

2063

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ

Кафедра «Соппротивление материалов и теория упругости»

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
(лабораторный практикум)

Минск 1999

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ
АКАДЕМИЯ

Кафедра «Сопротивление материалов и теория упругости»

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
(лабораторный практикум)

Минск 1999

В издании говорится о значении лабораторных работ при изучении дисциплины «Сопротивление материалов», содержится их перечень, предусмотренный учебным планом для студентов строительных специальностей, описание измерительных приборов, которые используются при выполнении работ, и методы исследования напряженного и деформированного состояния в элементах конструкций. В описании каждой работы приводятся ее цель, краткие сведения из теории дисциплины, методика и последовательность выполнения, форма журнала работы для оформления результатов испытаний.

Изложенная в данном учебном пособии методика проведения лабораторных работ предусматривает максимально возможную самостоятельность. Она включает внеаудиторное изучение теории вопроса, составление формы журнала, заполнение его по исходным данным и самостоятельное проведение исследований с обработкой опытных данных. Руководствуясь настоящим изданием и консультацией преподавателя, студент проводит требуемые исследования.

Для самоподготовки приводятся сведения о соответствующих разделах теории и контрольные вопросы по каждой лабораторной работе.

Составители:

М.К.Балыкин, В.А.Пенькевич,
В.Н.Заяц, И.А.Голубев

Под общей редакцией В.Н.Зайца

Рецензент Г.П.Пастушков

© М.К.Балыкин, В.А.Пенькевич,
В.Н.Заяц, И.А.Голубев,
составление, 1999

Введение

Программой дисциплины «Сопротивление материалов» предусматривается параллельно с изучением теоретического материала выполнение ряда лабораторных работ. Часть этих работ посвящена изучению механических свойств материалов, таких как прочность, жесткость, и их расчетных характеристик. Другая часть лабораторных работ связана с моделированием, т.е. опытной проверкой расчетных формул, полученных теоретическим путем. Известно, что в теории сопротивления материалов делается ряд упрощений и ограничений, вводятся гипотезы. В результате этого полученные расчетные формулы в какой-то степени являются приближенными.

В запланированных лабораторных работах проверяются: гипотеза плоских сечений, законы распределения нормальных напряжений по поперечному сечению элементов конструкций и расчетные формулы для некоторых простых и сложных деформаций. Проверяется также и нижнейшее положение теории сопротивления материалов - соответствие закона Гука для технических материалов.

Кроме того, на лабораторных занятиях студент знакомится с методикой и техникой выполнения испытаний образцов и элементов конструкций с измерительными приборами и испытательными машинами.

Настоящее учебное пособие содержит цель, методику и технику выполнения лабораторных работ, предусмотренных учебным планом для строительных специальностей, описание измерительных приборов, которые используются при выполнении этих работ, форму журнала и порядок оформления результатов испытаний.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лабораторные занятия включают в себя подготовку к опыту, выполнение его, обработку полученных данных и анализ результатов.

Подготовка к лабораторным работам выполняется студентами самостоятельно в домашних условиях. Следует обязательно проработать теоретический материал соответствующего раздела дисциплины по рекомендованным учебникам, конспекту лекций. Желательно ознакомиться с содержанием лабораторных работ по любому

доступному пособию к лабораторным работам по сопротивлению материалов. Однако основным руководством к выполнению лабораторных работ является настоящее пособие, так как оно составлено согласно планам организации учебного процесса на кафедре и технической оснащенности лаборатории испытания материалов.

Важным этапом подготовки к лабораторным работам является составление журнала для записи исходных и опытных данных, результатов испытаний. Форма журнала приводится в пособии после описания каждой лабораторной работы. Для зарисовки схем образцов, испытательных установок и ожидаемых диаграмм и записи исходных и опытных данных, результатов испытаний следует оставлять в тетради свободными указанное количество строк.

Руководствуясь настоящим пособием, студенту необходимо заполнить (по возможности) все пункты подготовленного журнала по исходным данным (используемые формулы, требования к испытанию, испытательная машина и т.д.), делая только самые необходимые записи. Без журнала лабораторных работ с внесенными исходными данными студент к выполнению работ не допускается.

В процессе выполнения лабораторных работ в журнал вносятся опытные данные. Обработка этих данных и анализ результатов выполняются студентами самостоятельно с использованием настоящего пособия и консультаций преподавателя.

Отчет о выполненной работе, как правило, должен быть полностью подготовлен в лаборатории и представлен преподавателю для проверки и подписи.

При подготовке к зачету рекомендуется воспользоваться контрольными вопросами, приведенными в конце описания каждой лабораторной работы.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА ОБРАЩЕНИЯ С ПРИБОРАМИ

В лаборатории испытания материалов кафедры СМиТУ размещено сложное оборудование с высоким электрическим напряжением, опасным для жизни человека, а также ряд напольных и настольных установок с относительно тяжелыми грузами, которые могут при неумелом обращении привести к травме.

Для предупреждения несчастных случаев студенты обязаны соблюдать следующие основные правила.

1. Выполнять требования преподавателя и учебного персонала лаборатории по соблюдению правил техники безопасности.

2. Приступать к выполнению лабораторной работы только после разрешения преподавателя или учебного персонала лаборатории.

3. Запрещается самостоятельно приводить в действие машины, механизмы, нагружать установки.

4. При выполнении работы не отвлекаться на посторонние действия.

5. При обнаружении неисправности немедленно сообщить об этом преподавателю или учебному персоналу лаборатории.

6. Запрещается трогать приборы, установки и испытательные машины, на которых не выполняется данная лабораторная работа.

7. К лабораторным работам допускаются студенты, ознакомленные с приведенными требованиями под личную подпись.

В лабораторных работах используются точные высокочувствительные измерительные приборы. С целью предотвращения их порчи запрещается самостоятельно их регулировать или переставлять.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

При проведении испытаний образцов материалов и элементов конструкций возникает необходимость в измерении их начальных размеров, а также перемещений и деформаций, вызванных нагрузкой. Для этого используются соответствующие измерительные приборы, имеющие измерительную шкалу с определенной ценой (α) одного деления или цифровое табло с ценой единицы показаний.

Для измерения геометрических размеров элементов конструкций используются мерные ленты ($\alpha = 1$ мм) и штангенциркули ($\alpha = 5 \times 10^{-2}$ и 1×10^{-1} мм), а для измерения перемещений - стрелочные индикаторы ($\alpha = 1 \times 10^{-2}$ мм). Деформации в материале конструкции, которые в упругой стадии нагружения очень малы, измеряются тензометрами: механическими и оптическими ($\alpha = 1 \times 10^{-3}$ мм) или более чувствительными - электрическими ($\alpha = 1 \times 10^{-5}$ мм).

Штангенциркуль

Штангенциркуль применяется для измерения наружных и внутренних размеров образцов и деталей. В лабораторной практике используются штангенциркули с пределом измерения до 125 и до 500 мм с точностью отсчета 0,05 и 0,1 мм.

Штангенциркуль (рис. 1 а) состоит из штанги 1, оканчивающейся губками 2 и 3, и свободно передвигаемой по штанге рамки 4 с такими же губками. На штанге 1 имеется шкала с делениями через 1 мм, а на рамке 4 нанесены 10 делений нониуса 5, позволяющего делать отсчеты с точностью до 0,1 мм.

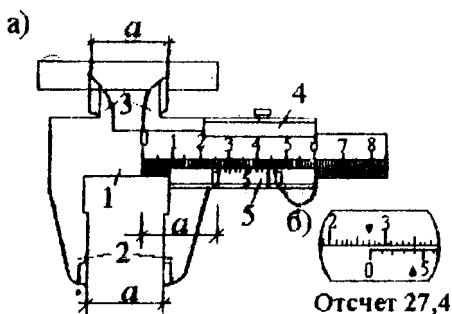


Рис. 1

Измерение наружных размеров производится между губками 2, внутренних - между губками 3. Число целых миллиметров размера α отсчитывается на шкале штанги по нулевому штриху нониуса 5, число десятых долей миллиметров определяется тем штрихом нониуса, который окажется совмещенным с каким-либо штрихом шкалы (рис. 1 б).

Стрелочный индикатор

Стрелочный индикатор (рис. 2) предназначен для измерения линейных перемещений отдельных точек образцов, деталей и конструкций, вызванных их деформацией.

