

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»
(ПГУАС)

Д.С. Саденко, В.В. Зернов, В.П. Волков, А.Е. Евсеев

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Рекомендовано Редсоветом университета
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся
по направлению 08.03.01 «Строительство»

Пенза 2014

УДК 539.31.6
ББК 30.121
С64

Рецензент – кандидат технических наук, профессор
В.С. Абрашитов (ПГУАС)

Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: учеб.
С64 пособие / Д.С. Саденко, В.В. Зернов, В.П. Волков, А.Е. Евсеев. –
Пенза: ПГУАС, 2014. – 88 с.

Содержит описание экспериментальной установки и методику проведения измерений, порядок выполнения работ и контрольные вопросы.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Механика» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 08.03.01 «Строительство», при подготовке, выполнении и сдаче лабораторных работ.

© Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства, 2014

© Саденко Д.С., Зернов В.В.,
Волков В.П., Евсеев А.Е., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данный лабораторный практикум составлен на основе многолетнего опыта преподавания на кафедре «Механика» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства.

Все лабораторные работы разделены в соответствии с изучаемыми видами напряженно-деформированного состояния тел и изучаются с применением специального оборудования.

К каждой работе даны краткие теоретические сведения, режимам проведения опытов; данные о методах измерения и приборах, позволяющих получать результаты с заданными погрешностями. Приведены основные зависимости для определения границ доверительных интервалов оценок исследуемых характеристик материалов при ограниченном количестве опытов.

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка бакалавров и магистров строительных специальностей предполагает получение ими не только фундаментального образования по общим и специальным разделам математики и механики, но и освоение современных компьютерных технологий с применением новейших комплексов учебного оборудования, применяемых при решении задач механики и сопротивления материалов.

Экспериментальные методы позволяют проводить исследования, которые не могут быть заменены компьютерным моделированием.

Механические испытания экспериментально подтверждают научные гипотезы, теоретические выводы

Такой установкой и является стенд ««Основы сопротивления материалов» ОСМ-8ЛР-09».

С помощью только одного данного комплекса появилась возможность проводить такие лабораторные работы:

1. Определение упругих характеристик материала при растяжении (модуль упругости и коэффициент Пуассона).
2. Определение модуля сдвига.
3. Испытание на срез.
4. Определение перемещений при изгибе балки.
5. Определение напряжений в сечении балки при изгибе.
6. Определение напряженного состояния в балке при сложном нагружении (при действии изгиба и кручения).
7. Исследование устойчивости сжатого стержня (определение критической силы).
8. Испытание на растяжение с записью диаграммы деформирования.

В описаниях работ указываются: цель опыта, постановка задачи, соответствующие теоретические данные, порядок проведения опыта с пошаговыми фотографиями, необходимые пояснения к пользованию аппаратурой и способы обработки результатов опыта.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы проводятся в соответствии с данными методическими материалами и руководством по эксплуатации ОСМ-8ЛР- 09.000 РЭ.

К выполнению лабораторных работ допускаются только обучающиеся, ознакомившиеся с указанными материалами.

1.1. Описание программы «ОСМ измерения»

Программа «ОСМ измерения» предназначена для совместной работы с учебным стендом «Основы сопротивления материалов» ОСМ-8ЛР-09.

Работать с программой должен оператор, имеющий базовые навыки работы с персональным компьютером в операционной среде MS Windows 2000/XP/Vista/7. Все файлы, записываемые программой, выбираются оператором, им же указывается их местоположение на жестком диске.

Производители учебного стенда и программы снимают с себя всякую ответственность в случае потери важной информации по причине неквалифицированного использования программы. Запуск программы пользователем означает согласие пользователя с этим условием.

Программа предназначена для работы с операционными системами MS Windows 2000/XP/Vista/7. 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 рис. 1.1.1.

В зоне, обозначенной 1 (рис. 1.1.1), 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 нажать 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.

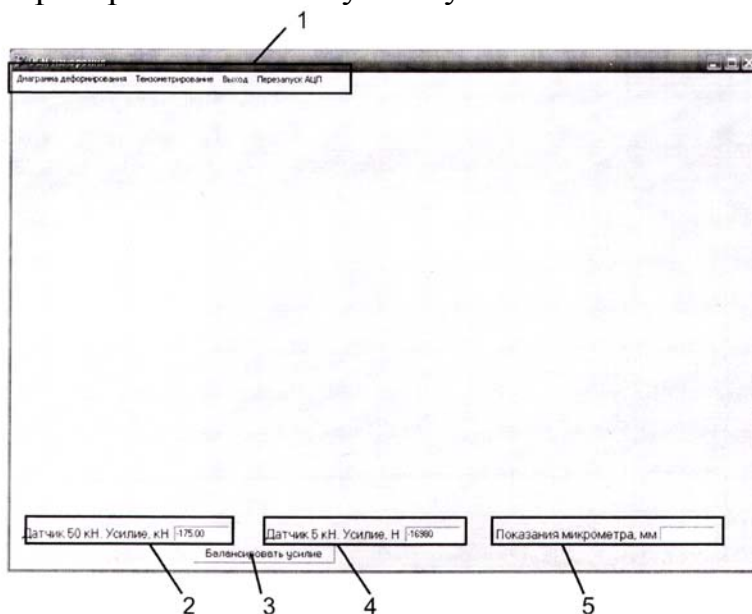


Рис. 1.1.1. Диалоговое окно программы при запуске

Пункт меню «Диаграмма деформирования»

После выбора данного пункта меню на экране появляется окно, показанное на рис. 1.1.2.

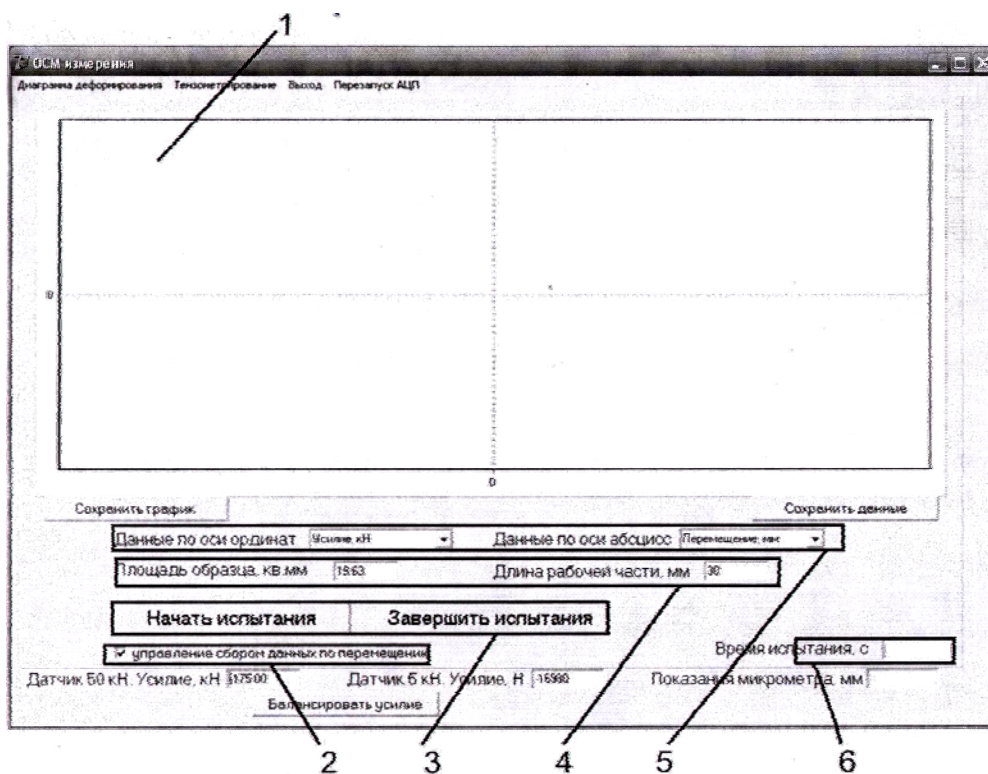


Рис. 1.1.2. Диалоговое окно «Диаграммы деформирования»

В зоне, обозначенной 1 (см. рис. 1.1.2), 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 рис. 1.1.3.

В зоне, обозначенной 1 (см. рис. 1.1.3), 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 по-

следние значения». Кнопка «Удалить все собранные значения» удаляет все собранные данные.

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

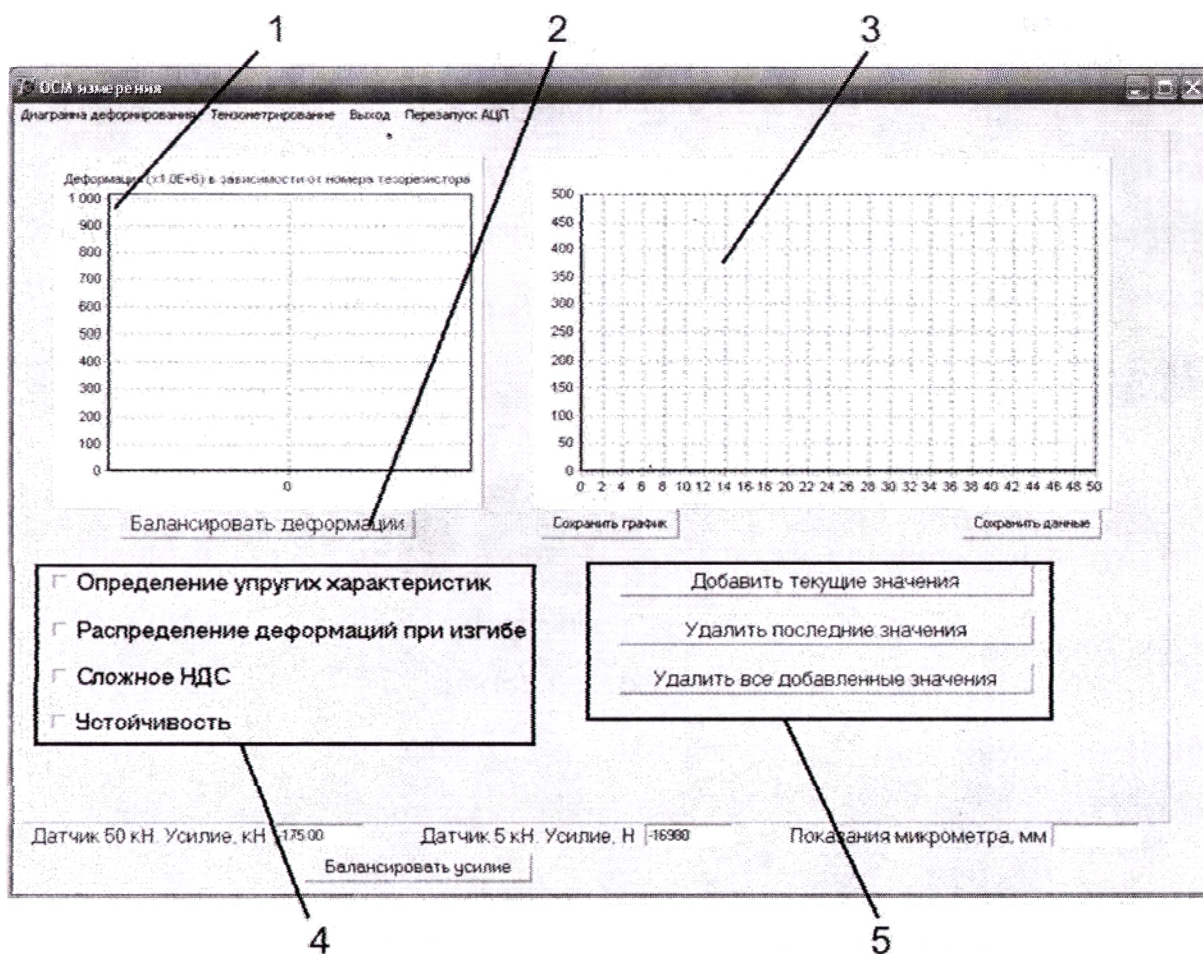


Рис. 1.1.3. Диалоговое окно «Тензометрирование»

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 сис-

тема 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.*

1.2. Общий порядок действий при работе со стендом

1.2.1. Включить ПЭВМ, дождаться загрузки операционной системы.

1.2.2. Установить на силовую раму стенда приспособления и образцы для испытаний в соответствии с проводимой лабораторной работой (см. описание лабораторных работ).

1.2.3. Подключить используемый силоизмеритель, тензодатчики и микрометр с цифровым выходом к соответствующим разъемам на измерительно-преобразовательном блоке.

1.2.4. Включить питание измерительно-преобразовательного блока кнопкой, расположенной слева на блоке. При этом должны включиться цифровые табло на блоке.

1.2.5. Запустить на ПЭВМ программу «ОСМ измерения».

1.2.6. 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 (рис. 1.2.1).

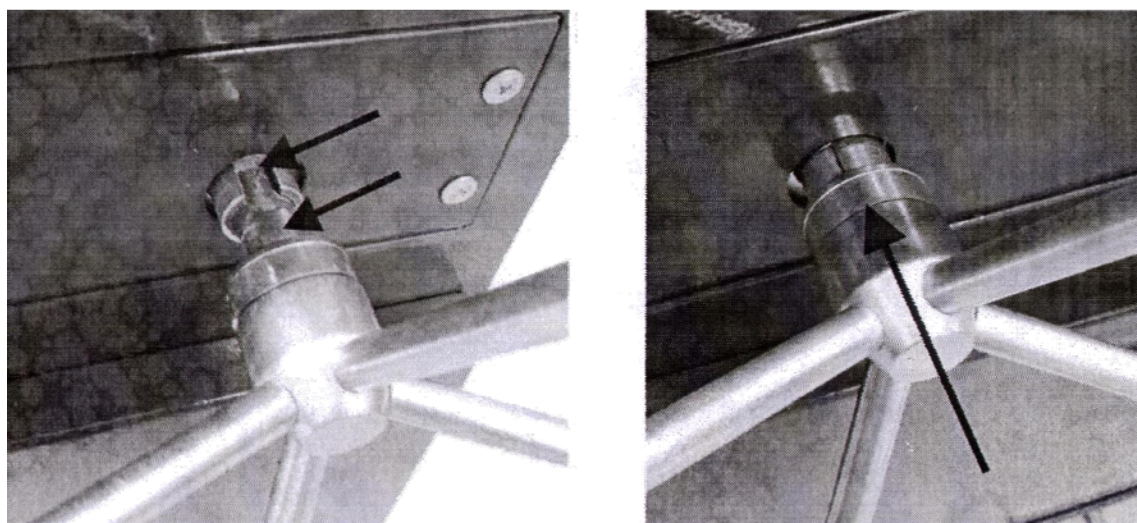


Рис. 1.2.1. Установка рукоятки ручного насоса

1.2.7. 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.**

1.2.8. Для направления потока жидкости, обеспечивающего выдвижение (прямой ход) гидроцилиндра, необходимо переключить краны в положение, показанное на рис. 1.2.2.

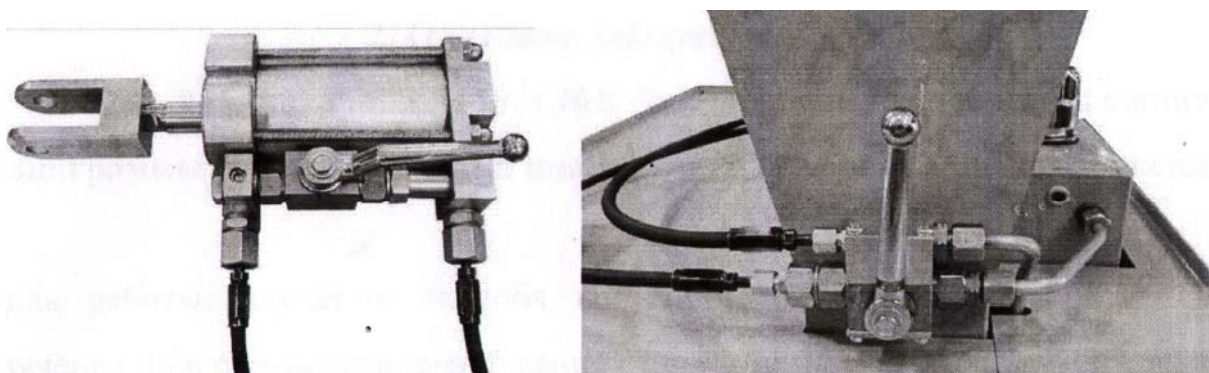


Рис. 1.2.2. Положение кранов при прямом ходе гидроцилиндра

1.2.9. Для направления потока жидкости, обеспечивающего втягивание (обратный ход) гидроцилиндра, необходимо переключить краны в положение, показанное на рис. 1.2.3.

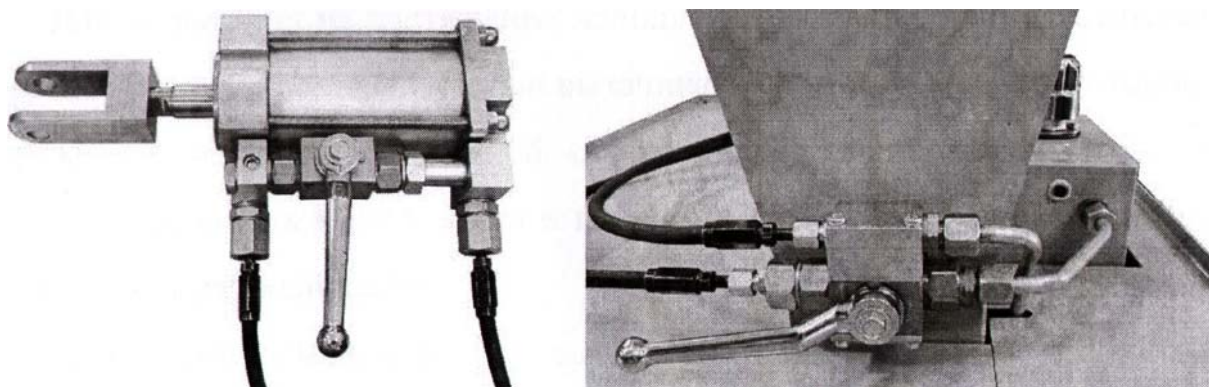


Рис. 1.2.3. Положение кранов при обратном ходе гидроцилиндра

1.2.10. После завершения работы с гидроцилиндром необходимо перевести краны в положение, показанное на рис. 1.2.2 и убрать гидроцилиндр на подставку, расположенную сзади силовой рамы.

Контрольные вопросы

1. Изобразите диаграмму растяжения образца из малоуглеродистой стали (Ст.3). Покажите полные, упругие и остаточные абсолютные деформации при нагружении силой, большей, чем F_T .
2. На каком участке образца происходят основные деформации удлинения? Как это наблюдается на образце? Какие нагрузки фиксируются в этот момент?
3. Объясните, почему после образования шейки дальнейшее растяжение происходит при все уменьшающейся нагрузке?
4. Перечислите механические характеристики, определяемые в результате испытаний материала на растяжение. Укажите характеристики прочности и пластичности.
5. Дайте определение предела пропорциональности.
6. Дайте определение предела упругости.
7. Дайте определение предела текучести.
8. Дайте определение предела прочности.
9. Как определить предел текучести при отсутствии площадки текучести? Покажите, как это сделать, по конкретной диаграмме.
10. Какие деформации называются упругими, какие остаточными? Укажите их на полученной в лабораторной работе диаграмме растяжения стали.
11. Как определяется остаточная деформация после разрушения образца?
12. Выделите на диаграмме растяжения образца из мягкой стали упругую часть его полного удлинения для момента действия максимальной силы.
13. Какое явление называется наклепом? До какого предела можно довести предел пропорциональности материалов с помощью наклепа?
14. Как определяется работа, затраченная на разрушение образца? О каком свойстве материала можно судить по удельной работе, затраченной на разрушение образца?
15. Как определить марку стали и допускаемые напряжения для нее после проведения лабораторных испытаний?
16. Чем отличается диаграмма истинных напряжений при растяжении от условной диаграммы?
17. Можно ли определить модуль упругости материала по диаграмме напряжений?
18. Как определить работу, затрачиваемую на деформации текучести лабораторного образца?

2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

2.1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.

Экспериментальное определение диаграммы деформирования пластичного материала при растяжении

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

Теоретические основы [1]

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. Существуют, 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 рис. 2.1.1 показана типичная для углеродистой стали диаграмма испытания образца в координатах $P-\Delta l$. Полученная кривая условно может быть разделена на следующие четыре зоны.

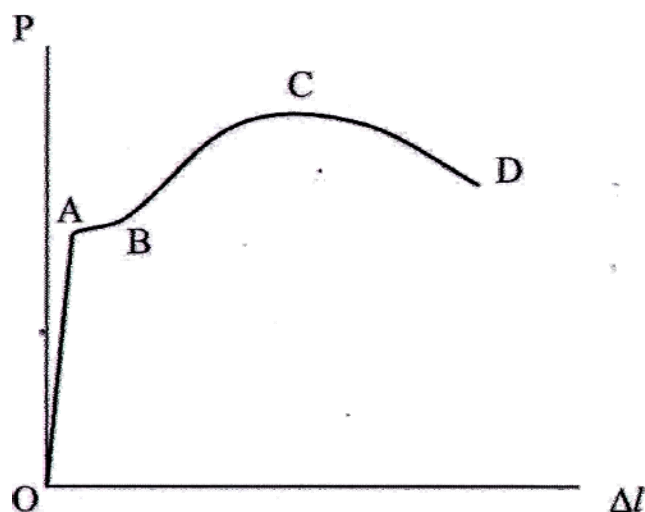


Рис. 2.1.1. Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

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

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

На рис. 2.1.1 этот участок для большей наглядности показан с отступлением от масштаба. Удлинения Δl 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 большее 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 2.1.2. Кривая 1 типична для алюминия и отожженной меди, кривая 2 – для высококачественных легированных сталей.

