

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Строительно-политехнический колледж

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ


ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

часть 3

к выполнению лабораторных работ №10 -14
для студентов специальностей 15.02.08 Технология
машиностроения, 15.02.10 Мехатроника и мобильная
робототехника

Методические указания обсуждены на заседании методического совета
СПК

«18» 02. 2022 года Протокол № 6

Председатель методического совета СПК  Сергеева С. И.

Методические указания одобрены на заседании педагогического совета
СПК

«25» 02. 2022 года Протокол № 6

Председатель педагогического совета СПК  Дегтев Д.Н.

Составители: преп. И.И. Извеков, преп. В.Н. Елизаров

УДК – 531 (07)

ББК 22.2я7

Методические указания к выполнению лабораторных работ № 10, 11, 12, 13, 14, по предмету «Техническая механика» для студентов специальностей 15.02.08 «Технология машиностроения», 15.02.10 «Мехатроника и мобильная робототехника»/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. И.И. Извеков, преп. В.Н. Елизаров. Воронеж, 2022. 40 с.

В методических указаниях содержатся краткие теоретические сведения по основам прикладной механики, знакомят с принципами работы лабораторного оборудования, использованием измерительных инструментов и приборов, методикой проведения механических испытаний материалов и конструкций на прочность, жесткость, устойчивость.

Методические указания подготовлены в электронном виде.

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический университет», 2022

ИНСТРУКЦИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

1. Выполнение работ студентами производится только в присутствии преподавателя или лаборанта после прохождения инструктажа по технике безопасности и изучения устройства машин.
2. Включать или выключать силовой рубильник имеет право только преподаватель или лаборант.
3. Перед началом работы необходимо проверить надежность защитных ограждений; надежность заземления; исправность захватов; работу испытательной машины на холостом ходу; исправность предохранительного приспособления, запирающего защелку, на маятниковом копре.
4. Во время работы машины запрещается прикасаться к электропроводке; облакачиваться или опираться на машину; поправлять образец во время работы машины; класть посторонние предметы на подвижные части машины; стоять в плоскости движения маятника маятникового копра.
5. При работе на маятниковом копре обязательно пользоваться устройством, запирающим защелку. Установку образца, снятие предохранителя и освобождение маятника копра производит только преподаватель или лаборант.
6. Испытание образцов из хрупкого материала производить только в специальном приспособлении.
7. Испытательные машины и другое оборудование лаборатории использовать только по их прямому назначению.
8. Наблюдать за ходом эксперимента разрешается только с лицевой стороны испытательной машины.

ОСНОВЫ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ

Теоретические сведения

При исследовании напряженно-деформированного состояния деталей и конструкций широкое применение находит метод электротензометрирования, основанный на применении проволочных датчиков электросопротивления, так называемых тензорезисторов (тензодатчиков).

Проволочный датчик представляет собой наклеенную на полоску бумаги тонкую проволоку из материала с высоким омическим сопротивлением (манганин, константан, нихром и т.п.) диаметром $0,015 \div 0,03$ мм, уложенную несколькими параллельными петлями и называемую решеткой тензорезистора (рис. 1). К концам проволоки сваркой или пайкой присоединяются более толстые выводные проводники, с помощью которых датчик подключают к регистрирующему прибору. Тензорезистор наклеивается на поверхность исследуемой детали так, чтобы размер базы совпадал с направлением, в котором желательно измерить деформацию. Обычно применяют датчики с базой 5, 10 или 20 мм. При плотной приклейке проволока деформируется вместе с поверхностью исследуемого объекта, ее омическое сопротивление изменяется и регистрируется как показатель деформации.

Опыт показывает, что относительное изменение омического сопротивления проволоки ДКУ К пропорционально ее деформации ϵ , т.е.

$$\Delta R/R = \gamma_0 \epsilon, \quad (1)$$

где γ_0 – коэффициент тензочувствительности – безразмерная величина, зависящая от физических свойств материала. Для материалов, применяемых в датчиках сопротивления, величина γ_0 колеблется в пределах 2-3,5. Например, для константана $\gamma_0=2,0-2,1$, для нихрома 2,1-2,3 и т.д. Основными па-

раметрами тензорезистора является база l , сопротивление R и коэффициент тензочувствительности γ_0 .



Рис. 1

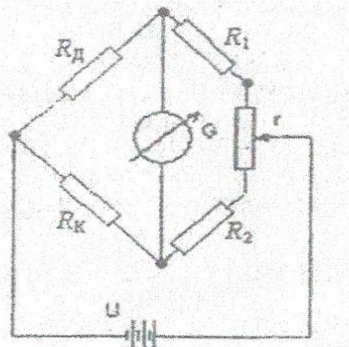


Рис. 2

Датчики описанного типа применяются при температурах от -40°C до $+70^\circ\text{C}$.

Практически изменение сопротивления R очень мало и для его измерения применяют достаточно чувствительные приборы. При статических испытаниях датчик, наклеенный на поверхность исследуемой детали, включается в измеритель-

ный прибор по мостовой схеме (рис 2). Сопротивление рабочего датчика R_d является одним плечом моста.

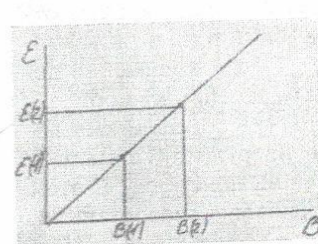


Рис. 3

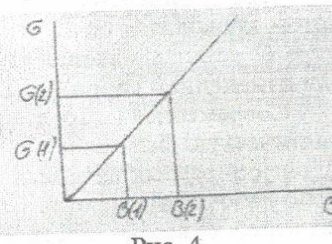


Рис. 4

Основная погрешность в показаниях тензорезисторов возникает за счет изменения температуры самого датчика при пропускании через него тока, а также вследствие изменения температуры исследуемой детали при ее деформировании. В результате изменения температуры сопротивление датчика меняется весьма заметно. Так, например, для константанового датчика, наклеенного на поверхность стальной детали, при изменении температуры на один градус омическое сопротивление меняется так же, как и при изменении напряжений в стальном образце на $0,7$ МПа. Для уменьшения температурной погрешности в мостовую схему (рис. 2) включают компенсационный датчик R_k . Компенсационный датчик наклеивается на отдельную, пластинку из того же материала, что и исследуемая деталь, и находится в тех же температурных условиях, что и рабочий датчик. Тогда одинаковым будет и температурное изменение сопротивлений R_d и R_k . Два оставшихся плеча моста представляют собой равные сопротивления R_1 и R_2 (рис. 2), которые вмонтированы в измерительный прибор. Напряжение U источника постоянного тока не должно превышать $4-6$ В, чтобы не вызвать значительного нагрева датчика.