Состоит индикатор из корпуса 1 со шкалой, подвижного стержня 2, который может перемещаться вдоль своей оси, и головки 3 с контактным шариком. Специальной пружинкой (внутри корпуса) контактный шарик всегда прижат к исследуемому элементу и перемещается вместе с ним. Перемещение стержня преобразуется во вращательное движение стрелок по циферблату.

Шкала малого круга имеет 10 делений, каждое которых соответствует 1 мм перемещения контактного стержня. Шкала большого круга имеет 100 делений с ценой одного деления $\alpha = 0,01$ мм. При повороте малой стрелки на одно деление большая стрелка индикатора делает полный оборот - 100 делений большой шкалы.

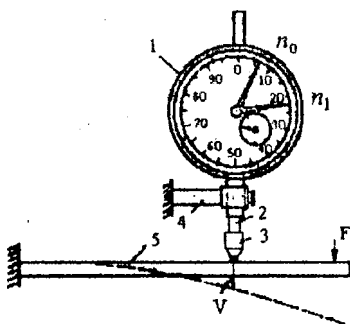


Рис. 2

Для проведения измерения индикатор закрепляется корпусом к неподвижной части конструкции или штативу 4. Контактным шариком он касается детали 5 в точке, перемещение которой исследуется. Измеренное перемещение точки обусловлено показаниями индикатора до и после деформации детали, конструкции:

$$v = (n_1 - n_0) \cdot \alpha_n = \Delta n \cdot \alpha_n, \quad (1)$$

- где v - измеряемое линейное перемещение;
 n_0 - отсчет по индикатору до деформации;
 n_1 - отсчет по индикатору после деформации;
 Δn - приращение показаний индикатора;
 α_n - цена деления индикатора.

Электротензометры

Тензометры - это приборы, позволяющие измерять весьма малые деформации твердых тел, вызванные действием внешних сил. За период развития тензометрии создано много типов тензометров - механических, оптических и электрических. В настоящее время наибольшее развитие получила электротензометрия.

Электрический тензометр - это прибор, измеряющий относительную линейную деформацию на определенном участке твердого тела электрическим методом. Он состоит из трех частей: тензодатчика, усилителя и индикатора. Тензодатчик (или датчик) - это чувствительный элемент, воспринимающий измеряемую деформацию и преобразующий ее в тот или иной электрический параметр. Различают датчики активного сопротивления, индуктивные, емкостные, фотоэлектрические, пьезоэлектрические и т.п. В измерительных приборах широкое распространение получили датчики активного сопротивления (проволочные, фольговые и полупроводниковые). Из них наиболее часто используются проволочные датчики сопротивления (тензорезисторы).

Известно, что при растяжении или сжатии проволоки изменяются ее геометрические размеры (длина, площадь поперечного сечения) и физические свойства (удельное сопротивление), а следовательно, и электрическое сопротивление. Между относительным изменением сопротивления проволоки и относительной деформацией ее существует линейная зависимость.

Основное уравнение проволочного тензоэффекта имеет вид

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l} = K \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где R - электрическое сопротивление недеформированной проволоки;

ΔR - приращение сопротивления деформированной проволоки;

K - чувствительность проволоки к деформации (коэффициент тензочувствительности);

$\varepsilon = \Delta l / l$ - относительная деформация тензочувствительной проволоки

Проволочный датчик изготавливается из проволоки с большим удельным сопротивлением (константан, нихром и др.) диаметром $d=0,02-0,05$ мм и представляет собой плоскую петлеобразную решетку с выводами на концах (рис. 3 а). Проволочная решетка приклеивается к тонкой прямоугольной полоске специальной бумаги или пленки толщиной 0,05 мм, служащей для решетки основой (подложкой) и изолирующей ее от материала испытуемой детали.

Датчики сопротивления характеризуются базой l_0 (длина чувствительной решетки 5-100 мм) и номинальным сопротивлением R (значение активного сопротивления решетки 10-800 Ом). Наибольшее значение относительной деформации, которую можно измерить при помощи датчика, составляет $\epsilon_{\max}=0,3$ %. Коэффициент тензочувствительности проволочных датчиков лежит в пределах $K=1,9 - 2,3$.

Датчик сопротивления, будучи наклеенным на деталь, воспринимает измеряемую деформацию и преобразует ее в соответствующее изменение своего электрического сопротивления. После включения датчика в измерительную электрическую схему изменение его сопротивления преобразуется в пропорциональное изменение силы тока, которое фиксируется индикатором.

В электротензометрии наиболее распространена схема четырехплечевого измерительного моста (мостик Уитстона), состоящая из четырех последовательно соединенных датчиков $D_1...D_4$, имеющих сопротивления $R_1...R_4$, источника питания E и индикатора I (рис. 3 б).

Известно, что при равновесии мостовой схемы, которое выражается уравнением $R_1R_3=R_2R_4$, ток в диагонали моста отсутствует. Если сопротивление одного из плеч изменится, равновесие нарушается и возникающий в диагонали ток фиксируется индикатором. Поскольку этот ток очень слабый, то для возможности измерения он предварительно усиливается.

Один из датчиков любого плеча моста (например, D_1) наклеивается на исследуемую деталь, на деформируемую ее часть. Этот датчик называется рабочим датчиком (рис. 3 в). Исследуемая деталь и усилитель могут размещаться на некотором расстоянии друг от друга и быть в различных температурных условиях. Поскольку датчики сопротивления чувствительны к изменению температуры, то, чтобы исключить ее влияние на результаты измерения, еще один датчик соседнего плеча моста (например, D_2) размещается на

исследуемой детали (но на недеформирующейся ее части) и называется термокомпенсационным (рис. 3 в).

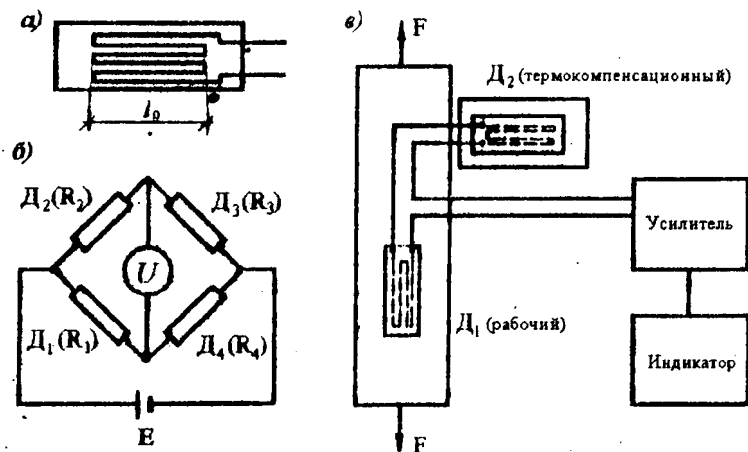


Рис. 3

В лаборатории испытания материалов кафедры используется измеритель деформации цифровой ИДЦ-1. Он имеет 10 измерительных каналов, ручное управление и цифровую индикацию. Цена единицы показаний прибора $\alpha = 1 \times 10^{-5}$ ЕОД (единиц относительной деформации)

На рис. 4 показана лицевая панель измерителя деформации ИДЦ-1, на которой расположены кнопки управления. Работа с прибором (после подключения датчиков и питания) заключается в нажатии кнопки соответствующего канала измерения, а затем кратковременном нажатии кнопки "пуск". Отсчеты показаний снимаются по цифровому табло до и после нагружения исследуемого объекта.

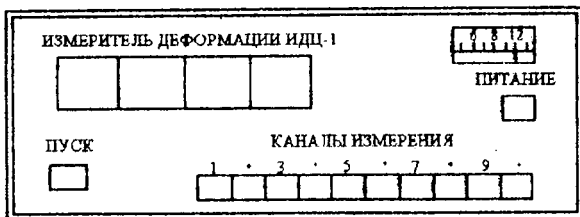


Рис. 4

Величина измеренной относительной деформации ε вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \frac{2}{K} (n_1 - n_0) \cdot \alpha = \frac{2}{K} \Delta n \cdot \alpha, \quad (3)$$

где n_0 - показание прибора при ненагруженном объекте;

n_1 - показание прибора после нагружения объекта;

Δn - приращение показаний прибора;

α - цена единицы показаний прибора;

K - коэффициент тензочувствительности применяемого датчика.

Тарировка измерительных приборов осуществлена на датчиках, имеющих тензочувствительность, равную 2 (в числителе формулы). Реальная чувствительность партии датчиков указывается в паспорте и может отличаться от тарировочной на некоторую величину.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИИ

Экспериментальное исследование напряженного состояния твердого тела заключается в определении главных напряжений, их направления и установлении вида напряженного состояния.