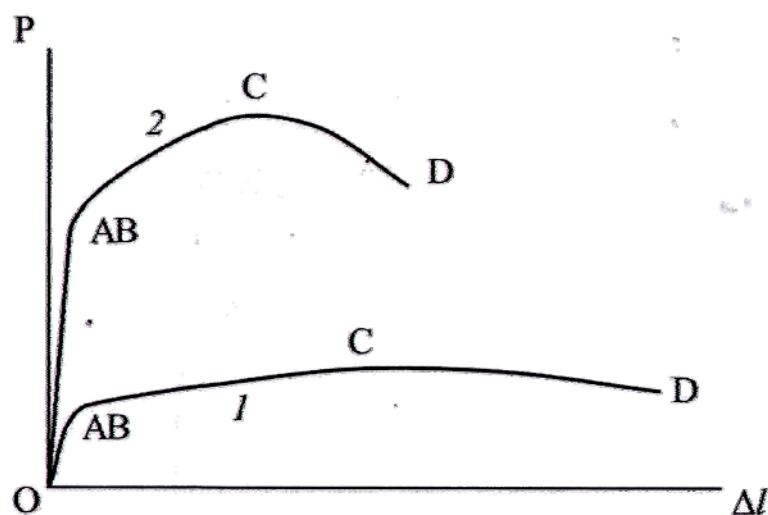


Рис. 2.1.2. Диаграммы деформирования меди (1) и легированной стали (2)

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 утонение 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 $P = f(\Delta l)$ перестраивают в координатах σ и ϵ . Для этого необходимо уменьшить в F раз ординаты и в l раз абсциссы, где F и l – соответственно площадь поперечного сечения и рабочая длина образца до нагружения. Так как эти величины постоянны, то диаграмма $\sigma = f(\epsilon)$ (рис. 2.1.3) имеет тот же вид, что и диаграмма растяжения, но будет характеризовать уже не свойства образца, а свойства материала.

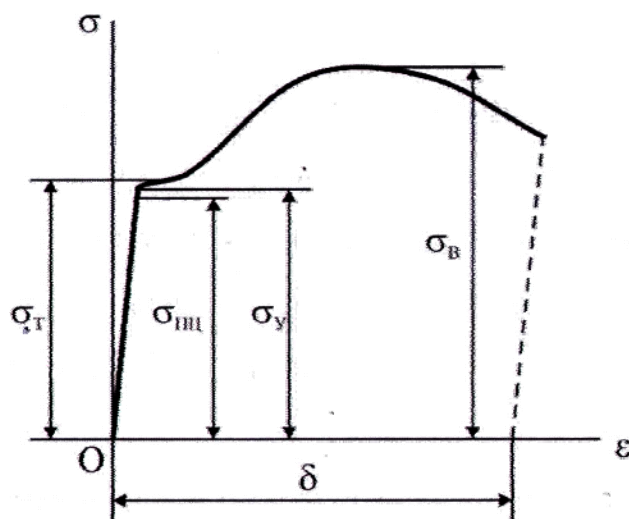


Рис. 2.1.3. Диаграмма деформирования (напряжение – деформация)

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

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

Упругие свойства материала сохраняются до напряжения, называемого *пределом упругости*. *Под пределом упругости σ_y понимается такое наи-*

большее 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 $\varepsilon_{\text{ост}} = (1 \dots 5) \cdot 10^{-5}$, т.е. 0,001...0,005 %. 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 $\sigma_{\text{пл}}$ и σ_y 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 $\varepsilon_{\text{ост}} = 0,002$ или 0,2 % (рис. 2.1.4). В некоторых случаях устанавливается предел $\varepsilon_{\text{ост}} = 0,5$ %.

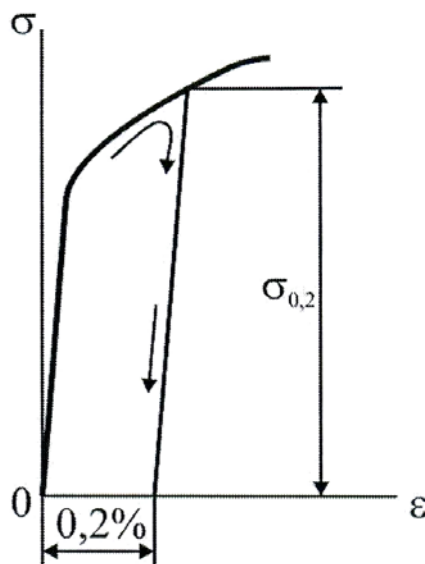


Рис. 2.1.4. Определение условного предела текучести

Условный предел текучести обозначается через $\sigma_{0,2}$ или $\sigma_{0,5}$ 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 Δl_0 на стандартной длине. Удлинение при разрыве будет следующим:

$$\delta \% = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100.$$

Диаграмма растяжения с учетом уменьшения площади F и местного увеличения деформации, называется истинной диаграммой растяжения (кривая $OC'D'$ на рис. 2.1.5).

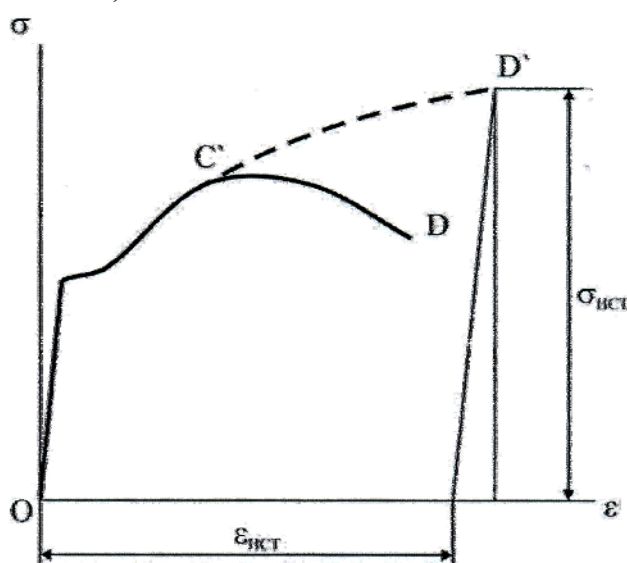


Рис. 2.1.5. Истинная диаграмма растяжения

Экспериментальная часть

1. Установить гидроцилиндр 2 на силовую раму станда (рис. 2.1.6) завернув два винта 1 и 3 на М10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.

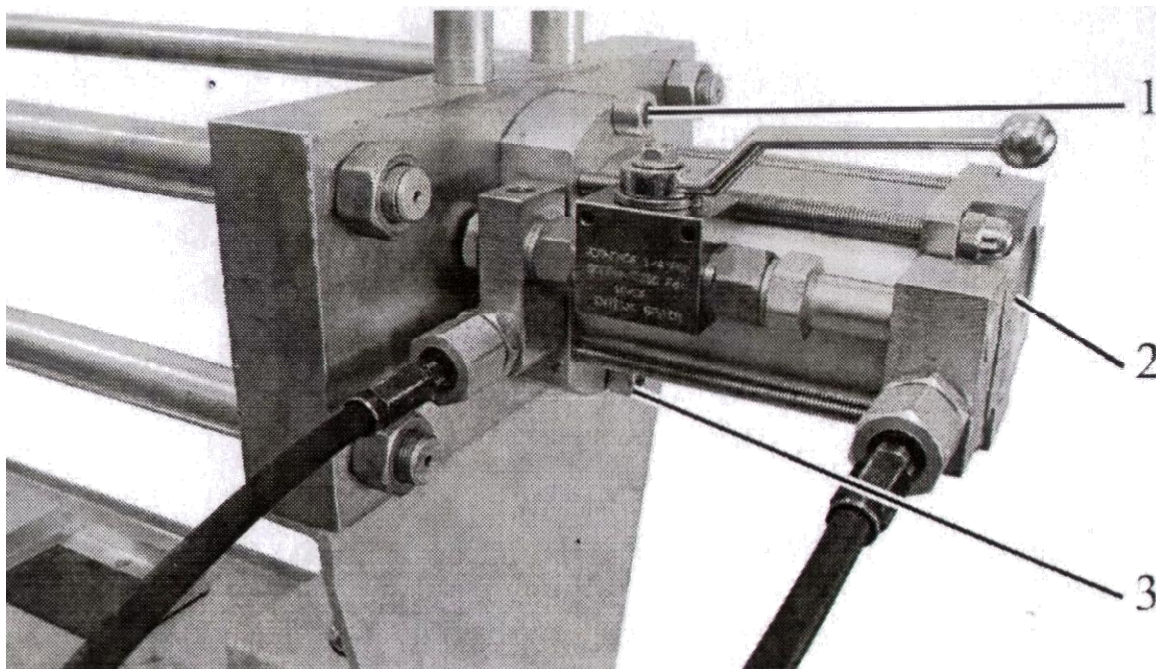


Рис. 2.1.6. Установка гидроцилиндра

2. Установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рис. 2.1.7) на силовую раму станда (рис. 2.1.8). Наворачивание и затяжку гайки необходимо производить «от руки», применение гаечного ключа не требуется.

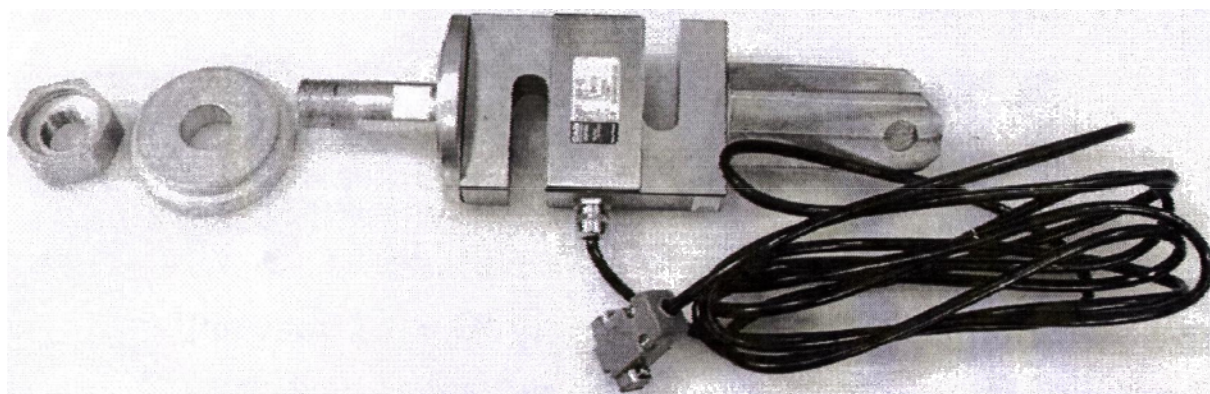


Рис. 2.1.7. Силоизмеритель на 50 кН с держателем

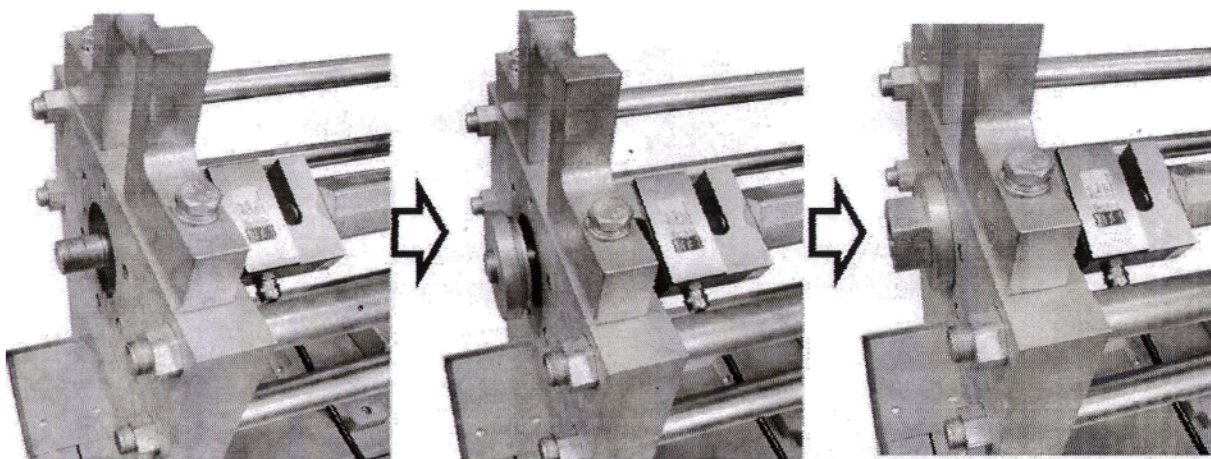


Рис. 2.1.8. Монтаж силоизмерителя на 50 кН

3. Измерить диаметр d образца и его рабочую длину l (длину тонкой цилиндрической части), вычислить площадь поперечного сечения F_0 , занести данные в табл. 2.1.1. 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 (рис. 2.1.9).

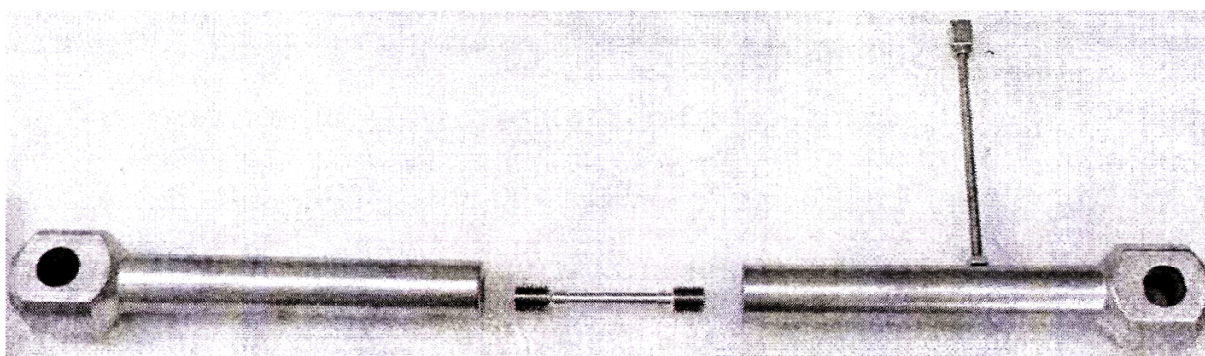


Рис. 2.1.9. Образец с резьбовыми захватами

5. Установить модуль крепления микрометров на направляющие (рис. 2.1.10). 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.

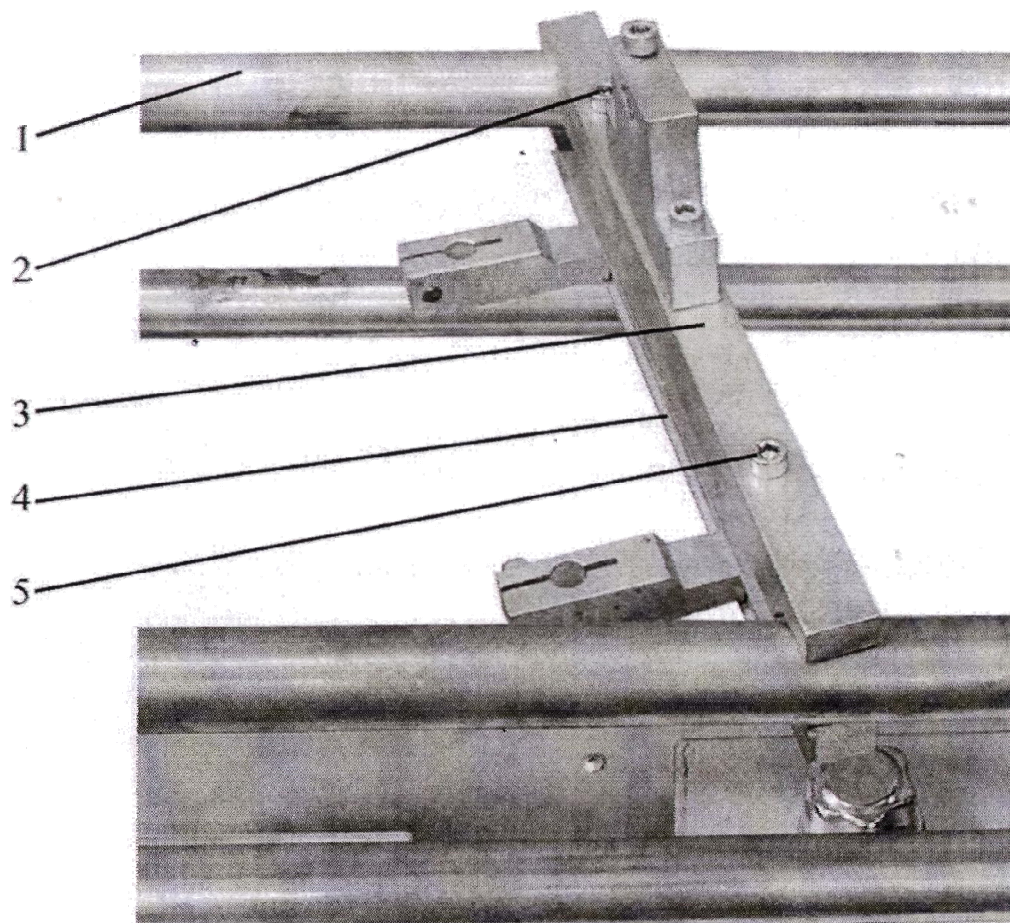


Рис. 2.1.10. Установка держателя микрометра

6. Установить образец с захватами 2 в вилки на силоизмерителе и гидроциindre 8 (рис. 2.1.11) 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 1.2.6–1.2.8. 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 9–11 мм 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.

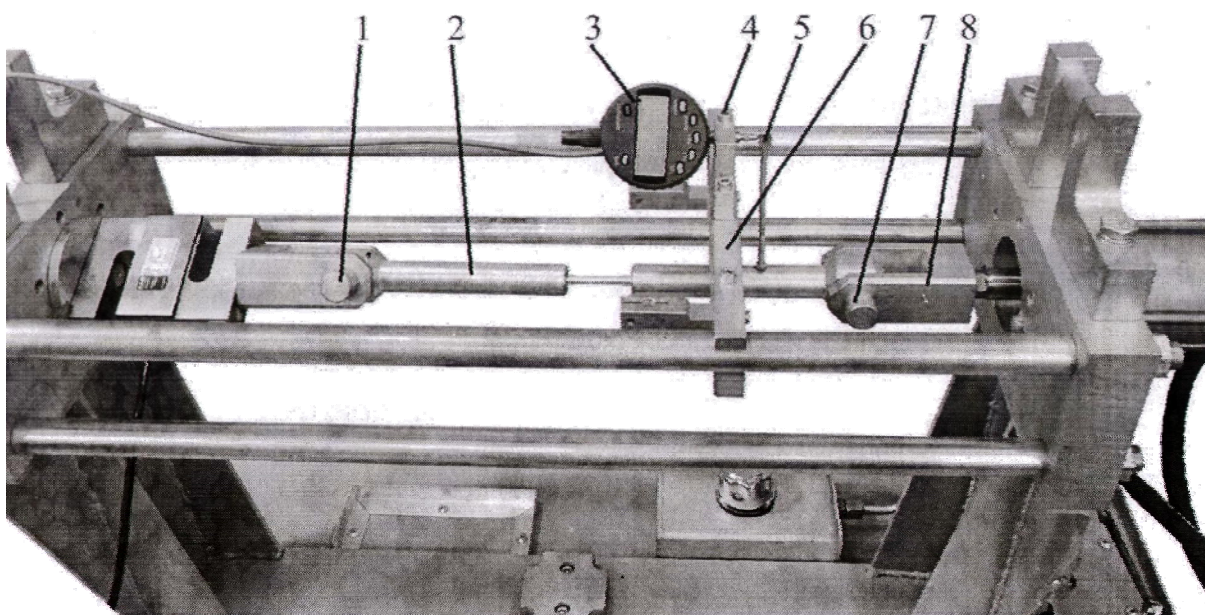


Рис. 2.1.11. Сборка стенда для проведения лабораторной работы №1

7. Подключить разъемы силоизмерителя на 50 кН и микрометра к измерительно-преобразовательному блоку.

8. Выполнить пункты 1.2.3–1.2.5.

9. В программе выбрать пункт меню «Диаграмма деформирования».

10. Ввести в программу геометрические характеристики образца: площадь поперечного сечения F_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 вытягиванию 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 вытягивать 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

чить питание измерительно-преобразовательного блока. Выйти из программы.

20. Все дальнейшие измерения и результаты вычислений следует заносить в табл. 2.1.1.

21. Измерить диаметр d_k частей образца в самом тонком месте (шейке), вычислить площадь поперечного сечения F_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 $\delta = (l_k - l_0)/l_0$ и относительное сужение после разрыва $\psi = (F_0 - F_k)/F_0$.

24. По диаграмме сила — перемещение определить усилие, действующее на образец в момент разрыва P_k . Рассчитать истинное сопротивление разрыву $\sigma_{ист} = P_k/F_k$.

25. По диаграмме напряжение — деформация определить временное сопротивление σ_B и предел текучести — физический σ_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.

Т а б л и ц а 2 . 1 . 1

Протокол испытаний

l , мм					
l_0 , мм		$\delta = (l_k - l_0)/l_0$, %			
l_k , мм					
d , мм		$F_0 = \pi \cdot d^2/4$, мм ²		$\psi = (F_0 - F_k)/F_0$, %	
d_k , мм		$F_k = \pi \cdot d_k^2/4$, мм ²			
P_k , Н				$\sigma_{ист} = P_k/F_k$, МПа	
σ_B , МПа					
σ_B ($\sigma_{0,2}$), МПа					

Контрольные вопросы

1. Как формулируется закон Гука для линейного напряженного состояния? Как ограничить верхнюю максимальную нагрузку?
2. Каковы границы применения закона Гука?
3. Что характеризует модуль упругости E , от чего он зависит и какова его размерность?
4. По какому геометрическому выражению с использованием диаграммы напряжений можно определить E ?
5. Почему при определении деформаций растянутого образца используют два тензометра?
6. Как определить величину коэффициента Пуассона?
7. Что характеризует коэффициент Пуассона, от чего он зависит и какова его размерность?
8. В каких пределах может изменяться коэффициент Пуассона?
9. Какой материал называется абсолютно несжимаемым?
10. Какой материал называется абсолютно хрупким?
11. Почему при определении коэффициента Пуассона растянутого образца используют тензометры расположенные во взаимно перпендикулярных положениях?

2.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.

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 σ_z и продольные ε_z и поперечные ε_x деформации. При растягивающих усилиях, соответствующих напряжениям, не превышающим предел текучести, продольные напряжения и деформации связаны соотношением, называемым законом Гука:

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

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

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

$$\mu = -\varepsilon_x / \varepsilon_z$$

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 (рис. 2.2.1) завернув два винта 1 и 3 на М10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.

2. Установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рис. 2.2.2) на силовую раму стенда (рис. 2.2.3). Наворачивание и затяжку гайки необходимо производить «от руки», применение гаечного ключа не требуется.

3. Измерить ширину b и толщину t образца, вычислить площадь поперечного сечения F_0 , занести данные в табл. 2.2.1.