Если исследуется напряженное состояние сложной конструкции и применяется большое количество рабочих датчиков, то при снятии их показаний компенсационный датчик является общим для всех рабочих датчиков, а сопротивления R_d

включаются в схему моста поочередно. Чтобы избежать погрешностей из-за изменения напряжения питания U , с помощью переменного сопротивления r (рис. 2) перед каждым отсчетом проводится балансировка моста (сила тока в гальванометре G устанавливается равной нулю). После нарушения детали изменением сопротивления r снова балансируют мост.

Современная измерительная аппаратура обеспечивает автоматическую балансировку моста при нагружении детали и включении разных датчиков и фиксирует их показания. С этой целью рабочие тензорезисторы подключаются к тензостанции, состоящей из автоматического измерителя деформаций АИД-4 и автоматического 100-позиционного переключателя АП-3.

Электронный измеритель деформации АИД-4 предназначен для измерения с помощью тензорезисторов статических или медленно меняющихся деформаций (механических напряжений) в элементах строительных конструкций и деталей машин. Его можно использовать также для измерения усилий, давлений, перемещений, прогибов и других механических параметров, которые преобразуются в электрический сигнал, с помощью тензорезисторов, укрепленных на специальных упругих элементах.

При изменении вследствие деформации сопротивления рабочего тензорезистора в измерительной диагонали моста появляется напряжение ΔU , которое усиливается электронным усилителем до величины, достаточной для приведения в действие реверсивного двигателя. Ротор двигателя, в зависимости от фазы ΔU , вращается в ту или другую сторону, поворачивая кинематически связанный с ним токосъемник реохорда до положения, при котором уравнивается изменение сопротивления тензорезистора. С токосъемником реохорда через зубчатую передачу связаны указательные стрелки.

Для измерения деформаций в большом числе точек детали прибор используется в комплексе со специальным коммутирующим устройством АП-3.

Автоматический 100-позиционный переключатель АП-3 предназначен для коммутации внешних полумостов, состав-

ленных из тензорезисторов и их поочередного соединения с электронным измерителем деформаций. Питание электромагнитов переключателя осуществляется кратковременным нажатием кнопки «КН» на переключателе. В случае необходимости возврата переключателя назад кнопку «КН» держат в нажатом состоянии и за ручку переключателя вращением по часовой стрелке устанавливают переключатель в необходимое положение. Для проведения измерений необходимо:

- включить питание тензостанции;
- при отключенном моторе балансировки моста (на передней панели) нажать кнопку «КН» переключателя АП-3 и, не отпуская ее, установить поворотом ручки номер нужного тензорезистора;
- включить мотор балансировки моста и по циферблату снять показание датчика.

По установленным в ходе эксперимента показаниям тензодатчиков проводится расшифровка напряженного состояния исследуемой детали по следующей методике.

Если показания тензорезистора при нагружении испытуемого образца обозначить B , то соотношение (1) можно представить в виде

$$\varepsilon = K_\varepsilon B, \quad (2)$$

где K_ε – тарировочный коэффициент, определяемый тарированием датчиков.

Учитывая закон Гука для линейного напряженного состояния, формулу (2) приведем к виду

$$\sigma = E\varepsilon = K_\varepsilon EB = K_\sigma B, \quad (3)$$

где σ – напряжение; E – модуль Юнга.

Тарировочные коэффициенты K_σ , K_ε определяют по результатам статических испытаний на растяжение или чистый изгиб. При этом рассчитывают значения напряжений σ или деформации ε и фиксируют показания B тензорезистора, наклеенного на испытуемый образец.

По результатам испытания строят тарировочный график в координатах (ε - B) (рис. 3) или (σ - B) (рис. 4). По двум произвольным точкам 1, 2 на соответствующем графике можно определить тарировочный коэффициент K_ε по деформациям или K_σ по напряжениям

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon(2) - \varepsilon(1)}{B(2) - B(1)}; \quad K_\sigma = \frac{\sigma(2) - \sigma(1)}{B(2) - B(1)}. \quad (4)$$

При исследовании линейного напряженного состояния тензорезисторы ориентируют по направлению действующего напряжения. Используя показания датчиков, напряжение определяют по одному из соотношений (3).

Если исследуется двухосное напряженное состояние при известных главных направлениях, то в окрестности каждой точки наклеивают два датчика, ориентированные вдоль главных направлений. Используя закон Гука для плоского напряженного состояния, с учетом соотношений (2), (3) получим формулы для определения главных напряжений [1];

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{K_\varepsilon E}{1 - \mu^2} (B_1 + \mu B_2) = \frac{K_\sigma}{1 - \mu^2} (B_1 + \mu B_2) \\ \sigma_2 &= \frac{K_\varepsilon E}{1 - \mu^2} (B_2 + \mu B_1) = \frac{K_\sigma}{1 - \mu^2} (B_2 + \mu B_1) \end{aligned} \right\},$$

где μ – коэффициент Пуассона; B_1 , и B_2 – показания датчиков, ориентированных соответственно в первом и во втором главных направлениях.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГИБОВ И УГЛОВ ПОВОРОТА ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ ДВУХОПОРНОЙ БАЛКИ ПРИ ПРЯМОМ ИЗГИБЕ

10.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Рассчитать теоретические значения углов поворота опорных сечений и прогибы поперечных сечений балки и сравнить их с величинами, полученными опытным путём.

10.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Изгиб называют прямым в том случае, когда нагрузки действуют в главной плоскости, проходящей через ось балки и одну из главных центральных осей инерции поперечного сечения. Ось балки при этом изгибается в плоскости действия нагрузок. Изогнутую ось балки называют упругой линией. Перемещение поперечных сечений балки при изгибе характеризуют следующими двумя величинами: прогибом u и углом поворота сечения θ .

Прогибом сечения u называют линейное перемещение центра тяжести сечения в направлении нормали к недеформированной оси балки.