Поскольку напряжения непосредственному измерению не поддаются, измеряются лишь деформации тела, а затем, используя закон Гука, переходят к напряжениям.

В общем случае действия сил на тело (элемент конструкции) в нем возникают линейные ε и угловые γ деформации. Для исследова-

дования напряженного состояния в какой-либо точке тела вокруг нее выделяют малый прямоугольный элемент, размеры которого обусловлены типом применяемых приборов (рис. 5).

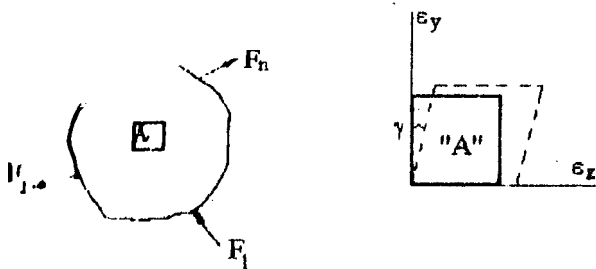


Рис. 5

Чтобы оценить напряженное состояние в точке тела, необходимо знать относительные линейные деформации ϵ в любых двух направлениях выделенного элемента и угловую, выраженную углом сдвига γ .

Экспериментальным путем линейная деформация определяется довольно просто, а угол сдвига - очень сложно. Но угол сдвига можно вычислить по данным измерения линейных деформаций в любых трех направлениях, проходящих через исследуемую точку тела.

Измерение линейных деформаций наиболее целесообразно проводить методом электротензометрии. Для этого на поверхности тела (элемента конструкции) необходимо наклеить датчики (тензорезисторы), количество и направление которых определяются условиями испытания (известен ли при этом вид напряженного состояния, известны ли направления главных напряжений).

При помощи датчика измеряют относительную линейную деформацию ϵ в исследуемой точке тела в направлении продольной оси датчика. Эта деформация окажется осредненной в пределах базы датчика. Если напряженное состояние тела однородное или близкое к этому, а длина базы датчика значительно меньше размеров этого тела, то измеренное значение ϵ можно условно считать истинным для данной точки.

Расчетные формулы окажутся наиболее простыми, если измерения линейных деформаций производить в направлении любых двух произвольно направленных, но взаимно перпендикулярных осей и третьей, расположенной под углом 45° к ним. Все три оси должны проходить через исследуемую точку тела.

Расположенные подобным образом датчики образуют прямоугольную тензометрическую розетку (рис. 6 а). Такую розетку используют наиболее часто. В некоторых случаях применяют четырехэлементные розетки, позволяющие получить более достоверные опытные данные.

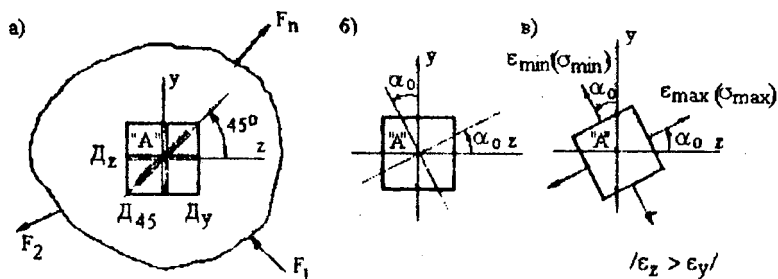


Рис. 6

По значениям измеренных линейных деформаций ϵ_z , ϵ_y и ϵ_{45} вычисляют угол сдвига γ_{zy} и главные деформации ϵ_{\max} и ϵ_{\min} исследуемого элемента по следующим формулам:

$$\gamma_{zy} = \epsilon_z + \epsilon_y - 2\epsilon_{45}; \quad (4)$$

$$\epsilon_{\frac{\max}{\min}} = \frac{\epsilon_z + \epsilon_y}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_{45})^2 + (\epsilon_y - \epsilon_{45})^2}. \quad (5)$$

Направление главных деформаций, а следовательно, и главных напряжений, обусловленных углом α_0 , находят по формуле

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = -\frac{\varepsilon_z + \varepsilon_y - 2\varepsilon_{45}}{\varepsilon_z - \varepsilon_y} \quad (6)$$

Угол α_0 отсчитывают от оси z или y (рис. 6 б). Положительное значение - против хода часовой стрелки, отрицательное - по ходу.

Отсчитывая угол α_0 от оси с большей относительной деформацией, получают направление ε_{\max} , а от оси с меньшей относительной деформацией - направление ε_{\min} (рис. 6 в).

Численные значения экстремальных нормальных напряжений (главных напряжений) определяют по обобщенному закону Гука, в котором E и ν - упругие постоянные материала:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_{\max} + \nu\varepsilon_{\min}) ; \\ \sigma_{\min} &= \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_{\min} + \nu\varepsilon_{\max}) . \end{aligned} \quad (7)$$

Значение наибольшего касательного напряжения в исследуемой точке определяют по формуле

$$\tau_{\max} = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{zy}^2} \quad (8)$$

Вид напряженного состояния в исследуемой точке устанавливают по количеству главных напряжений, отличных от нуля. Если оба главных напряжения не равны нулю, напряженное состояние - плоское; если одно из главных напряжений отличается от нуля - линейное.

В частных случаях исследования напряженного состояния тела число применяемых датчиков может быть сокращено.

Так, если в исследуемой точке тела имеет место плоское напряженное состояние, но известны только направления главных напряжений (например, z и y), то для определения значений этих напряжений достаточно применить только два датчика, расположив

их в названных направлениях для измерения главных деформаций ϵ_{\max} и ϵ_{\min} (рис. 7).

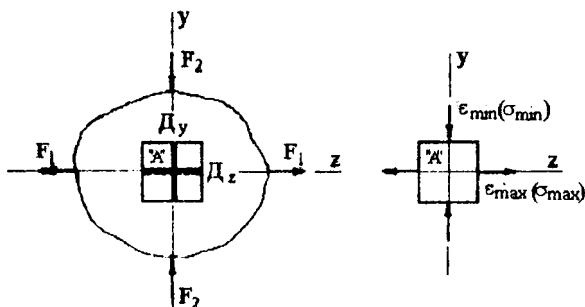


Рис. 7

Значения экстремальных нормальных напряжений определяют по формуле (7), а максимального касательного - по формуле (8).

Если в исследуемой точке имеет место линейное напряженное состояние, но известно лишь направление главного напряжения (например, z), то для измерения главной деформации достаточно применить лишь один датчик, расположив его в указанном направлении (рис. 8).

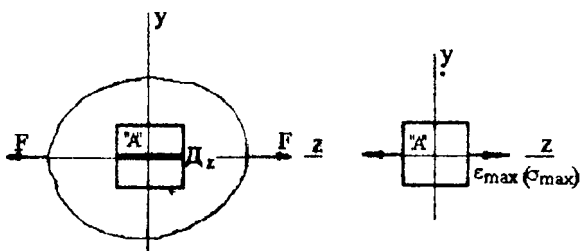


Рис. 8

По измеренному значению ϵ_{\max} , пользуясь законом Гука, находят главное напряжение:

$$\sigma_{\max} = E\varepsilon_{\max} \quad (9)$$

Для исследования распределения нормальных напряжений по сечению элемента конструкции перпендикулярно намеченному сечению в характерных точках нужно наклеить одиночные датчики с целью измерения относительной линейной деформации волокон ε в этих точках (рис. 9).

Нормальные напряжения определяют по формуле Гука

$$\sigma_i = E\varepsilon_i \quad (10)$$

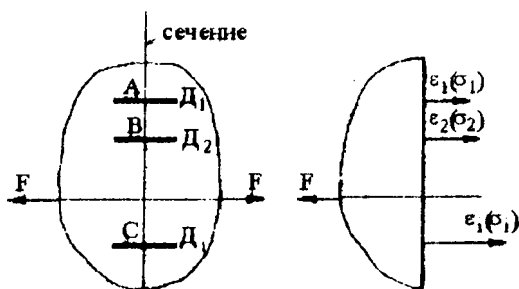


Рис. 9

Лабораторная работа № 1

ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

В строительном деле в качестве конструкционного материала широко используется сталь, имеющая много разновидностей. Стали подразделяются на группы, категории и марки в зависимости от назначения, контролируемых свойств (механических, химических) и особенностей получения (кипящая, спокойная).