4. Установка образца показана на рис. 2.2.4. 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 1.2.6–1.2.8. При необходимости повернуть вилку 10. Вращать вилку гидроцилиндра следует только по ходу часовой стрелки, если смотреть со стороны вилки.

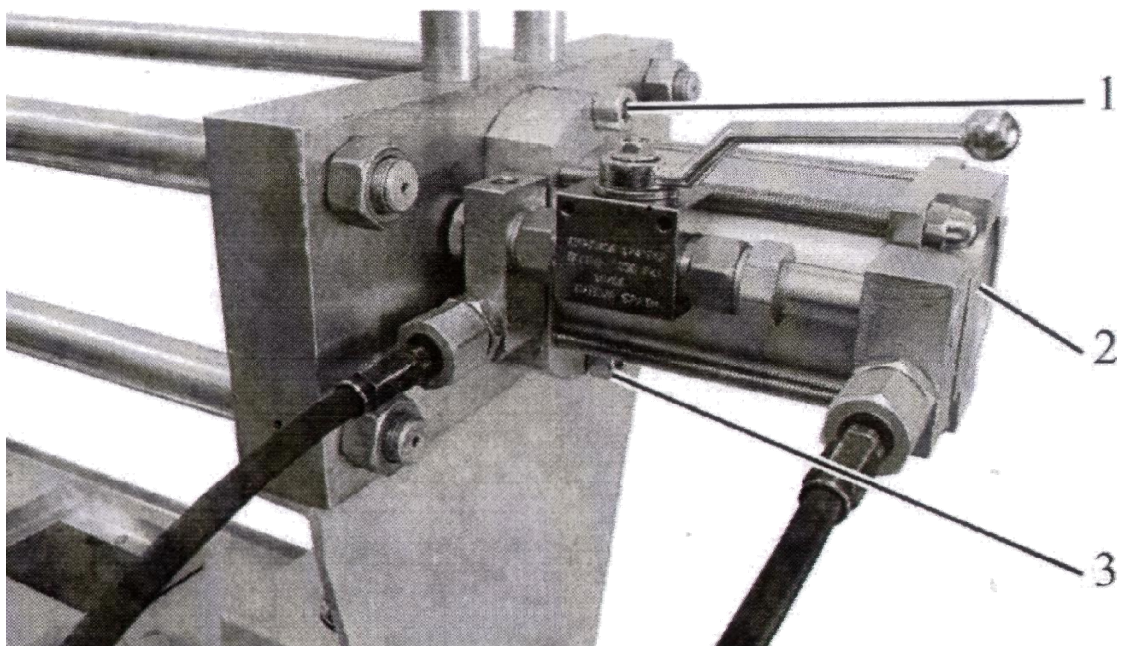


Рис.2.2.1. Установка гидроцилиндра

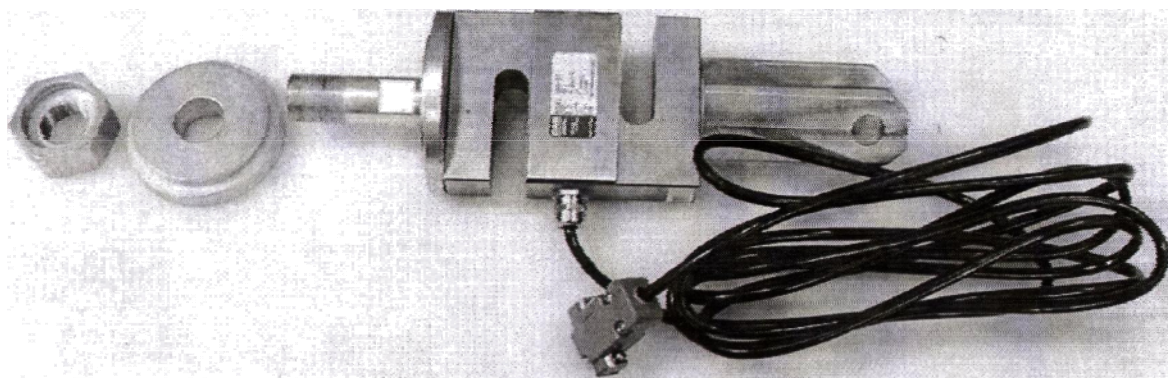


Рисунок 2.2.2. Силоизмеритель на 50 кН с держателем

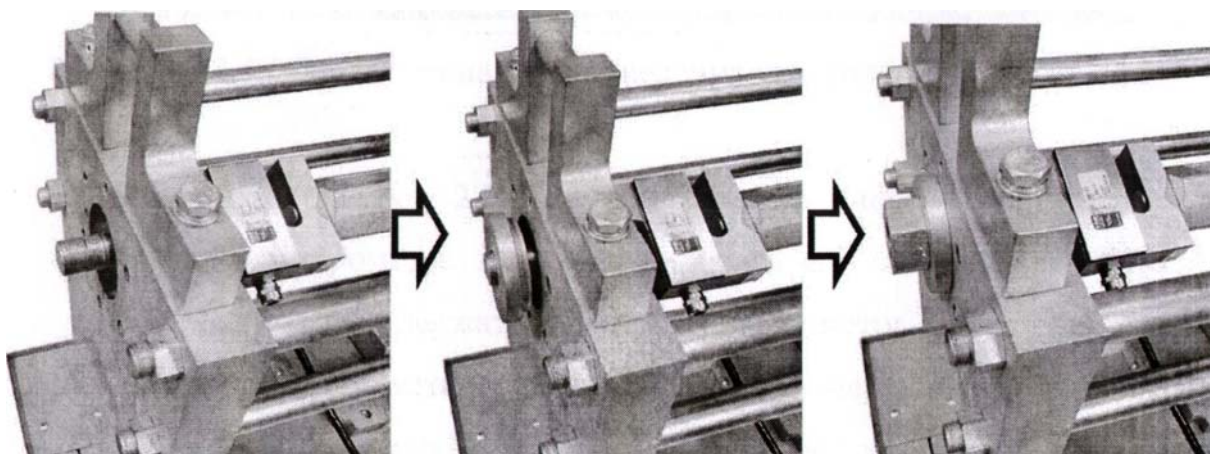


Рис. 2.2.3. Монтаж силоизмерителя на 50 кН

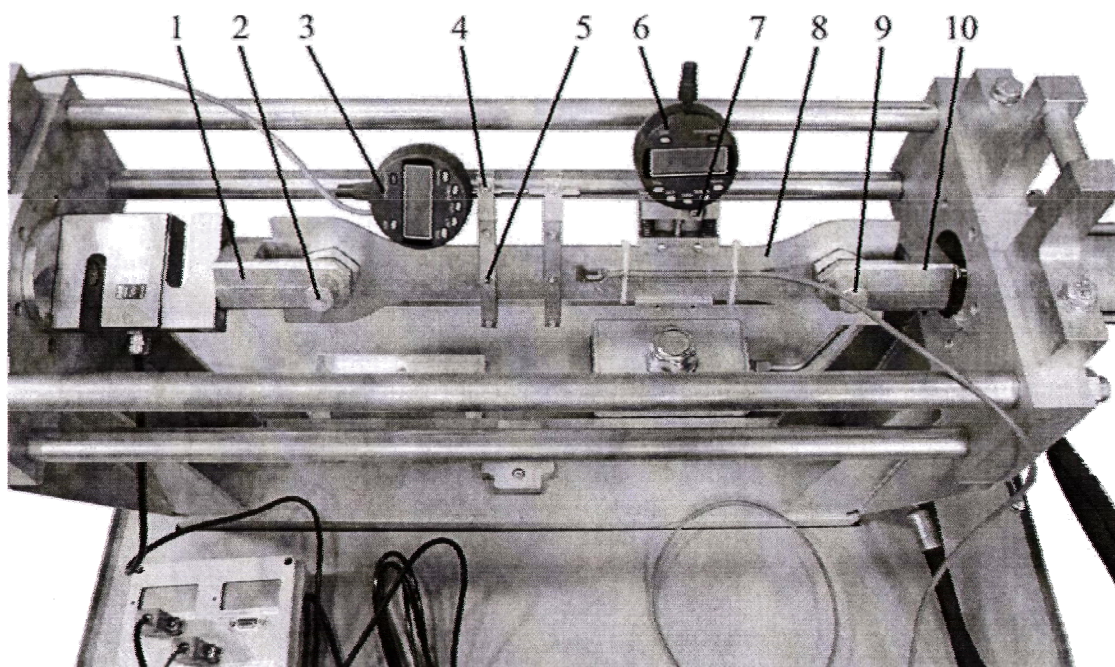


Рис. 2.2.4. Сборка стенда для проведения лабораторной работы №2

5. Установить (рис. 2.2.4) микрометр 3 с цифровым выходом в держатель микрометра 5 и зафиксировать его с помощью винта 4. Установить второй держатель с упором микрометра. Расстояние между держателями для установки микрометра, измеряющего продольные перемещения, должно быть равно примерно 40 мм, а сами держатели должны быть параллельны. Установка держателей осуществляется путем затяжки 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 табл. 2.2.1.

7. Установить (рис. 2.2.4) 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 1.2.3–1.2.5.

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 прогрев 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 Δz и поперечного Δx) и значения деформации $\varepsilon_{z_тр}$, $\varepsilon_{x_тр}$, измеренных тензорезисторами в табл. 2.2.1. Продольная деформация измеряется тензорезистором №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 обоих вдоль 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 $\sigma = P/F_0$, продольной $\varepsilon_z = \Delta z/l$ и поперечной $\varepsilon_x = \Delta x/b$ деформации. Сравнить значения деформаций, полученные по микрометрам и по тензорезисторам.

Построить график зависимости $\sigma(\varepsilon_z)$, 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.

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

Т а б л и ц а 2 . 2 . 1

Геометрические параметры образца

t , мм	b , мм	l , мм	F , мм ²

Т а б л и ц а 2 . 2 . 2

Протокол испытаний

Измеренные величины					Рассчитанные величины		
P , кН	Δ_z , мкм	Δ_x , мкм	$\varepsilon_{z_тр} \cdot 10^6$	$\varepsilon_{x_тр} \cdot 10^6$	σ , МПа	$\varepsilon_z \cdot 10^6$	$\varepsilon_x \cdot 10^6$

Контрольные вопросы

1. При каком нагружении прямой брус испытывает деформацию кручения?
2. Какое правило знаков принято для крутящих моментов?
3. Что называется углом закручивания?
4. Как выражается закон Гука при кручении?
5. По каким формулам можно определить модуль сдвига?
6. Как опытным путем определяется модуль сдвига?
7. Как экспериментально определяется угол закручивания образца? Какие измерительные приборы и приспособления при этом применяются?
8. Что называется жесткостью поперечного сечения бруса при кручении? Размерность жесткости поперечного сечения.
9. Какие факторы влияют на величину угла закручивания?
10. По какой формуле определяется полярный момент сопротивления для круглого вала сплошного сечения и для вала кольцевого сечения?

2.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.

Определение модуля сдвига

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

Теоретические основы [4]

Существует такое напряженное состояние, когда на гранях выделенного элемента возникают только касательные напряжения τ (рис.к 2.3.1). 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 брусьев может возникать и при других видах нагружения.

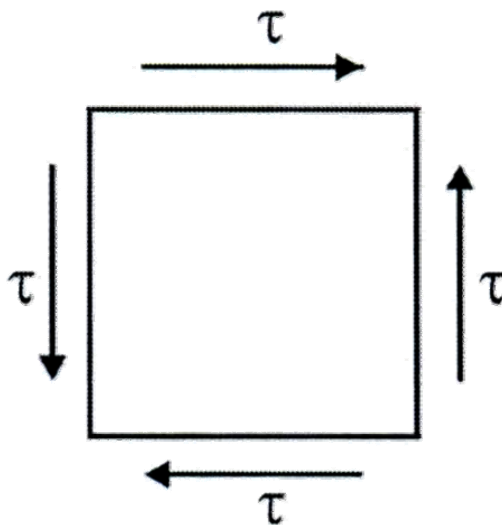


Рис. 2.3.1. Чистый сдвиг

Наиболее просто однородный чистый сдвиг может быть осуществлен нагружением тонкостенной цилиндрической трубки моментами, приложенными в торцевых плоскостях (рис. 2.3.2). Величина напряжения τ определяется из условий равенства момента равномерно распределенных по поперечному сечению внутренних сил моменту M :

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

где R – радиус трубки;
 δ – ее толщина.

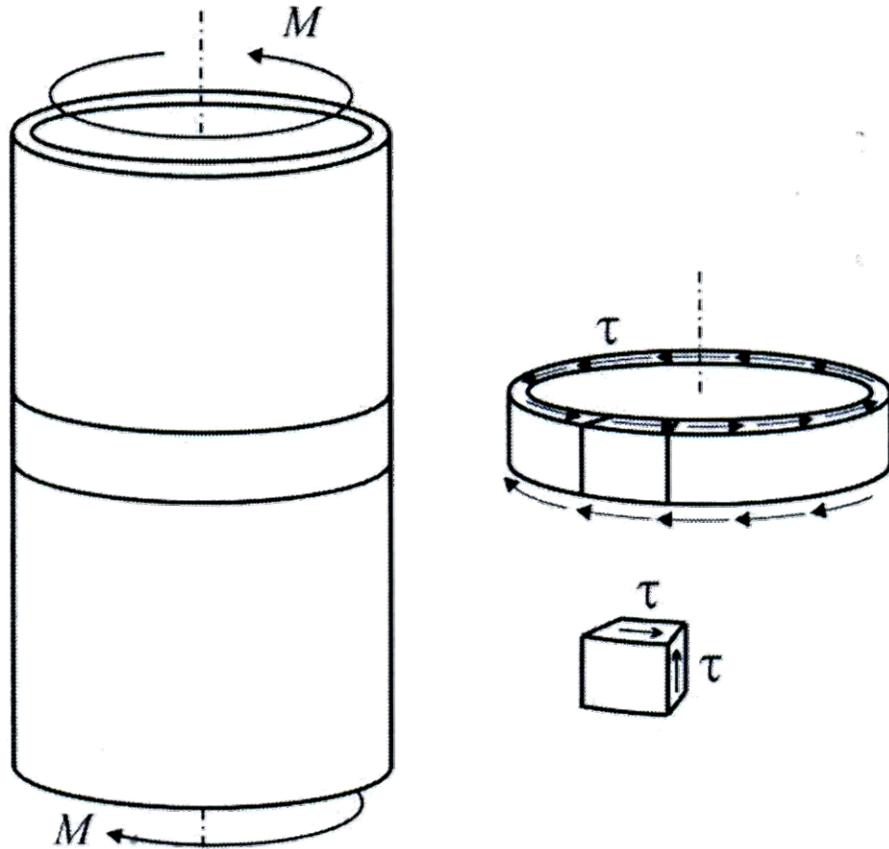


Рис. 2.3.2. Кручение тонкостенной трубы

Касательное напряжение τ связано с угловой деформацией с соотношением

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

где $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ – модуль сдвига или модуль упругости второго рода.

В результате возникающих деформаций торцовые сечения трубки (рис. 2.3.3) получают взаимные угловые смещения φ . Характер возникающих смещений показан на рис. 2.3.3, причем $\varphi = \gamma \cdot l/R$.

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

$$\varphi = M \cdot l / (G \cdot J_p),$$

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

$$J_p = \pi \cdot (D^4 - d^4) / 32.$$

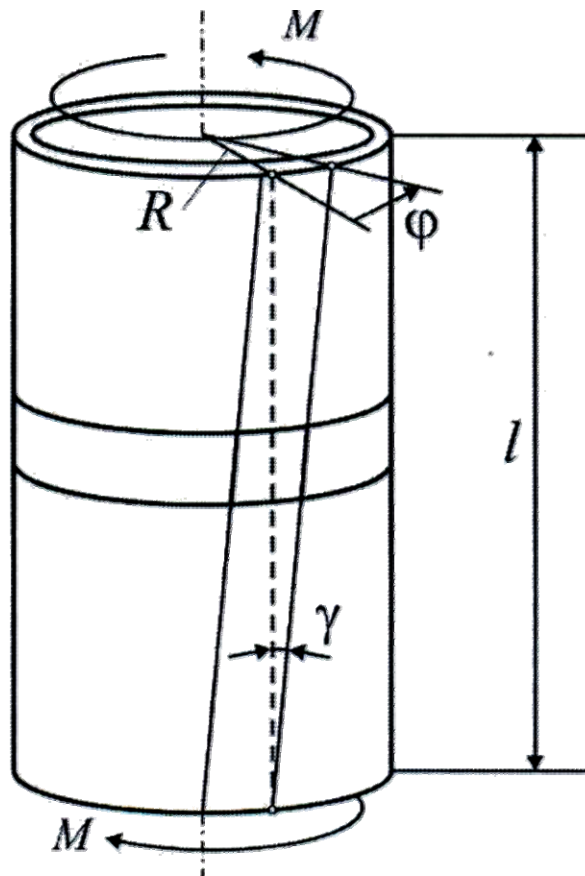


Рис. 2.3.3. Перемещения при кручении

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

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Если к скручиваемой, трубе радиально прикрепить тонкий стержень (рис. 2.3.4), то при малых углах поворота величина угла поворота может быть определена следующим образом:

$$\varphi_1 = \Delta_l / a.$$

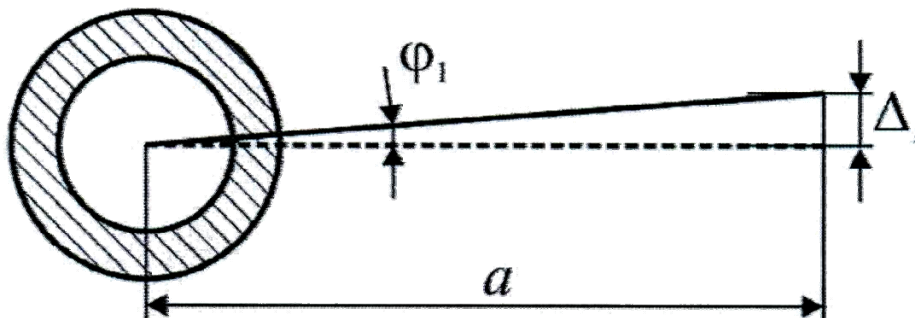


Рис. 2.3.4

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

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

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 (рис. 2.3.5), привести образец в горизонтальное состояние (рис. 2.3.6), совместить паз на захвате с штифтом в левой плите и сдвинуть до плотного прилегания захвата к внутренней плоскости левой плиты.

Установить (рис. 2.3.7) 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 рис. 2.3.5.

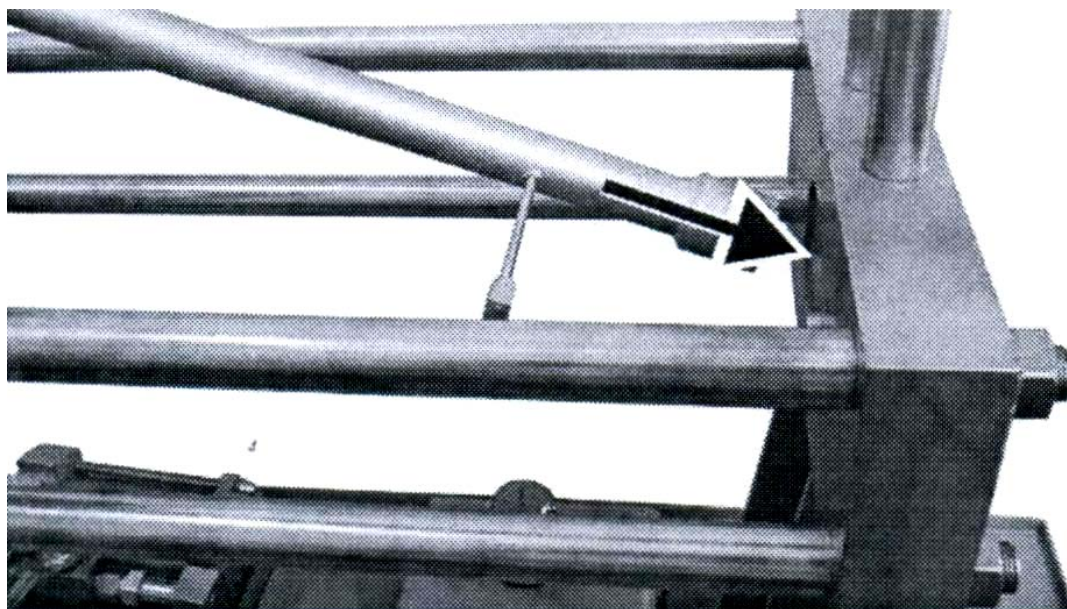


Рис. 2.3.5. Установка образца для испытаний на кручение

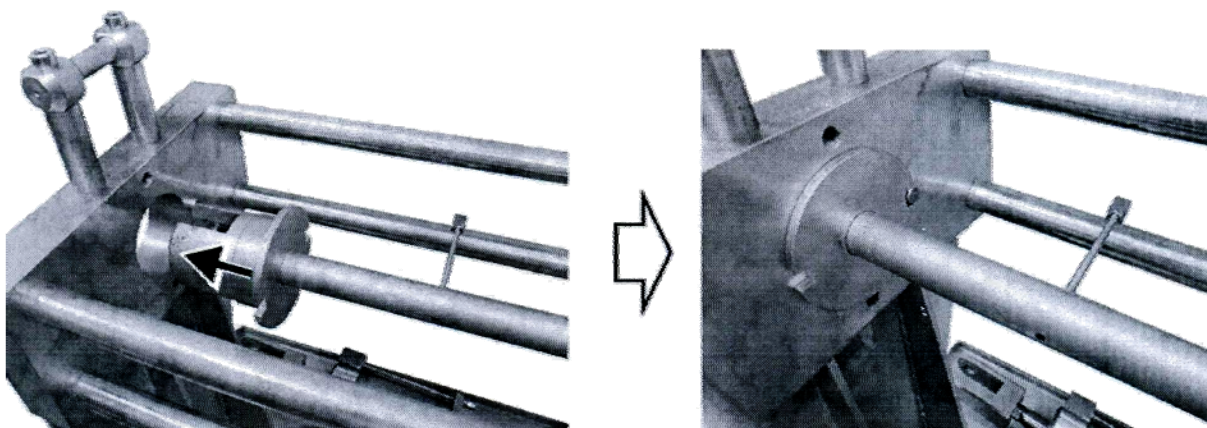


Рис. 2.3.6. Установка образца для испытаний на кручение

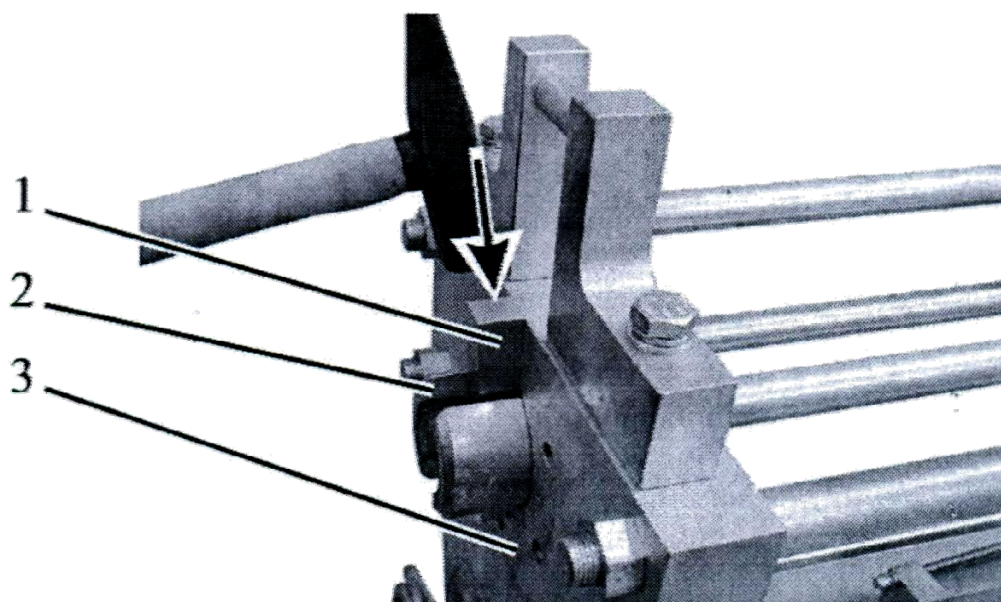


Рис. 2.3.7. Установка клинового упора

2. Установить устройство нагружения для испытаний на кручение в правую плиту силовой рамы стенда (рис. 2.3.8). 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.