Углом поворота сечения θ называют угол, на который плоскость сечения поворачивается относительно нейтральной линии.

При упругом деформировании, когда справедлив закон Гука, прогибы и углы поворота сечений балки можно определить методом Мора. Если балка с прямой осью состоит из участков с постоянной в пределах каждого из них изгибной жёсткостью EJ_x , то для определения прогибов и углов поворота сечений можно использовать способ Верещагина [1].

Поскольку закон Гука справедлив только при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности матери-

ала $\sigma_{\text{пц}}$, то максимальная нагрузка на балку должна быть определена из условия:

$$\sigma_{\text{max}} \leq \sigma_{\text{пц}},$$

где σ_{max} — наибольшее нормальное напряжение в опасном сечении балки.

10.3. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис. 10.1) для определения перемещения в балке состоит из основания с двумя призматическими опорами (1), на которые ставится испытываемая стальная балка (2) прямоугольного поперечного сечения с размерами $h \times b$. Нагружение балки силой F производится с помощью передвигающейся по длине балки подвески (3) со сменными грузами. Прогибы у сечений балки измеряют индикатором часового типа (4). Этот индикатор базируется на магнитной стрелке, которая может перемещаться вдоль основания установки, что позволяет измерять прогибы различных сечений балки.

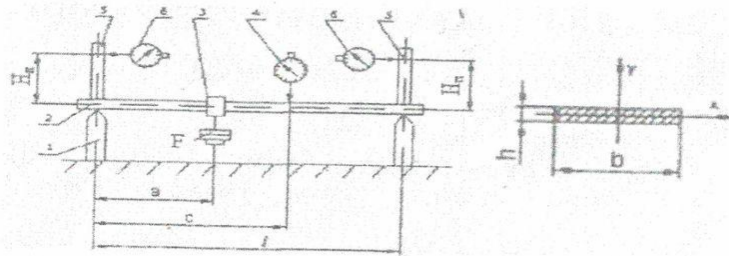


Рис. 10.1

Для экспериментального определения углов поворота левого $\theta_{\text{л}}^{\alpha}$ и правого $\theta_{\text{п}}^{\alpha}$ опорных сечений к балке в её опорных сечениях жёстко прикреплены вертикальные стойки (5), с верхними концами которых, расположенными на расстояниях

$H_{\text{л}}$ и $H_{\text{п}}$ от оси балки, соприкасаются измерительные наконечники индикаторов (6), установленных горизонтально.

Поскольку стойка жёстко соединена с опорным сечением, то её угол поворота равен углу поворота опорного сечения (рис. 10.2). Углы поворота опорных сечений можно рассчитать по формулам:

$$\theta_{\text{п}}^{\alpha} \approx \text{tg} \theta_{\text{п}}^{\alpha} = \frac{\delta_{\text{п}}}{H_{\text{п}}}; \quad \theta_{\text{л}}^{\alpha} \approx \text{tg} \theta_{\text{л}}^{\alpha} = \frac{\delta_{\text{л}}}{H_{\text{л}}}, \quad (10.1)$$

где $\delta_{\text{л}}$ и $\delta_{\text{п}}$ — горизонтальное перемещение верхнего конца левой и правой стоек соответственно.

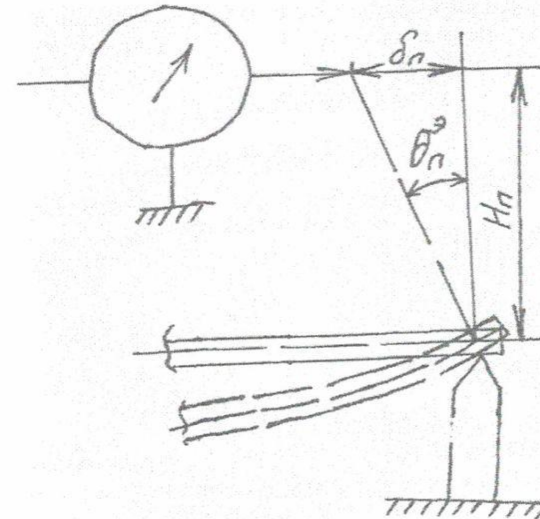


Рис. 10.2

10.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Измерить линейкой с точностью ± 1 мм расстояние между опорами ℓ , величины H_L и H_P . Штангенциркулем с точностью $\pm 0,1$ мм измерить размеры поперечного сечения балки h и b .

2. При заданном преподавателем значении размера α (рис. 10.1) определить максимально допустимую нагрузку на балку по полученной из условия (1) формуле:

$$F_{max} = \frac{\ell b h^2 \sigma_{шт}}{6\alpha(\ell - \alpha)}, \quad (10.2)$$

приняв $\sigma_{шт} = 240$ МПа.

3. По заданной преподавателем нагрузке F рассчитать прогиб y в указанном сечении балки с координатой c и углы поворота левого (θ_L) и правого (θ_P) опорных сечений. Результаты расчёта перемещений записать в таблицу.

Способ определения перемещения	Прогиб y , мм При $c =$, мм	Углы поворота опорных сечений, рад	
		θ_L	θ_P
Расчёт			
Эксперимент			

Теоретический расчёт перемещений y , θ_L и θ_P может быть осуществлён на ПЭВМ.

4. Экспериментально определить значение прогиба (y^3) и углов поворота (θ_L^3 и θ_P^3) опорных сечений и результаты занести в таблицу.

5. Оценить расхождение расчётных и экспериментальных значений прогиба и углов поворота опорных сечений по формулам:

$$\Delta y = \frac{|y - y^3|}{y^3} \cdot 100\%; \quad \Delta \theta_L = \frac{|\theta_L - \theta_L^3|}{\theta_L^3} \cdot 100\%; \quad \Delta \theta_P = \frac{|\theta_P - \theta_P^3|}{\theta_P^3} \cdot 100\%$$

Сделать вывод о степени точности использованного теоретического метода расчёта перемещений.