Нормирующими показателями для стали являются механические характеристики прочности и пластичности, которые получают по результатам испытания образцов на растяжение.

Цель работы

Цель настоящей работы - изучить опытную зависимость между деформацией растяжения Δl и усилием сопротивления N образца стали, определить механические характеристики прочности и пластичности. На основании этих характеристик установить марку стали и расчетное сопротивление.

Для этого образец стали подвергается растяжению до разрыва. При этом записывается диаграмма испытания.

Исходные данные

Требования к испытанию. Испытание проводится по ГОСТ 1497-84, который предусматривает статический вид нагружения образца, температуру $10-35^{\circ}\text{C}$ и скорость удлинения не более 1 мм/мин .

Испытательная машина. Для выполнения работы используется разрывная машина типа Р-5 с электромеханическим приводом и рычажно-маятниковым силоизмерителем. Машина снабжена аппаратом для записи диаграммы испытания в системе координат "усилие-деформация". Скорость удлинения постоянная. Наибольшее усилие, создаваемое машиной, составляет 50 кН .

Измерительные приборы. Геометрические размеры образца и значения ожидаемых деформаций таковы, что в качестве измерительного прибора можно использовать штангенциркуль с ценой деления $0,05\text{ мм}$ или $0,1\text{ мм}$, который обеспечит требуемую ГОСТом точность измерения.

Образец для испытания. Для проведения испытания принят цилиндрический короткий образец №6 типа III по ГОСТ 1497-84 (рис. 1.1). На рабочей длине l образца с начальным диаметром d_0 рисками отмечается расчетная длина l_0 .



Рис. 1.1

После осмотра образца в журнале лабораторной работы необходимо вычертить его схему, затем произвести замеры l_0 и d_0 (с точностью до 0,1 мм) и записать полученные результаты. По этим данным вычислить кратность образца l_0/d_0 и начальную площадь A_0 поперечного сечения рабочей части образца.

Краткие сведения о диаграмме растяжения. Машинная диаграмма растяжения для малоуглеродистой стали имеет вид, показанный на рис. 1.2, а. На опытной диаграмме отмечают характерные точки 1, 2, 3, соответствующие механическим характеристикам прочности, и точку 4, соответствующую моменту разрыва образца.

Положение точки 1, характеризующей предел пропорциональности, определяется графическим способом (рис. 1.2 б), который заключается в следующем. На произвольном уровне начального участка диаграммы проводят прямую BC , параллельную оси абсцисс, и на этой прямой откладывают отрезок kn , равный половине отрезка mk . Через точку n и начало координат проводят прямую On и параллельно ей касательную к диаграмме. Ордината точки касания 1 определяет усилие N_{pr} , которое соответствует пределу пропорциональности.

Точка 2 располагается на горизонтальном или почти горизонтальном участке диаграммы, называемом площадкой текучести. За усилие, соответствующее пределу текучести N_y , принимают наименьшее значение продольной силы N в пределах площадки текучести.

Точку 3 определяют наибольшей ординатой диаграммы. Она характеризует предельное (в отношении прочности) усилие N_u , соответствующее пределу прочности. При этой продольной силе в образце начинает появляться местное сужение площади сечения, называемое шейкой.

В точке 4 происходит разрушение образца при усилении N_d , соответствующем моменту разрыва.

В процессе удлинения образца различают упругую и упруго-пластическую стадии деформации. Практически до точки 1 в образце имеют место лишь упругие деформации, а далее появляются еще и остаточные (пластические). К моменту разрыва (точка 4, рис. 1.2) отрезок абсциссы $00_1 = \Delta l_r$ соответствует остаточной части деформации образца, а отрезок $0_10_2 = \Delta l_e$ - упругой части деформации. Полная деформация $\Delta l_{tot} = \Delta l_r + \Delta l_e$.

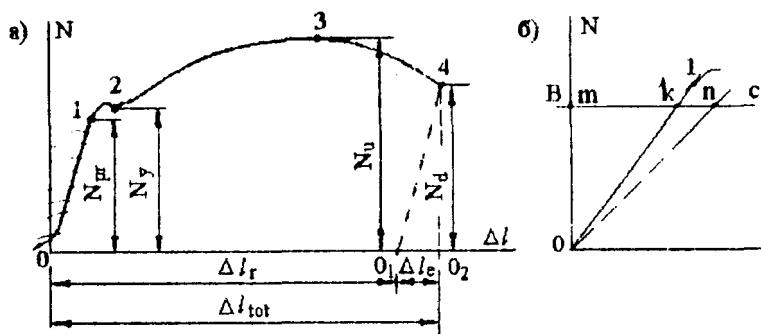


Рис. 1.2

Испытание. Следует ознакомиться с принципом работы испытательной машины, ее основными узлами. В процессе испытаний нужно следить за ходом изображения диаграммы, зрительно отмечать характерные точки, заметить образование шейки и наблюдать за ее утоньшением. Момент разрыва образца обычно сопровождается легким щелчком.

Опытные данные

Испытанный образец. При осмотре испытанного образца обратить внимание, что в рабочей части длина его увеличилась, а диаметр уменьшился. Внимательно осмотреть местное сужение (шейку), ее положение на расчетной длине, протяженность зоны шейки, характер расположения частиц материала в сечении, по которому произошел разрыв.

В журнале лабораторной работы зарисовать схему образца после испытания (с учетом масштаба). Сложив обе части образца, измерить конечную длину l , расчетного участка (между рисками) и диаметр d , образца после разрыва (в месте разрыва). Вычислить величину площади поперечного сечения образца A , после испытания.

Машинная диаграмма растяжения. На планшете мягким карандашом провести координатные оси диаграммы. На диаграмме отметить характерные точки. Выполнить графическое построение для определения предела пропорциональности. Из точки 4 провести линию, параллельную начальному (линейному) уча-

стку диаграммы. С учетом масштаба диаграммы снять значения усилия и удлинения образца для всех характерных точек и занести их в соответствующие графы таблицы опытных данных журнала.

По данным характерных точек и общей закономерности начертить в журнале лабораторной работы диаграмму растяжения в удобном, читаемом масштабе. На диаграмме показать усилия, соответствующие механическим характеристикам прочности, усилие при разрыве, а также полное удлинение и его составляющих к моменту разрыва образца.

Краткие сведения из теории. Численные значения механических характеристик прочности и пластичности определить по формулам.

Характеристики прочности:

$$\text{предел пропорциональности } \sigma_{pr} = N_{pr} / A_0 ,$$

$$\text{предел текучести } \sigma_y = N_y / A_0 ,$$

$$\text{предел прочности } \sigma_u = N_u / A_0 .$$

В данном испытании определение предела упругости не предусмотрено.

Характеристики пластичности:

относительное остаточное удлинение после разрыва

$$\varepsilon_r = \frac{l_r - l_0}{l_0} \cdot 100 , \% ,$$

относительное остаточное сужение (уменьшение) площади поперечного сечения после разрыва

$$\psi_r = \frac{A_r - A_0}{A_0} \cdot 100 , \% .$$

Результаты испытания

Характеристики прочности и пластичности. Исходя из полученных данных вычислить механические характеристики прочности и пластичности с точностью до трех значащих цифр. Обратите внимание на размерность входящих в формулы величин. Напряжения должны быть выражены в МПа.

При вычислении ε_r отметить кратность образца ($\varepsilon_{r,5}$ или $\varepsilon_{r,10}$).

Деформации к моменту разрыва. Известно, что в образце в упругопластической стадии деформации (т.е. за пределом упругости) имеют место как упругие, так и остаточные деформации. На примере деформаций, соответствующих точке 4 (момент разрыва), убедитесь в этом на результатах испытания.

Полная деформация к моменту разрыва Δl_{tot} уже измерена по диаграмме (см. таблицу опытных данных журнала). По той же диаграмме определите значения упругой Δl_e и остаточной Δl_r деформаций.

Напряже н и е р а з р ы в а. Условное напряжение разрыва определяется по формуле $\sigma_r = N_d / A_0$, а истинное - по $\sigma'_r = N_d / A_r$, где A_r - реальная площадь сечения образца в месте разрыва. Отметьте, что истинное напряжение разрыва выше, чем предел прочности.