3. Установить (рис. 2.3.9) 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.

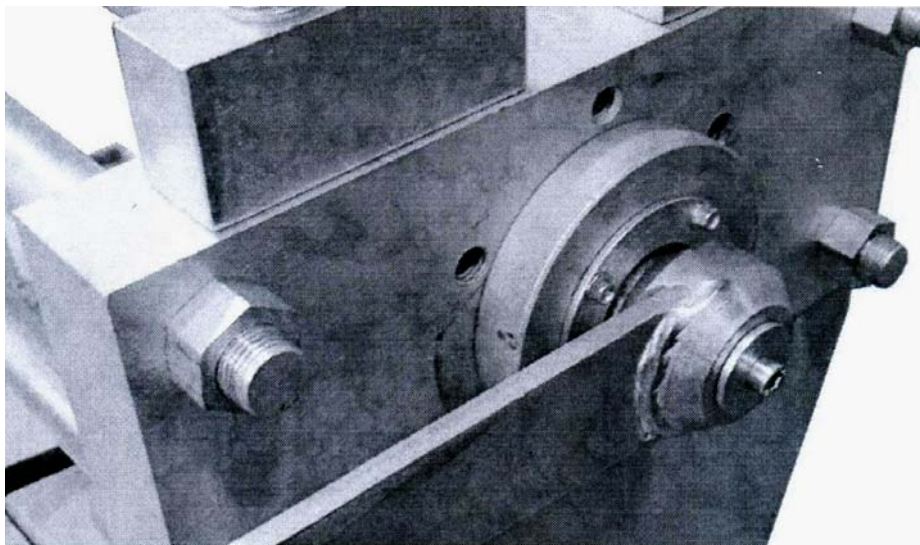


Рис. 2.3.8 Установка нагружающего устройства

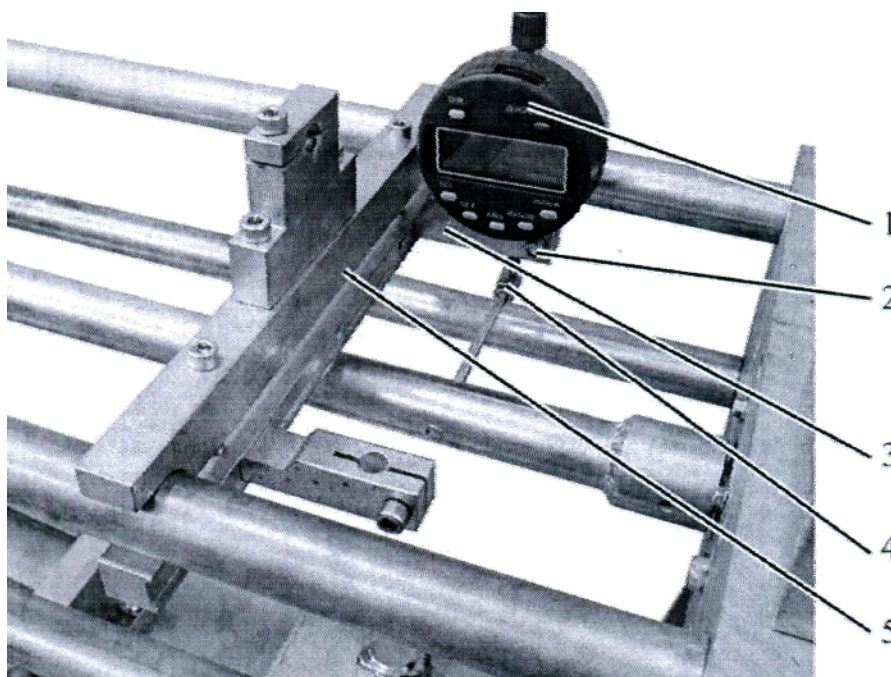


Рис. 2.3.9. Установка микрометров

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 рис. 2.3.10.

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.

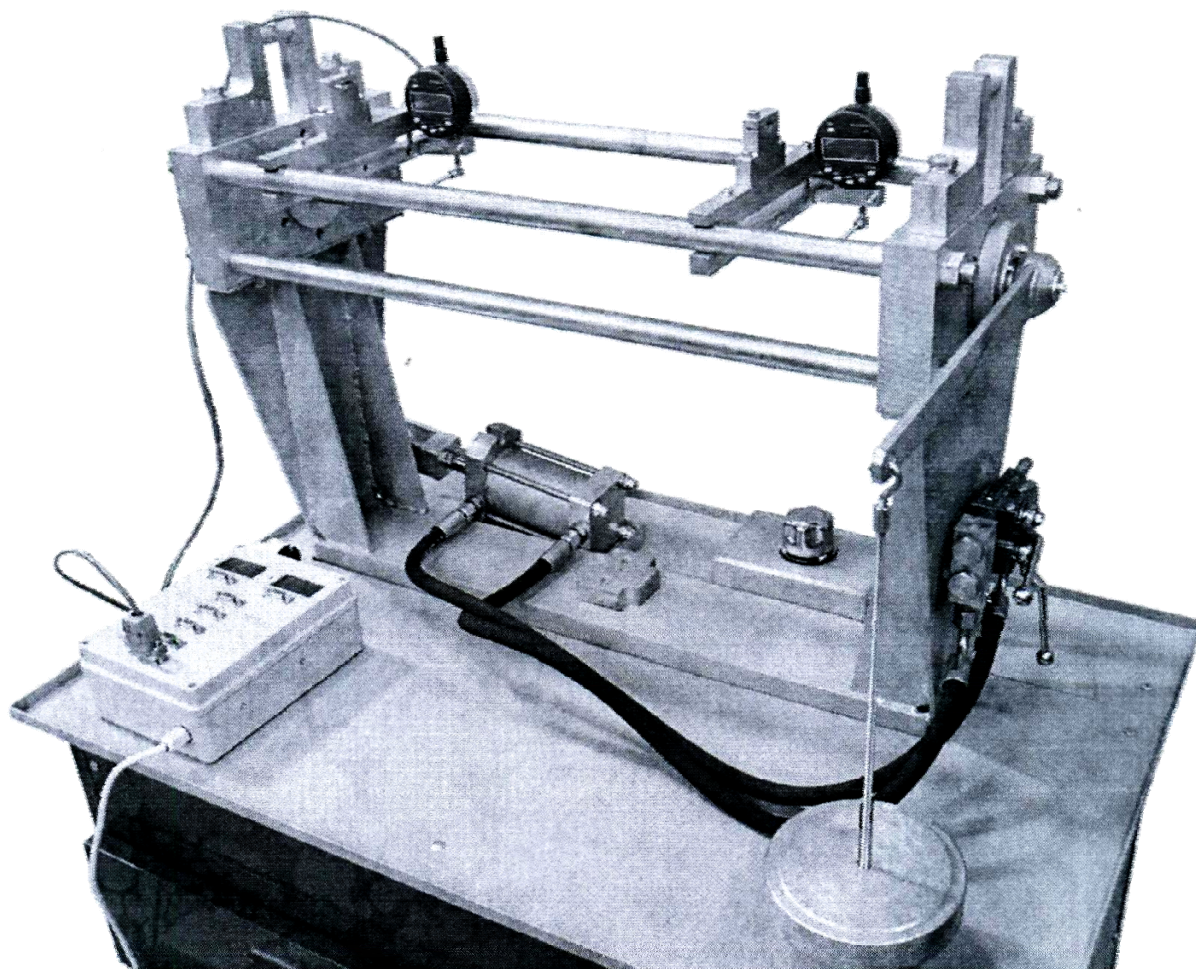


Рис. 2.3.10. Сборка стенда
для проведения лабораторной работы №3

7. Занести показания микрометров Δ_1 и Δ_2 в табл. 2.3.2.
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 табл. 2.3.2 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. Произвести оценку точности полученного результат, сравнить его с литературными данными для стали. Сделать выводы.

Т а б л и ц а 2.3.1

Геометрические параметры образца

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

Т а б л и ц а 2.3.2

Протокол испытаний

Номер груза	M , Н·мм	Δ_1 , мм	Δ_2 , мм	$\varphi = (\Delta_1 - \Delta_2)/a$
1	7350			
2	14700			
3	22050			
4	29400			
5	36750			

Контрольные вопросы

1. При каком нагружении прямой брус испытывает деформацию кручения?
2. Какое правило знаков принято для крутящих моментов?
3. Что называется углом закручивания?
4. Как выражается закон Гука при кручении?
5. По каким формулам можно определить модуль сдвига?
6. Как опытным путем определяется модуль сдвига?
7. Как экспериментально определяется угол закручивания образца? Какие измерительные приборы и приспособления при этом применяются?
8. Что называется жесткостью поперечного сечения бруса при кручении? Размерность жесткости поперечного сечения.
9. Какие факторы влияют на величину угла закручивания?
10. По какой формуле определяется полярный момент сопротивления для круглого вала сплошного сечения и для вала кольцевого сечения?

2.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4.

Испытание пластичных материалов на срез

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

Теоретические основы [2]

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 (рис. 2.4.1).

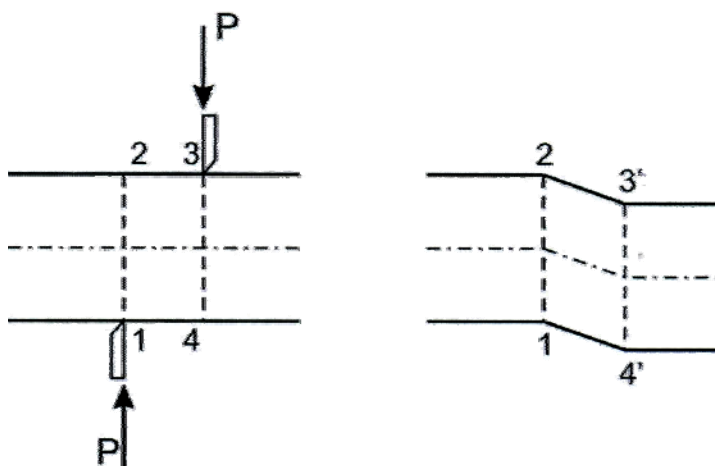


Рис. 2.4.1. Односторонний срез

Для случая нагружения, показанного на рис. 2.4.1, поперечная сила на участке 1–4 может быть определена с помощью метода сечений и будет равна

$$Q = P.$$

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

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{max}}}{F}.$$

Для случая двухстороннего среза (рис. 2.4.2):

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{max}}}{2F}.$$

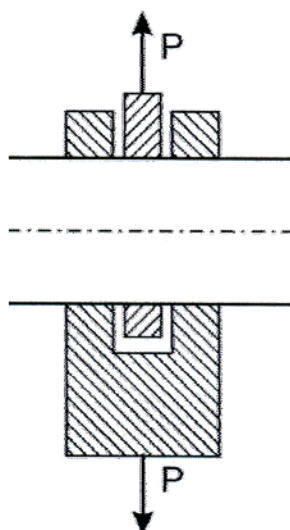


Рис. 2.4.2. Двухсторонний срез

Экспериментальная часть

1. Установить гидроцилиндр 2 на силовую раму станда (рис. 2.4.3) завернув два винта 1 и 3 на M10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.

2. Установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рис. 2.4.4) на силовую раму станда (рис. 2.4.5). Наворачивание и затяжку гайки необходимо производить «от руки», применение гаечного ключа не требуется.

3. Измерить диаметр d образца, вычислить площадь поперечного сечения F_0 , занести данные в табл. 2.4.1.

4. Вставить образец в захваты для испытаний на срез (рис. 2.4.6).

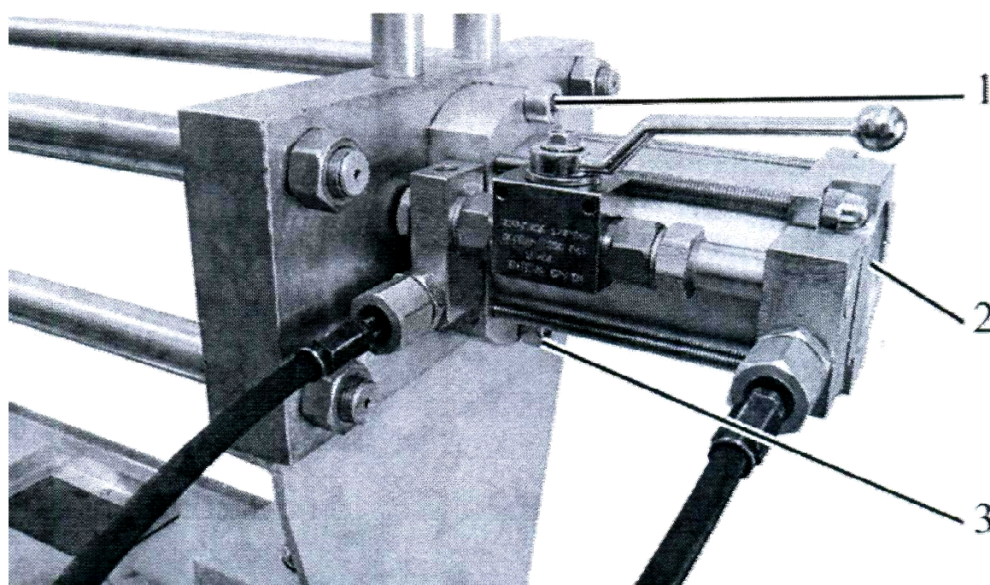


Рис. 2.4.3. Установка гидроцилиндра

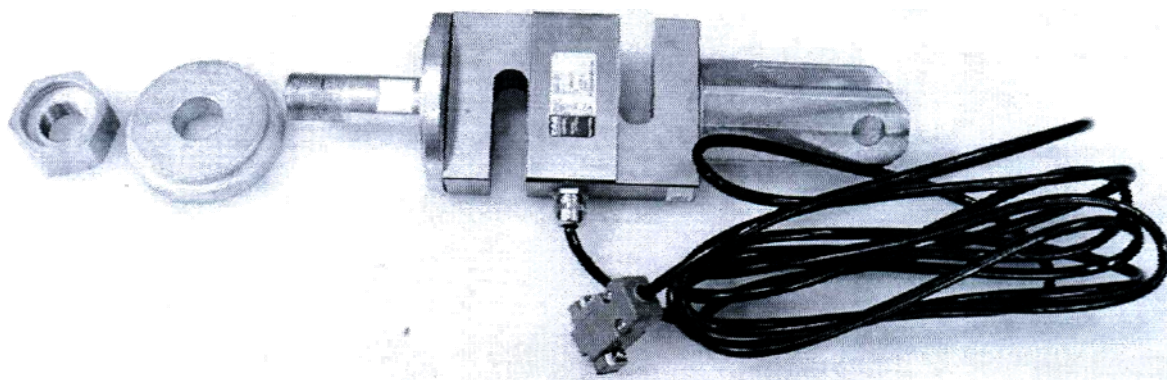


Рис. 2.4.4. Силоизмеритель на 50 кН с держателем

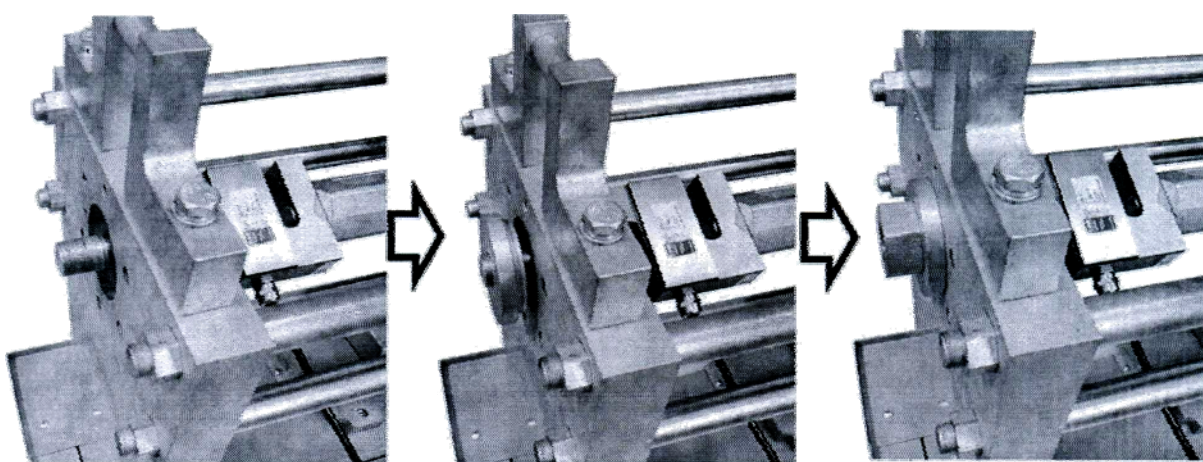


Рис. 2.4.5. Монтаж силоизмерителя на 50 кН

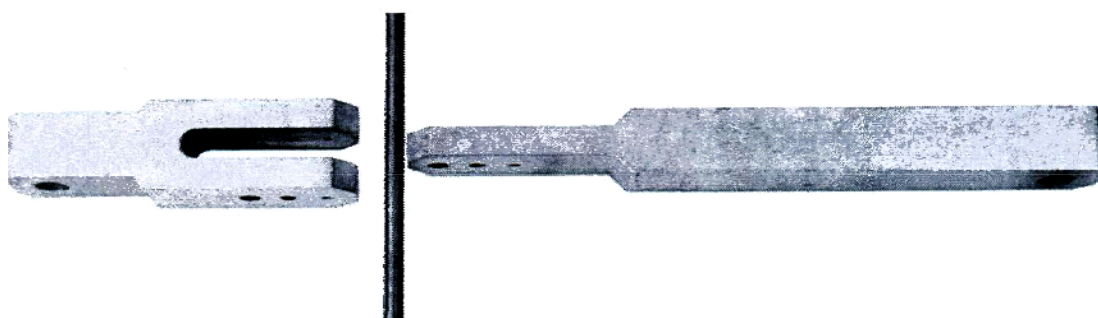


Рис. 2.4.6. Захваты для испытаний на срез

5. Установить образец с захватами 3 в вилки на силоизмерителе 1 и гидроциindre 5 (рис. 2.4.7) 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 1.2.6—1.2.8. При необходимости рукой повернуть вилку гидроцилиндра 5 для

обеспечения параллельности боковой плоскости захвата 3 с внутренней плоскостью захвата 5.

Вращать ви́лку гидроцилиндра следует только по ходу часовой стрелки, если смотреть со стороны ви́лки.

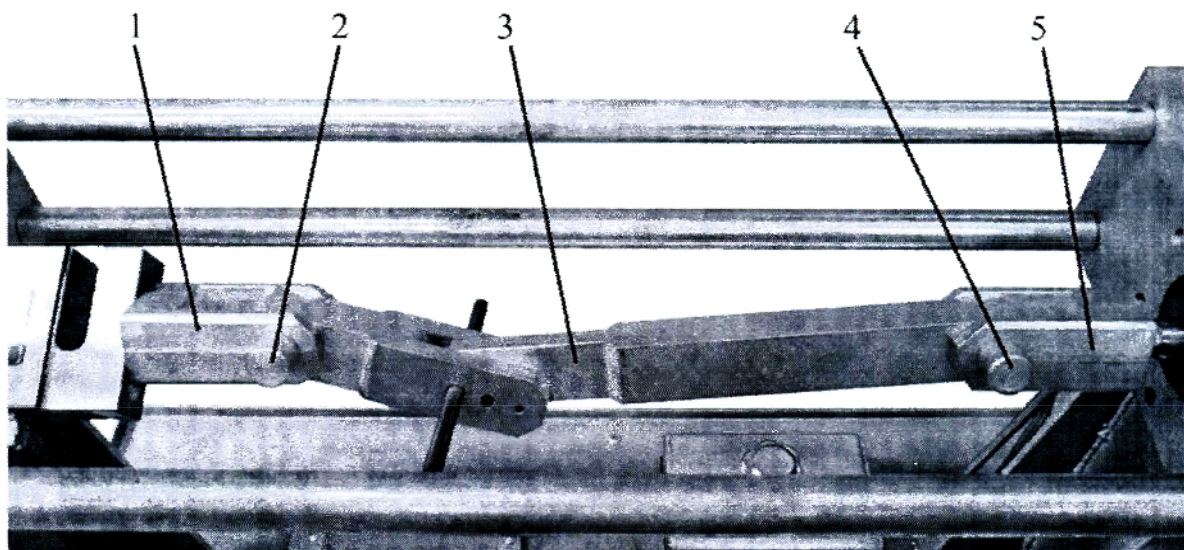


Рис. 2.4.7. Сборка стенда
для проведения лабораторной работы №4

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 F_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 $P_{\max}$. Рассчитать сопротивление срезу $\tau_{\text{ср}} = P_{\max} / F_0$, занести данные в табл. 2.4.1.
17. Сделать выводы о характере работы пластичных материалов при срезе.