10.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Основные формулы и соотношения.
2. Схемы экспериментальной установки и экспериментального определения угла поворота.
3. Заполненная таблица, включающая теоретические и экспериментальные значения перемещений.
4. Оценка расхождений расчётных и экспериментальных значений перемещений.
5. Вывод о степени точности использованного теоретического метода расчёта перемещений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид деформации называется прямым изгибом?
2. С какой целью определяют максимально допустимую нагрузку на балку?
3. Что называется прогибом поперечного сечения балки?
4. Что такое угол поворота сечения?
5. Назовите известные вам теоретические способы определения прогибов и углов поворота поперечных сечений балки.
6. В каких случаях для определения прогибов и углов поворота сечений может быть использован способ Верещагина?
7. Как в данной работе определяют экспериментальное значение прогиба?
8. Как в данной работе определяли экспериментальные значения углов поворота опорных сечений балки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

11.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Рассчитать теоретически полное перемещение свободно от закрепления торцевого сечения консольной балки при косом изгибе и сопоставить полученные результаты с экспериментальными.

11.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Косой изгиб – это такой вид деформирования, при котором плоскость действия нагрузок (силовая плоскость) не совпадает ни с одной из главных плоскостей.

Главную называют плоскость, проходящую через ось балки и одну из главных центральных осей инерции поперечного сечения. Ось балки при этом не лежит в плоскости действия нагрузок.

При определении напряжений и деформаций косой изгиб рассматривают согласно принципу независимости действия сил как одновременный прямой изгиб балки в двух главных плоскостях xu и yz (координатная ось z совмещена с осью балки, а оси x , y являются главными центральными осями инерции поперечного сечения). Составляющие δ_x и δ_y полного перемещения в каждой из главных плоскостей можно рассчитать методом Мора или способом Верещагина [2].

Величину полного перемещения δ определяют как геометрическую сумму δ_x и δ_y по формуле:

$$\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}. \quad (11.1)$$

Так как закон Гука справедлив только при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности материала $\sigma_{пл}$, то максимально допустимую нагрузку на балку определяют из условия:

$$|\sigma_{max}| \leq \sigma_{пл}. \quad (11.2)$$

11.3. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Испытания на косой изгиб проводят на установке (рис. 3), состоящей из стальной балки (1) длиной l прямоугольного поперечного сечения, жёстко закреплённой одним торцом в опорной стойке (2). Последняя позволяет осуществить поворот балки вокруг её оси на любой угол α . Отсчёт этого угла производится от горизонтальной оси, перпендикулярной линии действия силы F , по транспортиру (3) и указателю (4), жёстко соединённому с балкой (рис. 3, вид А). При заданном угле α балка фиксируется прижимным винтом (5). Нагружение проводится с помощью установленного на оси балки прямоугольного шарнира (6) и закреплённой на нём подвески (7) со смещёнными гирями (весом по 10 Н каждая). Шарнир позволяет обеспечить неизменность приложения нагрузки в вертикальном направлении и производить нагружение балки силой F под углом α к оси y .

Для измерения перемещений в стойке у концевой части балки устанавливается штанга (8) с двумя индикаторами часового типа (9, 10), измерительные наконечники которых соприкасаются с опорными площадками шарнира (6). С помощью индикаторов с точностью $\pm 0,01$ мм измеряют горизонтальное δ_r и вертикальное δ_b перемещения δ_r и вертикальное δ_b перемещения свободного торца балки. Экспериментальное значение полного перемещения f , определяют как геометрическую сумму δ_r и δ_b по формуле:

$$\delta_s = \sqrt{(\delta_r)^2 + (\delta_b)^2}. \quad (11.3)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид деформирования называется косым изгибом балки?
2. С какой целью определяется максимально допустимая нагрузка F_{max} ?
3. Чему равны осевые моменты инерции и моменты сопротивления для прямоугольного сечения?
4. Как теоретически определяются полное перемещение и его составляющие?
5. Как экспериментально определяются полное перемещение и его составляющие?
Как доказать с помощью данных опыта несовпадение при косом изгибе плоскости изогнутой оси балки с силовой плоскостью?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

12.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментально определить для стали упругие постоянные – модуль упругости E и коэффициент поперечной деформации μ .

12.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При одноосном растяжении металлического образца в пределах упругости между нормальным напряжением σ и относительной продольной деформацией ε существует прямая пропорциональная зависимость, выражаемая законом Гука;

$$\sigma = E\varepsilon \quad (12.1)$$

Коэффициент пропорциональности E между нормальным напряжением и соответствующим ему относительным удлинением называют модулем упругости первого рода (модулем Юнга). Величина E является физической константой материала, она характеризует его способность сопротивляться упругому деформированию, является мерой его жесткости. Из диаграмм растяжения (рис. 5) следует, что величина модуля упругости равна тангенсу угла α наклона линейного участка диаграммы растяжения ($\sigma - \varepsilon$) к оси деформаций ε . Модули упругости углеродистых и легированных сталей находятся в пределах $(2,0 - 2,2) \cdot 10^5$ МПа.

Коэффициентом поперечной деформации μ (коэффициентом Пуассона) называют отношение относительной поперечной деформации ε_n к относительной продольной деформации, определенных в пределах упругости

$$\mu = |\varepsilon_n / \varepsilon|. \quad (12.2)$$

Безразмерный коэффициент μ характеризует упругие свойства материала, является его физической константой и определяется экспериментально. Для металлов величина μ находится в пределах 0,25 - 0,33.

Для экспериментального определения упругих постоянных материала E и μ согласно [1,2] необходимо располагать установленными из опыта на растяжение значениями напряжений σ и соответствующими этим значениям величинами деформаций ε и ε_n . Так как в процессе упругого деформирования необходимо регистрировать очень малые деформации, то для их измерения в настоящей работе применяют высокочувствительные электрические тензометры сопротивления (тензорезисторы).

Для испытания на растяжение используют стандартный плоский образец (ГОСТ 1497-84) [3]. Схема расположения тензорезисторов (тенизодатчиков) на образце приведена на рис. 12.2. Т1 и Т2 предназначены для измерения продольных деформаций, а тензодатчики Т3 и Т4 — для измерения поперечных деформаций.