Краткие сведения из теории. Согласно условию прочности ($\sigma_{max} \leq R_y$), требуется, чтобы возникающие в элементах конструкции максимальные напряжения от расчетной нагрузки не превышали напряжений, которые может воспринять материал этой конструкции. Безопасное напряжение в материале условно характеризуется его расчетным сопротивлением R_y , которое определяется по результатам испытания материала с использованием зависимости

$$R_y = R_n / \gamma_m, \quad (1.1)$$

где R_n - нормативное сопротивление материала, предусмотренное стандартом, которое для стали принимается равным нормирующему значению предела текучести, установленному нормами для данной марки стали по результатам многочисленных испытаний, т.е.

$$R_n = \sigma_{yn};$$

γ_m - коэффициент надежности по материалу, учитывающий возможное снижение прочности, вызванное отклонениями от технологического режима изготовления (для различных марок стали значения его находятся в пределах $\gamma_m = 1,025 \dots 1,15$).

Исходя из зависимости (1.1) установлены и приведены в нормативных документах (СНИП и др.) значения расчетных сопротивлений для различных марок сталей в зависимости от вида проката (лист, фасон) и толщины его. Величина R_y для сталей находится в достаточно широких пределах. Так, например, для стали Ст3, по ГОСТ 380-71, $R_y=175...225$ МПа.

Известно, что машинную диаграмму растяжения можно преобразовать в диаграмму напряжений (условных или истинных). На рис. 1.3 показан вид диаграммы условных напряжений.

На этой диаграмме отмечены точки, ординаты которых соответствуют характеристикам прочности и расчетному сопротивлению R_y .

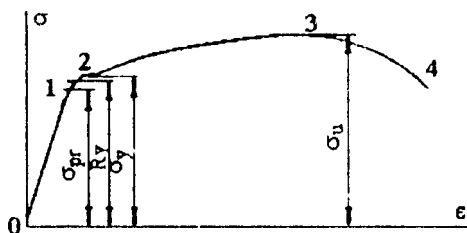


Рис. 1.3

Выводы

М а р к а с т а л и . По результатам испытания нужно установить марку стали. Так как работа носит учебный характер, можно ограничиться результатом испытания лишь одного образца (по ГОСТу требуется не менее двух).

Марка и технические требования углеродистой стали общего назначения предусмотрены ГОСТ 380-88. Для сталей группы А (поставляемых по механическим свойствам) категории 3 при определении марки стали нормирующими показателями являются: предел прочности σ_u , предел текучести σ_y и относительное остаточное удлинение после разрыва $\epsilon_{r,5}$.

Механические свойства горячекатанной, прокатной и листовой стали, по ГОСТ 380-88, для толщины до 20 мм при растяжении приведены в табл. 1.1.

При анализе данных табл. 1.1 обратите внимание, что у более прочных сталей пластичность уменьшается.

Установив марку стали, сделать соответствующую запись в журнале (например: Ст4 кп3, последняя цифра означает номер категории) и указать величину предела текучести, установленного нормами для этой марки стали. Например, опытное значение $\sigma_y = 238$ МПа. Сталь отнесена к марке Ст3 кп3. Для этой марки стали по нормам принимается $\sigma_{yn} = 235$ МПа.

Таблица 1.1

Механические свойства углеродистой стали (по ГОСТ 380-88)

Марка стали	Предел прочности σ_H , МПа	Предел текучести нормированный σ_{yn} , МПа	Относительное остаточное удлинение $\delta_{r,5}$, %
		не менее	
Ст 0	не менее 300	не нормируется	23
Ст 1 кп	300-390	"-	35
Ст 1 пс, сп	310-410	"-	34
Ст 2 кп	320-410	215	33
Ст 2 пс, сп	330-430	225	32
Ст 3 кп	360-460	235	27
Ст 3 пс, сп	370-480	245	26
Ст 4 кп	400-510	255	25
Ст 4 пс, сп	410-530	265	24
Ст 5 пс, сп	490-630	285	20
Ст 6 пс, сп	не менее 590	315	15

Примечание. Индексы после номера марки стали указывают на способ получения: кп - кипящая, пс - полуспокойная, сп - спокойная.

Нормативное сопротивление. За нормативное сопротивление для данной марки стали принимается минимальное значение предела текучести, приведенное в ГОСТе, т.е. $R_n = \sigma_{yn}$.

Расчетное сопротивление. Величину расчетного сопротивления определить по зависимости (1.1), приняв, согласно ГОСТ 380-88, коэффициент надежности по материалу равным $\gamma_m = 1,05$.

Диаграмма напряжений. Начертить в журнале диаграмму условных напряжений (схематически) для испытанного образца, соблюдая масштаб только по оси ординат (напряжений). Отметить точки, ординаты которых соответствуют характеристикам прочности и расчетному сопротивлению.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 1

ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы

1. Изучить опытную зависимость между усилием и удлинением образца стали и определить механические характеристики прочности и пластичности.
2. Установить марку стали и вычислить расчетное сопротивление.

Исходные данные

- Требования к испытанию (5 строк).
- Испытательная машина (4 строки).
- Измерительные приборы (3 строки).
- Схема образца до испытания (15 строк).

Опытные данные

- Схема образца после испытания (13 строк).
- Координаты характеристик точек диаграммы растяжения.

Таблица опытных данных

Координаты \ Точки	1	2	3	4
Удлинение Δl , мм				
Усилие N, кН				

Машинная диаграмма растяжения (13 строк)

Результаты испытания

Характеристики прочности.

1. Предел пропорциональности (4 строки)
2. Предел текучести (4 строки).
3. Предел прочности (4 строки).

Характеристики пластичности.

1. Относительное остаточное удлинение (4 строки).
2. Относительное остаточное сужение (4 строки).

Удлинение образца к моменту разрыва:

- а) полное (1 строка);
- б) упругое (1 строка);
- в) остаточное (1 строка).

Напряжение разрыва:

- а) условное (4 строки);
- б) истинное (4 строки).

Выводы

- Марка стали (3 строки);
 Нормативное сопротивление (3 строки);
 Расчетное сопротивление (7 строк);
 Диаграмма напряжений (15 строк).

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какова цель работы?
2. Основные требования к испытанию.
3. Каким требованиям должна отвечать испытательная машина в связи с поставленной целью?
4. Какой тип образца принят для испытания?
5. Что такое кратность образца?
6. Сколько характерных точек отмечают на диаграмме растяжения? Каким механическим характеристикам они соответствуют?
7. Чем характерен участок диаграммы растяжения до предела пропорциональности?
8. Как называется почти горизонтальный участок диаграммы растяжения? Какое явление происходит в материале образца в момент, когда на диаграмме наблюдается этот участок?
9. Какая точка диаграммы соответствует потере несущей способности? Что при этом образуется в образце?
10. В каком сечении образца образуется шейка?
11. Почему к моменту разрыва образца ординаты диаграммы растяжения значительно меньше?
12. Какие стадии деформации материала наблюдаются при испытании образца?
13. Какая стадия деформации образца соответствует точкам 1, 2, 3 и 4 на диаграмме растяжения?
14. Какие составляющие включает в себя полная деформация в упругой и упругопластической стадиях?
15. По какой формуле определяются численные значения характеристик прочности?
16. По каким формулам определяются численные значения характеристик пластичности?
17. Какие опытные данные позволяют определить величину упругой и величину остаточной деформации образца?
18. Чем отличаются формулы для определения условного и истинного напряжений?
19. Каким параметром характеризуется безопасное напряжение в материале?

20. Что такое нормативное сопротивление и какая механическая характеристика материала принимается за нормативное сопротивление для стали?

21. Зачем введен коэффициент надежности по материалу?

22. Указать математическую связь между расчетным сопротивлением и характеристиками прочности?

23. По каким нормирующим показателям устанавливается марка стали?

24. Как влияет на показатель пластичности стали увеличение его прочности?

25. Изобразите общий вид диаграммы условных напряжений и отметьте на ней точку, соответствующую расчетному сопротивлению.

Лабораторная работа № 2

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

В элементах строительных конструкций и деталях машин могут использоваться различные технические материалы (сталь, чугун, древесина и др.), подвергающиеся деформации сжатия.

Для оценки пригодности конкретного материала в конструкции необходимо знать поведение его под нагрузкой, а также механические характеристики прочности и пластичности. Испытание на сжатие является основным при определении механических характеристик хрупких материалов.

Цель работы

Цель работы - изучить опытную зависимость между сжимающим усилием и деформацией образцов из чугуна, стали и древесины. По результатам испытания определить механические характеристики прочности и пластичности, а для образцов из хрупкого материала и расчетное сопротивление.