Т а б л и ц а 2.4.1

Протокол испытаний

d , мм		$F_0 = \pi \cdot d^2 / 4$, мм ²	
$P_{\max}$, Н		$\tau_{\text{ср}} = P_{\max} / F_0$, МПа	

Контрольные вопросы

1. Что называется деформацией чистого сдвига?
2. Какой случай плоского напряженного состояния называют чистым сдвигом?
3. Чему равны величины главных напряжений при чистом сдвиге?
4. Как деформируется при чистом сдвиге элементарный объем?
5. Что называют абсолютным сдвигом, относительным сдвигом, углом сдвига?
6. Как записывается закон Гука при сдвиге?
7. Как определяют модуль сдвига?
8. Дать определение модуля сдвига G . Записать формулу закона Гука при сдвиге.
9. Как связаны поперечная сила Q и касательные напряжения в площадке среза?
10. Как определяют потенциальную энергию деформации при чистом сдвиге? Какая существует при этом связь между упругими постоянными (E , G , μ) для изотропного материала?

2.5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. 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 шарнирно опертой балки сосредоточенной силой в ней возникает изгибающий момент, кусочно-линейно распределенный по длине (рис. 2.5.1).

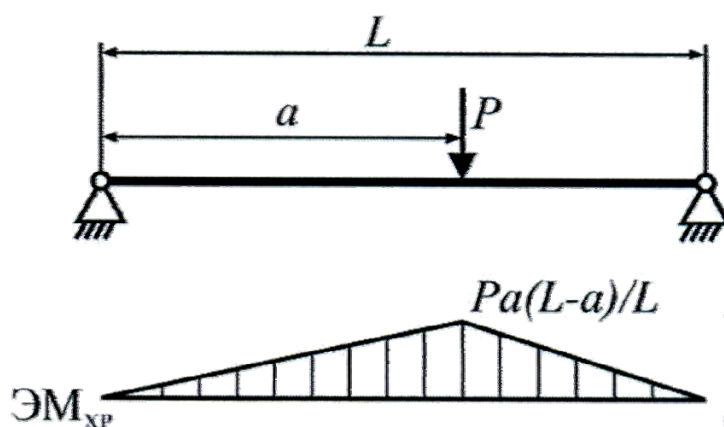


Рис. 2.5.1. Схема нагружения и эпюра изгибающего момента

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

$$\delta_b = \int_L \frac{M_{XP} \cdot M_{XM1} \cdot dz}{E \cdot J_x},$$

где M_{XP1} – момент от единичной силы, приложенной в рассматриваемой точке;

E – модуль упругости материала балки;

J_x – момент инерции сечения относительно горизонтальной оси.

Угловое перемещение в правой опоре определяется

$$\theta = \int_L \frac{M_{XP} \cdot M_{XM1} \cdot dz}{E \cdot J_x},$$

где M_{XM1} – момент от единичного момента, приложенного в рассматриваемой точке.

Эпюра изгибающего момента от единичной силы показана на рис. 2.5.2. Эпюра изгибающего момента от единичного момента, приложенного в правой опоре, показана на рис. 2.5.3.

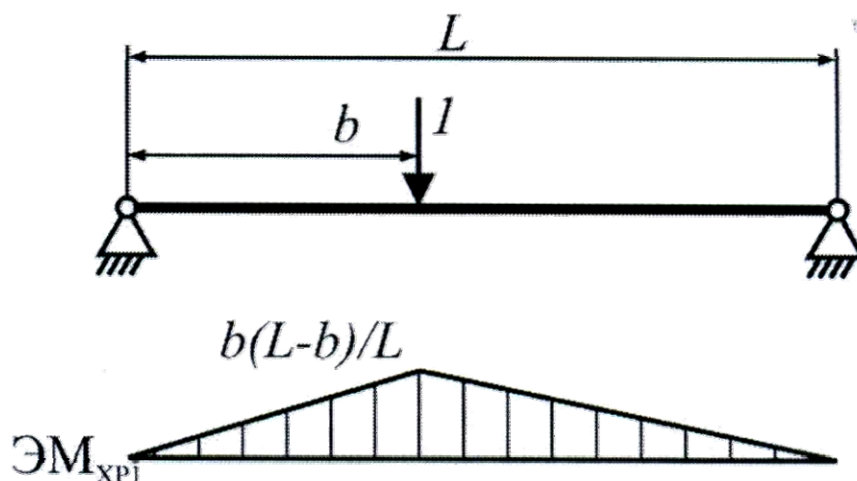


Рис. 2.5.2 Эпюра изгибающего момента от действия единичной силы

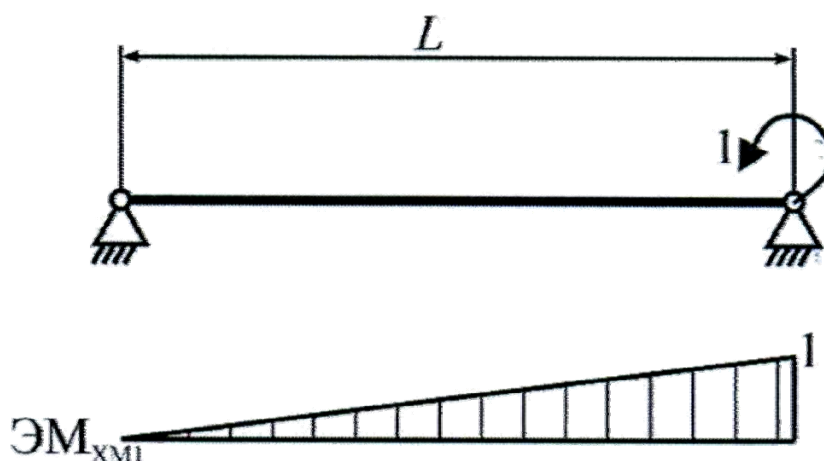


Рис. 2.5.3 Эпюра изгибающего момента от действия единичного Моментa

Экспериментальная часть

1. Установить в правую опорную плиту 3 силовой рамы захват 2 для испытаний на изгиб (рис.2.5.4). 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 клиновой упор 1 в паз на захвате, между осью в захвате и опорной плитой. Убедиться, что клиновой упор прилегает к плите силовой рамы над захватом и под захватом, после чего нанести легкий удар по кли-

ну молотком массой 0,1 кг (в комплекте стенда) в направлении стрелки, показанной на рис. 2.5.4.

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

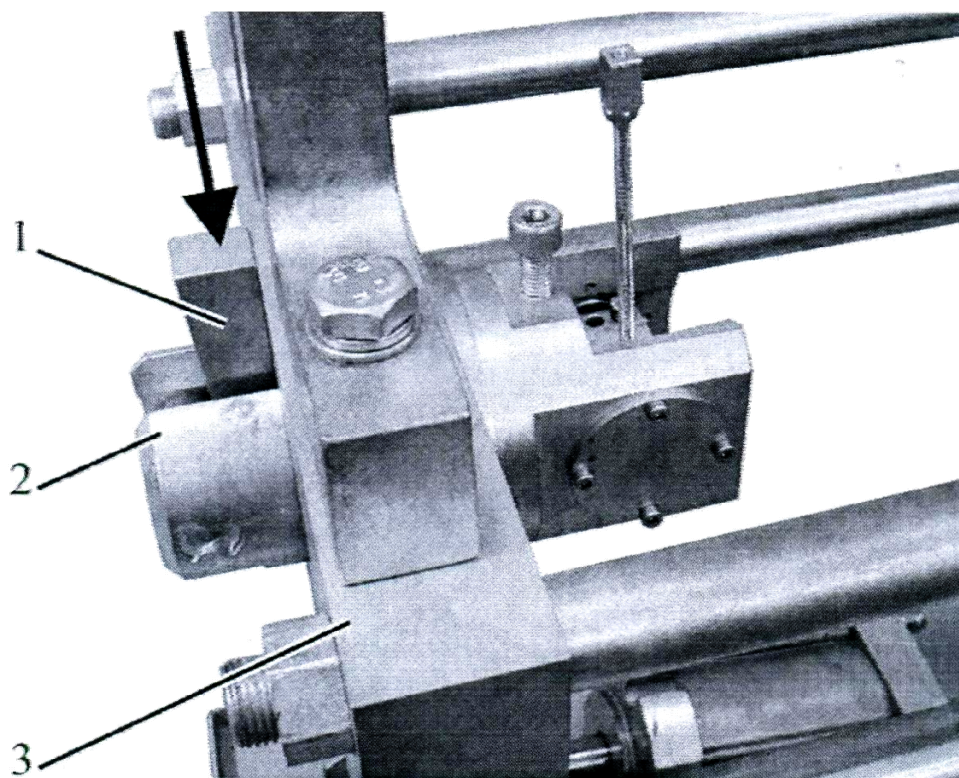


Рис. 2.5.4. Установка захвата для испытаний на изгиб

3. Измерить ширину t и толщину h образца, вычислить момент инерции поперечного сечения $J_x = t \cdot h^3 / 12$, занести данные в табл. 2.5.1.

4. Установить образец 5 в захваты (рис. 2.5.5). 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.

5. Выбрать точку на образце, в которой следует измерять перемещение, записать расстояние b от этой точки до оси левой опоры в табл. 2.5.1. Установить (рис. 2.5.5) 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.

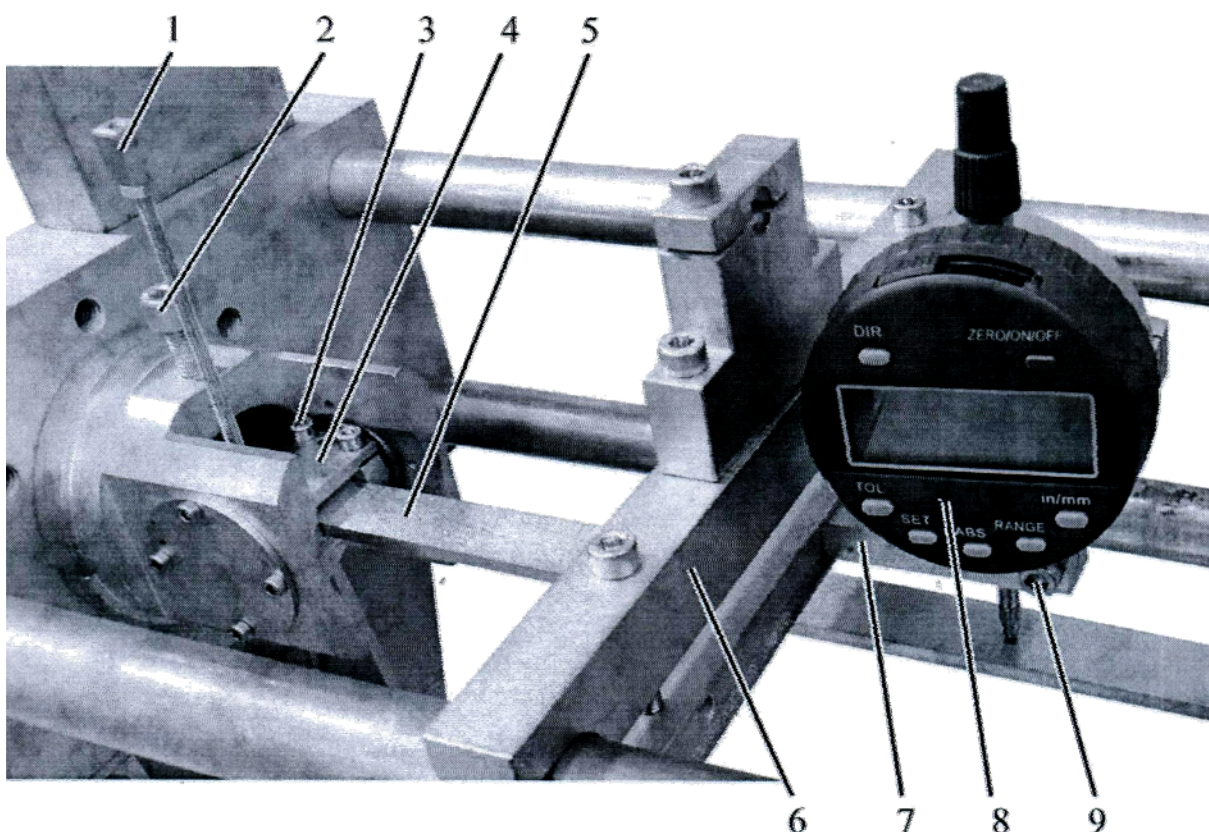


Рис. 2.5.5. Установка образца для определения перемещений при изгибе

6. Установить второй модуль крепления микрометра (рис. 2.5.6) 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 табл. 2.5.2.

8. Отмерить при помощи рулетки выбранное расстояние и установить подвес на балку (рис. 2.5.7), затянуть винты на подвесе.

9. Установить показания микрометров на «0», нажав кнопку «Zero».

10. Выбрать величину нагрузки P на образец (шаг по нагрузке 4,9 Н). Величина нагрузки не должна превышать 30 Н.

11. Установить на подвес грузы в соответствующие выбранной нагрузке.

12. Занести показания микрометров Δ_1 и Δ_2 в табл. 2.5.2

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.

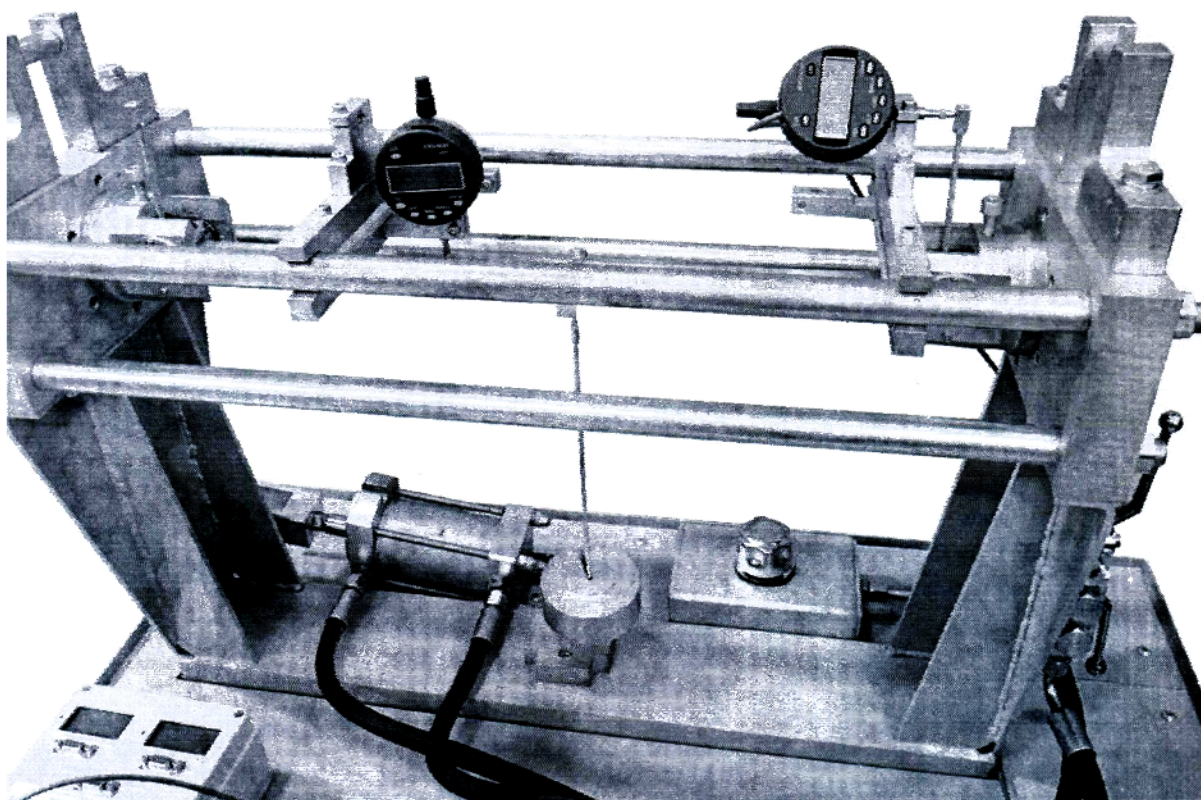


Рис. 2.5.6. Сборка стенда для проведения лабораторной работы №5

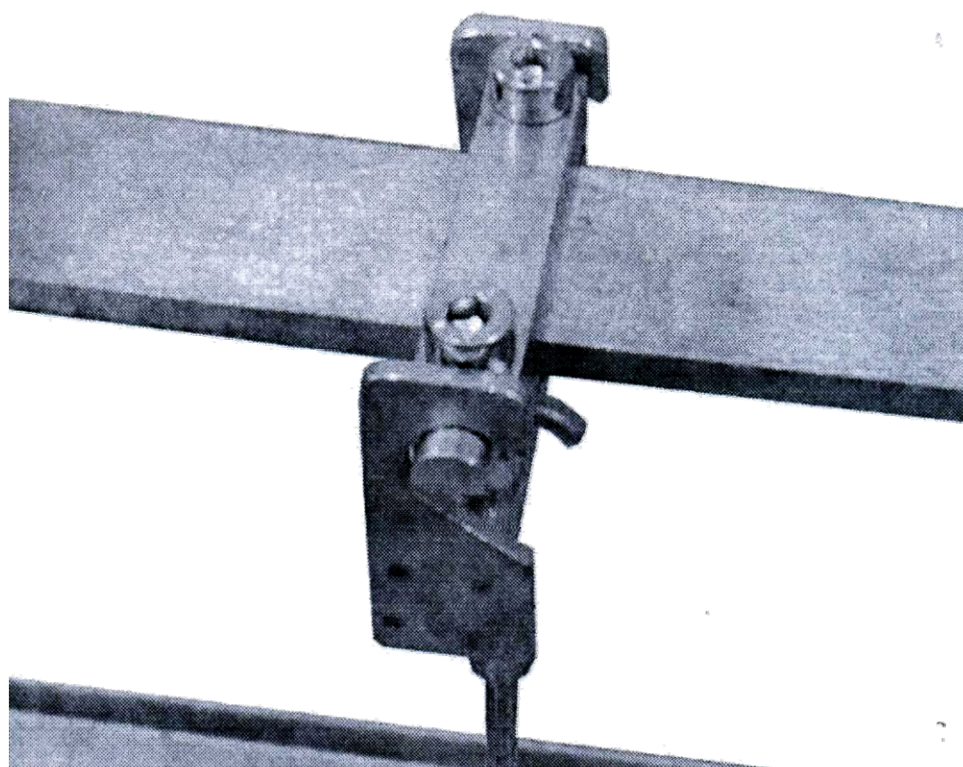


Рис. 2.5.7. Установка подвеса на балку

Т а б л и ц а 2 . 5 . 1

Геометрические параметры образца

t , мм	h , мм	J_x	Расстояние между опорами l ,
			500

Т а б л и ц а 2 . 5 . 2

Протокол испытаний

a , мм	b , мм	P , Н	Δ_1 , мм	Δ_2 , мм	$\theta = \Delta_2/100$ мм

Контрольные вопросы

1. Какие основные типы опор применяются для закрепления балок к основанию?
2. Какие опорные закрепления может иметь статически определимая балка?
3. Какие уравнения статики (равновесия) используются для определения опорных реакций?
4. Какие внутренние усилия возникают в поперечном сечении балки при чистом изгибе?
5. Какие внутренние силовые факторы возникают в сечении балки при поперечном изгибе и как они вычисляются?
6. Приведите правила знаков для изгибающих моментов и поперечных сил?
7. Как определяются границы участков при делении оси балки на участки?
8. Какими дифференциальными зависимостями связаны величины M , Q и q ?
9. Какими параметрами характеризуется деформация изгиба?
10. Для чего нужно знать величины прогибов и углов поворота сечений?
11. Что называется жесткостью сечения при изгибе?
12. Что такое упругая линия балки? Как выглядит дифференциальное уравнение этой линии? Какие приняты при этом допущения?
13. Какие теоретические способы определения перемещений в балках вам известны? Перечислите их, укажите достоинства и недостатки их применения.

14. Перечислите, какие условные правила необходимо выполнять при использовании универсального уравнения упругой линии.

15. Чем подтверждается пропорциональность между прогибами балки и нагрузкой на нее?

16. Какие перемещения получают поперечные сечения балок при изгибе?

17. Из каких граничных условий определяются постоянные интегрирования при нахождении прогибов балки?

18. Какими дифференциальными зависимостями связаны между собой внутренние усилия и перемещения при поперечном изгибе?

19. Почему при определении прогибов балки можно пользоваться приближенным дифференциальным уравнением изогнутой оси балки?

2.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6.

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, называют *балкой*.

В случае чистого изгиба (рис. 2.6.1) 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 [1].

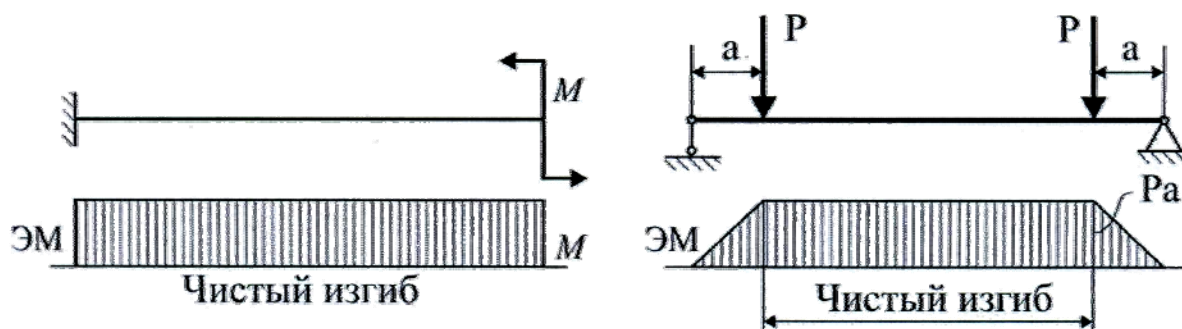


Рис. 2.6.1. Схемы нагружения и эпюры изгибающего момента

Точки, расположенные до изгиба в плоскости поперечного сечения бруса, в результате изгиба переместятся в пространстве таким образом, что их совокупность снова образует плоскость [5]. По условиям симметрии точки среднего поперечного сечения AA (рис. 2.6.2, 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

(рис. 2.6.2, б). Для данных половин средние сечения также остаются плоскими.

