перемещения подвижной стойки; 5- исследуемый образец; 6- гиревая подвеска с набором грузов; 7- неподвижная стойка; 8- индикатор

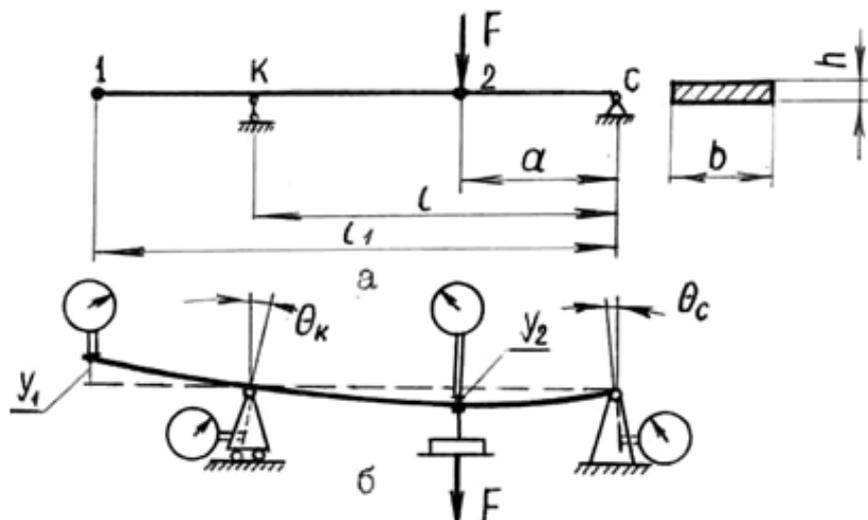


Рисунок 48 - Схема к определению перемещений

Таблица 5 - Геометрические параметры образца

$h$ , мм	$t$ , мм	$J_x$ , см <sup>4</sup>	Расстояние между опорами $l$ , мм

Таблица 2 - Протокол испытаний

$a$ , мм	$b$ , мм	$F$ , Н	$\Delta_1$ , мм	$\Delta_2$ , мм	$\theta = \Delta_2/100$ мм

### Контрольные вопросы

1. Назовите характеристики при деформация изгиба?
2. Какую роль играют величина прогибов и углы поворота сечений?
3. Дайте определение упругой линии балки. Напишите дифференциальное уравнение. Если здесь допущения, то какие?
4. Перечислите теоретические способы определения перемещений в балках. В их применении опишите достоинства и недостатки.
5. Универсальное уравнение для упругой линии используют при условных правилах, каких?
6. Подтвердите наличие пропорциональности между нагрузкой балки и ее прогибами?

## Задачи для самостоятельного решения

**Пример.** В камере центрального водоотлива при помощи цепной тали устанавливают на фундаменте насос весом 1360 кГ. Таль прикреплена к центру двутавровой балки № 20, закрепленной своими концами в стенах камеры. Расстояние между точками опоры балки 3,8 м, вес тали 28 кГ. Определить стрелу прогиба балки под действием веса насоса и балки и напряжение в балке, условно считая крепления балки в стенах камеры шарнирными.

*Дано:*

*Решение:*

Изгибающий момент, действующий на балку, равен

\_\_\_\_\_

Момент сопротивления балки находим по таблице

Напряжение в материале балки составит:

\_\_\_\_\_

Осевой момент инерции сечения балки находим по таблице

Стрела прогиба балки

\_\_\_\_\_

Ответ: 0,3 мм

1. Определить диаметр рычага ручной лебедки. Рычаг длиной 350 мм воспринимает концевую поперечную силу 28 кГ и имеет допускаемое напряжение на изгиб  $600 \text{ кГ/см}^2$ .

Ответ: 26 мм

2. Шахтная вагонетка с грузом имеет вес 2,5Т. Расстояние от колес вагонетки до подшипников на осях 100 мм. Определить диаметр оси вагонетки по условиям прочности на изгиб, принимая допускаемое напряжение равным  $1000 \text{ кГ/см}^2$ .

Ответ: 63 мм

3. В стволе в качестве опор под водоотливные трубы весом 8,5Т нужно укрепить двутавровые балки. Предположим, что нагрузка от веса труб приложена посередине балок, расстояние между точками опор балок 1750 мм. Определить номер двутавровых балок, принимая допускаемое напряжение на изгиб  $800 \text{ кГ/см}^2$ .

Ответ: №30

4. Ствол имеет 100 растрелов из двутавровых балок № 27, которые несут нагрузку от направляющих проводников. Расстояние между точками опоры растрелов 5 м. предположим, что нагрузка приложена посередине растрелов и напряжение равно  $750 \text{ кГ/см}^2$ . Следует определить величину нагрузки на растрелы.

Ответ: 305,4Т

### Лабораторная работа №7

## Определение напряжений в сечении балки при изгибе.

*Цель работы:* экспериментальное определение распределения нормальных напряжений по высоте сечения упругой балки при чистом изгибе методами тензометрии.

### Теоретические основы.

Изгибом называется такой вид нагружения, при котором в поперечных сечениях бруса возникают изгибающие моменты. В случае, если изгибающий момент является единственным силовым фактором в сечении. А поперечная и нормальная силы отсутствуют, то такой изгиб называется *чистым*. Если в поперечных сечениях бруса возникают также поперечные силы, то изгиб называют *поперечным*. Это наблюдается в большинстве случаев. Брус, работающий на изгиб, называется *балкой*.

В случае чистого изгиба (рисунок 49) на тех участках бруса, где поперечные силы  $Q = 0$  изгибающий момент остается постоянным. Под действием моментов  $M$  брус изгибается. Так как в любом сечении бруса возникает один и тот же изгибающий момент, то в случае однородного бруса изменение кривизны для всех участков будет одним и тем же. Следовательно, при чистом изгибе ось однородного бруса принимает форму дуги окружности.

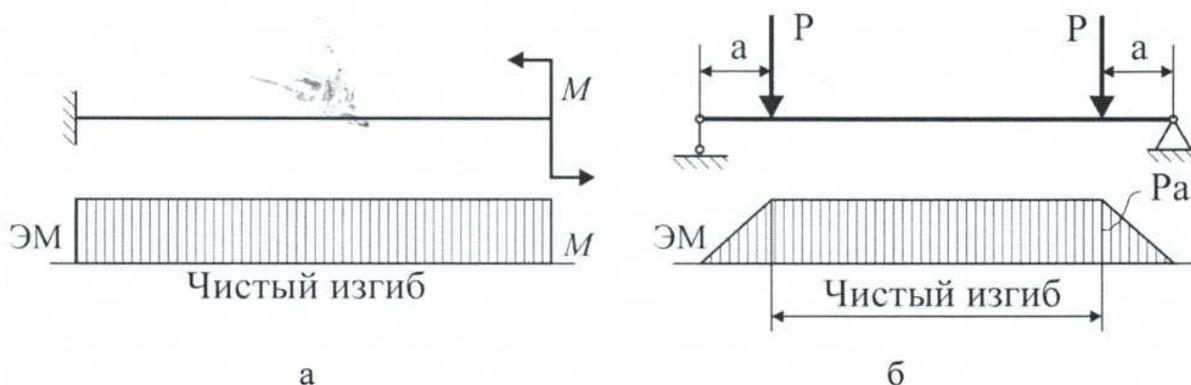


Рисунок 49 - Схемы нагружения и эпюры изгибающего момента

Точки, расположенные до изгиба в плоскости поперечного сечения бруса, в результате изгиба переместятся в пространстве таким образом, что их совокупность снова образует плоскость. По условиям симметрии точки среднего поперечного сечения  $AA$  (рисунок 50.а) не могут получить смещений ни вправо, ни влево, значит, данное сечение остается плоским.

Разрезая брус на две равные части сечением  $AA$ , получаем вдвое меньшие участки, находящиеся в таких же условиях, что и целый участок (рисунок 50.б). для данных половин средние сечения также остаются плоскими.

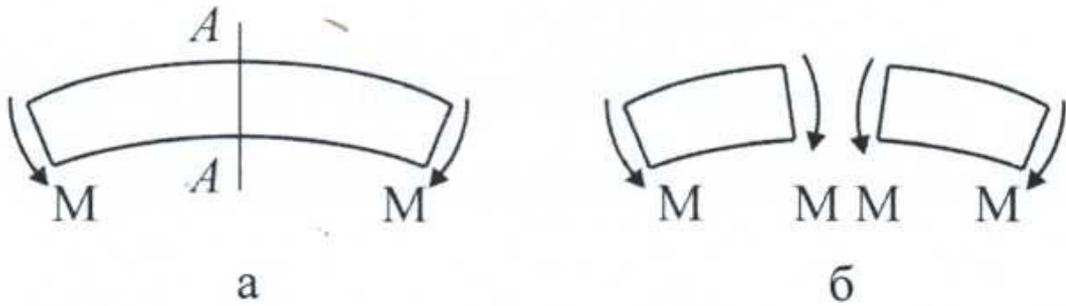


Рисунок 50 - Условия симметрии при чистом изгибе

Таким образом, при чистом изгибе все сечения однородного бруса не искривляются, а только поворачиваются.

Процесс формирования деформаций при чистом изгибе может рассматриваться как результат поворота плоских поперечных сечений друг относительно друга. Если рассмотреть два смежных сечения, отстоящих друг от друга на расстоянии  $dz$  (рисунок 51) и принять левое сечение условно за неподвижное, то в результате поворота правого сечения на угол  $d\theta$  верхние слои удлинятся, а нижние – укоротятся. Слой, в котором удлинения отсутствуют, называется *нейтральным* слоем – отрезок  $CD=C'D'=dz$ .

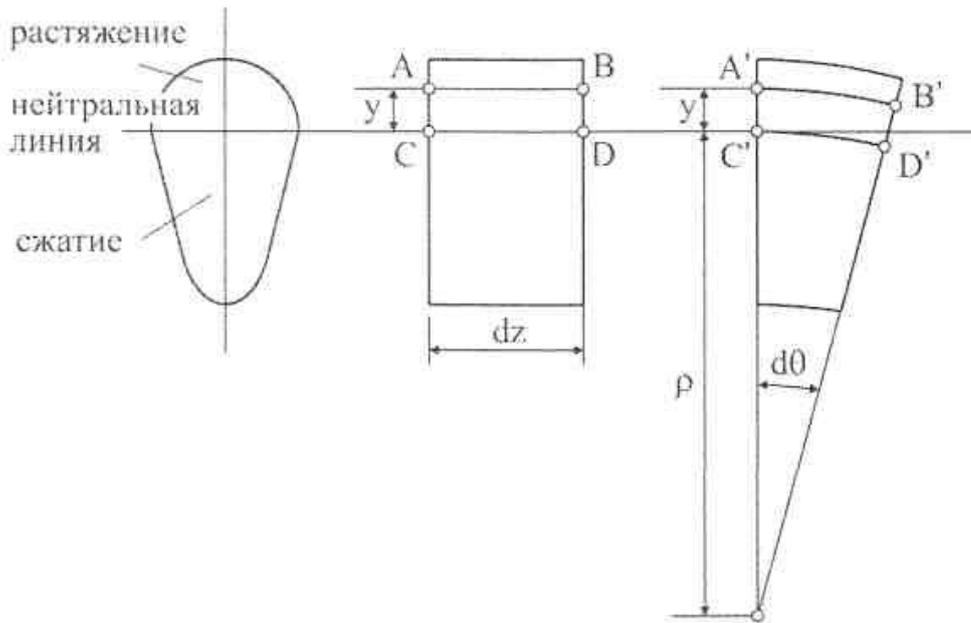


Рисунок 51 - Геометрические обозначения

В результате поворота сечений изменение кривизны нейтрального слоя будет равно:

$$- \quad - \quad (23)$$

Произвольный отрезок  $AB = dz$  (рисунок 52), расположенный от  $CD$  на расстоянии  $y$ , в результате изгиба удлинится на величину  $A'B'-AB$ . Так как сечения остаются плоскими,

$$A'B'-AB=(\rho+y)d\theta-\rho d\theta=yd\theta, \quad (24)$$

где  $y$  – расстояние от рассматриваемого отрезка  $AB$  до нейтрального слоя  $CD$ .  
Относительное удлинение слоя  $AB$  равно

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{y}{\rho} d\theta \quad (25)$$

По закону Гука

$$\sigma = E \epsilon \quad (26)$$

Таким образом, при чистом изгибе напряжения в поперечном сечении изменяются по линейному закону. Геометрическое место точек в сечении, удовлетворяющее условию  $\sigma=0$ , называется *нейтральной линией* сечения. Нейтральная линия перпендикулярна к плоскости кривизны изогнутого бруса и проходит через центр тяжести сечения. Таким образом, координата  $y$  отсчитывается от центральной оси, перпендикулярной к плоскости кривизны. Кривизна  $1/\rho$  – кривизна нейтрального слоя или кривизна оси бруса.

Изгибающий момент в сечении бруса может быть выражен интегральным образом через напряжения  $\sigma$  (рисунок 53):

$$M = \int \sigma y dA \quad (27)$$

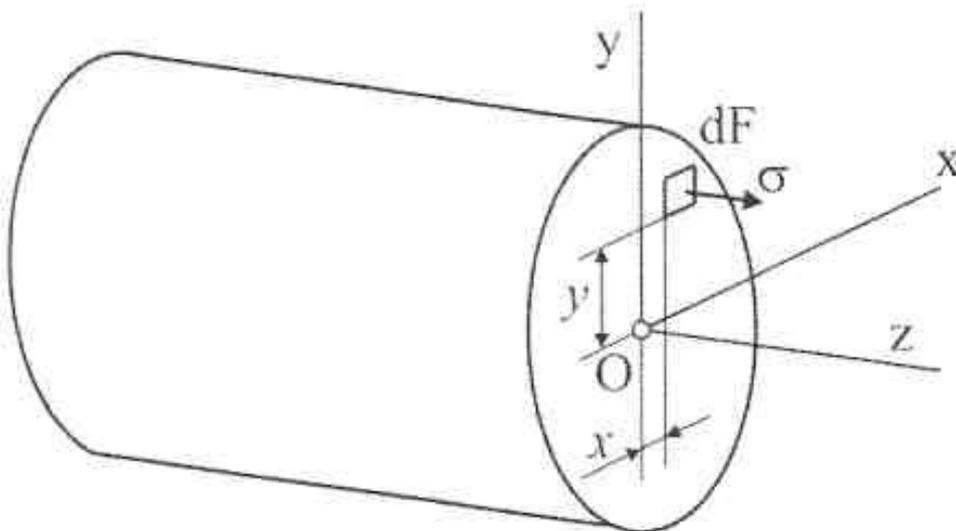


Рисунок 53 - Внутренние силовые факторы

Момент элементарных сил  $\sigma dA$  относительно  $y$  равен нулю, а относительно оси  $x$  – полному изгибающему моменту  $M$ , тогда получаем

$$- \quad - \quad (28)$$

Первое выражение приводится к виду  $J_{XY}=0$ .

Следовательно, изменение кривизны бруса происходит в плоскости момента в том случае, если последняя проходит через одну из *главных* осей сечения. Такой изгиб называется *прямым*. Если плоскость изгибающего момента не совпадает с главной осью сечения, изгиб называется *косым*.

Из выражений (28) получаем зависимость кривизны бруса от изгибающего момента:

$$- \quad - \quad (29)$$

Где  $J_X$  – момент инерции сечения относительно главной центральной оси, перпендикулярной к плоскости изгибающего момента.

Величина  $J_X$  называется *жесткостью* бруса при изгибе. Эта величина пропорциональна четвертой степени линейных размеров сечения при пропорциональном их изменении.