Для этого стандартные образцы названных материалов подвергаются сжатию до разрушения. При этом записывается диаграмма деформирования и фиксируются усилия в ее характерных точках.

Исходные данные

Требования к испытанию. Испытание проводится статической нагрузкой со скоростью деформирования не более 1 мм/мин.

Испытательная машина. Работа выполняется на гидравлическом прессе, который может обеспечить усилие в 500 кН. Машина снабжена приспособлением для записи диаграммы испытания.

Измерительные приборы. Геометрические размеры образцов до и после испытания, а также значения ожидаемых деформаций таковы, что измерение их штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм обеспечит требуемую точность.

Образцы для испытания. Испытание стали и чугуна проводится на коротких образцах, имеющих вид цилиндра с высотой $h=(1...2)d$ или кубика. Выбор размеров образцов диктуется мощностью испытательной машины.

Образцы для испытания древесины выполняются в виде параллелепипеда с высотой, равной 1,5 ширины.

Перед испытанием необходимо произвести замер высоты и поперечного сечения предназначенного для испытания образца и сделать его эскиз в журнале наблюдений.

Краткие сведения о диаграммах сжатия. Диаграмма сжатия чугуна (рис. 2.1) на всем протяжении слегка искривлена, отчего закон Гука является приближенным, а значение модуля продольной упругости осредненным. Площадка текучести отсутствует. Продольная деформация образца незначительна. При этом он несколько выпучивается в средней по длине части, принимая бочкообразную форму.

В момент испытания, соответствующего наивысшей точке диаграммы, в образце появляются первые трещины, направленные под углом примерно 45° . Это свидетельствует о том, что в материале образца произошла потеря прочности, т.е. началось разрушение. Наибольшая ордината диаграммы N_u - усилие, соответствующее пределу прочности материала.

При дальнейшем деформировании образца первоначальные трещины увеличиваются, появляются новые, а с выпуклой части образца начинается выкрашивание частиц материала.

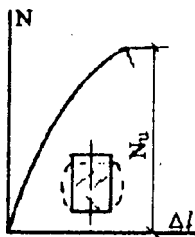


Рис. 2.1

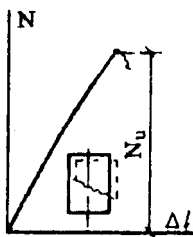


Рис. 2.2

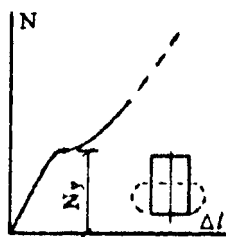


Рис. 2.3

Вид диаграммы сжатия древесины вдоль волокон (рис. 2.2) подобен диаграмме сжатия чугуна. Характер разрушения материала иной: одна часть образца сдвигается относительно другой по наклонным площадкам.

Диаграмма сжатия образца стали (рис. 2.3) в начале деформирования практически не отличается от диаграммы растяжения: имеется прямолинейный участок и площадка текучести (несколько укороченная). За пределом упругости в образце интенсивно нарастают пластические деформации - он заметно укорачивается и принимает бочкообразную форму. Но разрушить образец из малоуглеродистой стали не представляется возможным, т.к. по мере роста деформации образца непрерывно возрастают усилие сопротивления и площадь поперечного сечения (образец расплющивается). В этой связи установить на диаграмме точку, соответствующую пределу прочности, невозможно.

Опытные данные

В процессе испытания для образцов из чугуна и древесины по шкале показаний силоизмерителя испытательного пресса снимают значения усилий, соответствующие пределу прочности.

Для образца из стали фиксируют усилие предела текучести и максимально возможное усилие, достигнутое при испытании.

При осмотре испытанных образцов следует обратить внимание на степень укорочения, форму и характер разрушения, произвести замеры образцов (высоты и диаметра).

В журнале лабораторной работы сделайте эскизы образцов после испытания и изобразите диаграммы сжатия.

Результаты испытания

По полученным в результате испытания данным для хрупких материалов из всех характеристик прочности и пластичности можно определить лишь предел прочности $\sigma_u = N_u / A_0$ и относительное остаточное укорочение $\epsilon_r = (l_r - l_0) \cdot 100 / l_0$.

Для образца из стали вычислить значения предела текучести, а также максимального напряжения и укорочения, достигнутых при испытании.

Для образцов из чугуна и древесины вычислить расчетные сопротивления, приняв коэффициент безопасности по материалу $\gamma_m = 2,5$.

Испытание образца из стали носит демонстрационный характер. Полезно сопоставить полученное значение максимального напряжения со значениями предела текучести и прочности для данного образца $\sigma_u \approx 360$ МПа.

Выводы

В выводах указать на различие в характере поведения пластических и хрупких материалов при испытании образцов на сжатие и растяжение.

Форма журнала лабораторной работы № 2

Лабораторная работа № 2

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

Цель работы

1. Изучить опытную зависимость между усилием сопротивления сжатию и деформацией (укорочением) образцов из пластического и хрупкого материалов.
2. Определить механические характеристики прочности и пластичности образцов из хрупкого материала, вычислить расчетное сопротивление.

Исходные данные

Требования к испытанию (2 строки).

Испытательная машина (2 строки).

Измерительные приборы (2 строки).

Схема образцов до испытания (10 строк):

чугунный

стальной

из древесины

Опытные данные

Усилие предела прочности:

а) для чугунного образца;

б) для образца из древесины.

Усилие предела текучести стального образца.

Максимальное усилие при сжатии образца из стали.

Схема образцов после испытания (10 строк):

чугунный

стальной

из древесины

Диаграммы сжатия образцов (12 строк):

чугуна

стали

древесины

Результаты испытания

Характеристики прочности и пластичности

Для образца из чугуна:

предел прочности (1 строка);

относительное остаточное укорочение (2 строки).

Для образца из древесины:

предел прочности (1 строка);

относительное остаточное укорочение (2 строки)

Для образца из стали:
предел текучести (1 строка);
максимальное напряжение в опыте (1 строка);
относительное остаточное укорочение (при максимальном напряжении) (2 строки).

Расчетные сопротивления:

- а) для образца из чугуна (1 строка);
- б) для образца из древесины (1 строка).

Выводы (8 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какие характеристики материала необходимо знать для оценки пригодности его в конструкции?
2. Для каких материалов испытание на сжатие является основным видом испытания?
3. Какой характер нагружения принят при испытании на сжатие?
4. Какую форму и размеры имеют образцы для испытания на сжатие?
5. Изобразите диаграмму сжатия чугуна. Чем она отличается от диаграммы растяжения стали?
6. Как происходит разрушение чугунного образца?
7. Изобразите диаграмму сжатия образца из древесины вдоль волокон, поперек волокон. Каков характер разрушения его?
8. Изобразите диаграмму сжатия образца из стали. Чем она отличается от диаграммы растяжения стали?
9. Какие механические характеристики хрупких материалов можно определить по результатам испытания на сжатие?
10. Что такое расчетное сопротивление материалов и как его определяют?

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В зависимость $\sigma = E\varepsilon$, выражающую закон Гука, входит физическая постоянная E , называемая модулем продольной упругости (модулем Юнга) и характеризующая жесткость материала, т.е. способность сопротивляться упругому деформированию. Величина модуля E зависит от физических свойств материала и определяется опытным путем.

Другой физической постоянной материала является коэффициент поперечной деформации (Пуассона) ν , характеризующий способность материала к поперечной деформации.

Среди допущений, принятых в дисциплине «Сопротивление материалов», имеется предположение, что до определенной величины деформации материал подчиняется закону Гука (деформация пропорциональна нагрузке), а плоские поперечные сечения элемента остаются плоскими в процессе деформирования (гипотеза Бернулли).

Цель работы

Цель настоящей работы - определить опытным путем численные значения модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации образца из стали при его растяжении. По результатам опыта подтвердить закон Гука и гипотезу плоских сечений.

Для этого стальной образец подвергается осевому растяжению при напряжениях до предела пропорциональности. В намеченных точках измеряются относительные продольные и поперечные деформации волокон образца.

Исходные данные

Требования к испытанию. Растяжение опытного образца должно осуществляться статической нагрузкой при скорости деформирования не более 1 мм/мин, ступенями, желательно равными.

Максимальная нагрузка на образец не должна вызывать напряжений, превышающих предел пропорциональности: $\sigma_{\max} \leq \sigma_{pr}$.