Рис. 12.1

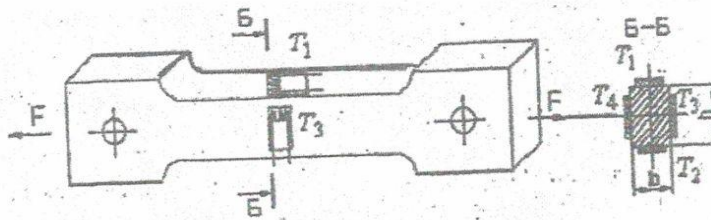


Рис. 12.2

Парное расположение продольных тензорезисторов применено для устранения влияния возможной эксцентрисности (внецентренности) приложения растягивающей нагрузки. Нецентральное приложение усилия приводит к изгибу образца. Все используемые в работе тензорезисторы имеют одинаковую базу и равное сопротивление.

12.3. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА И ПРИБОРЫ

РЫЧАЖНЫЙ ТЕНЗОМЕТР ТР-1

Рычажный тензометр ТР-1 служит для измерения малых линейных деформаций. Схема тензометра показана на рис. 12.3.

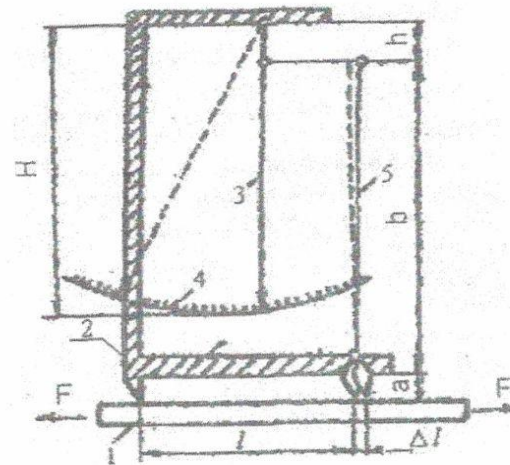


Рис. 12.3

Опорные ножи тензометра прижимаются к образцу с помощью струбчинки. Один из ножей тензометра (подвижный) изготовлен в виде ромбика, одно ребро которого прижимается к образцу, а другое — к рамке тензометра (2). Ромбик жестко связан с рычагом, который, в свою очередь, связан со стрелкой (3). Расстояние l между ножами называется базой тензометра (обычно 20 мм, но с помощью специальных приспособлений база может быть увеличена на 100 мм). Перемещение стрелки по шкале (4) пропорционально изменению рас-

стояния между ножами, но значительно больше его в зависимости от соотношения рычагов (5) и (6).

Шкала (4) тензометра градуирована в миллиметрах. Коэффициент увеличения тензометра зависит от размеров плеч рычагов.

Испытуемый образец с закрепленным на нем рычажным тензомером ТР-1 устанавливается в захваты испытательной машины УМ-5.

12.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Штангенциркулем с точностью $\pm 0,1$ мм измерить размеры поперечного сечения образца b и h (рис.12.2) и рассчитать площадь поперечного сечения A .

2. Определить величину максимальной растягивающей нагрузки F_{max} , которую можно приложить к образцу, не вызывая в нем напряжений, превышающих предел пропорциональности $\sigma_{пц}$:

$$F_{max} = \sigma_{пц} \cdot A. \quad (12.3)$$

Принять для малоуглеродистой стали, из которой изготовлен образец, $\sigma_{пц} = 200$ МПа.

3. Образец с предварительно наклеенными на него тензорезисторами закрепить в захватах испытательной машины УМ-5. С целью исключения погрешностей в начале испытания (ликвидации зазоров в узлах испытательной машины, проскальзывания образца в захватах и т.д.) создать предварительное нагружение образца усилием $F-6$ кН. Эта нагрузка принимается за условный нуль. Затем осуществить ступенчатое нагружение образца (5 ступеней), увеличивая нагрузку на 6 кН. На каждой ступени нагружения снять показания тензорезисторов и записать в таблицу.

Номер ступени	Нагрузка F , кН	Показания тензорезисторов				Приращение показаний тензорезисторов				Показания тензомера ТР-1 n , дел.	Приращение показаний тензомера ТР-1 Δn , дел.
		B_1	B_2	B_3	B_4	ΔB_1	ΔB_2	ΔB_3	ΔB_4		
1											
.											
.											
6											

4. Одновременно при испытании образца на растяжение провести тарирование тензорезисторов с целью перевода показаний тензорезисторов в единицы относительной деформации. Для этого на образце до начала испытания закрепить рычажный тензомер ТР-1, ориентируя его базой в направлении приложения нагрузки. База тензомера $l = 20$ мм, цена деления его шкалы $c = 0,001$ мм. На каждой ступени нагружения зафиксировать показания n (в делениях) рычажного тензомера и занести их в таблицу. Установив по показаниям рычажного тензомера среднюю относительную продольную деформацию на одну ступень нагружения $\epsilon = \Delta n_{cp} \cdot c / l$ определить тарировочный коэффициент:

$$K_{\epsilon} = \frac{\Delta n_{cp} \cdot c}{l \cdot \Delta B_{1cp}}, \quad (12.4)$$

где Δn_{cp} — среднее приращение показаний рычажного тензомера на одну ступень нагружения; ΔB_{1cp} — среднее приращение показаний первого тензорезистора на одну ступень нагружения;

5. Определить приращения на одну ступень нагружения относительной продольной деформации

$$\Delta \epsilon = 0,5(\Delta B_{1cp} + \Delta B_{2cp}) \cdot K_{\epsilon} \quad (12.5)$$

и относительной поперечной деформации, соответствующей одной ступени нагружения,

$$\Delta\varepsilon_n = 0,5(\Delta B_{зсп} + \Delta B_{4сп}) \cdot K_\varepsilon \quad (12.6)$$

6. Рассчитать коэффициент поперечной деформации

$$\mu = |\Delta\varepsilon_n / \Delta\varepsilon|, \quad (12.7)$$

модуль Юнга

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta F}{A \cdot \Delta\varepsilon} \quad (12.8)$$

и сравнить полученные значения со справочными данными для исследованного материала [1]

12.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Основные формулы и соотношения.
2. Заполненная таблица экспериментальных данных.
3. Рассчитанные значения модуля упругости первого рода и коэффициента Пуассона.
4. Сопоставление установленных значений E и μ со справочными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой тензорезистор?
2. На чем основан принцип работы тензорезистора?
3. Как осуществляется включение тензорезистора в измерительный прибор?
4. Что называют модулем; упругости и каков его физический смысл при растяжении?
5. Что называют коэффициентом поперечной деформации и какова его величина для металлов?
6. Из какого условия рассчитывается максимальная растягивающая сила?
7. Как проводится тарирование тензорезисторов?