Исключая из закона Гука (26) кривизну  $1/\rho$ , получаем выражение для напряжения  $\sigma$ :

$$- \quad (30)$$

Максимальное напряжение при изгибе возникает в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси (рисунок 54)

$$- \quad (31)$$

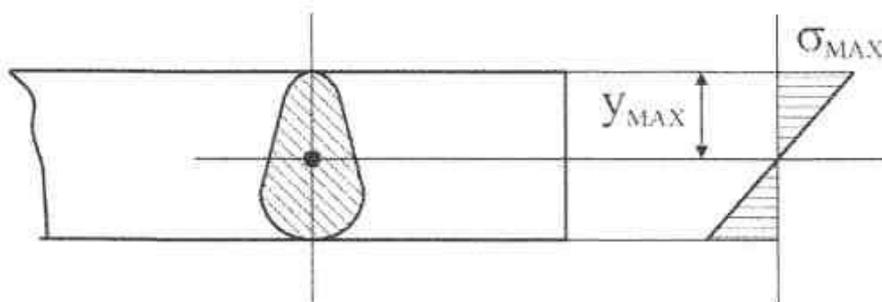


Рисунок 54 - Распределение напряжений по сечению

Отношение  $J_X/y_{MAX}$  называется моментом сопротивления сечения при изгибе  $W_X, \text{ см}^3$

Таким образом,

$$- \quad (32)$$

Напряжения при изгибе обратно пропорциональны третьей степени линейных размеров сечения. Наиболее экономичными являются формы поперечных сечений, для которых с наименьшей затратой материала получается наибольшая величина момента сопротивления. Соответственно. Необходимо по возможности распределять площадь сечения дальше от нейтральной оси. Примером таких сечений могут быть стандартные двутавровые профили. При изгибе в вертикальной плоскости такие профили дают существенную выгоду по сравнению с прочими формами поперечных сечений.

Для экспериментального изучения распределения напряжений при изгибе балки по высоте сечения при упругом поведении тела можно воспользоваться методами тензометрирования.

Тензометрирование нагруженных тел позволяет определить компоненты тензора деформации в точках установки тензорезисторов. Тензорезистор представляет собой датчик, сопротивление которого зависит от его деформации. Тензорезисторы выполняются из тонких пленок или проволоки из проводящих материалов (рисунок 55), помещенных между двумя слоями пленок из изолирующих материалов. Универсальные тензорезисторы имеют следующую структуру: решетчатый чувствительный элемент из тонкой металлической резистивной фольги (толщиной 3-6 мкм) кладется на основу из тонкой пластмассовой пленки (толщиной 15-16 мкм) и ламинируется тонкой пленкой. На краю тензорезистора выполняют площадки для внешнего подсоединения проводов. Тензорезисторы устанавливают на конструкции путем наклейки. Жесткость тензорезисторов должна быть значительно меньше жесткости основной конструкции. При нагружении конструкции деформации передаются через слой клея на тензорезистор. Что позволяет измерять деформации. Для зоны упругой работы конструкции по деформациям могут быть однозначно определены напряжения с помощью закона Гука.

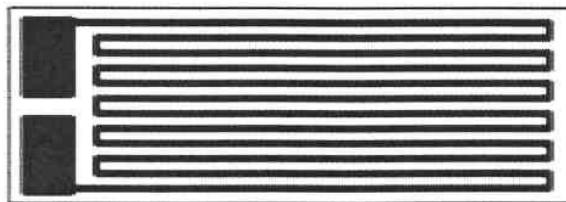


Рисунок 55 - Пример тензорезистора

Относительное изменение сопротивления тензорезистора пропорционально деформации

—

(33)

где  $K$  – коэффициент тензочувствительности,  
 $R$  – номинальное сопротивление тензорезистора.

Для измерения изменения сопротивления тензорезистора применяют схему включения по мосту Уинстона. Тензорезистор  $R_{ТР}$  и три резистора  $R_0$  с сопротивлением, равным номинальному сопротивлению тензорезистора, соединяют в мост (рисунок 6.7) и записывают постоянным напряжением  $U_{пит}$ , при этом измеряют напряжение  $U_{изм}$ . В недеформированном состоянии сопротивление тензорезистора  $R_{ТР}$  равно  $R_0$ , при этом напряжение  $U_{изм}$  равно нулю. При деформированном сопротивлении тензорезистора изменяется. И напряжение  $U_{изм}$  отлично от нуля:

$$- - - - - \quad (34)$$

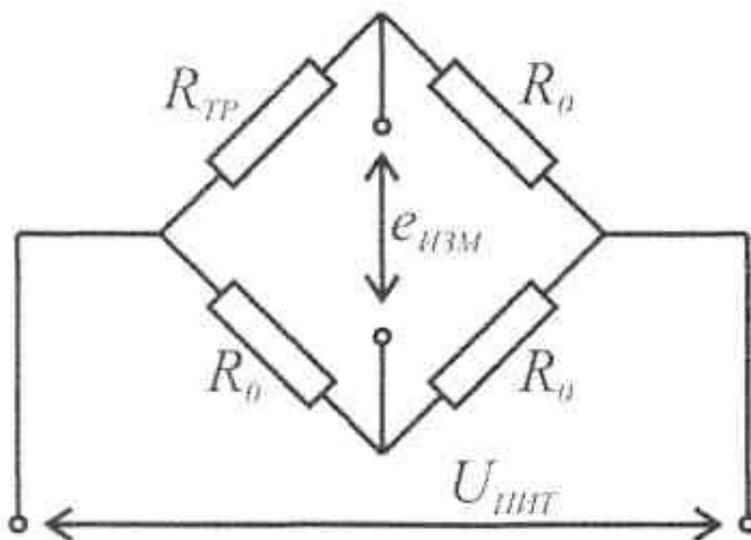


Рисунок 56 - Схема включения тензорезистора

Выходное напряжение подается на тензоусилитель, где увеличивается и передается на измерительные устройства. В данной испытательной машине в качестве измерительного устройства используется плата АЦП и ноутбук. Измеренное электрическое напряжение в программе «ОСМ измерения» переводится в деформацию:

$$- - - - - \quad (35)$$

*Экспериментальная часть.*

Экспериментальная часть заключается в определении закона распределения нормальных осевых напряжений путем перерасчета их из деформаций, измеренных тензорезисторами. По измеренному значению силы рассчитывают напряжения в местах установки тензорезисторов и сравнивают их с экспериментально измеренными.

1. Установить гидроцилиндр 1 на основание силовой рамы стенда (рисунок 57) совместив расточку на задней крышке гидроцилиндра цилиндрическим выступом в опорной пластине 2.

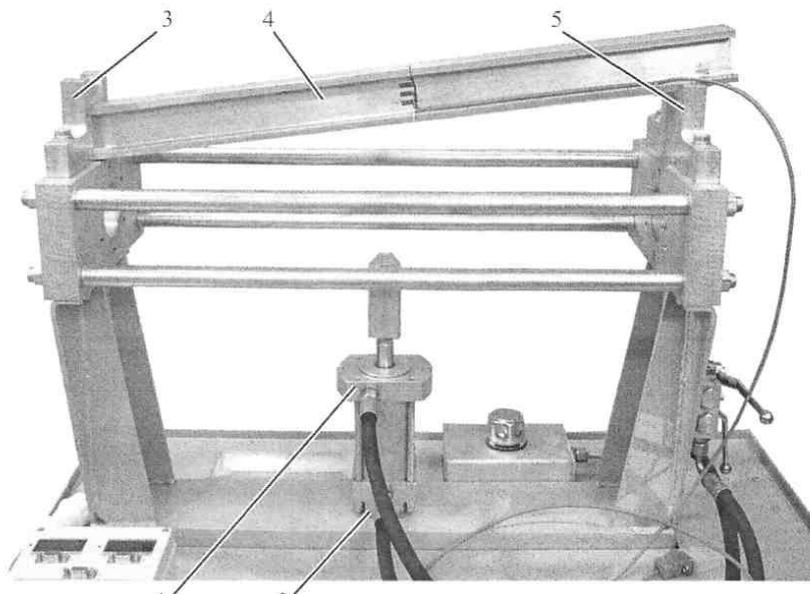


Рисунок 57 - Установка гидроцилиндра и балки

2. Установить (рисунок 57) двутавровую балку 4 с тензорезисторами под опоры 3 и 5. Для этого необходимо завести конец балки на котором нет провода под одну из опор, продвинуть балку под опору на 10-15 см, после чего завести второй конец балки под противоположную опору. Балка в установленном положении показана на рисунке 58.

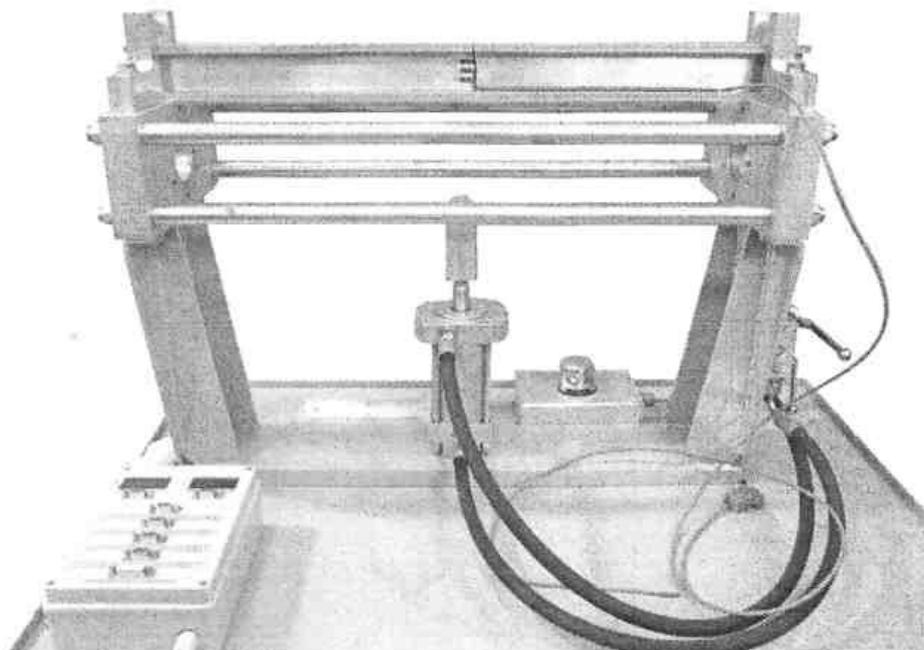


Рисунок 58 - Балка в установленном положении

3. Убедиться в том, что шток гидроцилиндра находится в положении, позволяющем установить силоизмеритель на 5кН с устройством нагружения под балкой (рисунок 59). При необходимости следует с помощью насоса сдвинуть гидроцилиндр в положение, обеспечивающее возможность установки силоизмерителя. Работа с насосом описана в пунктах 6-8.

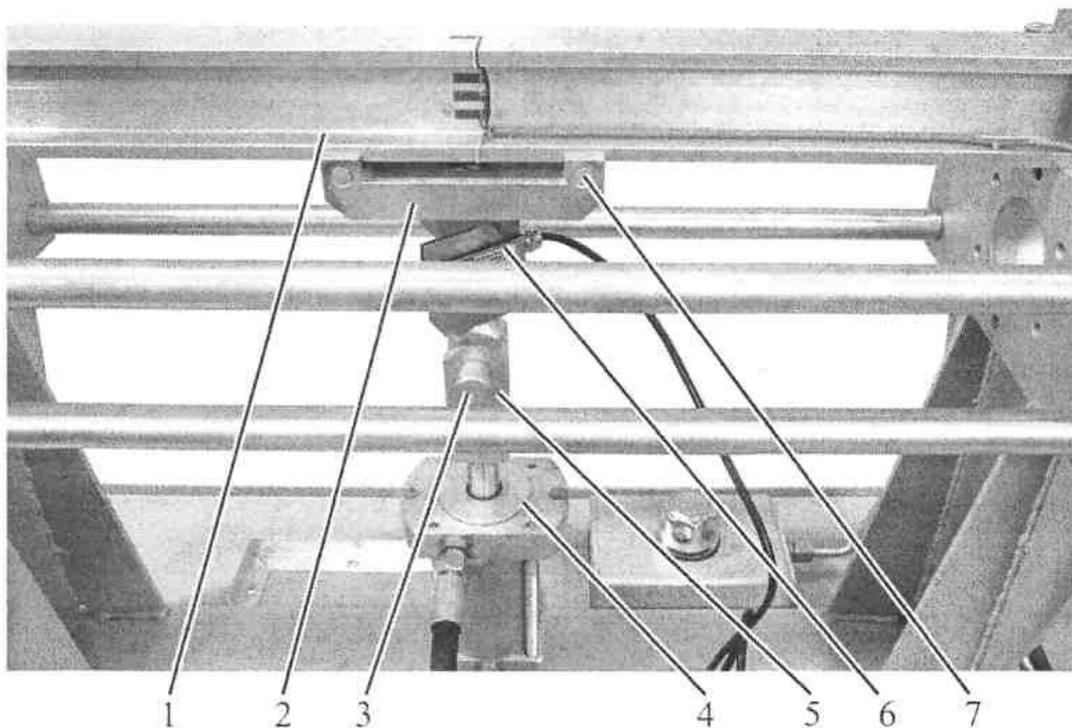


Рисунок 59 - Установка силоизмерителя

4. Установить силоизмеритель 6 на 5кН с устройством нагружения 2 балки 1 (рисунок 59) в вилку 5 гидроцилиндра 4 при помощи стопорного пальца 3. Устройство нагружения при этом должно быть сориентировано вдоль балки 1 и балка 1 должна войти в пазы на устройстве нагружения и опереться на цилиндрические штифты 7. При необходимости рукой повернуть вилку 5 гидроцилиндра для обеспечения параллельности паза на устройстве нагружения с боковыми гранями балки. Вращать вилку гидроцилиндра следует только по ходу часовой стрелки, если смотреть со стороны вилки.

5. Подключить разъемы силоизмерителя на 5 кН и тензорезисторов к измерительно-преобразовательному блоку.

6. Выполнить пункты 3-5.

7. В программе выбрать пункт меню «Тензометрирование».

8. Установить флажок напротив пункта «распределение деформаций при изгибе». Подождать пока значения деформаций (по тензорезисторам), отображаемые программой не перестанут меняться (происойдет прогрев тензоусилителей и тензорезисторов). Это может занять 5-10 минут.

9. В программе нажать кнопку «Балансировать деформации».

10. перевести краны в положение, соответствующее выдвигению штока гидроцилиндра.

11. Обнулить показания силоизмерителя, нажав в программе кнопку «Балансировать усилие».
12. Начать прикладывать нагрузку к образцу плавно вращая рукоятку привода насоса против часовой стрелки. Увеличить усилие, действующее на образец, на 400-500 Н. текущее значение усилия следует наблюдать по программе «ОСМ измерения».
13. Записать значение усилия значения деформации  $\varepsilon_1 \dots \varepsilon_6$ , измеренных тензорезисторами, в таблицу 2. Тензорезисторы нумеруются (обозначения в программе «ОСМ измерения») по порядку расположения на балке, пятым считается тензорезистор, наклеенный на полку двутавра, по которой проложен кабель.
14. Выполнить действия по п.п. 12-13 до значения усилия в 2000 Н.
15. Снять нагрузку с образца, для этого следует установить ручки обоих кранов вдоль их корпусов.
16. Перевести краны в положение, соответствующее втягиванию штока. Вращая рукоятку насосной станции отвести устройство нагружения вниз на 5-7 мм.
17. Удерживая одной рукой силоизмеритель с устройством нагружения, вынуть стопорный палец, после чего снять силоизмеритель.
18. Демонтировать гидроцилиндр, образец и разложить все элементы на их места в ящиках и на стенде. Выключить питание измерительно-преобразовательного блока. Выйти из программы.
19. Рассчитать для каждого значения нагрузки значения осевых напряжений в местах установки тензорезисторов 1-5:

$$\text{---} \quad (33)$$

где  $F$  – текущее значение усилия,

$L = 644$  мм – расстояние между неподвижными опорами,

$l = 120$  мм – расстояние между штифтами в устройстве нагружения,

$y_i$  – координата тензорезистора, отсчитываемая от нейтральной оси (в данном случае середины сечения двутавра);

- момент инерции сечения двутавра относительно горизонтальной оси.

20. Рассчитать значения напряжений по деформациям, измеренным тензорезисторами

$$, \quad (34)$$

где  $E = 72$  ГПа – модуль упругости алюминиевого сплава.

21. Рассчитать по формуле Журавского касательные напряжения  $\tau$  в точке установки шестого тензорезистора. В данной точке реализуется чистый сдвиг, следовательно, первое главное напряжение в этой точке

22. Первое главное напряжение, так же может быть вычислено по одной из главных деформаций, полученной путем тензометрирования ( $\varepsilon_6$ ):

23. сравнить значения напряжений, полученные расчетом по действующей силе и по показаниям тензорезисторов. Сделать выводы.