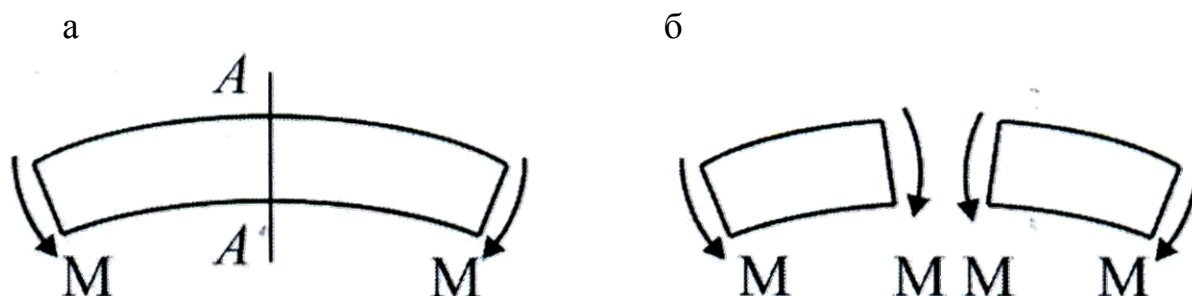


Рис. 2.6.2. Условия симметрии при чистом изгибе

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 [5]. Если рассмотреть два смежных сечения, отстоящих друг от друга на расстоянии dz (рис. 2.6.3) 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 $CD = C'D' = dz$.

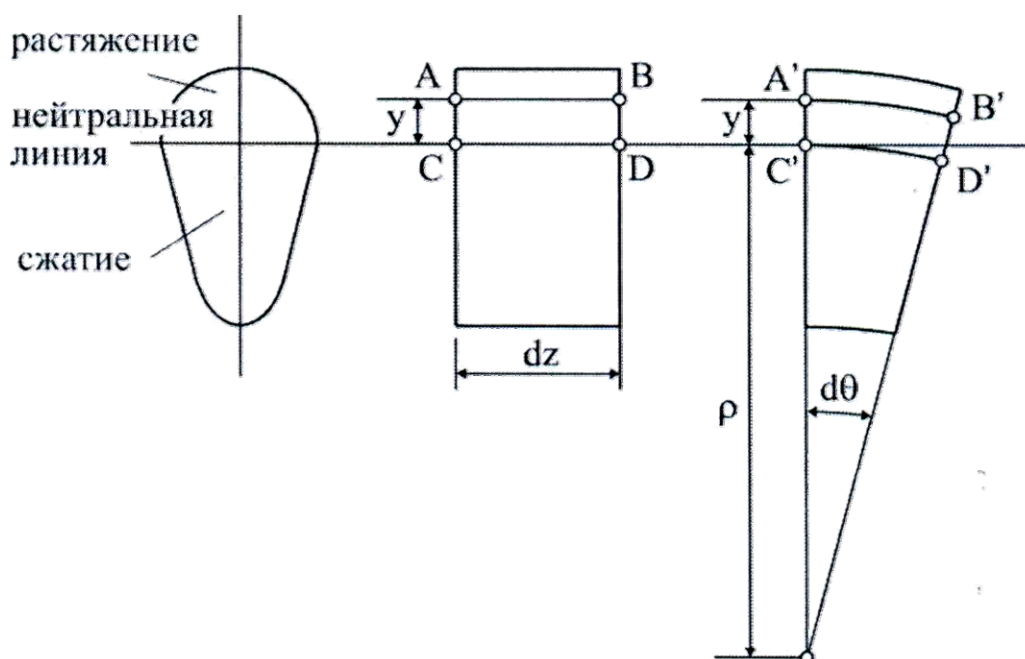


Рис. 2.6.3. Геометрические обозначения

В результате поворота сечений изменение кривизны нейтрального слоя будет равно:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dz}.$$

Произвольный отрезок $AB = dz$ (рис. 2.6.3), расположенный от CD на расстоянии y , в результате изгиба удлинится на величину $A'B' - AB$. Так как сечения остаются плоскими,

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

где y – расстояние от рассматриваемого отрезка AB до нейтрального слоя CD .

Относительное удлинение слоя AB равно:

$$\varepsilon = \frac{yd\theta}{dz} = \frac{y}{\rho}.$$

По закону Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \frac{y}{\rho}. \quad (1)$$

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 σ (рис. 2.6.4):

$$\int_F \sigma \cdot x dx = M_y;$$

$$\int_F \sigma \cdot y dx = M_x;$$

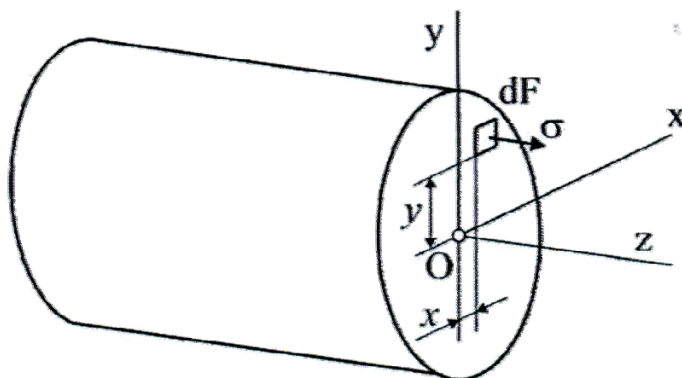


Рис. 2.6.4. Внутренние силовые факторы

Момент элементарных сил σdF относительно y равен нулю, а относительно оси x – полному изгибающему моменту M . Тогда получаем:

$$\frac{E}{\rho} \int_F y x dF = 0; \quad \frac{E}{\rho} \int_F y^2 dF = 0; \quad (2)$$

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 (2) получаем зависимость кривизны бруса от изгибающего момента:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EJ_x},$$

где J_x – момент инерции сечения относительно главной центральной оси, перпендикулярной к плоскости изгибающего момента.

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

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

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{J_x}.$$

Максимальное напряжение при изгибе возникает в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси (рисунок 2.6.5):

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot y_{\max}}{J_x}$$

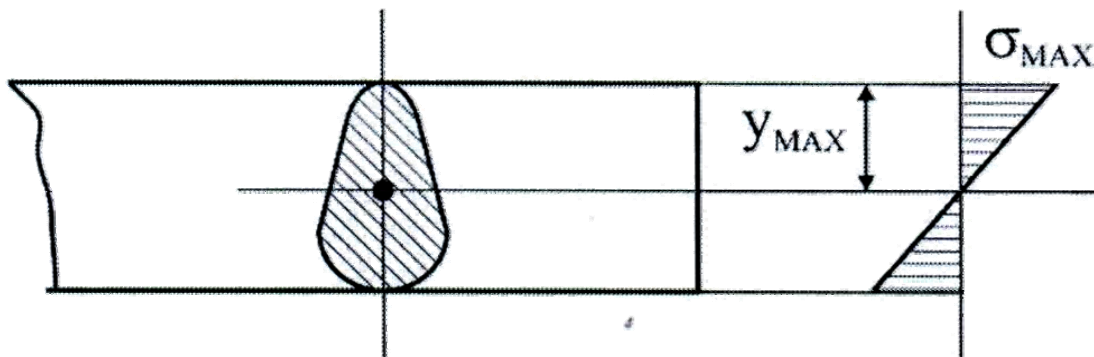


Рис. 2.6.5. Распределение напряжений по сечению

Отношение $J_x/y_{\max}$ называется моментом сопротивления сечения при изгибе W_x [см³].

Таким образом,

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{IZG}}{W_x}$$

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 W_x . 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 [3] 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 2.6.6), 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.

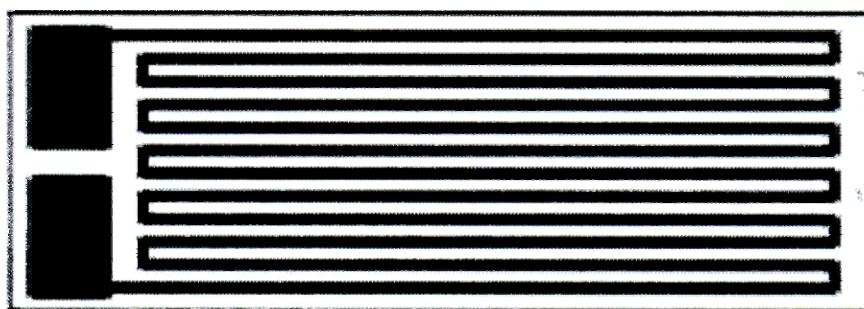


Рис. 2.6.6. Пример тензорезистора

Относительное изменение сопротивления тензорезистора пропорционально деформации

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon,$$

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 (рис. 2.6.7) 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:

$$U_{изм} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R} U_{пит} = \frac{1}{4} K \cdot \varepsilon \cdot U_{пит}.$$

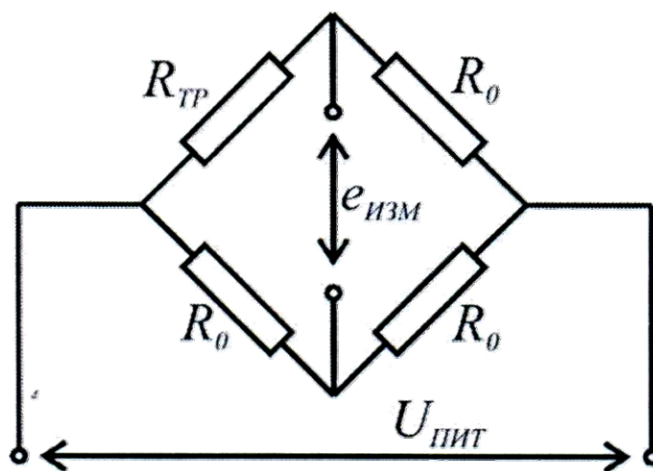


Рис. 2.6.7. Схема включения тензорезистора

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:

$$\varepsilon = \frac{4U_{изм}}{K \cdot U_{пит}}$$

Экспериментальная часть

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

1. Установить гидроцилиндр 1 на основание силовой рамы стенда (рис. 2.6.8) совместив расточку на задней крышке гидроцилиндра цилиндрическим выступом в опорной пластине 2.

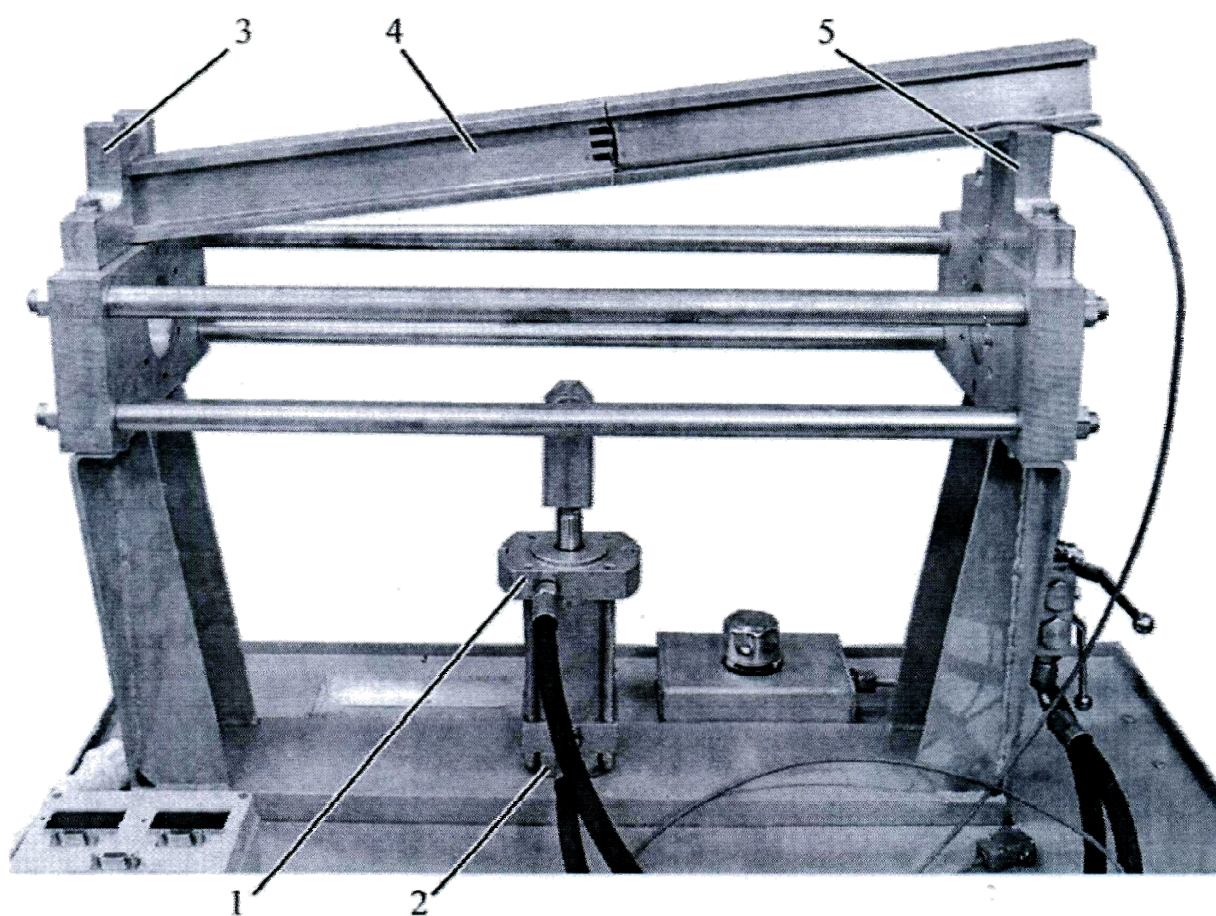


Рис. 2.6.8. Установка гидроцилиндра и балки

2. Установить (рис. 2.6.8) 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 рис. 2.6.9.

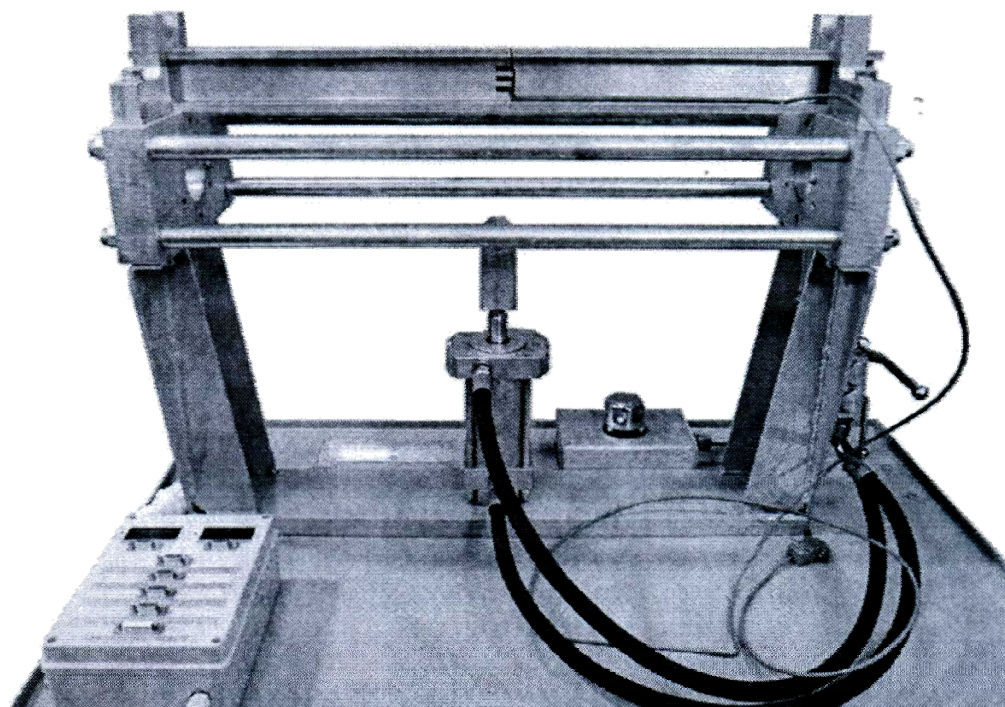


Рис. 2.6.9. Балка в установленном положении

3. Убедиться в том, что шток гидроцилиндра находится в положении, позволяющем установить силоизмеритель на 5 кН с устройством нагружения под балкой (рис. 2.6.10). При необходимости следует с помощью насоса сдвинуть гидроцилиндр в положение, обеспечивающее возможность установки силоизмерителя. Работа с насосом описана в пунктах 1.2.6–1.2.8.

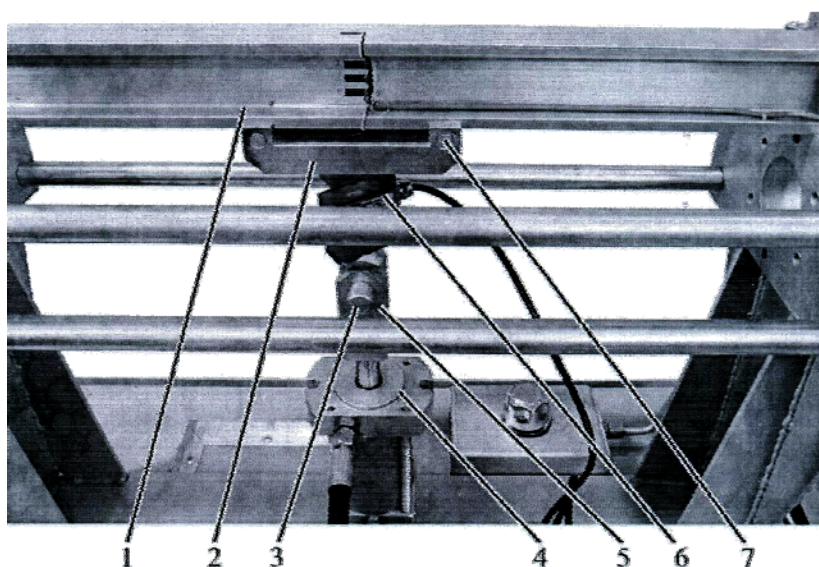


Рис. 2.6.10. Установка силоизмерителя

4. Установить силоизмеритель 6 на 5 кН с устройством нагружения 2 балки 1 (рис. 2.6.10) 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 1.2.3–1.2.5.

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 (произойдет прогрев тензоусилителей и тензорезисторов). Это может занять 5–10 минут.

9. В программе нажать кнопку «Балансировать деформации».

10. Перевести краны в положение, соответствующее выдвиганию 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 500–700 Н. Текущее значение усилия следует наблюдать по программе «ОСМ измерения».

13. Записать значение усилия значения деформации ϵ /...измеренных тензорезисторами, в табл. 2.6.2. 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 3000 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:

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{P(L-l)}{4J_x} y_i,$$

где P – 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);

J_x – момент инерции сечения двутавра относительно горизонтальной оси.

20. Рассчитать значения напряжений по деформациям, измеренным тензорезисторами $\sigma_{\text{экср}} = E \cdot \varepsilon_i$, где $E = 72$ ГПа – модуль упругости алюминиевого сплава.

21. Рассчитать по формуле Журавского касательные напряжения τ в точке установки шестого тензорезистора. В данной точке реализуется чистый сдвиг, следовательно, первое главное напряжение в этой точке $\sigma_6^1 = \tau$.

22. Первое главное напряжение, так же может быть вычислено по одной из главных деформаций, полученной путем тензометрирования (ε_6):

$$\sigma_6^1 = \frac{E}{1+\mu} |\varepsilon|.$$

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

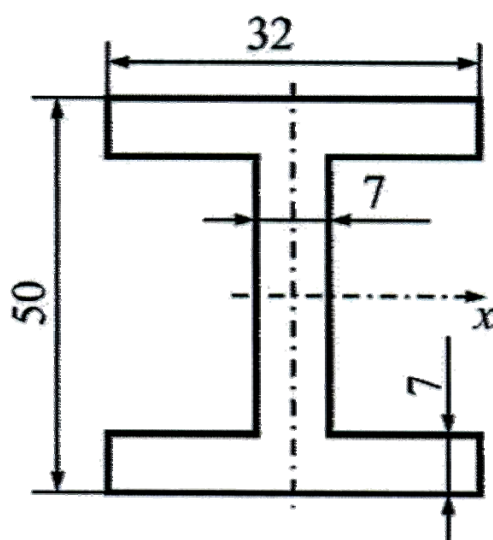


Рис. 2.6.11. Поперечное сечение балки.

Т а б л и ц а 2 . 6 . 1

Параметры образца

Номер тензорезистора	Расстояние от оси x до тензорезистора	Момент инерции J_x , 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° к продольной оси стержня		

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

Т а б л и ц а 2 . 6 . 2

Протокол испытаний

P , Н	№ i	$\sigma_{расчi}$, МПа	$\varepsilon_i \cdot 10^6$	$\sigma_{экспi}$, МПа
1	2	3	4	5
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			

Окончание табл. 2.6.2

1	2	3	4	5
	6			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			

Контрольные вопросы

1. Какой изгиб называется плоским?
2. Что такое чистый и поперечный изгиб?
3. Какие внутренние силовые факторы возникают в поперечных сечениях бруса в случае действия плоской системы сил?
4. Что такое нейтральный слой и нейтральная ось и как они располагаются в балке?
5. По какой формуле определяются нормальные напряжения в сечении балки при изгибе? Как распределяются нормальные напряжения по сечению?
6. Как опытным путем определить нормальные напряжения?
7. Какие тензометры были использованы для определения нормальных напряжений при изгибе?
8. Покажите расчетную схему балки при изгибе, на которой проводилось определение напряжений в лабораторной работе. Постройте эпюру изгибающих моментов для этой схемы и подсчитайте расчетный момент.
9. Как определить максимально допустимую величину нагрузки на испытываемую балку?
10. Как теоретически подсчитать величину ожидаемых максимальных напряжений в балке, подвергаемой опытному испытанию на изгиб?
11. Как ориентированы в изгибаемой балке главные площадки на уровне нейтрального слоя и в точках, наиболее удаленных от этого слоя? Нарисуйте эти элементы со всеми напряжениями.

2.7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7.