8. Как рассчитывается тарировочный коэффициент в настоящей работе?

9. Для чего применяется парное расположение продольных тензорезисторов на образце?

10. Какому виду нагружения подвергался образец, если деформация, определенная по показаниям тензорезисторов T_3 и T_4 , положительна?

11. Какова последовательность экспериментального определения модуля Юнга?

12. В какой последовательности определяется экспериментальное значение коэффициента Пуассона?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛОСЕ С ОТВЕРСТИЕМ

13.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Установить экспериментально методом электротензометрирования распределение напряжений в полосе в сечении, ослабленном круглым отверстием, и определить величину коэффициента концентрации напряжений.

13.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Одним из основных факторов, снижающих прочность элементов конструкций, является концентрация напряжений. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в области резких изменений формы упругого тела (надрезы, углы, отверстия, выточки) возникают повышенные напряжения. Например, при растяжении полосы с небольшим круглым отверстием (рис. 13.1) закон равномерного распределения напряжений вблизи отверстия нарушается: Напряжен-

ное состояние становится двухосным, а у края отверстия появляется пик осевого напряжения σ_y . Увеличение напряжений в местах резкого изменения геометрии элемента конструкции называют концентрацией напряжений, а само отверстие (надрез, выточку и т.п.) — концентратором напряжений. Зона распределения повышенных напряжений ограничена узкой областью и в связи с локальным характером распространения эти напряжения называют местными. Последние в зависимости от геометрической формы детали определяют обычно методами теории упругости или экспериментально.

Основным показателем местных напряжений является теоретический коэффициент концентрации напряжений, определяемый по формуле [1];

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}, \quad (13.1)$$

где σ_{max} — наибольшее местное напряжение; σ_n — номинальное напряжение, которое определяется по формулам сопротивления материалов без учета эффекта концентрации. Величину σ_{max} определяют аналитически (методами теории упругости) или экспериментально. Следует отметить, что в формуле (13.1) под σ понимают одну из компонент напряженного состояния, наиболее существенно влияющую на усталостную прочность детали.

В настоящей работе экспериментально (методом электрометрирования) определяется теоретический коэффициент концентрации напряжений при растяжении полосы шириной b и толщиной t , имеющей центральное отверстие диаметром d (рис. 13.1). На этом рисунке показаны рабочие тензодатчики (1, 2, 3, 4) и тарировочный тензодатчик (5), наклеенные соответственно в ослабленном сечении Б-Б и на удалении $\approx 4d$ от отверстия (рис. 13.1, сечение Г-Г). Все указанные тензодатчики базой ориентированы вдоль оси y образца. Под действием растягивающей силы F в поперечных сечениях полосы,

отстоящих на расстоянии $\approx 4d$ от отверстия, возникает однородное линейное напряженное состояние. Напряжение в этих сечениях определяется по формуле

$$\sigma = F/bt. \quad (13.2)$$

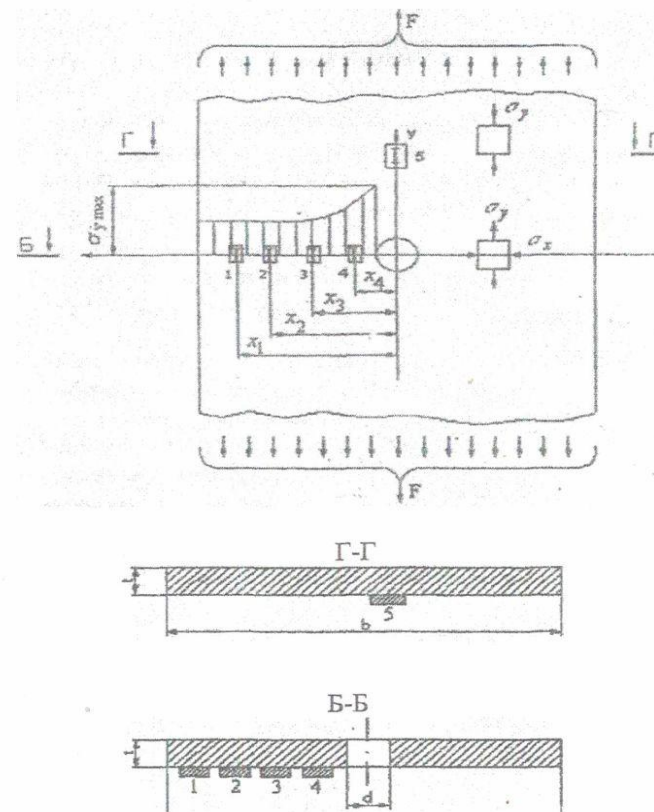


Рис. 13.1

В областях, примыкающих к отверстию, в частности, в сечении Б-Б, реализуется двухосное напряженное состояние, определяемое компонентами напряжений σ_x, σ_y . Данные эксперимента и расчеты методами теории упругости свидетельствуют о достаточной малости σ_x по сравнению с σ_y , в связи с чем можно приближенно принять в опасном сечении Б-Б схему линейного напряженного состояния, определяемого неравномерно распределенным напряжением σ_y .

Таким образом, теоретический коэффициент концентрации напряжений в растягиваемой полосе можно определить согласно формуле (1) по соотношению

$$\alpha = \frac{\sigma_{y\max}}{\sigma_{yn}}, \quad (13.3)$$

где $\sigma_{y\max}$ — максимальное осевое напряжение, возникающее у контура отверстия (рис. 13.1); σ_{yn} — номинальное осевое напряжение, определяемое по формуле:

$$\sigma_{yn} = \frac{F}{(b-d)t}. \quad (13.4)$$

Соотношение (3) с учетом (4) можно записать в виде:

$$\alpha = \frac{\sigma_{y\max}(b-d)t}{F}. \quad (13.5)$$

13.3. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА И ПРИБОРЫ

Испытания проводятся на универсальной машине УМ-5. При выполнении работы используется тензостанция АИД-4.

13.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Получить от лаборанта образец (полосу с наклеенными датчиками). Штангенциркулем с точностью $\pm 0,1$ мм измерить размеры полосы b, t, d и координаты центров рабочих тензодатчиков $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$ (рис. 13.1).

2. Установить образец в захваты испытательной машины УМ-5 и включить тензостанцию АИД — 4.