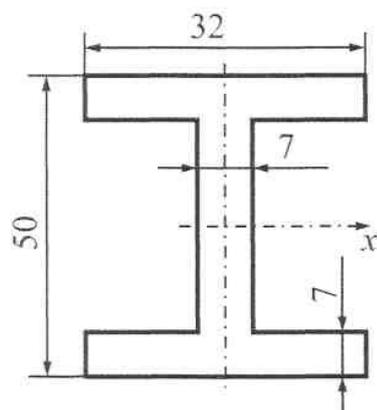


Рисунок 60 - Поперечное сечение балки

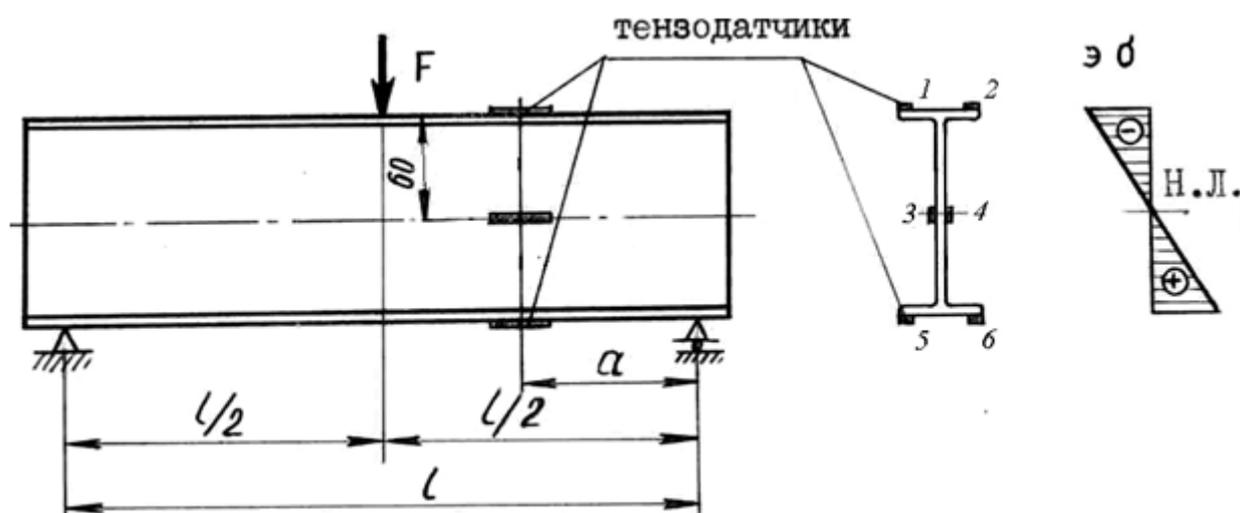


Рисунок 61 Схема испытания балки на изгиб

Таблица 7 - Параметры образца

№ тензистора	Расстояние от оси $x$ до тензорезистора	Момент инерции, $\text{мм}^4$	Модуль упругости $E$ , ГПа
1	25	236000	72
2	12,5		
3	0		
4	12,5		
5	25		
6	На оси $x$ , под $45^\circ$ к продольной оси стержня		

Модуль упругости образца  $E=72$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\mu=0,32$

Таблица 8 - Протокол испытаний

$F, \text{Н}$	№ $i$	$\sigma_{\text{РАСЧ}i}, \text{МПа}$		$\sigma_{\text{ЭКСП}i}, \text{МПа}$
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение плоского изгиба?
2. Укажите разницу между чистым и поперечным изгибами?
3. Плоский изгиб – какие возникают внутренние силовые факторы?
4. Расположение нейтрального слоя и нейтральной оси в балке?
5. Формула нормальных напряжений. Распределение по сечению нормальных напряжений как происходит?
6. Определение нормальных напряжений опытным путем.
7. Какими тензометрами при изгибе пользуются для определения нормальных напряжений?
8. Запишите формулу для определения максимально допустимой величины нагрузки.
9. Каким образом можно рассчитать величину максимальных напряжений в испытательной балке?
10. Покажите главные площадки в балке, испытываемую на изгиб

## Лабораторная работа №8

### Определение напряженного состояния в балке при сложном нагружении (при действии изгиба и кручения)

*Цель работы:* экспериментальное определение компонент тензора деформаций при плоском напряженном состоянии методами тензометрии, определение главных значений тензоров деформаций и напряжений.

*Теоретические основы.*

При одновременном действии изгиба  $M$  и кручения  $T$  (рисунок 62) в балке, выполненной из тонкостенной трубы, возникает двусосное напряженное состояние.

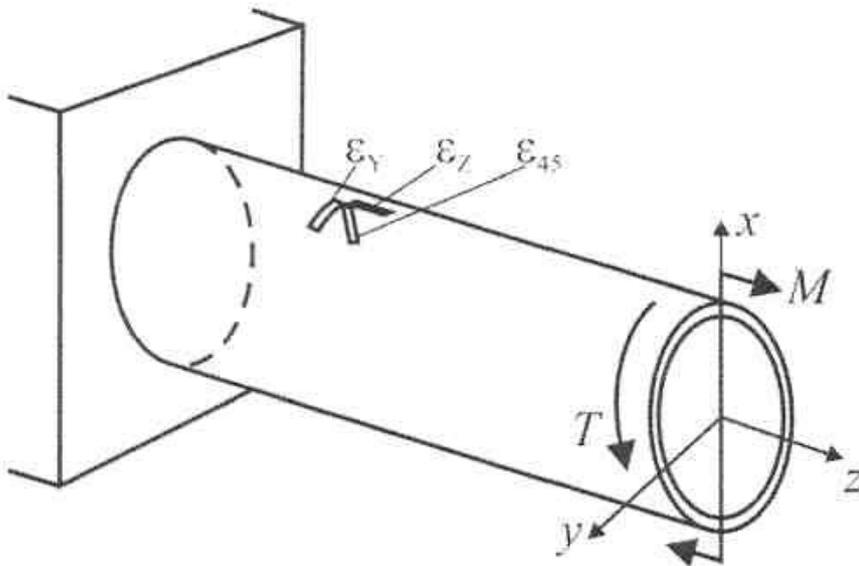


Рисунок 62 - Схема нагружения

В данной лабораторной работе исследуется напряженное состояние в точке, где действуют наибольшие по сечению нормальные напряжения (верхняя точка балки). В рассматриваемой точке реализуется одновременное растяжение вдоль оси  $z$  и сдвиг в плоскости  $yz$  (рисунок 63).

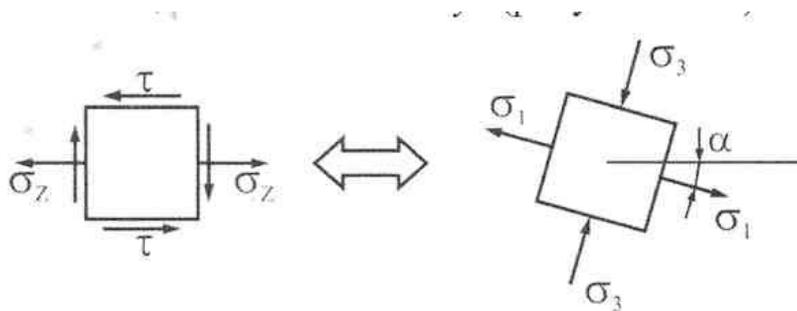


Рисунок 63 - Компоненты тензора напряжений

Значения напряжений, рассчитанных по внешней нагрузке, определяются следующим образом:

$$\sigma_x = \frac{N}{F} \quad (36)$$

$$\sigma_y = \frac{N}{F} \quad (37)$$

Значения главных напряжений:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (38)$$

С другой стороны значение главных напряжений могут быть найдены экспериментальным путем методом тензометрирования. При тензометрировании определяются деформации в трех направлениях: вдоль оси стержня –  $\epsilon_z$ , перпендикулярно оси стержня-  $\epsilon_y$ , под углом  $45^\circ$  к оси стержня –  $\epsilon_{45}$ .

Главные деформации могут быть вычислены следующим образом:

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (39)$$

Из закона Гука можно выразить главные напряжения через главные деформации:

$$\sigma_{1,2} = E \epsilon_{1,2} \quad (40)$$

### Экспериментальная часть

В данной лабораторной работе возможна реализация различных комбинаций изгиба и кручения. В связи с этим, такие параметры как плечо изгиба, плечо кручения и прикладываемая нагрузка (вес грузов) задаются преподавателем.

Плечо изгиба (расстояние от оси рычага до середины тензорезистора)  $L$  может быть равным 180; 280; 380; 480; 580; 680 мм. Плечо кручения  $l$  – от 150 до 350 мм. Нагрузка – от 24,5 до 147 (шаг 24,5Н).

1. Установить образец для изучения сложного напряженного состояния (рисунок 8). для этого наклонить образец в вертикальной плоскости, вставить трубу 3 в отверстие в правой опорной плите 6. Продвинуть образец вправо, после чего вставить образец устройством заделки в левую опорную плиту 1, совместив паз в устройстве заделки со штифтом в опорной плите.

**ВНИМАНИЕ:** держать образец нужно только за трубу 3. Запрещается брать образец за рабочий участок 2 с установленными тензорезисторами.

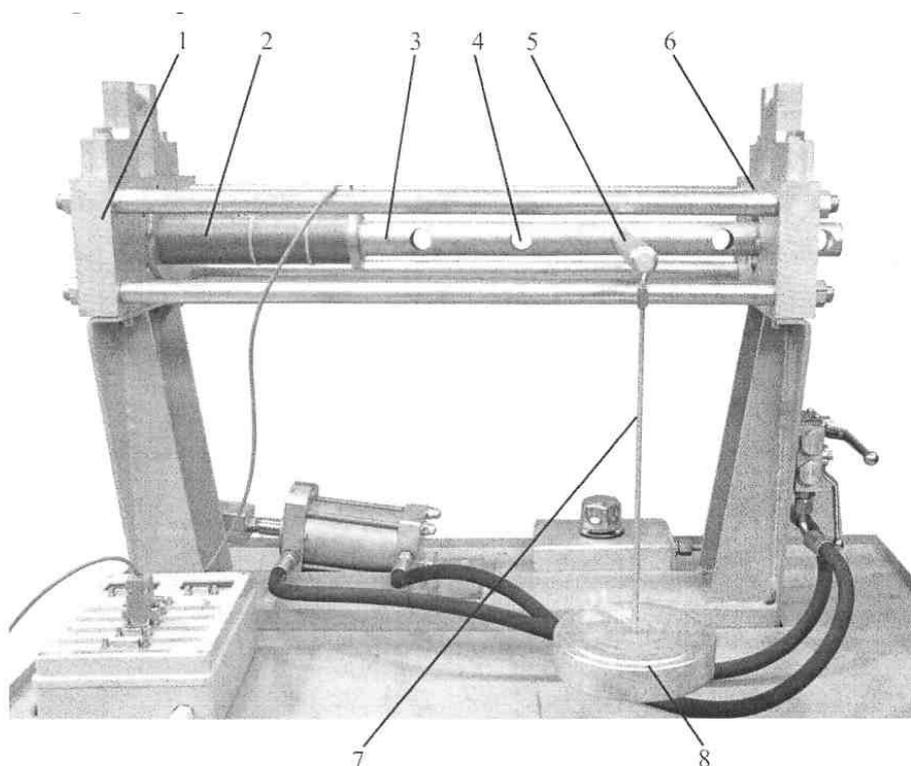


Рисунок 64 - Сборка стенда для лабораторной работы

2. Закрепить устройство заделки образца в левой опорной плите (рисунок 65). установить клиновым упор 1 в паз на захвате 2, между осью в захвате и опорной плитой 3. Убедиться, что клиновым упор прилегает к плите силовой рамы над захватом и под захватом, после чего нанести легкий удар по клину молотком массой 0,1 кг (в комплекте стенда) в направлении стрелки, показанной на рисунке 9.

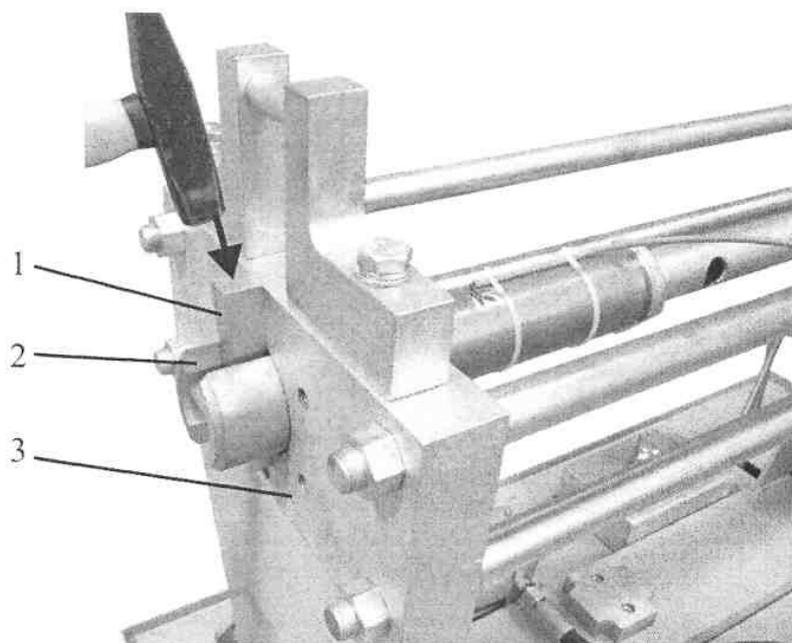


Рисунок 65 - Фиксация образца клиновым упором

3. Установить (рисунок 64) рычаг 5 нагрузителя в одно из отверстий 4 в трубе 3, в соответствии с заданным плечом изгиба. Установить фиксатор рычага в отверстие (рисунок 8). **работа без фиксатора запрещена.**
4. Выдвинуть рычаг на расстояние, соответствующее плечу кручения.

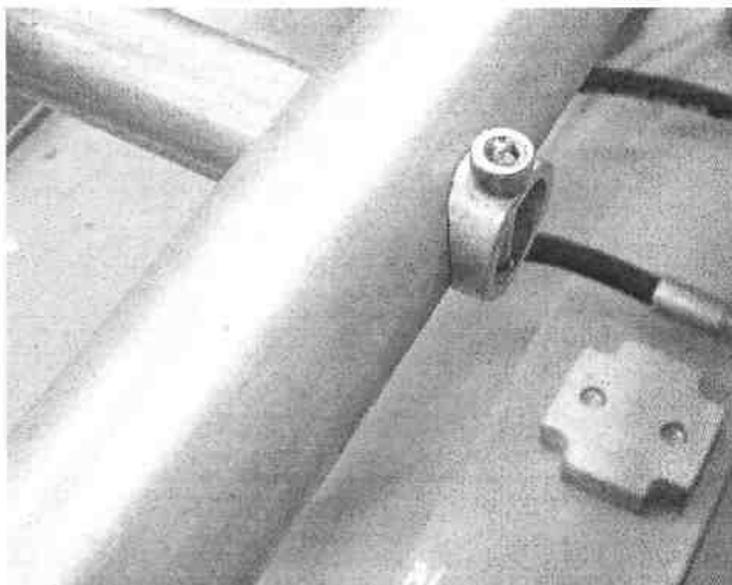


Рисунок 66 - Фиксатор рычага

5. Установить (рисунок 64) подвес 7 на рычаг 5.
6. Подключить разъем тензорезисторов к измерительно-преобразовательному блоку.
7. Выполнить пункты 2.3-2.5
8. В программе выбрать пункт меню «тензометрирование».
9. Установить флажок напротив пункта «сложное НДС». Подождать пока значения деформаций (по тензорезисторам), отображаемые программой не перестанут меняться (произойдет прогрев тензоусилителей и тензорезисторов). Это может занять 5-10 минут.
10. В программе нажать кнопку «балансировать деформации».
11. Установить (рисунок 64) грузы 8 на подвес 7, в соответствии с заданной нагрузкой.
12. записать показания тензорезисторов в таблицу 1. Тензорезистор №1 соответствует , №2 - , №3 - (по нумерации в программе «ОСМ измерения»).
13. Записать величины плеча изгиба, плеча кручения, нагрузки в таблицу 8
14. Вычислить значения главных напряжений двумя способами – по нагрузке и по показаниям тензорезисторов. Сравнить полученные значения. Сделать выводы.

Дополнительные данные:

Модуль упругости образца  $E=72$  Гпа, коэффициент Пуассона  $\mu=0,32$ .

Наружный диаметр образца  $D=50\pm 0,1$  мм.

Толщина стенки  $t=1,05\pm 0,05$  мм.