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 (рис. 2.7.1) в балке, выполненной из тонкостенной трубы, возникает двuosное напряженное состояние.

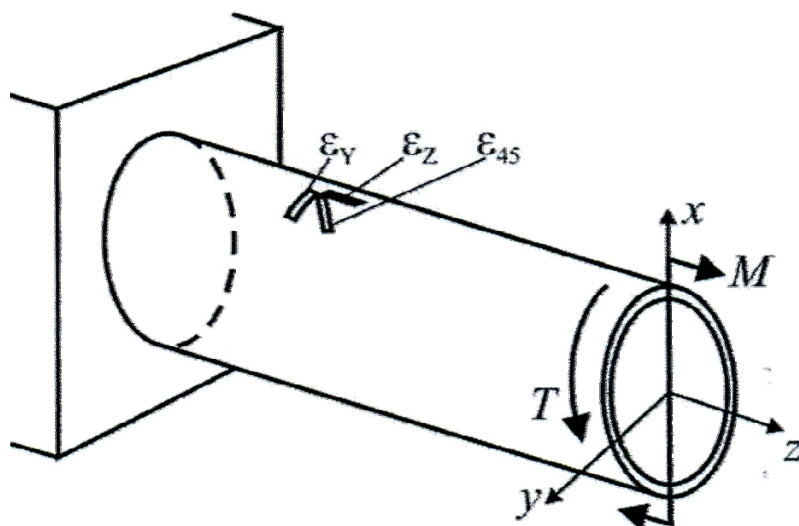


Рис. 2.7.1. Схема нагружения

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 ось z и сдвиг в плоскости yz (рисунок 2.7.2).

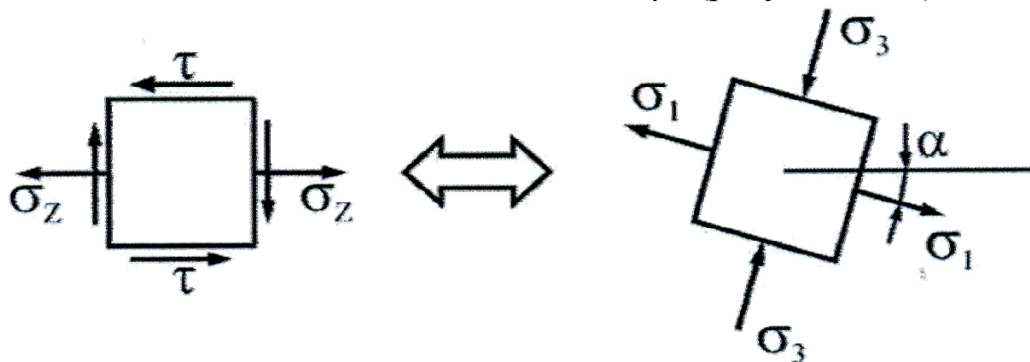


Рис. 2.7.2. Компоненты тензора напряжений

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

$$\sigma_z = \frac{M}{W_y} = \frac{4M}{\pi D^2 t} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{T}{W_p} = \frac{2M}{\pi D^2 t} \quad (2)$$

Значения главных напряжений:

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_z}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma_z^2}{4} + \tau^2} \quad (3)$$

С другой стороны значение главных напряжений могут быть найдены экспериментальным путем методом тензометрирования. При тензометрировании определяются деформации в трех направлениях вдоль оси стержня – ϵ_z , перпендикулярно к оси стержня – ϵ_y , под углом 45° к оси стержня – ϵ_{45} .

Главные деформации могут быть вычислены следующим образом:

$$\epsilon_{1,3} = \frac{\epsilon_z + \epsilon_y}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_{45}) + (\epsilon_y - \epsilon_{45})^2}.$$

Из закона Гука можно выразить главные напряжения через главные деформации:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_1 + \mu\epsilon_3) \\ \sigma_3 = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_3 + \mu\epsilon_1) \end{cases} \quad (4)$$

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 тензореистора) 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 Н (шаг 24,5 Н).

1. Установить образец для изучения сложного напряженного состояния (рис. 2.7.3). 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.

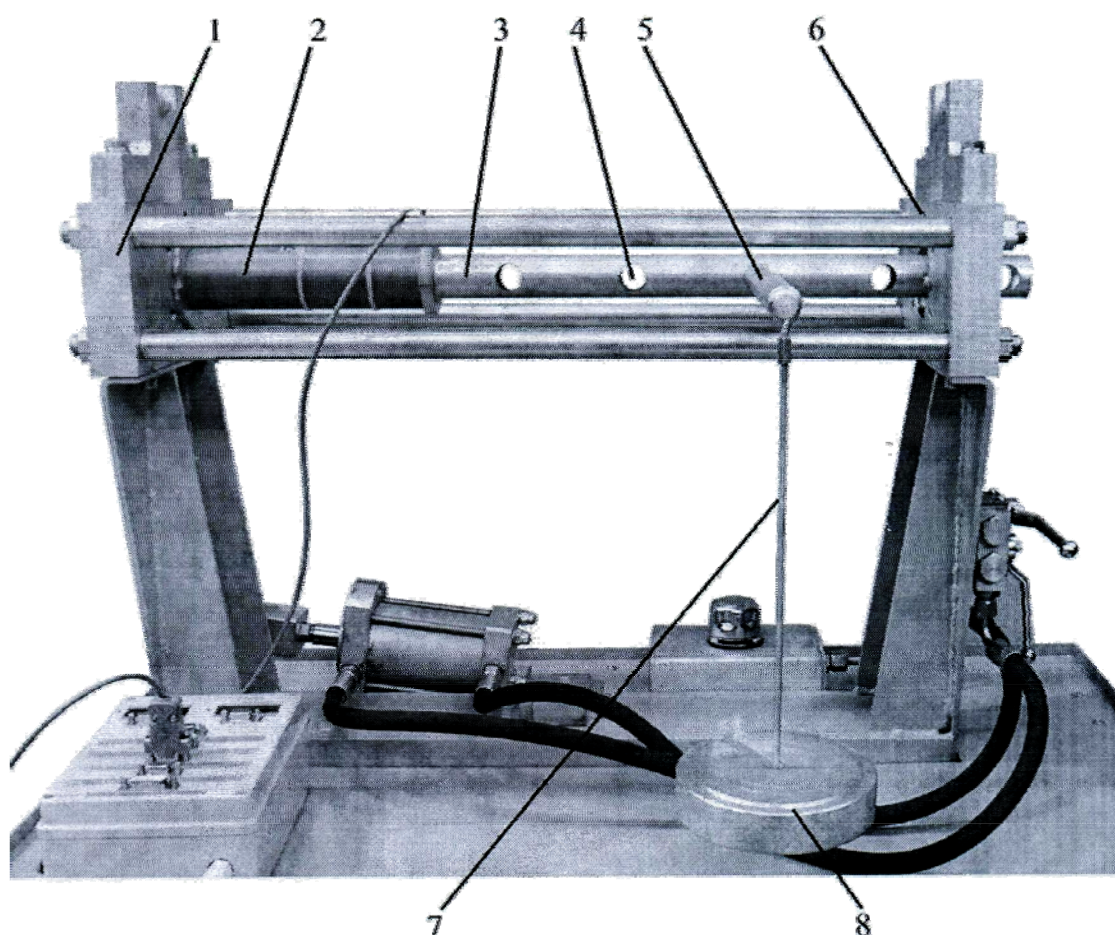


Рис. 2.7.3 Сборка стенда для лабораторной работы №7

2. Закрепить устройство заделки образца в левой опорной плите (рис. 2.7.4). Установить 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 рис. 2.7.4.

3. Установить (рис. 2.7.3) рычаг 5 нагрузителя в одно из отверстий 4 в трубе 3, в соответствии с заданным плечом изгиба. Установить фиксатор рычага в отверстие в рычаге (рис. 2.7.5). Работа без фиксатора запрещена.
4. Выдвинуть рычаг на расстояние, соответствующее плечу кручения.
5. Установить (рис. 2.7.3) подвес 7 на рычаг 5.
6. Подключить разъем тензорезисторов к измерительнопреобразовательному блоку.
7. Выполнить пункты 1.2.3–1.2.5.

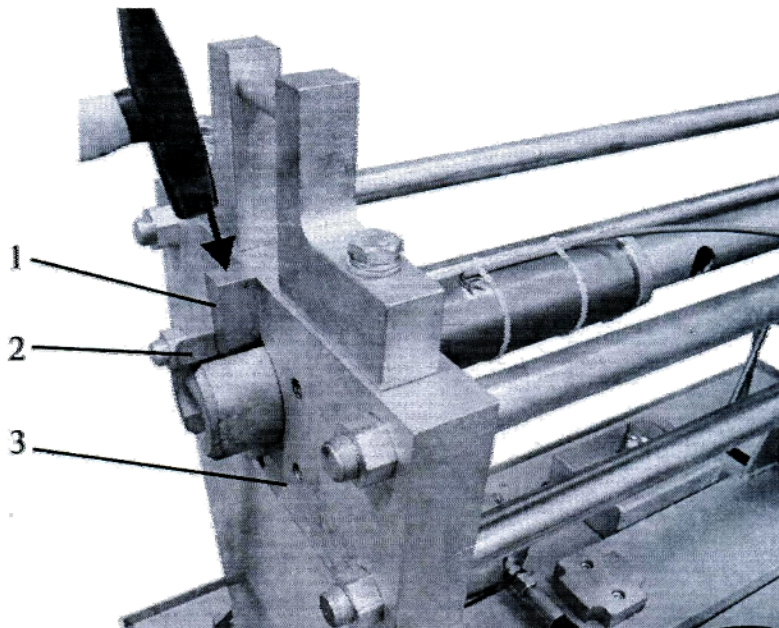


Рис. 2.7.4. Фиксация образца клиновым упором

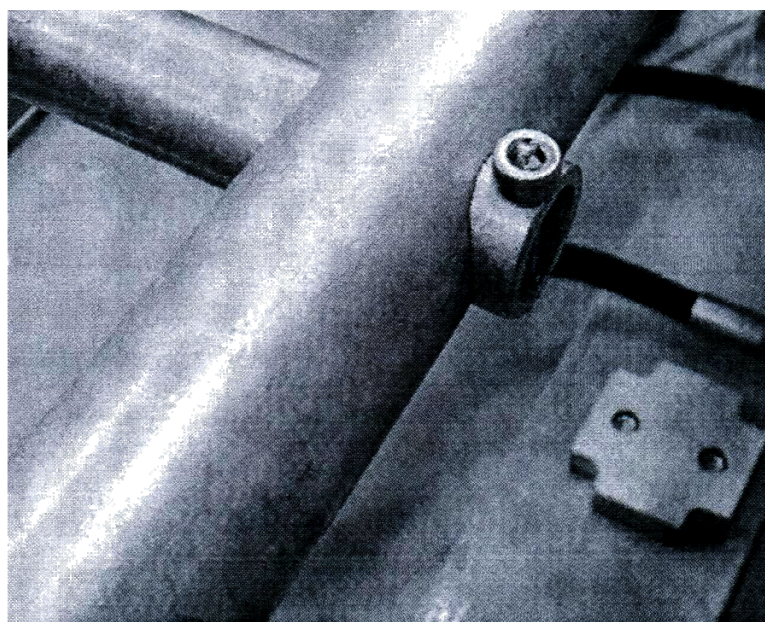


Рис. 2.7.5 Фиксатор рычага

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 (проойдет прогрев тензоусилителей и тензорезисторов). Это может занять 5–10 минут.

10. В программе нажать кнопку «Балансировать деформации».

11. Установить (рис. 2.7.3) грузы 8 на подвес 7, в соответствии с заданной нагрузкой.

12. Записать показания тензорезисторов в табл. 2.7.1. Тензорезистор №1 соответствует ε_z , №2 – ε_{45} , №3 – ε_y (по нумерации в программе «ОСМ измерения»).

13. Записать величины плеча изгиба, плеча кручения, нагрузки в табл. 2.7.1.

14. Вычислить значения главных напряжений двумя способами – по нагрузке и по показаниям тензорезисторов. Сравнить полученные значения. Сделать выводы.

Т а б л и ц а 2 . 7 . 1

Протокол испытаний

Расчет по нагрузке							
L , мм		$M=P \cdot L$, Н·мм		σ_z , МПа		σ_1 , МПа	
P , Н		$T=P \cdot l$, Н×мм		τ , МПа		σ_2 , МПа	
l , мм							
Расчет по тензометрированию							
$\varepsilon_z \cdot 10^6$		$\varepsilon_1 \cdot 10^6$		σ_1 , МПа			
$\varepsilon_y \cdot 10^6$							
$\varepsilon_{45} \cdot 10^6$		$\varepsilon_2 \cdot 10^6$		σ_2 , МПа			

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.

Контрольные вопросы

1. Что называется валом?
2. Какой вид нагружения прямого вала называется кручением?
3. Как вычисляется скручивающий момент, передаваемый шкивом, по заданной мощности и числу оборотов в минуту?
4. Что такое эпюра крутящего момента и как она строится?
5. Что называется полным и относительным углом закручивания вала?
6. Перечислите гипотезы, принимаемые в теории кручения прямого вала круглого поперечного сечения.
7. Какие напряжения возникают в поперечном сечении круглого вала при кручении и как они направлены?
8. Напишите формулу для определения напряжений в поперечном сечении скручиваемого круглого вала.
9. Какое напряженное состояние возникает в каждой точке круглого вала при кручении?
10. Напишите формулу для определения относительного и полного угла закручивания круглого вала.
11. Что называется жесткостью сечения при кручении?
12. Напишите выражение полярных моментов инерции для круглого и кольцевого сечений.
13. Какие внутренние силовые факторы возникают в поперечных сечениях вала при совместном действии изгиба и кручения? Какие из них учитывают в расчетах? Какие им соответствуют напряжения?
14. Какие напряжения возникают при совместной деформации кручения и изгиба и как они вычисляются?
15. Какие точки круглого бруса являются опасными и какое напряженное состояние в этих точках при кручении с изгибом?
16. В каких точках круглого поперечного сечения возникают наибольшие напряжения при изгибе с кручением?
17. Почему при расчете валов круглого сечения на изгиб с кручением не учитывают влияние поперечных сил?

2.8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8.

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 [1]. 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 (рис. 2.8.1, а). При достаточно большой силе стержень не может сохранять прямолинейную форму и изогнется.

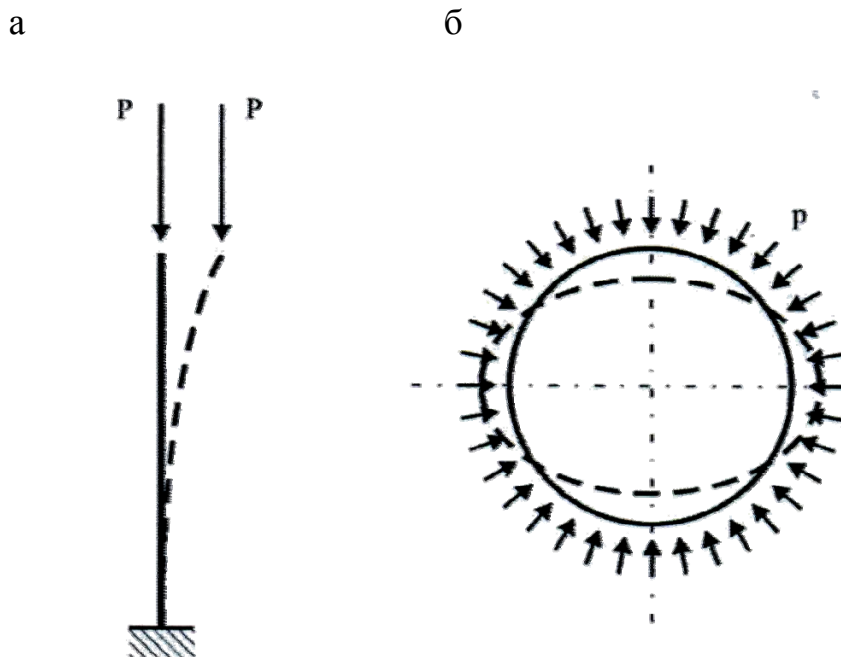


Рис. 2.8.1. Потеря устойчивости при нагружении конструкций

Еще одним примером потери устойчивости может быть тонкостенная труба, нагруженная внешним давлением (рис. 2.8.1, б), при этом круговая форма сечения переходит в эллиптическую, а затем труба полностью сплющивается, хотя напряжения к моменту потери устойчивости не достигают предела текучести.

Поэтому для надежной работы конструкции мало, чтобы она была прочна, необходимо чтобы все ее элементы были устойчивы [6]. 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 (рис. 2.8.2) и нагрузим его сверху центрально силой P , постепенно возрастающей. Пока сила P 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 P стержень будет все медленнее возвращаться к первоначальному положению при проверках его устойчивости. Силу P можно довести до такой величины, при которой стержень после небольшого отклонения в сторону уже не выпрямится, а останется искривленным. Если не удаляя силы P , выпрямить стержень, то он уже не сможет сохранить прямолинейную форму. При этом значении силы P , называемом *критическим* P_k , прямолинейная форма перестает быть устойчивой формой равновесия сжатого стержня. Критическая сила P_k вызывает в сжатом стержне напряжение, называемое «*критическим напряжением*» $\sigma_k = P_k/F$. Критические напряжения являются опасными напряжениями для сжатого стержня. Поэтому чтобы обеспечить устойчивость прямолинейной формы стержня к условию прочности добавляют условие устойчивости:

$$\sigma = P/F \leq [\sigma_y],$$

где $[\sigma_y]$ – допускаемое напряжение на устойчивость, равное критическому, деленному на коэффициент запаса на устойчивость $[\sigma_y] = \sigma_k/n$.

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

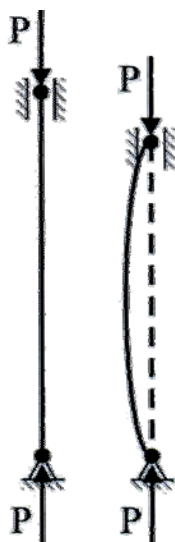


Рис. 2.8.2. Устойчивость продольно сжатого стержня

Рассмотрим прямой стержень постоянного сечения, шарнирно опертый по концам (рис. 2.8.3). Нагрузим стержень центрально приложенными продольными сжимающими силами $P = P_k$ и дадим ему весьма небольшое искривление в плоскости наименьшей жесткости.

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

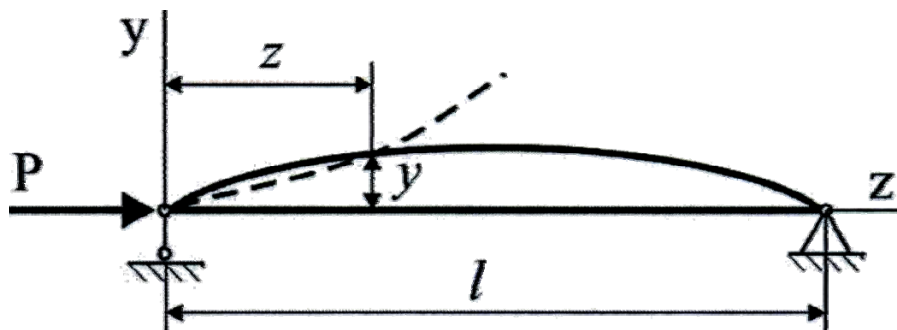


Рис. 2.8.3. Задача Эйлера

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

$$E \cdot J \cdot y'' = M, \quad (1)$$

где E – модуль упругости;

J – минимальный момент инерции сечения, M – изгибающий момент.

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

$$E \cdot J \cdot y'' = -P \cdot y, \quad (1)$$

Обозначим

$$P/EJ=k^2. \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$y''+k^2 \cdot y=0,$$

откуда

$$y = C_1 \cdot \sin kz + C_2 \cdot \cos kz.$$

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 (2), получаем:

$$P = \pi^2 n^2 EJ/l^2.$$

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

$$P_{кр} = \pi^2 EJ/l^2.$$

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

При $n = 1$

$$kl = \pi,$$

и уравнение упругой линии стержня принимает вид

$$y = C_1 \cdot \sin(\pi z/l)$$

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 (рис. 2.8.4).

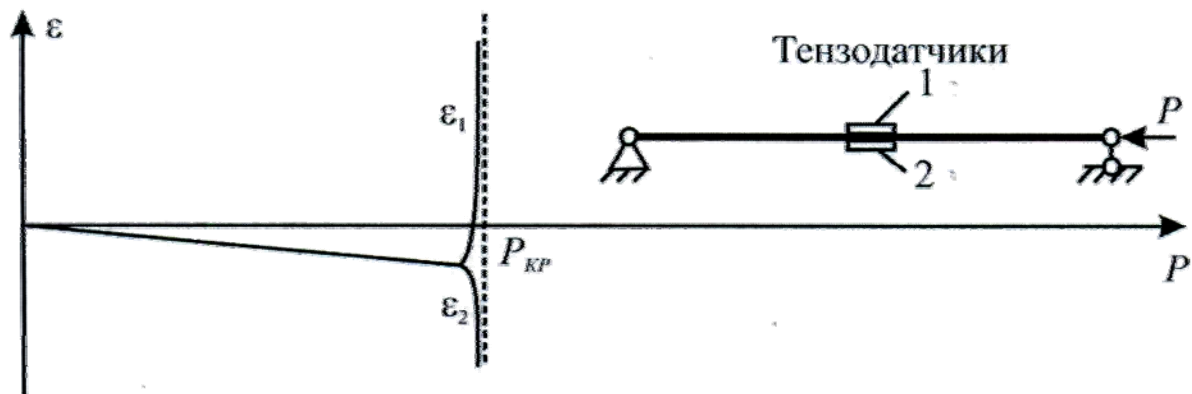


Рис. 2.8.4. Зависимость деформаций от сжимающей силы

Экспериментальная часть

1. Установить гидроцилиндр 2 на силовую раму стенда (рис. 2.8.5) завернув два винта 1 и 3 на М10 с цилиндрической головкой и внутренним шестигранником.
- 2.