Используемые формулы. Для выполнения поставленных в работе задач используются следующие формулы:

$$\sigma = \frac{N}{A} \text{ для определения нормальных напряжений в образце;} \quad (3.1)$$

$$\sigma = E\varepsilon \text{ - закон Гука;} \quad (3.2)$$

$$\nu = \frac{|\varepsilon'|}{\varepsilon} \text{ для определения коэффициента поперечной деформации.} \quad (3.3)$$

Испытательная машина. Для выполнения работы используется разрывная машина типа Р-5 с электромеханическим приводом, рычажно-маятниковым силовым измерителем и максимальным усилием в 50 кН.

Измерительные приборы. Для измерения размеров поперечного сечения образца используется штангенциркуль с ценой деления 0,05 или 0,1 мм.

Измерения продольной и поперечной деформаций волокон осуществляются датчиками сопротивления (тензорезисторами) с базой $l_0=20$ мм. Индикация результатов производится на измерителе деформации ИДЦ-1.

Цена α единицы показаний измерителя приводится на его шкале, а значение коэффициента тензочувствительности K датчиков - в паспорте комплекта датчиков.

Схема образца с датчиками. Для проведения испытания принят плоский образец прямоугольного поперечного сечения, схема которого показана на рис. 3.1. На этом же рисунке показана схема расположения датчиков в намеченном сечении.

В журнале лабораторной работы вычертить схему образца с расположенными на нем датчиками.

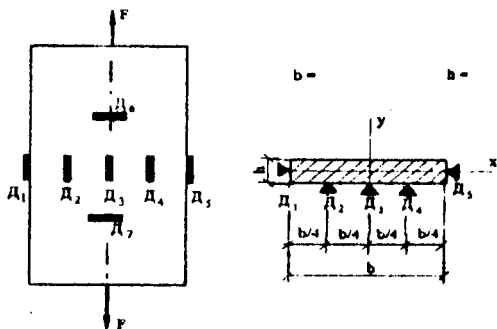


Рис. 3.1

Максимальная допустимая нагрузка на образец. Поскольку поставленная в работе цель связана с законом Гука, максимальные напряжения в опытном образце не должны превышать предела пропорциональности σ_{pr} .

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{\max}}{A} \leq \sigma_{pr} \approx 200 \text{ МПа}.$$

Из этого условия определяется максимальная допустимая нагрузка на образец.

Вычислить ее значение и внести в журнал.

Проведение испытания. При участии преподавателя (или учебного персонала лаборатории) следует ознакомиться с работой испытательной машины, ее основных узлов; рассмотреть образец с наклеенными датчиками, выделив среди них рабочие и термокомпенсационные датчики; овладеть техникой проведения отсчетов на измерителе деформации ИДЦ-1

В процессе испытания необходимо снять отсчеты на ИДЦ по всем датчикам и на всех ступенях нагрузки и записать их в таблицу опытных данных в графу с индексом n .

Опытные данные

Таблица опытных данных. Анализируя таблицу с опытными данными, обратите внимание на то, что по всем каналам измерителя деформации ИДЦ начальные отсчеты (при нулевой нагрузке) не одинаковы, т.к. они не регулируются.

Для удобства построения графика деформации целесообразно эти отсчеты привести по каждому каналу ИДЦ к общему начальному значению. Для этого из каждого последующего отсчета n_i нужно вычесть его значение при нулевой нагрузке n_0 . Таким образом, приведенные отсчеты получатся $n = n_i - n_0$ по всем каналам ИДЦ и при нулевой нагрузке окажутся равными нулю.

После этого вычислите приращения нагрузки ΔF и приведенных показаний ИДЦ Δl , вычитая из последующего отсчета предыдущий. Возможны отрицательные значения приращений. Подумайте, о чем свидетельствует этот фактор.

Затем вычислите среднеарифметические значения приращений нагрузки ΔF_m и отсчетов Δl_m по всем датчикам (индекс m означает "среднее"). Если первое значение Δl заметно отличается от последующих, то при вычислении среднеарифметического значения Δl_m его можно исключить.

После выполнения указанных подсчетов проведите анализ полученных результатов. Заметьте, что значения приращений отсчетов Δl по датчикам 1-5 практически одинаковы, что равным приращениям нагрузки ΔF соответствуют равные или почти равные приращения отсчетов Δl .

График деформации. Для подтверждения закона Гука необходимо построить графики зависимости продольной ε и поперечной ε' относительных деформаций волокон стержня от усилия N в нем. Так как отсчеты n пропорциональны ε , график можно построить в осях N и n .

Для построения графика выбирается удобно читаемый масштаб: 1:1, 1:2, (1:4), 1:5, 1:10.

Отложив в координатных осях опытные точки (рис. 3.2), трудно понять, что изучаемая зависимость имеет линейный характер. Линию связи спрямить, визуальнo располагая ее как можно ближе ко всем опытным точкам.

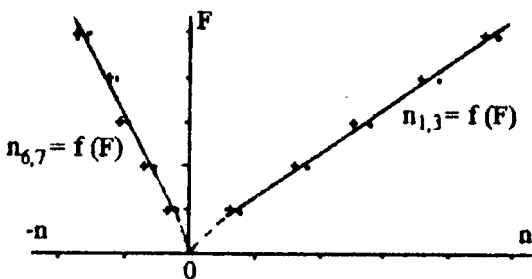


Рис. 3.2

Обратите внимание, что отдельные опытные точки могут несколько отклоняться от прямой. Это обусловлено неоднородностью материала и неточностью измерения. Кроме того, начальный участок диаграммы может быть нелинейным из-за наличия зазоров в механизмах испытательной машины и высокой степени чувствительности измерительной аппаратуры.

По характеру графика можно сделать вывод, подтвержден ли закон Гука при растяжении (при этом начальный участок диаграммы из анализа исключить).

Эпюра продольных деформаций. Измеренная продольная деформация в 5-ти точках поперечного сечения, выраженная приращениями отсчетов, позволяет построить эпюру распределения этих деформаций по ширине сечения опытного образца (рис. 3.3).

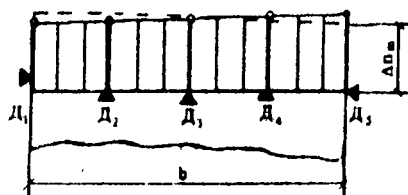


Рис. 3.3

В точках наклейки датчиков 1-5 отложите ординаты, соответствующие значениям средних приращений показаний Δl_m .

По положению опытных точек можно судить о характере распределения продольных деформаций (прямолинейном или криволинейном) по ширине сечения образца. При графическом методе обработки опытных данных проводится прямая (ломаная), объединяющая все опытные точки.

Далее вычислите среднеарифметическое значение приращения отсчетов по датчикам 1-5.

$$\Delta l_m = \frac{\Sigma(\Delta l_1' m + \dots \Delta l_5' m)}{5}$$

Значение этой величины отложите на эпюре продольной деформации и проведите пунктирную линию.

Сопоставляя на эпюре линию, характеризующую среднюю деформацию, с ломаной, проведенной по опытным точкам, сделать вывод о подтверждении гипотезы плоских сечений.

Конечно, вследствие погрешности в измерительной аппаратуре, неабсолютной центровки образца и возможной неоднородности материала образца ломаная линия не всегда совпадает со средней. Однако эти отклонения обычно незначительны.

Результаты испытания

На каждом конкретном опыте величина нагрузки на образец может быть разной, но не превышать F_{max} . Представляет интерес значение максимального напряжения, которое достигалось в опытном образце:

$$\sigma_{max} = N_{max} / A .$$

Напряжение от ступени нагрузки

$$\Delta \sigma = \Delta N / A .$$

Относительная деформация (продольная и поперечная) по опытным данным определяется по формуле (3).

Значение относительной продольной деформации ϵ вычислите, используя Δl_m (полученное как среднеарифметическое из прира-

щений отсчетов датчиков $D_{1,5}$), а значение относительной поперечной деформации ε' - из показаний датчиков $D_{6,7}$.

Значение коэффициента поперечной деформации определите по формуле (3.3).

Опытное значение модуля продольной упругости определите из закона Гука (3.2).

Выводы

Сделать заключение: подчиняется ли материал (сталь) закону Гука при растяжении, подтверждается ли гипотеза плоских сечений? Привести доказательства.

Сопоставить опытные значения модуля E и коэффициента ν для опытного образца со справочными данными ($E=190\text{--}220$ МПа, $\nu=0,25\text{--}0,33$).