Таблица 8 - Протокол испытаний

Расчет по нагрузке							
$L$ , мм		$M=PL$ ,		,		,	
$P$ , Н		Н·мм		МПа		МПа	
		$T=Pl$ ,		,		,	
$l$ , мм		Н·мм		МПа		МПа	
Расчет по тензометрированию							
				,	МПа		
				,	МПа		

### Контрольные вопросы

1. При испытании в материале вала на кручение с изгибом какое напряженное состояние возникает?
2. Как определить значения  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$  с помощью круга Мора?
3. Какими компонентами определяются деформированное и напряжённое состояния на поверхности детали?
4. Сколько тензорезисторов содержит розетку?
5. Как определить напряжения, применяя тензорезисторы?
6. Какую роль вводится угол  $45^\circ$  в формулу при сравнении теоретического и опытного значений угла  $\alpha_0$ ?

### Задачи для самостоятельного решения

**Пример.** Направляющий шкив шахтной подъемной установки весом 800 кГ несет вертикальную нагрузку 10,2Т. шкив жестко соединен с осью и расположен посередине пролета. Расстояние между опорами 700 мм. Определить минимально допустимый диаметр оси, обеспечивающий прочность на изгиб, принимая допусковое напряжение материала  $1200$  кГ/см<sup>2</sup>

*Решение:* Нагрузка на ось

Изгибающий момент — ————

Осевого момент сопротивления — ————

Диаметр оси ———— ————

Ответ: 120 мм

1. Ось шкива подъемной установки диаметром 140 мм воспринимает нагрузку от закрепленного посередине направляющего шкива 14 Т. Расстояние между опорами оси 800 мм. Определить напряжение, возникающее в материале оси.

Ответ: 1040 кГ/см<sup>2</sup>

2. Блок скреперной установки закреплен на оси диаметром 42 мм. Нагрузка на блок 950 кГ. Расстояние между опорами оси блока 230 мм. Определить наибольшее напряжение в материале оси.

Ответ: 740 кГ/см<sup>2</sup>

3. Вал поворотной платформы вращается от электродвигателя через редуктор. Диаметр вала 110 мм, напряжение во время поворота платформы 900 кГ/см<sup>2</sup>. Определить крутящий момент, передаваемый валом.

Ответ: 2349 кГм

4. Вал шибера затвора получает крутящий момент 3180 кГ см от звездочки цепи и приводит в движение шибера с помощью рейки. При этом в опасном сечении вала возникает касательное напряжение 600 кГ/см<sup>2</sup>. Чему равен диаметр вала?

Ответ: 30 мм

5. Приводной вал кругового опрокидывателя вагонеток передает посредством фрикционного барабана крутящий момент 23180 кГ см. диаметр вала 100 мм. Определить, какое напряжение возникает в материале вала.

Ответ: 118 кГ/см<sup>2</sup>

6. Углесос приводится в действие через промежуточный вал. Мощность двигателя 50 кВт, скорость вращения 1485 об/мин. Определить диаметр вала, если при работе углесоса материал вала испытывает напряжение 980 кГ/см<sup>2</sup>.

Ответ: 26 мм

7. определить длину подшипника трения скольжения для оси шахтной вагонетки, если диаметр цапфы 60 мм. Нагрузка на цапфу 2500 кГ, удельное давление 45 кГ/см<sup>2</sup>.

Ответ: 92 мм

8. определить длину подшипников трения скольжения для оси направляющего шкива шахтной подъемной установки, если нагрузка на ось 14 т, диаметр цапфы оси 140 мм, удельное давление 40 кГ/см<sup>2</sup>

Ответ: 125 мм

9. опорные подшипники барабана подъемной машины длиной 140 мм каждый воспринимает нагрузку 14 Т через две цапфы диаметром 200 мм. Определить удельное давление в опорах

Ответ: 25 кГ/см<sup>2</sup>

Лабораторная работа № 9  
**Исследование устойчивости сжатого стержня  
(определение критической силы)**

*Цель работы:* экспериментальное определение нагрузки потери устойчивости продольно-сжатого стержня.

*Теоретические основы.*

Под *устойчивостью* понимается свойство системы сохранять свое состояние при внешних воздействиях. Если система таким свойством не обладает, она называется *неустойчивой*, также можно сказать, что *неустойчивым* является ее состояние.

В реальных условиях всегда существуют определенные причины, по которым может произойти отклонение от исходного равновесного состояния. Следовательно, возможность перехода к новому состоянию в неустойчивой системе всегда реализуется. В этом случае говорят, что произошла *потеря устойчивости*.

Наиболее простым случаем является потеря устойчивости центрально сжатого стержня (рисунок 67а). при достаточно большой силе стержень не может сохранять прямолинейную форму и изогнется.

Еще одним примером потери устойчивости может быть тонкостенная труба, нагруженная внешним давлением (рисунок 67б), при этом круговая форма сечения переходит в эллиптическую, а затем труба полностью сплющивается, хотя напряжения к моменту потери устойчивости не достигают предела текучести.

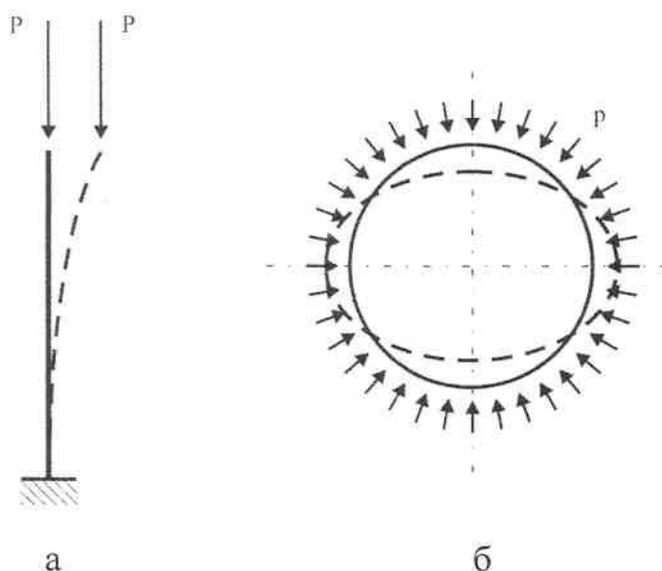


Рисунок 67 - Потеря устойчивости при нагружении конструкций

Поэтому для надежной работы конструкции мало, чтобы она была прочна, необходимо чтобы все ее элементы были устойчивы. Поэтому в ряде случаев помимо проверки на прочность, необходима проверка на устойчивость.

Рассмотрим достаточно длинный по сравнению с его поперечными размерами стержень, шарнирно-прикрепленный к опорам (рисунок 68) и нагрузим его сверху центральной силой  $F$ , постепенно возрастающей. Пока сила  $F$  сравнительно мала. Стержень будет сохранять прямолинейную форму. При отклонении стержня в сторону, он будет после ряда колебаний возвращаться к первоначальной форме, как только будет удалена сила, вызвавшая отклонение. При постепенном увеличении силы  $F$  стержень будет все медленнее возвращаться к первоначальному положению при проверках его устойчивости. Силу  $F$  можно довести до такой величины, при которой стержень после небольшого отклонения в сторону уже не выпрямится, а останется искривленным. Если не удаляя силы  $F$ , выпрямить стержень, то он уже не сможет сохранить прямолинейную форму. При этом значение силы  $F$ , называемом *критическим*,  $F_K$ , прямолинейная форма перестает быть устойчивой формой равновесия сжатого стержня. Критическая сила  $F_K$  вызывает в сжатом стержне напряжение, называемое «критическим напряжением»  $\sigma_K = F_K/A$ . Критические напряжения являются опасными напряжениями для сжатого стержня. Поэтому чтобы обеспечить устойчивость прямолинейной формы стержня к условию прочности добавляют условие устойчивости:

$$\sigma \leq \frac{F_K}{A} \quad (41)$$

где  $\sigma$  – допускаемое напряжение на устойчивость, равное критическому, деленному на коэффициент запаса на устойчивость

$$\sigma = \frac{F_K}{A} \cdot K \quad (42)$$

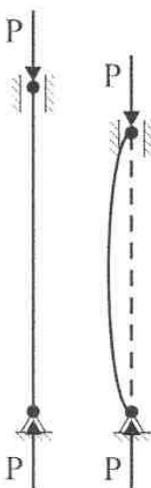


Рисунок 69 - Устойчивость продольно сжатого стержня

Для нахождения критических напряжений  $\sigma_K$  необходимо вычислить критическую силу  $F_K$ , т.е. наименьшую осевую сжимающую силу, способную удержать в равновесии слегка искривленный сжатый стержень. Впервые эта задача была поставлена и решена Л.Эйлером.

Рассмотрим прямой стержень постоянного сечения, шарнирно закрепленный в опорах (рисунок 70). нагрузим стержень центрально приложенными продольными сжимающими силами  $F=F_K$  и дадим ему весьма небольшое искривление в плоскости наименьшей жесткости.

Рассмотрим условия, при которых возможно равновесие стержня с изогнутой осью.

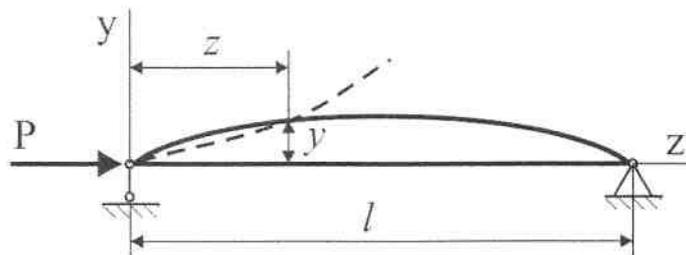


Рисунок 70 - Задача Эйлера

Обозначим координаты точек упругой линии стержня  $z$  и  $y$ . При малых прогибах

$$(41)$$

где  $E$  – модуль упругости,

$J$  – минимальный момент инерции сечения,

$M$  – изгибающий момент.

Изгибающий момент  $M$  по абсолютной величине равен . Положительным считается тот момент, который увеличивает кривизну. Следовательно,

Обозначим

$$(42)$$

Тогда уравнение (41) примет вид

$$(43)$$

откуда

$$(44)$$

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$  должны быть выбраны таким образом, чтобы были выполнены граничные условия: при  $z=0$   $y=0$  и при  $z=l$   $y=0$ .

Отсюда  $C_2=0$  и  $C_1 \sin kl=0$ .

Последнее уравнение имеет два возможных решения: либо  $C_1=0$ , либо  $\sin kl=0$ .

В первом случае при  $C_1 = C_2 = 0$  перемещения  $y$  тождественно обращаются в нуль, и стержень имеет прямолинейную форму. Во втором случае  $kl = \pi n$ , где  $n$  – произвольное целое число. Учитывая (42), получаем

$$(45)$$

Это означает, что для сохранения криволинейной формы необходимо, чтобы сила  $F$  принимала определенное значение. Наименьшая сила  $F$ , отличная от нуля, будет при  $n=1$ ,

$$(46)$$

Эта сила называется *первой критической* или *эйлеровой силой*.

При  $n=1$ ,  $kl = \pi$ , и уравнение упругой линии стержня принимает вид

$$(47)$$

Стержень изгибается по полуволне синусоиды с максимальным прогибом  $C_1$ .

При достижении внешней нагрузкой первой критической силы стержень в виду присутствия в его геометрии начальных несовершенств теряет устойчивость. В случае кинематического нагружения стержень переходит в новую форму равновесия – искривленную, при этом напряжения и деформации в его среднем сечении резко возрастают в связи с возникновением изгибающего момента. Таким образом, потеря устойчивости по первой форме может быть легко зафиксирована двумя тензодатчиками, установленными вдоль оси стержня в его среднем сечении (рисунок 71)

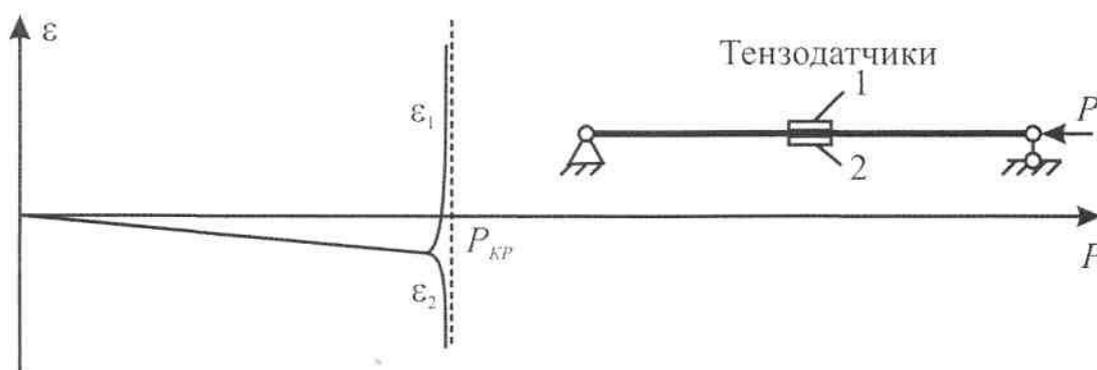


Рисунок 71 - Зависимость деформаций от сжимающей силы

### Экспериментальная часть.

1. Установить гидроцилиндр 2 на силовую раму стенда (рисунок 72) завернув два винта 1 и 3 на М10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.

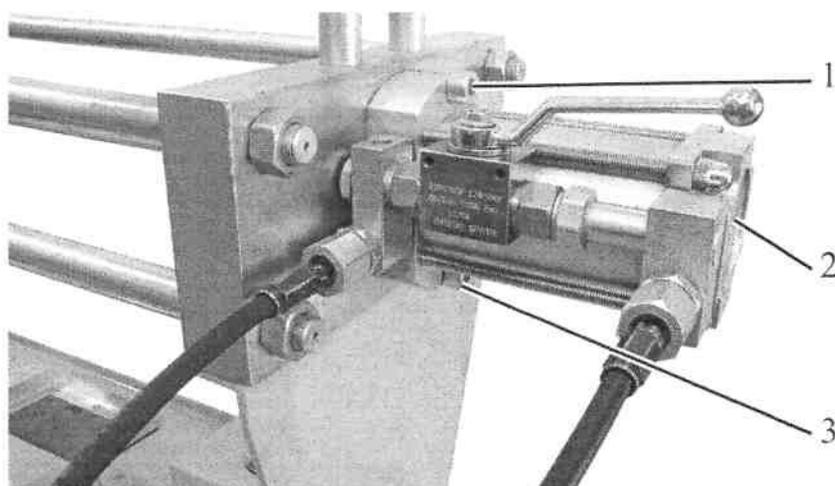


Рисунок 72 - Установка гидроцилиндра

2. Установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рисунок 73) на силовую раму станда (рисунок 74). наворачивание и затяжку гайки необходимо производить «от руки», применение гаечного ключа не требуется.