3. Нагрузить образец предварительно силой F и при этой нагрузке снять показания B тензодатчиков. Затем нагружение производить ступенчато с шагом ΔF . Значения F и ΔF задаются преподавателем. Данные показаний нагрузки F и тензодатчиков. На каждой ступени нагружения занести в таблицу, в которой приняты следующие обозначения: ΔB — приращения показания тензодатчиков на данной ступени нагружения.

Номер ступени	F, кН	1		2		3		4		5				
		B	ΔB	σ_y , МПа	B	ΔB	σ_y , МПа	B	ΔB	σ_y , МПа	B	ΔB	σ_y , МПа	
1														
.														
.														
5														

4. По показаниям пятого тензодатчика определить тарировочный коэффициент по формуле:

$$K_\sigma = \frac{\Delta F}{b \cdot t \cdot \Delta B_{5cp}}, \quad (13.6)$$

где ΔF — приращение нагрузки на одну ступень нагружения; ΔB_{5cp} — среднее приращение показаний пятого (тарировочного) тензодатчика.

5. Рассчитать напряжения в точках 1, 2, 3, 4 сечения Б-Б, соответствующих расположению рабочих тензодатчиков, по соотношению

$$\sigma_{yi} \approx K_\sigma \cdot \Delta B_i, \quad (13.7)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ - номер рабочего тензодатчика. Результат вычислений записать в таблицу.

6. Для каждого этапа нагружения по четырем значениям напряжений построить эпюры осевых напряжений в ослабленном сечении полосы в координатах ($\sigma_y - x$), приняв при этом соответствующие масштабы по осям x и σ_y . На рис. 13.1 схематично показана одна из таких эпюр. Величину $\sigma_{y, \max}$ нужно определить графически экстраполяцией (продолжением) экспериментальной кривой $\sigma_y = f(x)$ до пересечения с осью напряжений σ_y , проведенной по касательной к контуру отверстия.

7. По формуле (13.5) рассчитать значения коэффициентов концентрации напряжений, соответствующих нагрузкам F . Так как теоретический коэффициент концентрации напряжений α при упругом деформировании не зависит от величины нагрузки, то его усредненное значение можно определить по формуле:

$$\alpha_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i, \quad (13.8)$$

где α_i — коэффициент концентрации напряжений для нагрузки F_i .

8. Для оценки правильности определения напряжений в сечении Б-Б определить для каждой ступени нагружения расчетное растягивающее усилие F_p по соотношению

$$F_{cp} = 2t \int_0^{\frac{b-d}{2}} \sigma_y dx. \quad (13.9)$$

Интеграл в выражении (13.9) может быть определен численно, как площадь под соответствующей кривой $\sigma_y = f(x)$, или рассчитан на ПЭВМ.

9. Определить отклонение расчетного растягивающего усилия F_p от фактического растягивающего усилия F по формуле:

$$\Delta = \frac{|F_p - F|}{F} \cdot 100\%. \quad (13.10)$$

13.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Основные формулы и соотношения.
2. Схема расположения тензодатчиков на полосе с отверстием.
3. Заполненная таблица экспериментальных данных.
4. Построенные эпюры осевых напряжений (σ_y) в ослабленном сечении полосы для каждой ступени нагружения.
5. Вычисленное среднее значение коэффициента концентрации напряжения в полосе с отверстием.
6. Рассчитанные значения, растягивающих усилий для каждой ступени нагружения и их сравнение с фактическими значениями нагрузок.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На чем основан метод электротензометрирования?
2. Каковы основные параметры тензорезистора?
3. Каково назначение компенсационного тензодатчика?
4. По результатам каких испытаний проводится тарирование тензодатчиков?
5. Что такое концентрация напряжений?
6. На что влияет концентрация напряжений?
7. Как количественно оценивается концентрация напряжений?
8. Как рассчитывается теоретический коэффициент концентрации напряжений?
9. Как определяется номинальное осевое напряжение?
10. Как устанавливается максимальное осевое напряжение, возникающее на контуре отверстия?
11. Как определяется тарировочный коэффициент?
12. Какова последовательность экспериментального определения коэффициента концентрации напряжений в полосе с отверстием?
13. Для чего и как определяется расчетное значение растягивающего усилия?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВНЕЦЕНТРОМ РАСТЯЖЕНИИ

14.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определить экспериментально методом электротензометрирования напряжения при внецентренном растяжении и сопоставить их значения с теоретическими.

14.2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При внецентренном растяжении равнодействующая внешних сил параллельна оси стержня, но с ней не совпадает. При этом в поперечном сечении стержня возникает нормальная сила и изгибающие моменты относительно главных центральных осей инерции сечения.

Напряжения σ при внецентренном растяжении согласно [1] можно определить по формуле:

$$\sigma = F \left(\frac{1}{A} + \frac{y_F y}{J_x} + \frac{x_F x}{J_y} \right), \quad (14.1)$$

где F – нагрузка; x, y – координаты точки, в которой определяются напряжения (x, y – главные центральные оси инерции сечения); x_F, y_F – координаты точки приложения нагрузки; A – площадь поперечного сечения; J_x, J_y – осевые моменты инерции сечения.

Соотношение (14.1) применимо только при упругих деформациях. Так как закон Гука справедлив при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности материала $\sigma_{тп}$, то максимально допустимую нагрузку, которую можно приложить к испытываемому образцу, определяют из условия:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{тп}. \quad (14.2)$$

Образец (6) для испытания на внецентренное растяжение (рис. 14.1) представляет собой стержень с поднутрением, име-

ющий на рабочей части прямоугольное поперечное сечение с размерами $b \times h$ (рис. 14.1, сечение Б-Б). Образец нагружают через штифты (7) и тяги (8). При этом точка приложения силы F находится на главной центральной оси инерции x поперечного сечения (т.е. $y_F = 0$) и отстоит от его центра тяжести на расстояние $x_F = -b/2$ (рис. 14.1, сечение Б-Б). Таким образом, в поперечном сечении стержня возникают нормальная сила и изгибающий момент относительно оси y . Экспериментальные значения напряжений определяют методом электротензометрирования для правых и левых волокон рабочей части образца (т.е. при $\chi = \pm b/2$). Для этого на боковые поверхности рабочей части образца попарно наклеены тензорезисторы 1-4 (рис. 14.1). Парное расположение тензорезисторов необходимо для устранения погрешности, связанной с возможным смещением точки приложения нагрузки в направлении оси y .