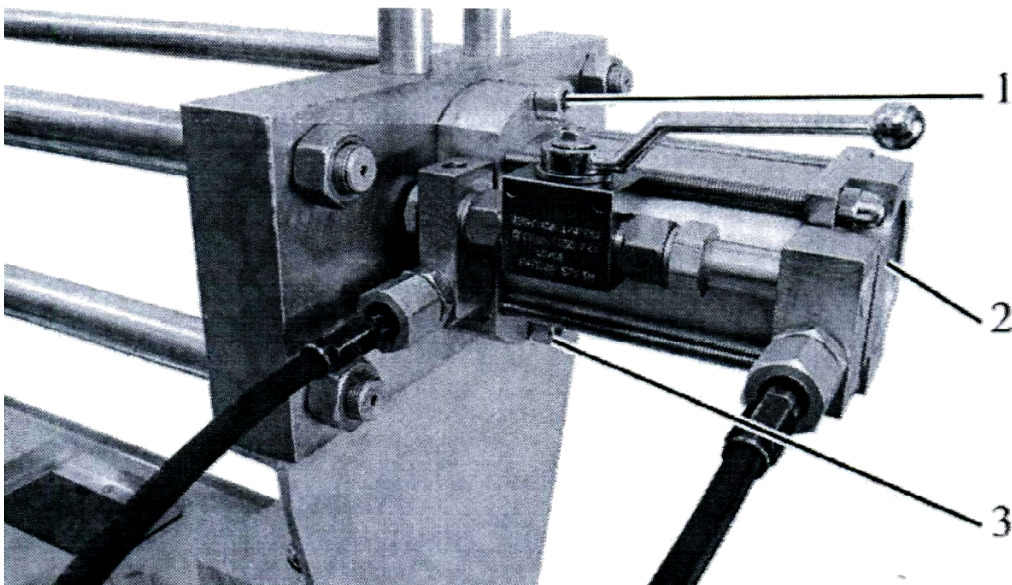


Рис. 2.8.5. Установка гидроцилиндра

2. Установить силоизмеритель на 50 кН с держателем (рис. 2.8.6) на силовую раму стенда (рис. 2.8.7). Наворачивание и затяжку гайки необходимо производить «от руки», применение гаечного ключа не требуется.

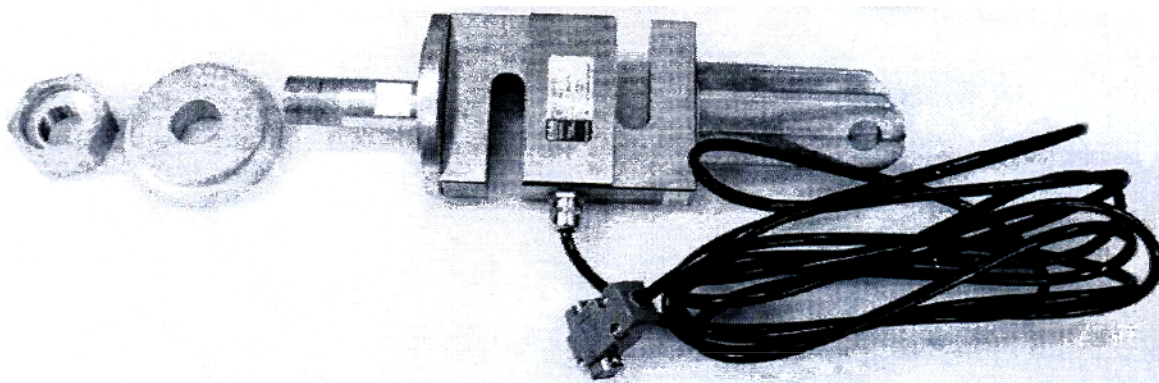


Рис. 2.8.6. Силоизмеритель на 50 кН с держателем

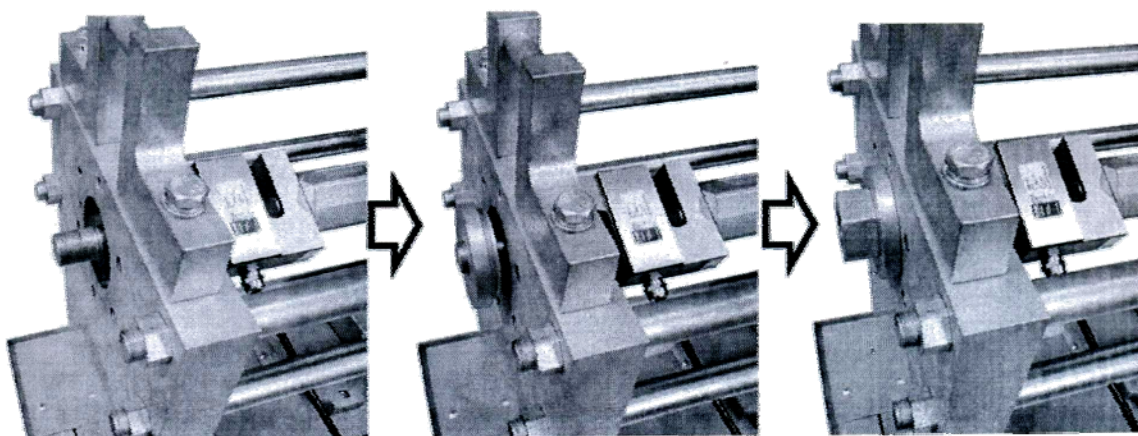


Рис. 2.8.7. Монтаж силоизмерителя на 50 кН

3. Измерить ширину b и толщину t образца, вычислить наименьший момент инерции поперечного сечения J_x , занести данные в табл. 2.8.1.

4. Установка образца показана на рис. 2.8.8. 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.

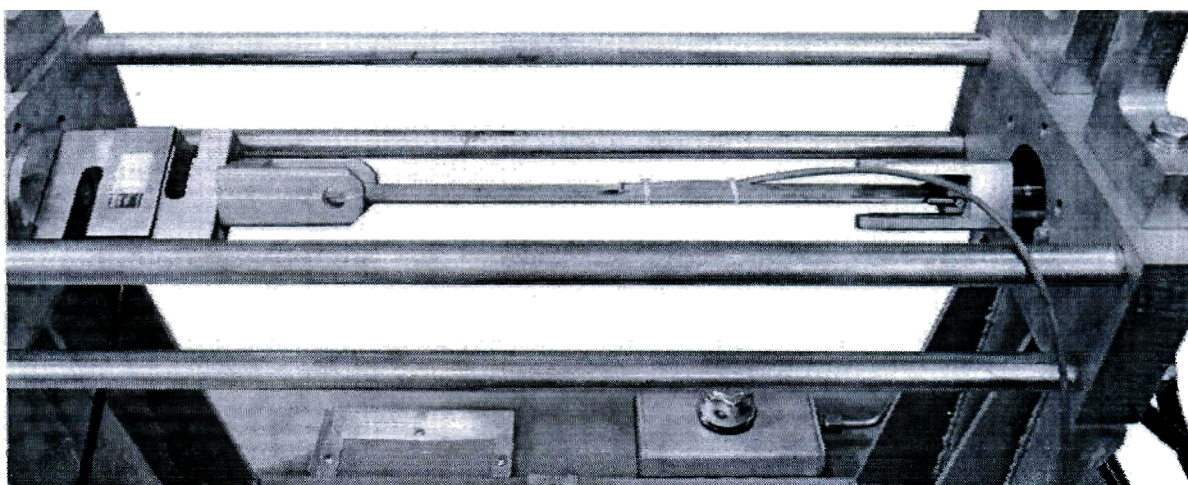


Рис. 2.8.8. Сборка стенда для проведения лабораторной работы №8

5. Образец установить промежуточной опорой с цилиндрическим центрирующим выступом большего диаметра в вилку силоизмерителя. После этого совместить ось второй промежуточной опоры с осью вилки гидроцилиндра (рис. 2.8.9) и произвести выдвижение гидроцилиндра до входа цилиндрического выступа в отверстие в вилке.

6. Подключить разъемы силоизмерителя на 50 кН, тензодатчиков, установленных на образце к измерительно-преобразовательному блоку.

7. Выполнить пункты 1.2.3–1.2.5.

8. В программе выбрать пункт меню «Тензометрирование».

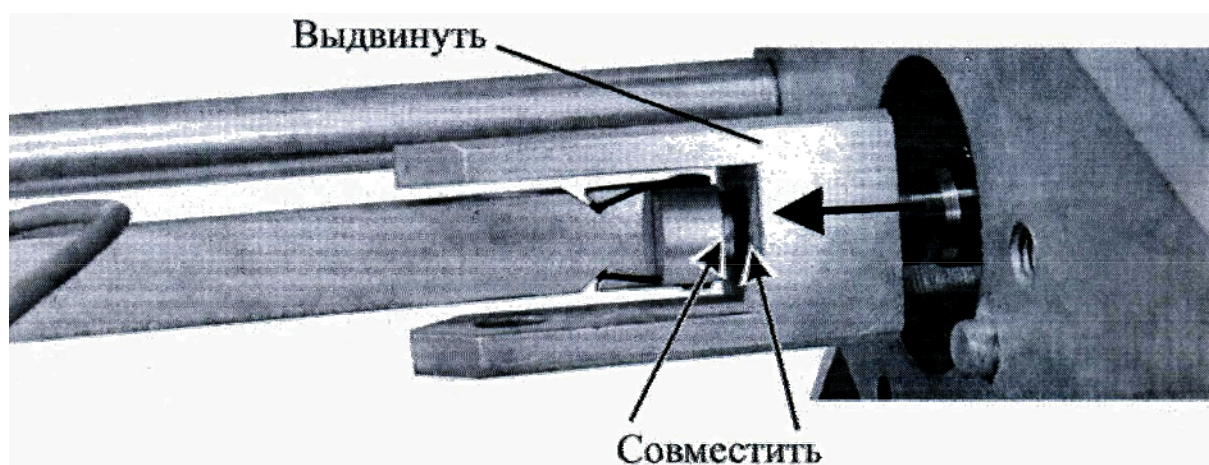


Рис. 2.8.9. Установка образца в вилку гидроцилиндра

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 выдвижению 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 $(500...600)10^6$. 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 2.8.2.

20. Определить критическую силу по формуле Эйлера, занести значение в таблицу 2.8.2. Сравнить полученные значения. Сделать выводы.

Т а б л и ц а 2 . 8 . 1

Геометрические параметры образца

t , мм	b , мм	l , мм	J_x , мм ⁴
	4		

Т а б л и ц а 2 . 8 . 2

Протокол испытаний

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

Контрольные вопросы

1. Какой изгиб называется продольным?
2. Что понимается под критической силой?
3. От чего зависит величина критической силы?

4. Когда применима формула Эйлера?
5. Что такое коэффициент приведения длины и чему он равен при различных случаях закрепления концов сжатых стержней?
6. Как определяется критическое напряжение, если формула Эйлера неприменима?
7. Чему равна гибкость стержня?
8. Как определить предельную гибкость?
9. Как опытным путем определить значение критической нагрузки?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов [Текст] / В.И. Феодосьев // М.: Наука, 1970.
2. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов [Текст] / Г.С. Писаренко, [и др.]; под ред. Г.С. Писаренко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа, 1979.
3. Макарова, Р.А. Тензометрия в машиностроении [Текст]: справочное пособие / Р.А. Макарова – М.: Машиностроение, 1975.
4. Дарков, А.В. Сопротивление материалов [Текст]: учебник для втузов. / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. – 4-е. изд. – М.: «Высшая школа», 1975.
5. Саргсян, А.Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов [Текст]: учебник для вузов / А.Е. Саргсян. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2000.
6. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов [Текст] / Н.М. Беляев. – 14-е изд. – М.: Наука, 1965.
7. Биргер, И.А. Сопротивление материалов [Текст] / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Обозначение основных величин

Наименование	Обозначения	
	В реко- мен- дованных учебни- ках	По стан- дарту СТ СЭВ 1565–79
Площадь	F	A
Коэффициент Пуассона	μ	N
Статический момент сечения относительно оси ξ	S_{ξ}	S_{ξ}
Момент инерции относительно оси ξ	I_{ξ}	I_{ξ}
Центробежный момент инерции	I_{xy}	I_{xy}
Полярный момент инерции	I_p	I_p
Момент сопротивления сечения изгибу относи- тельно оси ξ	W_{ξ}	W_{ξ}
Момент сопротивления сечения кручению	W_p	W_t
Сосредоточенная сила	P	F
Интенсивность распределенной нагрузки	q	n_e
Момент внешней пары сил	M, m	M
Нормальная сила	N	N_{cal}
Поперечная сила	Q	Q
Крутящий момент	M_k	T
Относительная линейная деформация	ε	ε
Упругая деформация	$\varepsilon_{уп}$	ε_{el}
Остаточная деформация	$\varepsilon_{ост}$	ε_t
Относительный угол закручивания	Θ	ϑ_{rel}
Предел пропорциональности	$\sigma_{пц}$	σ_{pr}
Предел упругости	σ_y	σ_e
Предел текучести	σ_T	σ_y
Условный предел текучести	$\sigma_{0,2}$	-
Временное сопротивление растяжению	$\sigma_{вр}$	σ_{ut}
Временное сопротивление сжатию	$\sigma_{вс}$	σ_{uc}
Критическое напряжение	$\sigma_{кр}$	σ_{cr}
Допускаемое напряжение	$[\sigma]$	σ_{adm}

Продолжение приложения

**Ориентировочные величины основных расчетных
сопротивлений на растяжение и сжатие**

Материал	Расчетное сопротивление R, МПа	
	на растяжение	на сжатие
Чугун в отливках: серый ковкий	33–100 85–110	145–310 95–125
Медь	30–110	
Латунь	60–130	
Бронза	50–110	
Алюминий	25–70	
Дюралюминий	70–140	
Текстолит	30–45	
Стеклотекстолит	35	
Бакелизированная фанера	40–50	
Капрон	30	
Поливинилхлорид	25	
Полипропилен	17	
Дуб: вдоль волокон поперек волокон	9–13 –	13–15 2–3,5
Сосна: вдоль волокон поперек волокон	7–10 –	10–12 1,5–2
Кладка: каменная кирпичная	0,2 0,2	0,4–4 0,6–2
Бетон	0,2–1,4	2,0–24

Механические характеристики конструкционных материалов

Материал	Временное сопротивление (предел прочности) σ_b , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ , %	Предел выносливости, МПа		
				σ_{-lp}	σ_{-lu}	τ_{-lk}
1	2	3	4	5	6	7
Углеродистые стали обыкновенного качества						
Ст 2кп	330–420	200–220	30–33	120–160	170–220	80–130
Ст 2пс(сп)	340–440	210–230	29–32			
Ст 3кп	370–470	220–240	24–27	120–160	170–220	100–130
Ст 3пс(сп)	380–490	230–250	23–26			
Ст 4кп	410–520	240–260	22–25	–	190–250	–
Ст 4пс(сп)	420–540	250–270	21–24			
Ст 5пс(сп)	500–640	270–290	17–20	170–220	220–300	130–180
Ст 6пс(сп)	600	300–320	12–15	190–250	250–340	150–200
Углеродистые качественные стали (нормализованные)						
10	340–420	210	31	120–150	160–220	80–120
20	420–500	250	25	120–160	170–220	100–130
30	500–600	300	21	170–210	200–270	110–140

Продолжение приложения

1	2	3	4	5	6	7
40	580–700	340	19	180–240	230–320	140–190
45	610–750	360	16	190–250	250–340	150–200
50	640–800	380	14	200–260	270–350	160–210
60	690–900	410	12	220–280	310–380	180–220
Легированные стали						
20X	720–850	400–650	12	–	310–380	170–230
40X	730–1050	650–900	15,5	240–340	320–480	210–260
45X	850–1060	700–950	9	–	400–500	–
40XH	1000–1450	800–1300	–	310–420	460–600	–
30XГСА	1100–1700	850–1500	7	–	480–700	280–400
60Г	710	420	11	250–320	–	–

Серые и высокопрочные чугуны						
СЧ18–36	Растяжение 180 Изгиб 360 Сжатие 700	–	–	35	90	–
СЧ24–44	Растяжение 240 Изгиб 440 Сжатие 1000	–	–	65	120	100

Продолжение приложения

1	2	3	4	5	6	7
СЧ21–40	Растяжение 210 Изгиб 400 Сжатие 950	–	–	–	100	80
ВЧ50–2	Растяжение 500 Изгиб 900–1000 Сжатие 1800	380	2	–	200–220	170–210
Алюминиевые деформируемые сплавы						
АМЦ	100	50	20	–	50	
АД – 31: естественное старение искусств. старение	140	70	13	–	90	–
	200	150	8	–	–	–
АМг5	270	120	15	–	110	–
Амг6	320	160	15	–	130	–
Д16Т	400–430	280–300	10	–	115	–
Медные сплавы						
Латунь Л68: мягкая твердая	300–380	–	42	–	120	–
	440–550	–	10	–	150	–

Продолжение приложения

1	2	3	4	5	6	7
Бронза: Бр.Амц9-2 Бр.АжМц 10-3-1,5	480-550 60	- -	20-12 12	- -	- -	- -
Неметаллические материалы						
Дерево: сосна	Растяжение 115 Изгиб 74-88 Сжатие 45	-	-	-	-	-
дуб	Растяжение 130 Изгиб 95 Сжатие 52	-	-	-	-	-
Текстолит	Растяжение 100 Изгиб 140-150 Сжатие 230-250	70-80	-	-	-	-
Капрон	Растяжение 60 Изгиб 90-100 Сжатие 85-100	-	-	-	-	-
Эпоксидные смолы	Растяжение 80 Изгиб 120-130 Сжатие 145-155					

Продолжение приложения

1	2	3	4	5	6	7
Фторопласт	Растяжение 37 Изгиб 60–80 Сжатие 50–60	–	50–70	–	–	–
Хлопок	Растяжение 376	–	–	–	–	–
Шерсть	Растяжение 109	–	–	–	–	–
Лен	Растяжение 352	–	–	–	–	–
Джут	Растяжение 287	–	–	–	–	–
Пенька	Растяжение 450	–	–	–	–	–
Манильская пенька	Растяжение 477	–	–	–	–	–
Копра	Растяжение 292	–	–	–	–	–
Растительный шелк	Растяжение 355	–	–	–	–	–
Шелк–сырец	Растяжение 448	–	–	–	–	–

Продолжение приложения

**Расчетные сопротивления проката для стальных конструкций
и отливок из серого чугуна**

Материал	Расчётное сопротивление, МПа			
	R_y	R_u	R_t	R_c
Сталь листовая, прокат, фасонная				
С245	240	360	—	—
С255	240	360	—	—
С285	280	390	—	—
С375	345	480	—	—
Чугун серый				
СЧ15	—	—	55	160
СЧ20	—	—	65	200
СЧ25	—	—	85	230
СЧ39	—	—	100	250

Основные расчётные характеристики наиболее употребительных материалов

Материал	Модули упругости, ГПа		Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-5}$	Коэффициент Пуассона μ	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$
	E	G			
1	2	3	4	5	6
Сталь: углеродистая легированная литье	200	80	1,25	0,24–0,28	7850
	210	80	1,25	0,25–0,33	7500
	175	–	1,25	0,25–0,33	7500
Пучки и пряди параллельных стальных проволок	196	–	–	0,3	7850
Канаты стальные спиральные двойной свивки	147	–	–	–	7850
Чугун: серый ковкий	115–160	45	1,14	0,23–0,27	7200
	155	–	1,14	0,23–0,27	7200
Медь: прокатная холоднотянутая	110	40	1,65	0,31–0,34	8500
	130	49	1,65	0,31–0,34	8500
Латунь холоднотянутая	91–99	35–37	1,7–2,2	0,32–0,42	8500
Алюминий	59–69	27	2,6	0,32–0,36	2700

Продолжение приложения

1	2	3	4	5	6
Дюралюминий	70	27–37	2,6	0,32–0,36	2700
Свинец	17	7	2,9	0,42	11340
Цинк	82	22	–	0,27	6900–7300
Титан	112	–	–	–	4500
Кобальт	200	–	–	–	8800
Вольфрам	400	–	–	–	19300
Бетон тяжелый естественно-го твердения класса: В20 В30 В50	27 32,5 39	0,4 $\frac{1}{2}$ 0,4 $\frac{1}{2}$ 0,4 $\frac{1}{2}$	1 1 1	0,16 0,16 0,16	2400 2400 2400
Полимербетон	18	–	–	–	2300
Сплошная кладка из: глиняного кирпича известняка гранита	28 60 98	– – –	0,4–0,7 0,4–0,7 0,4–0,7	– – –	1800 1800 –
Гранит	49	14–44	0,4–0,7	–	2600
Известняк	42	–	0,4–0,7	–	2300–2700
Мрамор	56	14–44	0,4–0,7	–	2700
Уголь	62	–	–	0,11	800–950

1	2	3	4	5	6
Сосна воздушно-сухая: вдоль волокон поперек волокон	10 0,5–1,0	5,5 5,5	0,02–0,05 0,02–0,05	– –	550 550
Дуб	11	–	0,02–0,05	–	800
Стекло	56	22	–	0,25	2200
Текстолит	6–10	2,5	–	–	1350
Стеклотекстолит КАСТ–В: по основе по утку перпендикулярно слоям	21,2 12,3 4	4 4 –	– – –	– – –	1600–1800 1600–1800 1600–1800
Винипласт	40	–	–	0,35	1300
Капрон	20	45	–	0,35	1100
Полиэтилен НД	0,45–0,5	–	–	0,39	65–950
Полиэтилен ВД	0,13–0,16	–	–	–	25–910
Каучук	0,08	0,027	–	0,47	930
Лед	10	3	0,5	–	900
Целлулоид	–	–	16–20	0,33 – 0,38	–
Парафин	–	–	–	0,50	–
Пробка	–	–	–	0,00	–
Песок сухой	–	–	–	–	1500–1700

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	5
2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	12
2.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. Определение модуля упругости и коэффициента Пуассона для стали	23
2.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. Определение модуля сдвига	28
2.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. Испытание пластичных материалов на срез	36
2.5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. Определение перемещений при изгибе балки	41
2.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. Определение напряжений в сечении балки при изгибе	48
2.7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. Определение напряженного состояния в балке при сложном нагружении (при действии изгиба и кручения)	60
2.8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8. Исследование устойчивости сжатого стержня (определение критической силы)	66
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	75
ПРИЛОЖЕНИЕ	76

Учебное издание

Саденко Денис Сергеевич
Зернов Владимир Викторович
Волков Владимир Павлович
Евсеев Александр Евгеньевич

**СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

В авторской редакции
Верстка Т.А. Лильп

Подписано в печать 10.11.14. Формат 60×84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 5,12. Уч.-изд.л. 5,5. Тираж 80 экз.
Заказ №441.



Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28.