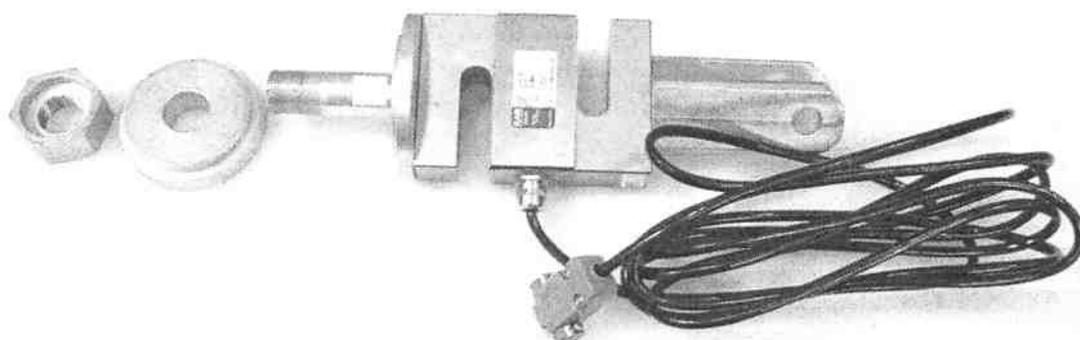


Рисунок 73 - Силовой измеритель на 50 кН с держателем

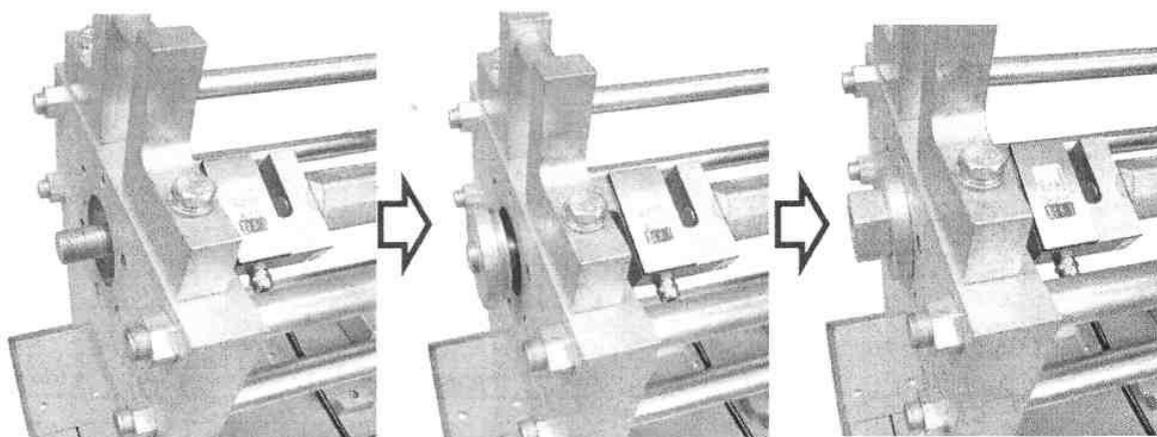


Рисунок 74 - Монтаж силоизмерителя на 50 кН

3. Измерить ширину  $b$  и толщину  $t$  образца, вычислить наименьший момент инерции поперечного сечения  $J_x$ , занести данные в таблицу 9.
4. Установка образца показана на рисунке 75 с помощью насоса сдвинуть гидроцилиндр в положение, обеспечивающее возможность установки образца с промежуточными опорами (закреплены на образце резиновыми кольцами) между основаниями вилок гидроцилиндра и силоизмерителя.

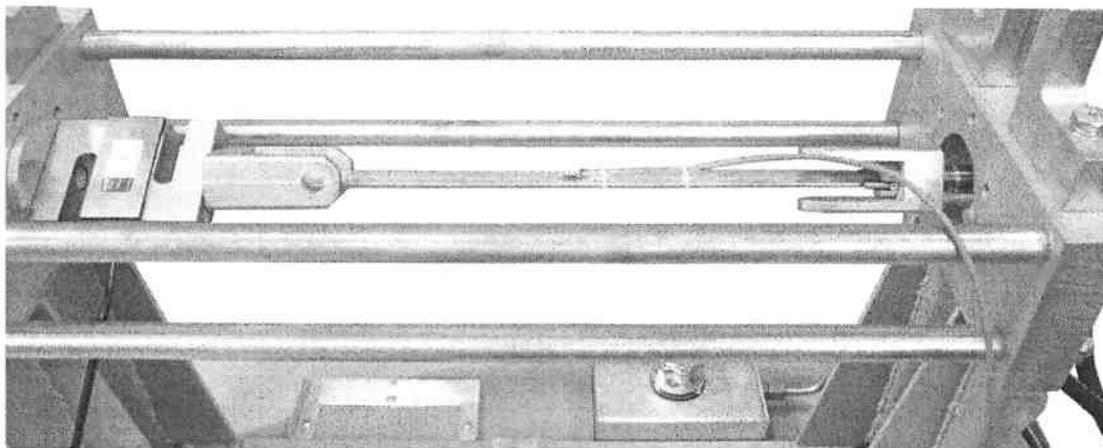


Рисунок 75 - Сборка стенда для проведения лабораторной работы

5. Образец установить промежуточной опорой с цилиндрическим центрирующим выступом большого диаметра в вилку силоизмерителя. После этого совместить ось второй промежуточной опоры с осью вилки гидроцилиндра (рисунок 76) и произвести выдвигание гидроцилиндра до входа цилиндрического выступа в отверстие в вилке.

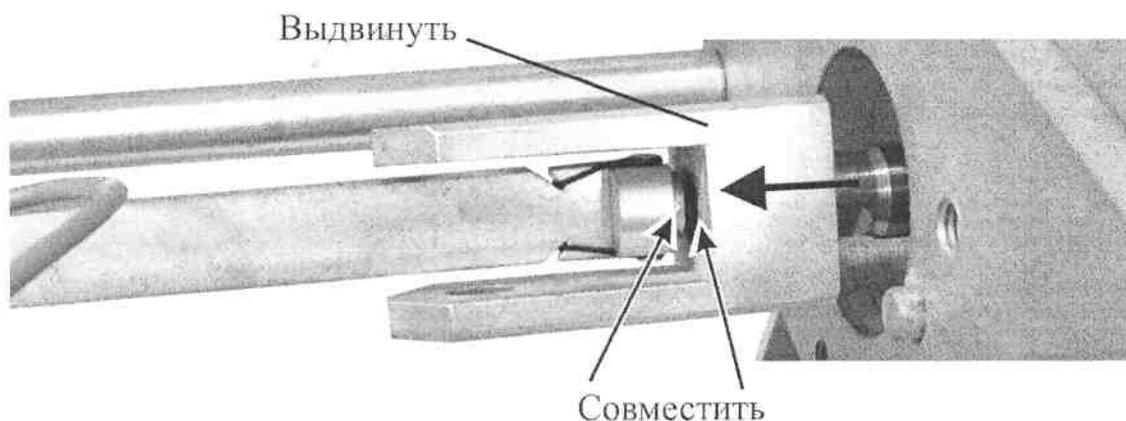


Рисунок 76 - Установка образца в вилку гидроцилиндра

6. Подключить разъемы силоизмерителя на 50 кН, тензодатчиков, установленных на образце к измерительно-преобразовательному блоку.
7. Выполнить пункты 3-5.
8. В программе выбрать пункт меню «тензометрирование».

9. Установить флажок напротив пункта «устойчивость». Подождать пока значения деформаций (по тензорезисторам), отображаемые программой не перестанут меняться (произойдет прогрев тензоусилителей и тензорезисторов). Это может занять 5-10 минут.
10. В программе нажать кнопку «балансировать деформации».
11. перевести краны в положение, соответствующее выдвиганию штока гидроцилиндра.
12. начать прикладывать нагрузку к образцу плавно вращая рукоятку привода насоса против часовой стрелки. Увеличить усилие, действующее на образец, на 0,1 кН. Текущее значение усилия следует наблюдать по программе «ОСМ измерения».
13. Добавить текущие значения силы и деформаций на график, нажав в программе кнопку «добавить текущие значения».
14. Выполнить действия по п.п. 12-13 до тех пор, пока деформации не начнут резко возрастать и не превысят . ДАЛЬНЕЙШЕЕ НАГРУЖЕНИЕ ОБРАЗЦА ЗАПРЕЩЕНО, поскольку оно может привести к возникновению в нем пластических деформаций.
15. Снять нагрузку с образца, для этого следует установить ручки обоих кранов горизонтально.
16. Перевести краны в положение, соответствующее втягиванию гидроцилиндра.
17. Вращая приводную рукоятку насоса, задвинуть гидроцилиндр до освобождения образца, образец при этом следует поддерживать рукой. Вынуть образец.
18. Демонтировать гидроцилиндр, силоизмеритель, и разложить все элементы на их места в ящиках и на стенде. Выключить питание измерительно-преобразовательного блока. Выйти из программы.
19. По графику «деформации - сила» определить величину силы, соответствующую потере устойчивости, занести значение в таблицу 10.
20. Определить критическую силу по формуле Эйлера, занести значение в таблицу 2. Сравнить полученные значения. Сделать выводы.

Таблица 9 - Геометрические параметры образца

t, мм	b, мм	l, мм	$J_x, \text{мм}^4$

Таблица 10 - Протокол испытаний

Экспериментально полученная нагрузка потери устойчивости, Н	Первая критическая сила по формуле Эйлера, Н

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение продольному изгибу.
2. Дайте определение критической силе.
3. Критическая сила, от чего зависит ее величина?
4. Применимость формулы Эйлера?
5. Имеет ли значение закрепление концов сжатых стержней?
6. В каких случаях применима формула Эйлера при определении критического напряжения?
7. Дайте определение гибкости стержня.
8. Дайте определение предельной гибкости.
9. Каким образом можно определить критическую нагрузку?

## Лабораторная работа № 10.

### Определение центра изгиба тонкостенного не замкнутого профиля.

*Цель работы:* экспериментальное определение центра изгиба тонкостенного замкнутого профиля.

#### *Теоретические основы.*

К числу наиболее распространенных тонкостенных стержней относятся прокатные профили, сварные балки и т.п. Толщина профиля (стенки поперечного сечения)  $\delta$  мала по сравнению с размерами поперечного сечения. В тонкостенных стержнях (открытого профиля) возникают явления, которые не могут быть учтены прежними моделями кручения и изгиба стержней.

Система сил, лежащих в плоскости сечения, в соответствии с законами механики может быть приведена к любой точке плоскости в виде равнодействующей силы и момента.

Величина равнодействующей не зависит от точки приведения и во всех случаях равна поперечной силе  $Q$ . В случае кругового незамкнутого профиля (рисунок 77) касательные напряжения в плоскости, перпендикулярной к оси симметрии равны

$$\tau_{\text{max}} = \frac{2Q}{\pi R \delta} \quad (48)$$

равнодействующая касательных сил по оси  $y$  определяется следующим интегралом:

$$Q_y = \int \tau_{\text{max}} \delta \sin \psi \, d\psi \quad (49)$$

который, как легко установить, равен  $Q$ .

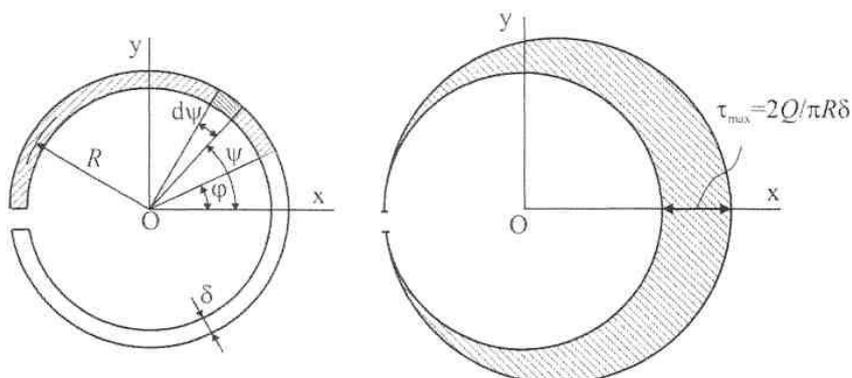


Рисунок 77 - Касательные напряжения в незамкнутом сечении при поперечном изгибе.

Равнодействующий момент в сечении зависит от положения точки приведения сил. Так в случае незамкнутого круглого профиля момент касательных сил относительно центра круга (рисунок 78) будет

$$— \quad (50)$$

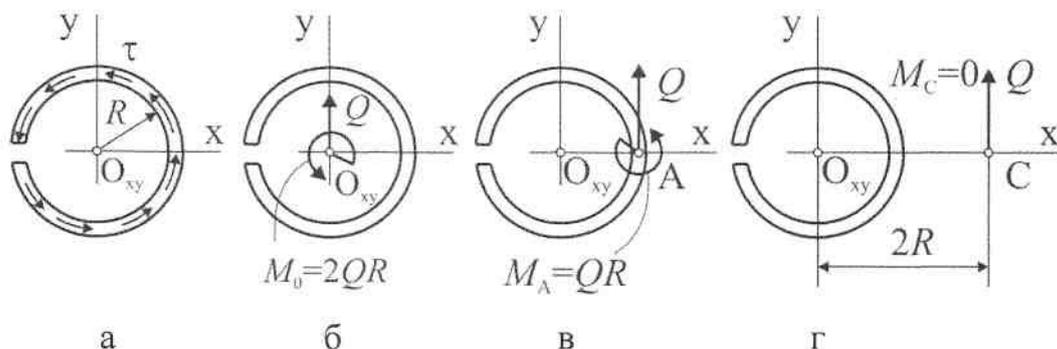


Рисунок 78 - Приведение равнодействующих к различным точкам

При переходе к другой точке момент изменится на величину  $Qa$ , где  $a$  – расстояние от первой точки до второй. Так если привести силы к точке А (рисунок 78в), то

$$(51)$$

Существует такая точка, относительно которой момент касательных сил в сечении при поперечном изгибе равен нулю. Эта точка называется *центром изгиба*. В данном случае центр изгиба находится на расстоянии  $2R$  от центра круга (рисунок 78 г).

Для сечений, имеющих две оси симметрии, центр изгиба совпадает с центром тяжести.

Если момент касательных сил в сечении относительно центра изгиба равен нулю, то и момент внешних сил относительно центра изгиба должен быть равен нулю, иначе в брус будут возникать деформации, свойственные не только поперечному изгибу, но и кручению.

Соответственно, целесообразно при определении внутренних силовых факторов приводить касательные силы в сечении не к центру тяжести. А к центру изгиба. И под крутящим моментом понимать соответственно внутренний момент относительно центра изгиба. Так с случае стержня, показанного на рисунке 79, можно сказать. Что поскольку линия действия силы проходит через ось  $z'$  (ось центра изгиба), то крутящий момент в сечении равен нулю, и стержень закручиваться не будет.

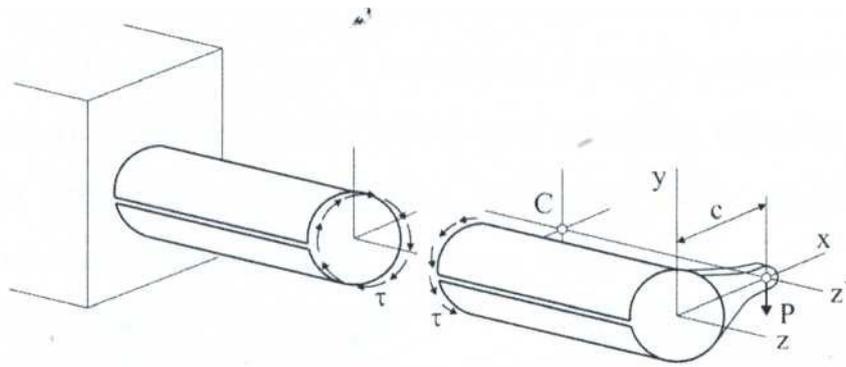


Рисунок 79 - Центр изгиба

*Экспериментальная часть.*

Экспериментально центр изгиба может быть найден следующим образом: нужно передвигать точку приложения силы  $F$  вдоль оси  $x$  (расстояние  $c$ ) (рисунок 79) и отслеживать угол поворота сечения какого-либо сечения. В случае, если сила будет приложена в центре изгиба, то стержень закручиваться не будет, т.е. угол поворота любого сечения будет равен нулю.

Если к скручиваемой трубе радиально прикрепить тонкий стержень (рисунок 80), то при малых углах поворота величина угла поворота может быть определена следующим образом:

$$(52)$$

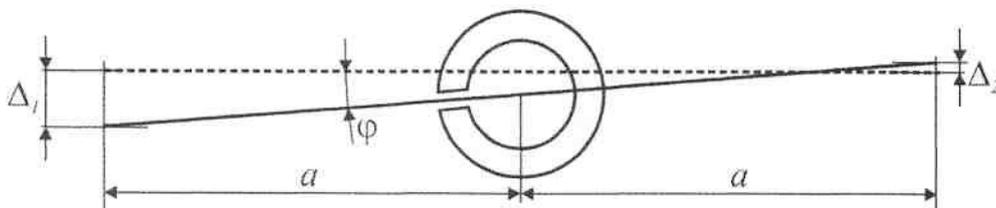


Рисунок 80 - Определение угла закручивания

Если построить график зависимости угла от расстояния  $c$  то точка пересечения этого графика с нулем даст значение  $c$ , соответствующее центру изгиба.

1. Установить образец для определения центра изгиба. Для этого наклонить образец в вертикальной (рисунок 81) плоскости так, чтобы устройство подвеса грузов оказалось внизу, после чего завести образец этим устройством в отверстие в левой опорной плите. Далее продвинуть образец влево, после чего вставить образец устройством заделки в правую опорную плиту, совместив паз в устройстве заделки со штифтом в опорной плите (рисунок 82).