Для определения тарировочного коэффициента K_σ на достаточном удалении ($\sim 2b$) от рабочей части образца наклеивают тарировочный тензорезистор 5 (рис. 14.1). В этой области образца с размерами поперечного сечения B и H (рис. 14.1, сечение С-С) при нагружении реализуется одноосное растяжение.

14.3. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА И ПРИБОРЫ

Испытания проводятся на универсальной машине УМ-5. При выполнении работы используется тензостанция АИД-4.

14.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Замерить штангенциркулем с точностью $\pm 0,1$ мм размеры b, h поперечного сечения рабочей части образца и размеры B, H сечения образца в зоне наклейки тарировочного тензорезистора (5).

2. Используя формулу (14.1) и условие (14.2), определить максимально допустимую нагрузку F_{\max} . При этом следует учесть, что площадь $A = bh$, а осевые моменты инерции для

прямоугольного сечения $J_x = \frac{bh^3}{12}$, $J_y = \frac{hb^3}{12}$. Принять для материала образца $\sigma_{тл} = 240 \text{ МПа}$.

3. Установить образец в захваты испытательной машины и подключить тензорезисторы к тензостанции.

4. С целью устранения зазоров между соприкасающимися частями испытательной машины предварительно нагрузить образец силой, равной 2 кН, и замерить показания тензорезисторов B_i ($i = 1, \dots, 5$).

5. Далее нагружать образец ступенчато возрастающей нагрузкой с шагом ΔF (шаг ΔF задается преподавателем) и на каждой ступени нагружения снимать показания тензорезисторов. Результаты замеров записать в таблицу.

6. Вычислить приращения показаний тензорезисторов ΔB_i ($i = 1, \dots, 5$), приходящиеся на одну ступень нагружения, а затем определить средние арифметические значения этих приращений $\Delta B_{i\text{ср}}$ ($i = 1, \dots, 5$).

7. Рассчитать приращения напряжений $\Delta\sigma$ в сечении С-С образца (рис. 14.1) на одну ступень нагружения:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{bH} \quad (14.3)$$

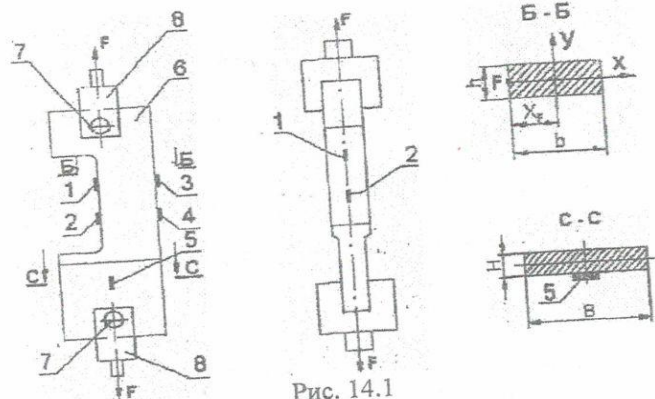


Рис. 14.1

Номер ступени	Нагрузка F, кН	Показания тензорезисторов					Приращения показаний тензорезисторов				
		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	ΔB ₁	ΔB ₂	ΔB ₃	ΔB ₄	ΔB ₅
1											
.											
.											
5											

8. Используя показания (5)-го датчика, определить тарировочный коэффициент

$$K_\sigma = \frac{\Delta\sigma}{\Delta B_{5\text{ср}}} \quad (14.4)$$

9. Рассчитать экспериментальные значения приращений напряжений для левых и правых волокон образца:

$$\Delta\sigma_{\text{л}}^3 = K_\sigma \frac{\Delta B_{1\text{ср}} + \Delta B_{2\text{ср}}}{2}; \quad \Delta\sigma_{\text{п}}^3 = K_\sigma \frac{\Delta B_{3\text{ср}} + \Delta B_{4\text{ср}}}{2} \quad (14.5)$$

10. Используя формулу (14.1), рассчитать теоретические значения приращений напряжений для левых $\Delta\sigma_{\text{л}}$ и правых $\Delta\sigma_{\text{п}}$ волокон. При этом учесть, что для левых волокон $x = -b/2$, а для правых волокон $x = +b/2$.

11. Оценить расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями приращений напряжений $\Delta_{\text{л}}$ и $\Delta_{\text{п}}$ для левых и правых волокон соответственно:

$$\Delta_{\text{л}} = \frac{|\Delta\sigma_{\text{л}} - \Delta\sigma_{\text{л}}^3|}{\Delta\sigma_{\text{л}}^3} \cdot 100\%; \quad \Delta_{\text{п}} = \frac{|\Delta\sigma_{\text{п}} - \Delta\sigma_{\text{п}}^3|}{\Delta\sigma_{\text{п}}^3} \cdot 100\% \quad (14.6)$$

14.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Основные формулы и соотношения.
2. Эскиз образца с наклеенными на нем тензодатчиками.
3. Заполненная таблица экспериментальных данных.
4. Теоретически и по экспериментальным данным рассчитать напряжения при внецентренном растяжении образца и оценить расхождение между ними.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Инструкция по технике безопасности при работе в лаборатории механических испытаний.....	4
Основы метода электротензометрирования	5
Лабораторная работа № 10. Определение прогибов и углов поворота поперечных сечений двухопорной балки при прямом изгибе.	11
Лабораторная работа № 11. Определение перемещений при косом изгибе	16
Лабораторная работа № 12. Определение модуля упругости и коэффициента поперечной деформации	20
Лабораторная работа № 13. Определение теоретического коэффициента концентрации напряжений в полосе с отверстием.....	27
Лабораторная работа № 14. Определение напряжений при внецентренном растяжении.....	34
Заключение	39
Библиографический список.....	40

ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ № 10 – 14
для студентов специальностей 15.02.10.
«Мехатроника и мобильная робототехника (по отраслям)»,
15.02.08 «Технология машиностроения»

Составители:

Елизаров Виктор Максимович
Извеков Игорь Иванович

Редактор Е. А. Кусаинова

Подписано к изданию 15.10.2019.

Уч.-изд. л. 2,2.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14