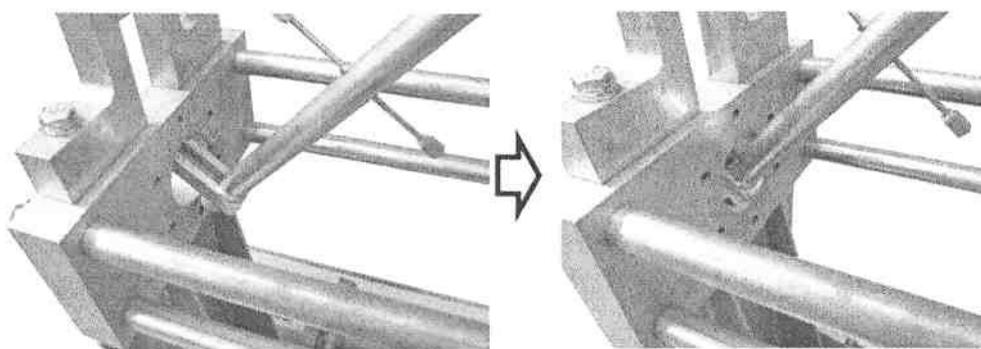


Рисунок 81 - Установка образца в левую опорную плиту

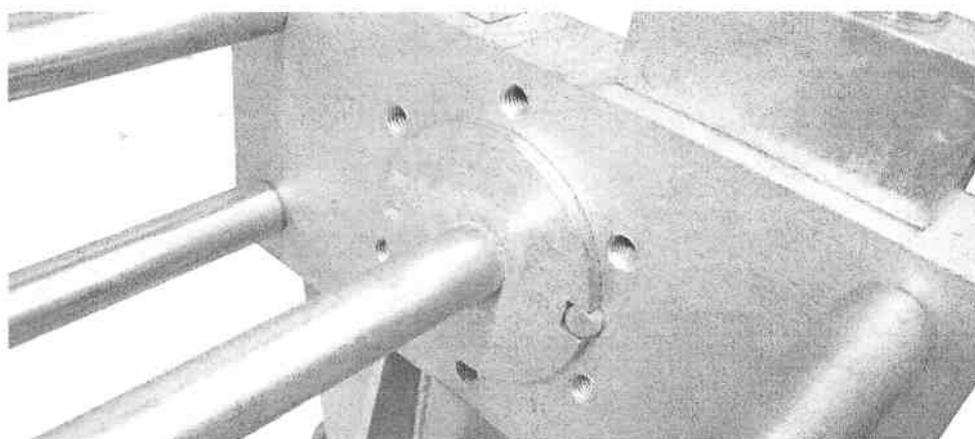


Рисунок 82 - Установка образца в правую опорную плиту

2. Закрепить устройство заделки образца в правой опорной плите (рисунок 83). Установить клиновидный упор 1 в паз на захвате 2, между осью в захвате и опорной плитой 3. Убедиться, что клиновидный упор прилегает к плите силовой рамы над захватом и под захватом, после чего нанести легкий удар по клину молотком массой 0,1 кг (в комплекте стенда) в направлении стрелки, показанной на рисунке 83.

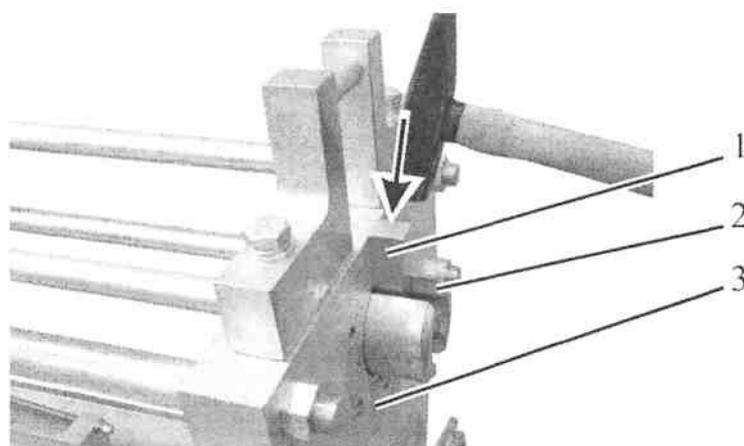


Рисунок 83 - Фиксация образца клиновым упором

3. Установить (рисунок 84) модуль крепления микрометра 1 так, чтобы отверстие в кронштейне 3 располагалось над упором 4 (при необходимости нужно переставить кронштейн 3 на соседнее отверстие в модуле 5). Установить микрометр 2 в кронштейне 3 и зафиксировать с помощью винта. Аналогичные действия выполнить для второго микрометра.

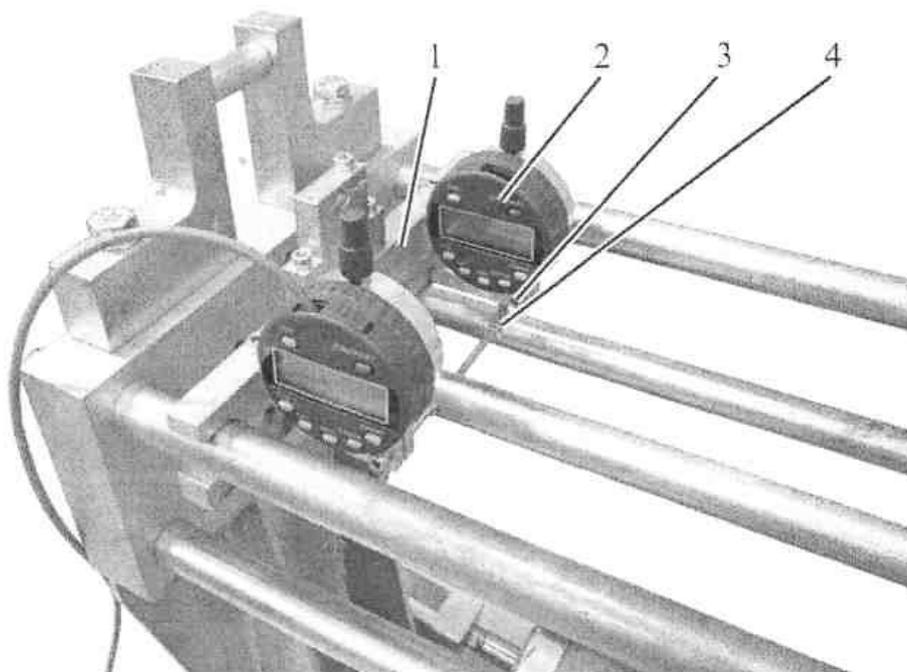


Рисунок 84 - Установка микрометров

4. Установить (рисунок 85) подвес 4 на фиксатор 3.
5. Установить (рисунок 85) фиксатор 3 на расстоянии 0 мм от оси образца, расстояние отмерять по линейке 2 нанесенной на устройство нагружения 1. Первое большое деление линейки соответствует оси образца.
6. Установить показания микрометров на «0», нажав кнопку «zero».
7. Установить (рисунок 85) три груза массой 1 кг на подвес 4.
8. Занести показания микрометров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  и расстояние от оси образца в таблицу 11.
9. Убрать грузы с подвеса, ослабить фиксатор 3 и сдвинуть его на 3-4 мм.
10. Выполнить действия по пунктам 7-9 до полного смещения фиксатора вправо.
11. По данным таблицы 1 построить график зависимости  $\varphi(c)$  (точечный), методом наименьших квадратов провести через полученные точки прямую линию. Абсцисса точки пересечения этой прямой с осью абсцисс соответствует расстоянию от оси образца до центра изгиба. (построение графиков и проведение прямой рекомендуется выполнять средствами Excel или аналогичных программ).
12. Сравнить полученное значение с теоретическим, равным среднему диаметру образца. Сделать выводы.

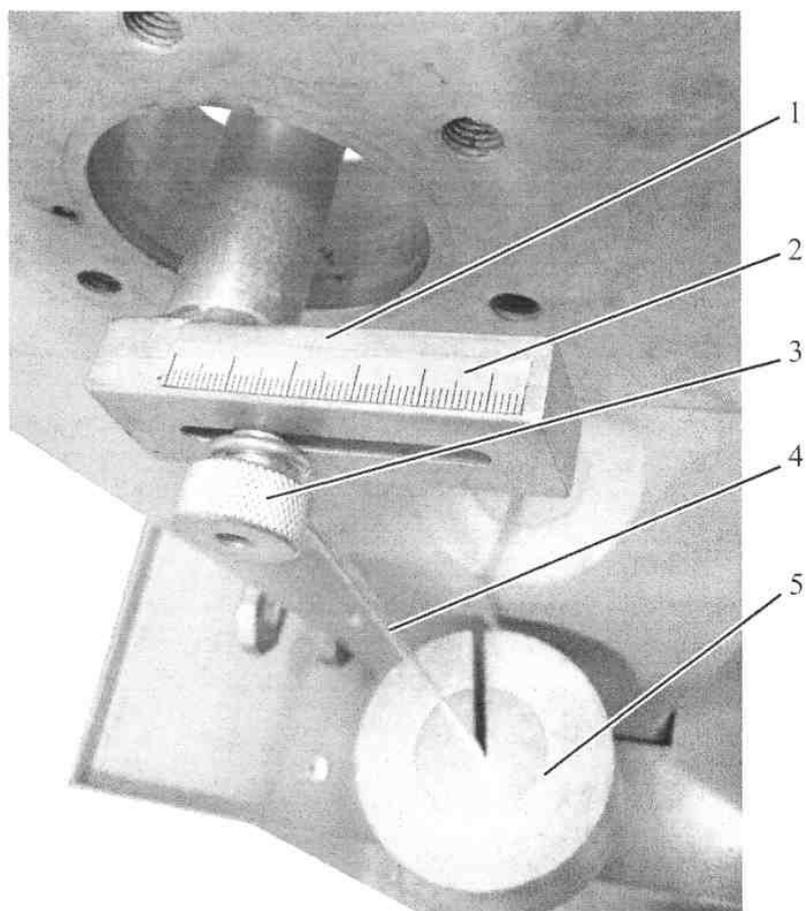


Рисунок 85 - Установка грузов

*Дополнительные данные:*

*Длина от оси образца до центра упора микрометра  $a = 60$  мм.*

*Наружный диаметр образца  $D = 22$  мм.*

*Внутренний диаметр образца  $d = 18$  мм.*

Таблица 11 - Протокол испытаний

$c$ , мм	$\Delta_1$ , мм	$\Delta_2$ , мм	$\varphi = (\Delta_1 - \Delta_2)/2a$

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение плоскому изгибу.
2. Дайте определение чистому и поперечному изгибам.
3. При изгибе какие внутренние силовые факторы возникают в поперечных сечениях бруса?
4. Дайте определение нейтральному слою и нейтральной оси в балке.
5. Запишите формулу нормального напряжения.
6. Определение нормальных напряжений опытным путем.
7. Определение нормальных напряжений при изгибе при помощи тензометров.
8. Решите задачу лабораторной работы методом сечений.
9. Дайте определение максимально допустимой величины нагрузки.
10. Запишите формулы для расчета величины максимальных напряжений при изгибе.
11. Дайте определение главных площадок при изгибе

## Лабораторная работа №11.

### Экспериментальная оценка концентрации напряжений около отверстия в растягиваемой полосе.

*Цель работы:* экспериментальное исследование распределения напряжений в растягиваемой полосе с отверстием.

#### *Теоретические основы.*

В области резких изменений в форме упругого тела (входящие углы, отверстия, выточки), а также в зоне контакта деталей возникают повышенные напряжения.

Например, при растяжении полосы с небольшим отверстием (рисунок 10.1 а) закон равномерного распределения напряжений вблизи отверстия нарушается. напряженное состояние становится двухосным, а у края отверстия появляется пик напряжения. Данная особенность распределения напряжений получила название *концентрации напряжений*. Зона распространения повышенных напряжений ограничена узкой областью, расположенной в окрестности очага концентрации, или концентратора напряжений. В связи с локальным характером распределения эти напряжения называются *местными напряжениями*.

Величина местных напряжений в зависимости от геометрической формы детали определяется обычно теоретически при помощи методов математической теории упругости. Часто при определении местных напряжений используется также испытание моделей.

Основным показателем местных напряжений является *теоретический коэффициент концентрации напряжений*:

$$\sigma_{\text{max}} = k_T \sigma_{\text{ном}}, \quad (53)$$

где  $\sigma_{\text{max}}$  – наибольшее местное напряжение,  
 $\sigma_{\text{ном}}$  – так называемое *номинальное напряжение*.

Это, то напряжение, которое определяется по формулам сопротивления материалов без учета эффекта концентрации. Обычно подсчет  $\sigma_{\text{ном}}$  ведется по наиболее ослабленному сечению детали, как, например, по сечению AA (рисунок 87а):

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{F}{A}, \quad (54)$$

Номинальное напряжение выбирается в первую очередь из соображений, связанных с простой расчета. Величина теоретического коэффициента концентрации определена для большинства встречающихся на практике типовых конструктивных элементов. Данные по величине  $k_T$  приводятся в виде таблиц и графиков в справочной литературе. На рисунке 87б приведена

зависимость теоретического коэффициента концентрации от соотношения геометрических размеров для полосы с отверстием.

Экспериментальное определение напряжения в точках образца выполнено путем тензометрирования. На рисунке 88 показан фрагмент образца с установленным на нем тензорезисторами и приведены обозначения, используемые в дальнейшем изложении.

На рисунках 89 и 90 приведено распределение нормальных напряжений, направленных вдоль оси образца для случая  $d/b=1/5$ . На рисунке 3 показано распределение напряжений вдоль оси образца  $Z$ , начиная от центра отверстия, на рисунке 4 вдоль оси  $X$ , начиная от центра отверстия.

Напряжения в основном сечении от внешней силы  $F$ :

$$\sigma = \frac{F}{bt}, \quad (55)$$

где  $b$  – ширина образца,  $t$  – толщина образца.

Номинальные напряжения в ослабленном сечении:

$$\sigma_n = \frac{F}{(b-d)t}, \quad (56)$$

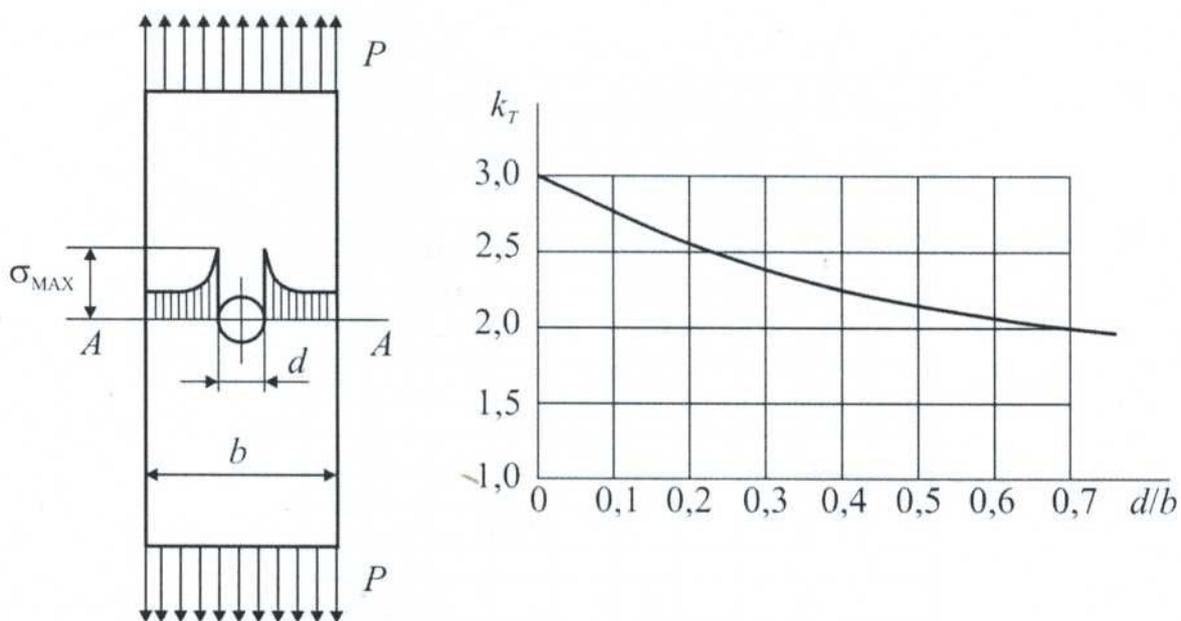


Рисунок 87 - Концентрация напряжений около отверстия

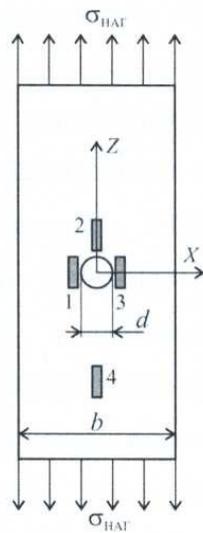


Рисунок 88 - Расположение тензорезисторов

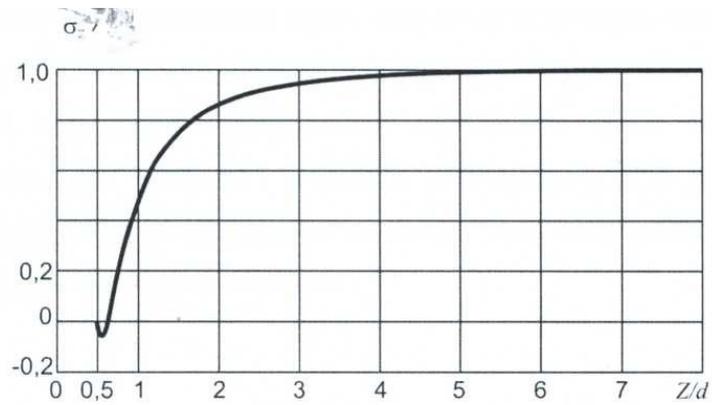


Рисунок 89 - Распределение нормальных напряжений вдоль оси образца  $Z$

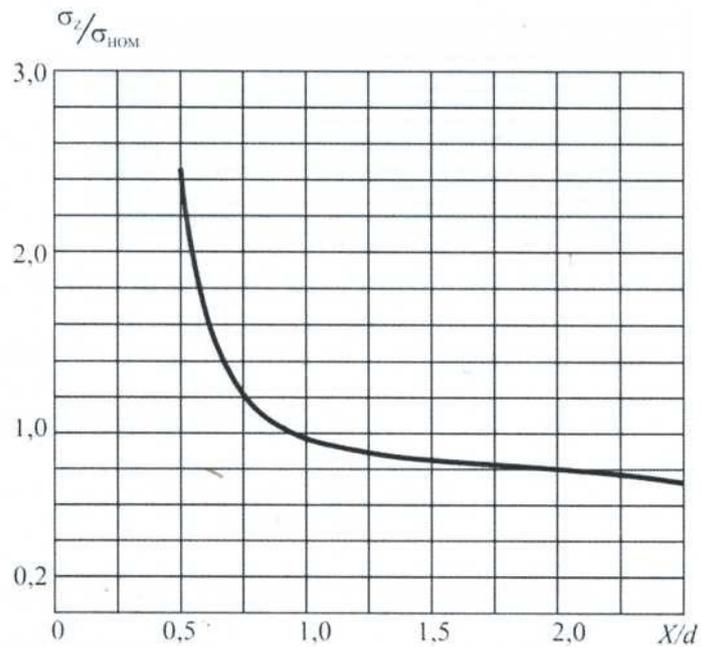


Рисунок 90 - Распределение нормальных напряжений вдоль оси  $X$  образца

Тензометрирование нагруженных тел позволяет определить компоненты тензора деформации в точках установки тензорезисторов. Тензорезистор представляет собой датчик, сопротивление которого зависит от его деформации. Тензорезисторы выполняются из тонких пленок или проволоки из проводящих материалов (рисунок 91), помещенных между двумя слоями пленок из изолирующих материалов. Универсальные тензорезисторы имеют следующую структуру: решетчатый чувствительный элемент из тонкой металлической резистивной фольги (толщиной 3-6 мкм) кладется на основу из тонкой пластмассовой пленки (толщиной 15-16 мкм) и ламинируется тонкой пленкой. На краю тензорезистора выполняют площадки для внешнего подсоединения проводов. Тензорезисторы устанавливают на конструкции путем наклейки. Жесткость тензорезисторов должна быть значительно меньше жесткости основной конструкции. При нагружении конструкции деформации передаются через слой клея на тензорезистор, что позволяет измерять деформации. Для зоны упругой работы конструкции по деформациям могут быть однозначно определены напряжения с помощью закона Гука.



Рисунок 91 - Пример тензорезистора

Относительное изменение сопротивления тензорезистора пропорционально деформации

$$— \quad (57)$$

где  $K$  – коэффициент тензочувствительности,

$R$  – номинальное сопротивление тензорезистора.

Для измерения изменения сопротивления тензорезистора применяют схему включения по мосту Уинстона. Тензорезистор  $R_{ТР}$  и три резистора  $R_0$  с сопротивлением, равным номинальному сопротивлению тензорезистора, соединяют в мост (рисунок 6) и запитывают постоянным напряжением  $U_{пит}$ , при этом измеряют напряжение  $U_{изм}$ . В недеформированном состоянии сопротивление тензорезистора  $R_{ТР}$  равно  $R_0$ , при этом напряжение  $U_{изм}$  равно нулю. При деформировании сопротивление тензорезистора изменяется, и напряжение  $U_{изм}$  отлично от нуля:

$$- - - \quad (58)$$

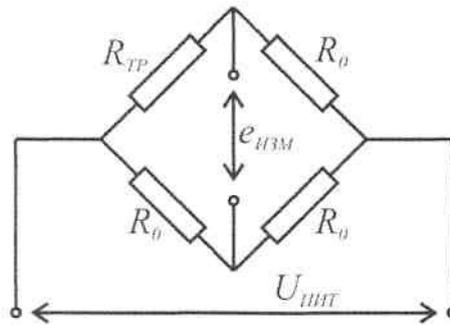


Рисунок 92 - Схема включения тензорезистора

Выходное напряжение  $U_{ИЗМ}$  подается на тензоусилитель, где увеличивается и передается на измерительные устройства. В данной испытательной машине в качестве измерительного устройства используется плата АЦП и ноутбук. Измеренное электрическое напряжение в программе «ОСМ измерения» переводится в деформацию, а затем в механическое напряжение, через модуль упругости  $E$ :

$$\text{---} \quad (59)$$

Особенностью определения деформаций и напряжений с помощью тензорезисторов является следующее: любой тензорезистор имеет конечные размеры, определяемые его измерительной базой (длиной и шириной), следовательно, он осредняет деформации в некоторой зоне конструкции. Таким образом, деформации, определенные тензометрированием в экспериментальной части работы, необходимо сравнивать с теоретически полученными деформациями, осредненными по ширине и длине тензорезистора.

### *Экспериментальная часть.*

Геометрические параметры образца:

Образец прямоугольного поперечного сечения шириной  $b = 50$  мм и толщиной  $t = 4,0$  мм. В центре образца выполнено отверстие диаметром  $d = 10$  мм. Тензорезисторы наклеены на образец. Расстояния от центра отверстия до краев измерительной решетки тензорезистора:

№1 – по оси  $X$  центр тензорезистора совпадает с центром отверстия; по оси  $Z$  – минимальное 38 мм, максимальное 43 мм;

№2, 4 – по оси  $X$  – минимальное 5,8 мм, максимальное 7,3 мм; по оси  $Z$  – центр тензорезистора совпадает с центром отверстия;

№ 3- по оси  $X$  центр тензорезистора совпадает с центром отверстия; по оси  $Z$  – минимальное 6,0 мм, максимальное 11,0 мм.

1. Установить гидроцилиндр 2 на силовую раму стенда (рисунок 93) завернув два винта 1 и 3 на М10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.

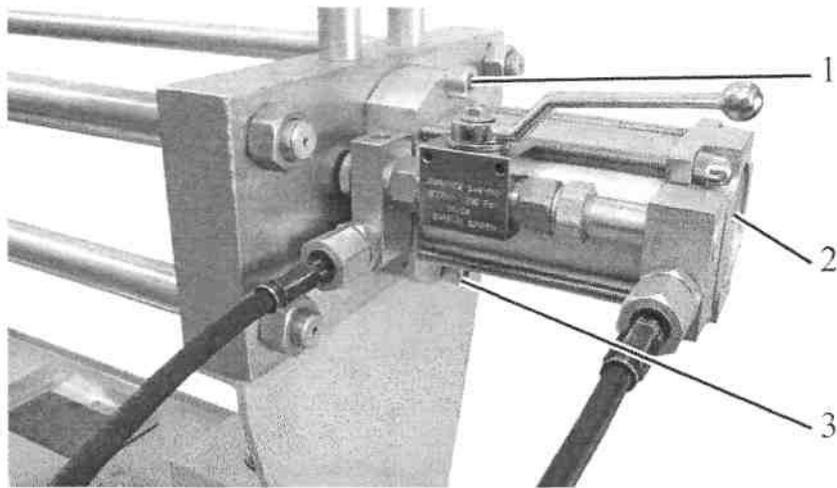


Рисунок 93 - Установка гидроцилиндра

2. Установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рисунок 94) на силовую раму стенда (рисунок 95). наворачивание и затяжку гайки необходимо производить «от руки», применение гаечного ключа не требуется.

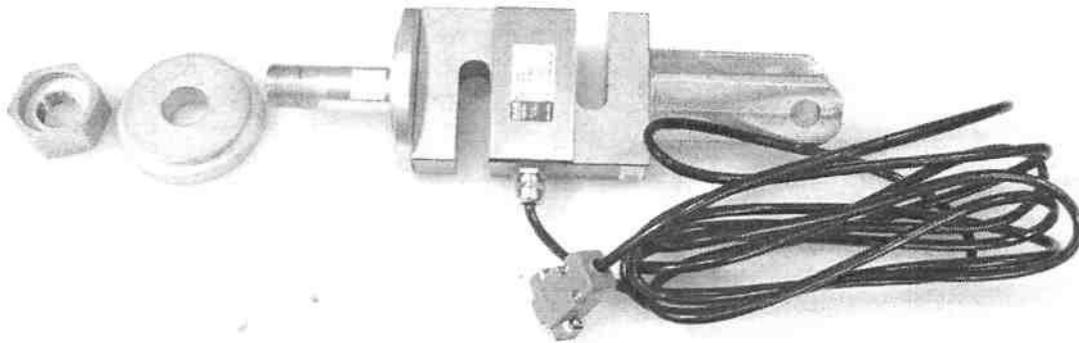


Рисунок 94 - Силовизмеритель на 50 кН с держателем

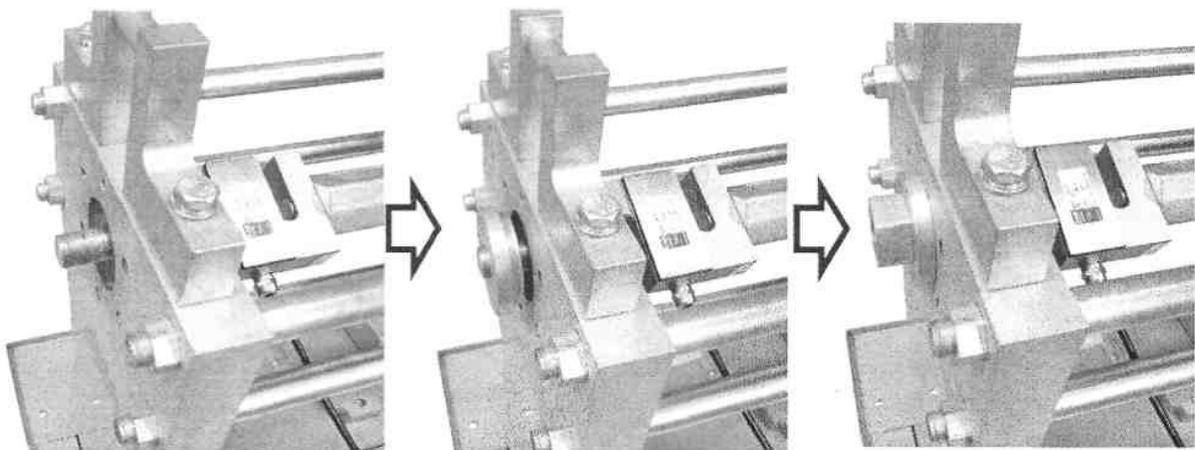


Рисунок 95 - Монтаж силоизмерителя на 50 кН

3. Установка образца показана на рисунке 96. Образец 3 установить левой частью в вилку 1 с помощью пальца 2. После этого следует с помощью насоса сдвинуть гидроцилиндр в положение, обеспечивающее возможность фиксации образца пальцем 4 в вилке 5. Работа с насосом описана в пунктах 6-8. При необходимости повернуть вилку 5. Вращать вилку гидроцилиндра следует только по ходу часовой стрелки, если смотреть со стороны вилки.

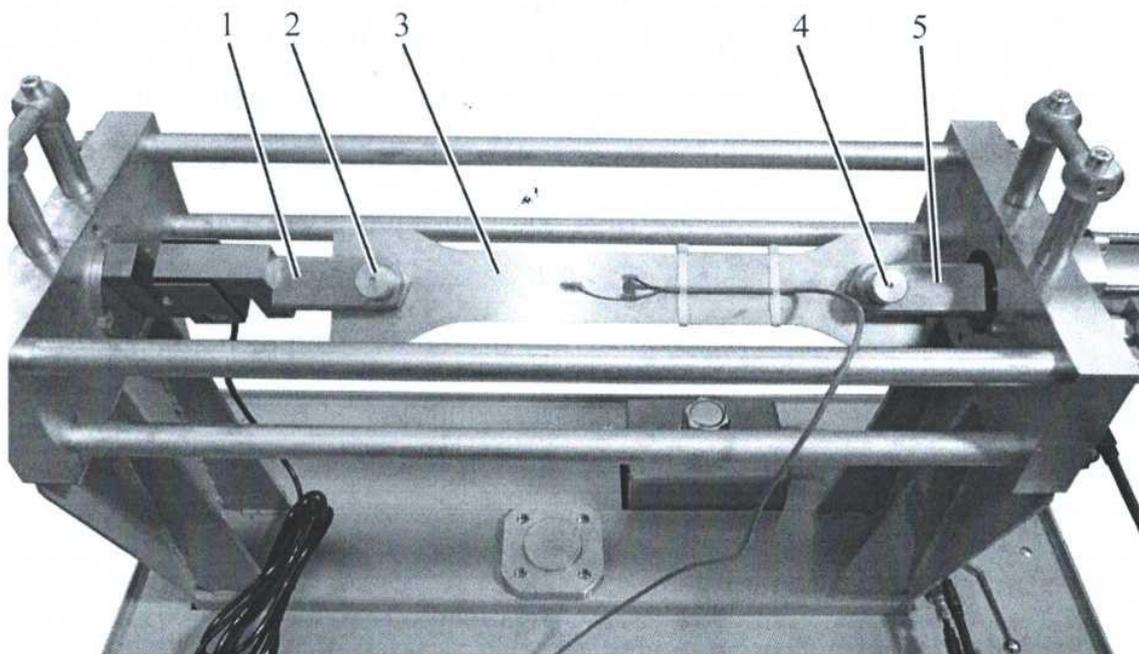


Рисунок 96 - Сборка стенда для проведения лабораторной работы

4. подключить разъемы силоизмерителя на 50 кН и тензодатчиков, установленных на образце к измерительно-преобразовательному блоку.
5. Выполнить пункты 3-5.
6. В программе выбрать пункт меню «тензометрирование».
7. Установить флажок напротив пункта «концентрация напряжений». Подождать пока значения деформаций (по тензорезисторам), отображаемые программой не перестанут меняться (произойдет прогрев тензоусилителей и тензорезисторов). Это может занять 5-10 минут.
8. В программе нажать кнопку «балансировать деформации».
9. Перевести краны в положение, соответствующее втягиванию штока гидроцилиндра.
10. Начать прикладывать нагрузку к образцу плавно вращая рукоятку привода насоса против часовой стрелки. Увеличить усилие, действующее на образец, на 3 кН. Текущее значение усилия следует наблюдать по программе «ОСМ измерения».
11. Записать значение усилия и значения деформации  $\varepsilon_{TP1}$ -  $\varepsilon_{TP4}$ , измеренных тензорезисторами в таблицу 12. Тензорезисторы пронумерованы по часовой

стрелке начиная с дальнего от кабеля (по обозначениям в программе «ОСМ измерения»).

12. Выполнить действия по п.п.11-12 до значения усилия в 20 кН.

13. Снять нагрузку с образца, для этого следует установить ручки обоих вдоль корпусов кранов.

14. Вынуть стопорные пальцы и снять образец.

15. демонтировать гидроцилиндр, силоизмеритель, и разложить все элементы на их места в ящиках и на стенде. Выключить питание измерительно-преобразовательного блока. Выйти из программы.

16. Рассчитать для значений растягивающей силы, реализованных в ходе экспериментальной части работы, значения деформаций  $\varepsilon_{TP1\_T} - \varepsilon_{TP4\_T}$  в зонах установки тензорезисторов, сравнить их с деформациями, полученными экспериментально. Сделать выводы о влиянии концентратора на распределение деформаций и упругих напряжений.

Таблица 12 Протокол испытаний

Измеренные величины				Рассчитанные величины				
$F, \text{кН}$	$\varepsilon_{TP1}$	$\varepsilon_{TP2}$	$\varepsilon_{TP3}$	$\varepsilon_{TP4}$	$\varepsilon_{TP1\_T}$	$\varepsilon_{TP2\_T}$	$\varepsilon_{TP3\_T}$	$\varepsilon_{TP4\_T}$
		-	4					

### Контрольные вопросы

1. Применимость теоремы о взаимности работ и взаимности перемещений.
2. Как можно использовать свойства теоремы о взаимности перемещений?
3. Построение линии прогибов балки, при наличии одного индикатора линейных перемещений.

Лабораторная работа № 12  
Теорема взаимности работ.

*Цель работы:* экспериментальная проверка теоремы взаимности работ на упругой балке под действием двух независимых изгибающих сил.

*Теоретические основы.*

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.

$$F_1 y_{12} = F_2 y_{21} = W. \quad (60)$$

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  $y_{12} = y_{21}$ .

При нагружении упругого тела двумя силами  $F_1$  и  $F_2$  в двух точках  $A$  и  $B$  (рисунок 97) работа этих сил может быть вычислена двумя способами.

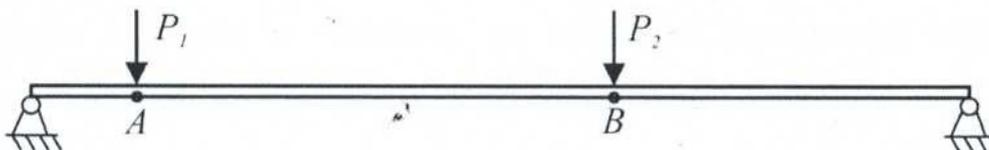


Рисунок 97 - Нагружение упругого тела

Вариант 1. Сначала к телу приложена сила  $F_1$ , тогда работа этой силы равна  $\frac{1}{2} F_1 y_A$ , при приложении силы  $F_2$  ее работа будет равна  $F_2 y_B$ , кроме того, под действием силы  $F_2$  переместится точка  $A$ , следовательно, сила  $F_1$  произведет дополнительную работу  $F_1 y_{AB}$ , где  $y_{AB}$  - перемещение точки  $A$  под действием силы  $F_2$ . Полная работа  $W$  и равна сумме этих трех работ:

$$W = \frac{1}{2} F_1 y_A + F_2 y_B + F_1 y_{AB}, \quad (61)$$

Вариант 2. Сначала к телу приложена сила  $F_2$ , тогда работа этой силы равна  $\frac{1}{2} F_2 y_B$ , при приложении силы  $F_1$  ее работа будет равна  $F_1 y_A$ , кроме того, под действием силы  $F_1$  переместится точка  $B$ , следовательно, сила  $F_2$  произведет дополнительную работу  $F_2 y_{BA}$ , где  $y_{BA}$  - перемещение точки  $B$  под действием силы  $F_1$ . Полная работа сил  $F_1$  и  $F_2$  равна сумме этих трех работ:

(62)

Очевидно, что работа, совершенная силами над упругим телом, не должна зависеть от того, в какой последовательности прикладывали силы к этому телу, следовательно:

(63)

Данное выражение можно сформулировать следующим образом: 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.

#### *Экспериментальная часть.*

1. Установить в правую опорную плиту 3 силовой рамы захват 2 для испытаний на изгиб (рисунок 11.2). Для этого его необходимо вставить в центральное отверстие плиты, совместить паз на захвате с штифтом в плите и сдвинуть до плотного прилегания захвата к внутренней плоскости плиты. Установить клиновидный упор 1 в паз на захвате, между осью в захвате и опорной плитой. Убедиться, что клиновидный упор прилегает к плите силовой рамы над захватом и под захватом, после чего нанести легкий удар по клину молотком массой 0,1 кг (в комплекте стенда) в направлении стрелки, показанной на рисунке 98.

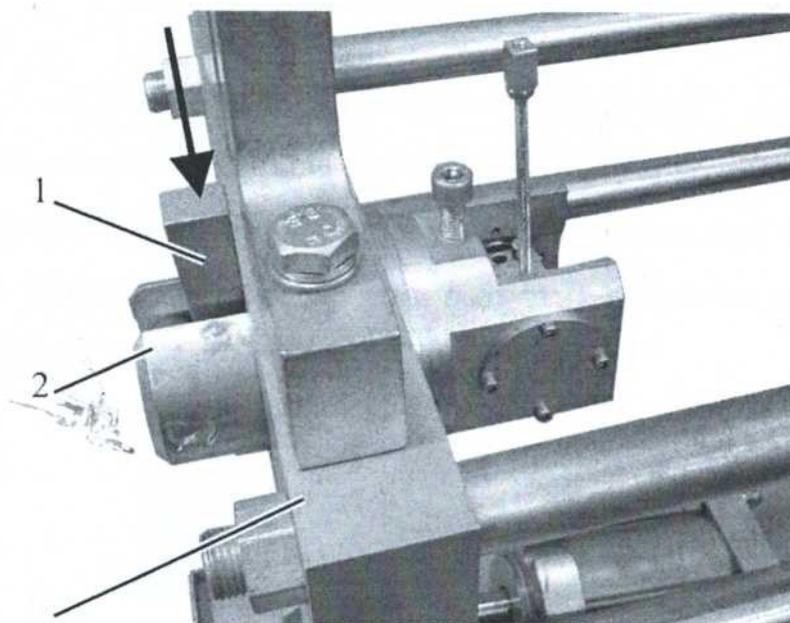


Рисунок 98 - Установка захвата для испытаний на изгиб

2. Установить в левую опорную плиту силовой рамы второй захват для испытаний на изгиб аналогично пункту 1.

3. Измерить ширину  $t$  и толщину  $h$  образца, вычислить момент инерции поперечного сечения, занести данные в таблицу 13.

4. Установить образец 5 в захваты (рисунок 99). Для этого ослабить винты 3 и вставить образец 5 под пластину 4. Задвинуть образец в захват, после чего ослабить аналогичные винты на противоположном захвате и установить образец в него.

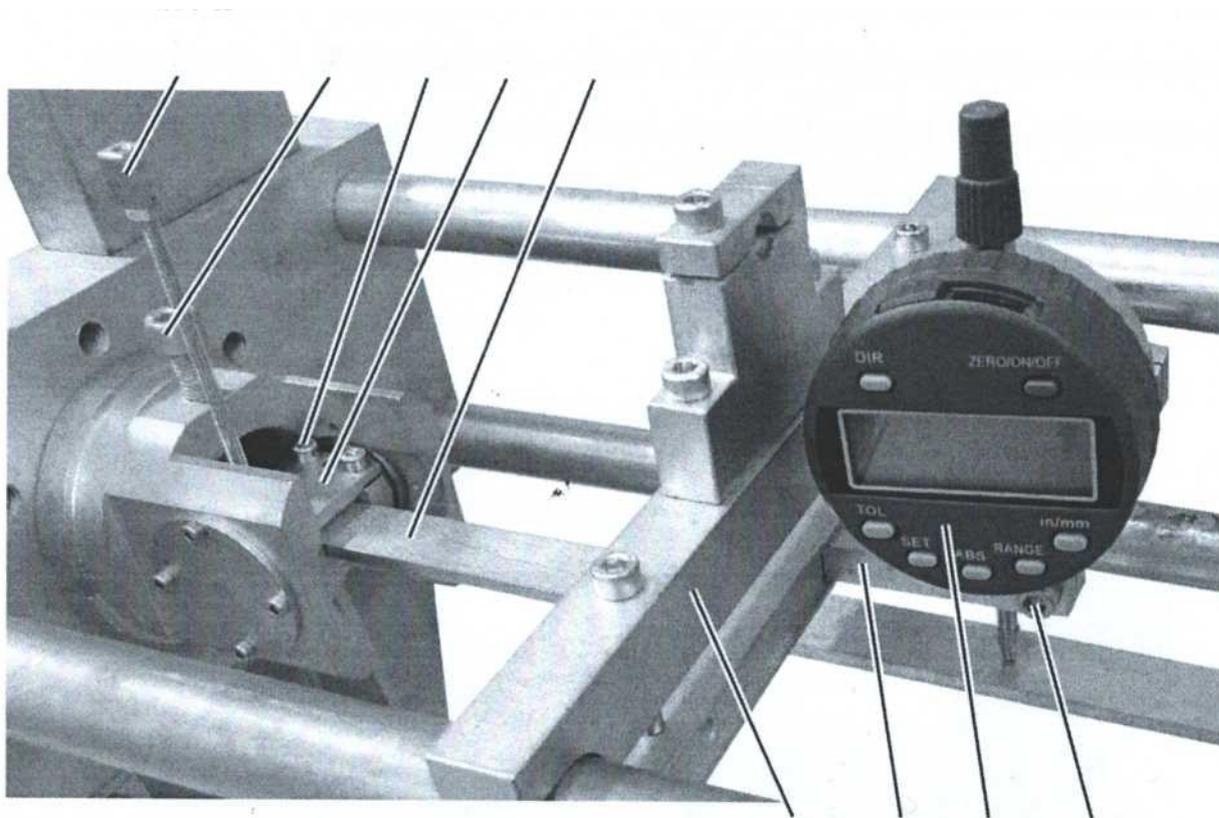


Рисунок 99 - Установка образца

5. Выбрать вдоль образца две точки  $A$  и  $B$ , в которых будет осуществлено нагружение. Установить в этих точках подвесы для грузов (рисунок 100). Записать расстояния  $a$  и  $b$  от этих подвесов до левой опоры в таблицу 14.

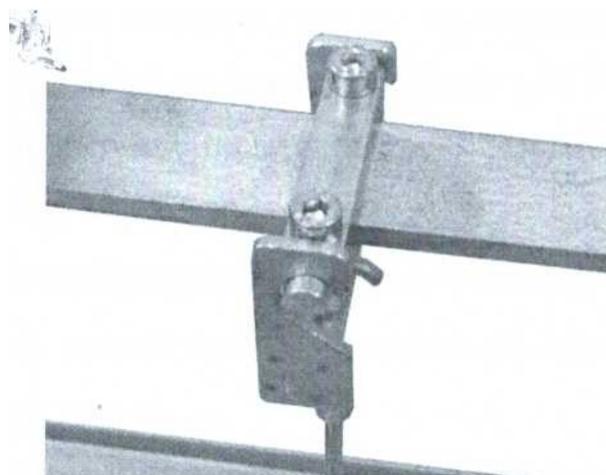


Рисунок 100 - Установка подвеса на балку



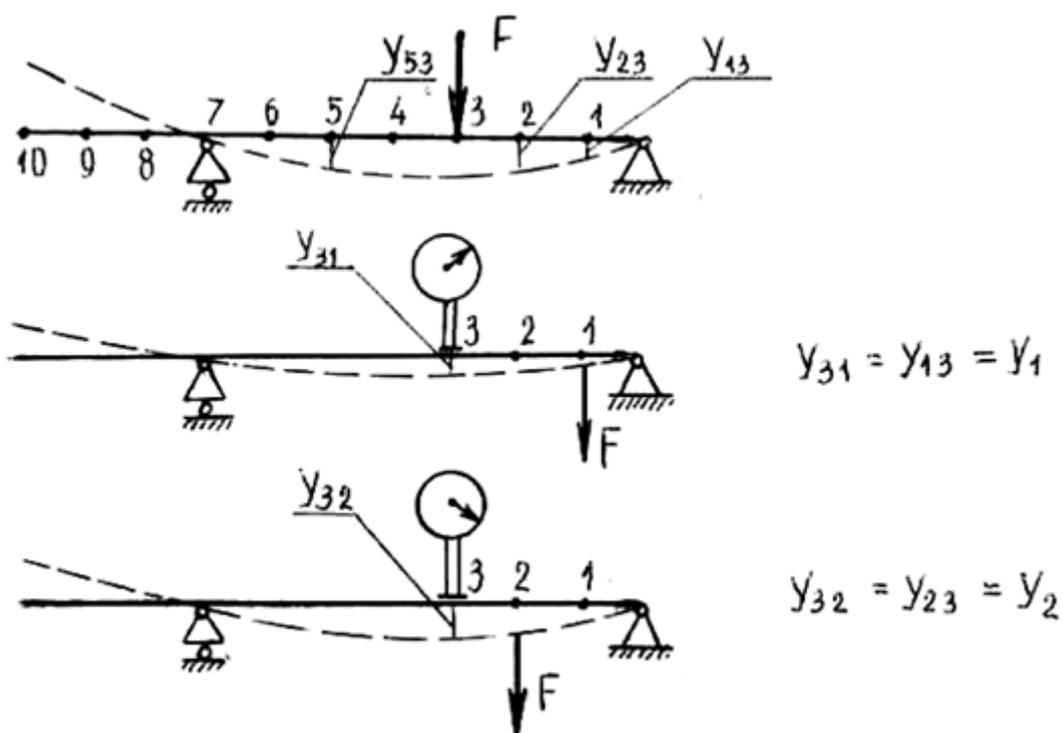


Рисунок 103 - Построение упругой линии балки

7. Установить показания микрометров на «0», нажав кнопку «zero».
8. Выбрать величины нагрузок  $F_1$  и  $F_2$  на образец (шаг по нагрузке 4,9 Н). Величина нагрузки не должна превышать 30 Н.
9. Установить на первый подвес (в точке  $A$ ) грузы, соответствующие выбранной нагрузке  $F_1$ .
10. Занести показания микрометров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в таблицу 14.
11. установить на второй подвес (в точке  $B$ ) грузы, соответствующие выбранной нагрузке  $F_2$ .
12. занести показания микрометров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в таблицу 14.
13. Снять грузы с обоих подвесов.
14. Установить на второй подвес (в точке  $B$ ) грузы, соответствующие выбранной нагрузке  $F_2$ .
15. Занести показания микрометров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в таблицу 14.
16. Установить на первый подвес (в точке  $A$ ) грузы, соответствующие выбранной нагрузке  $F_1$ .
17. Занести показания микрометров  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в таблицу 14.
18. Снять и разместить в ящиках стенда грузы и элементы, установленные при подготовке к измерениям.
19. Вычислить работу  $A_{12}$  силы  $F_1$  на перемещениях точки ее приложения, вызванной силой  $F_2$ .
20. Вычислить работу  $A_{21}$  силы  $F_2$  на перемещениях точки ее приложения, вызванной силой  $F_1$ .
21. Сравнить полученные значения работ для обоих случаев нагружения. Сделать выводы.

Таблица 13 - Геометрические параметры образца

$t$ , мм		$h$ , мм	$J_X$	Расстояние между опорами $l$ , мм
				500

Таблица 14 - Протокол испытаний

$a$ , мм	$b$ , мм	$F_1$ , Н	$F_2$ , Н	$\Delta_1$ , мм	$\Delta_2$ , мм	$A_{12}$ , мДж	$A_{21}$ , мДж
			-				
		-					
		-					
			-				

### Контрольные вопросы

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?
4. Как построить экспериментально линию прогибов балки, имея в наличии один индикатор линейных перемещений? Если предлагается несколько вариантов, то какой из них дает более точные результаты?

## Список использованных источников

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов /В.И.Феодосьев. – М.: Наука, 2004.-560 с.
2. Сопротивление материалов /Г.С.Писаренко, В.А.Агарев, А.Л.Квитка и др.; под ред.Г.С.Писаренко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 2009.-671 с.
3. Тензометрия в машиностроении: справочное пособие / под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 2005.
4. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. Учебник для вузов. Изд. 4-е. М.: «Высшая школа», 2005.
5. Саргсян А.Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов. – Учебник для вузов.- 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2000.
6. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. 14-е изд. – М.: Наука, 2005
7. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов. М., Наука, 2006.