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Цель работы

1. Определить опытным путем модуль продольной упругости и коэффициент поперечной деформации образца стали.
2. Подтвердить закон Гука и гипотезу плоских сечений при растяжении.

Исходные данные

Требования к испытанию (4 строки).

Используемые формулы (6 строк).

Испытательная машина (4 строки).

Измерительные приборы (10 строк).

Схема образца с датчиками (выполнить рис. 3.1) (22 строки).

Максимальная нагрузка на образец (3 строки)

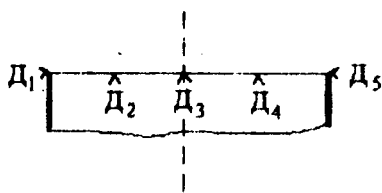
Опытные данные

Таблица опытных данных (1 страница)

Датчики		Д-1		Д-2		Д-3		Д-4		Д-5		Д-6		Д-7	
Нагрузка		n_1	Δn_1	n_2	Δn_2	n_3	Δn_3	n_4	Δn_4	n_5	Δn_5	n_6	Δn_6	n_7	Δn_7
F, кН	ΔF , кН	n_1 / p_1	Δn_1	n_2 / p_2	Δn_2	n_3 / p_3	Δn_3	n_4 / p_4	Δn_4	n_5 / p_5	Δn_5	n_6 / p_6	Δn_6	n_7 / p_7	Δn_7
Ср. зн.	$\Delta F_m =$	$\Delta n_{1m} =$		$\Delta n_{2m} =$		$\Delta n_{3m} =$		$\Delta n_{4m} =$		$\Delta n_{5m} =$		$\Delta n_{6m} =$		$\Delta n_{7m} =$	

График деформации (17 строк).

Эюра продольных деформаций (16 строк).



Среднее приращение отсчетов (по датчикам D_1 - D_5)

$$\Delta n_m = \dots$$

Отклонение наиболее удаленной точки от среднего значения

$$\frac{\Delta n_1 - \Delta n_m}{\Delta n_m} \cdot 100 = \dots\%$$

Результаты испытания

Максимальное напряжение в образце (4 строки).
Напряжение от ступени нагрузки (4 строки).
Относительная продольная деформация (4 строки).
Относительная поперечная деформация (4 строки).
Коэффициент поперечной деформации (4 строки).
Модуль продольной упругости (4 строки).

Выводы (10 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какой зависимостью выражается закон Гука при растяжении сжатии?
2. Что характеризует и от чего зависит величина модуля продольной упругости?
3. Что характеризует и от чего зависит коэффициент поперечной деформации (Пуассона)?
4. Какие допущения, принятые в теории сопротивления материалов, проверяются при выполнении настоящей работы?
5. Сформулируйте общую цель лабораторной работы.
6. Какова методика выполнения опыта по определению модуля E ?
7. Основные требования, предъявляемые к испытанию.
8. По какой формуле определяются нормальные напряжения в опытном образце?
9. Какие опытные данные необходимо получить, чтобы определить величину коэффициента поперечной деформации?
10. Какой метод измерения деформаций применяется в настоящей работе?
11. Какой элемент принятой, в опыте измерительной системы непосредственно воспринимает деформацию опытного образца?
12. Какого типа датчики используются в настоящей работе и каков принцип работы этих датчиков?

13. Как устроен проволочный датчик сопротивления (тензорезистор)? Что такое база датчика?

14. Как контактирует датчик с исследуемой деталью и что непосредственно при помощи его измеряется?

15. Какой датчик в четырехплечевом измерительном мостике называется рабочим?

16. Каково назначение термокомпенсационного датчика и его расположение на исследуемой детали?

17. По какой формуле на основании показаний измерителя деформации можно вычислить измеренную относительную деформацию участка опытного образца?

18. Из каких соображений определяется максимальная допустимая нагрузка на опытный образец?

19. Почему в таблице опытных данных равным приращениям нагрузки соответствуют равные или почти равные приращения показаний измерителя деформации?

20. Какой характер зависимости продольной деформации от нагрузки наблюдается в опыте и о чем это свидетельствует?

21. Подтверждает ли опыт гипотезу плоских сечений? Приведите доказательства.

22. Как согласуются опытные значения E и ν со справочными данными?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

В элементах конструкций и деталях машин по конструктивной или технологической необходимости часто сечения ослабляются определенными факторами (отверстия, выточки, пропилы, которые имеют различную форму и размеры). Это приводит к изменению характера распределения деформаций, а следовательно, и напряжений по этому сечению. Вблизи ослаблений, называемых концентраторами, напряжения возрастают в несколько раз и оцениваются коэффициентом концентрации напряжений α_k .

Для определения теоретического значения величины коэффициента концентрации напряжений методов сопротивления материалов недостаточно - используются положения теории упругости.

Цель работы

Цель работы - определить опытным путем значения коэффициента концентрации напряжений для двух видов концентраторов, а также оценить влияние плавности формы одного из них.

Для этого в сечениях опытного образца, где имеются концентраторы напряжений, в характерных точках наклеены тензорезисторы для измерения деформаций, по значениям которых вычисляются напряжения.

Исходные данные

Требования к испытанию. Опытный образец подвергается деформированию растягивающей статической нагрузкой до напряжений, не превышающих предела пропорциональности:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{pr}$$

Используемые формулы. Коэффициент концентрации напряжений определяется как отношение соответствующих напряжений:

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_m}, \quad (4.1)$$

где σ_{\max} - максимальное напряжение в зоне концентратора;

σ_m - среднее напряжение в смежном с концентратом сечении (для стержня с постоянным поперечным сечением), определяется по формуле

$$\sigma_m = \frac{\Delta N}{A} \quad (4.2)$$

Испытательная машина - разрывная машина типа Р-5 с максимальным усилием в 50 кН.

Измерительные приборы. Для измерения продольных деформаций в образце используются датчики омического со-

противления (тензорезисторы). В качестве регистратора деформаций используется измерительный прибор ИДЦ-1.

Характеристики тензорезисторов (база I_0 , коэффициент тензочувствительности K) и измерителя деформации (цена единицы показаний α) приводятся в паспорте опытной установки.

Схема образца с датчиками. Для проведения испытания принят стальной плоский образец постоянного поперечного сечения. Значение модуля продольной упругости E для материала образца указано в паспорте установки.

В качестве концентраторов напряжений выбрано малое круглое отверстие ($d < b/5$) и V-образные выточки с острой и округленной вершиной.

Расположение концентраторов напряжений, а также тензорезисторов показано на рис. 4.1.

Расстояние e определяется из выражения

$$e = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b-d}{2} \right) = \frac{b-d}{4}$$

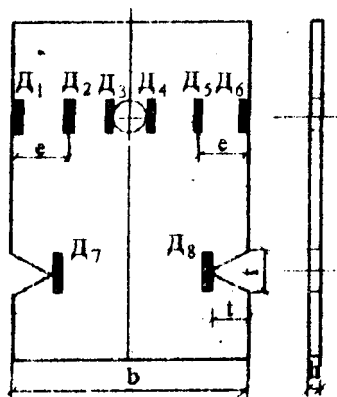


Рис. 4.1

Проведение испытания. Опытный образец нагружается до усилия, создающего напряжения, не превышающие предела пропорциональности.

Отсчеты по ИДЦ-1 снимаются по всем датчикам для двух нагрузок (предварительной и окончательной) и заносятся в соответствующую графу таблицы опытных данных.

Опытные данные

Т а б л и ц а о п ы т н ы х д а н н ы х . Обработка опытных данных заключается в вычислении приращений нагрузки ΔF и показаний датчиков $\Delta l = n_o - n_{II}$.

Результаты испытания

Результатом испытания являются значения коэффициентов концентрации напряжений для двух видов исследованных концентраторов.

Предварительно вычисляются относительные продольные деформации ($\varepsilon = 2\Delta l \alpha / K$) для всех опытных точек, а затем нормальные напряжения (с использованием закона Гука): $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

Среднее напряжение σ_m в образце определяется по формуле (4.2), а значение коэффициента концентрации напряжений - по формуле (4.1).

По полученным данным строится э п ю р а распределения н о р м а л ь н ы х напряжений по ширине сечения образца с малым круглым отверстием.

Аналогичная эпюра была построена в лабораторной работе № 3.

Сравнение результатов испытания

По справочным данным для малых круглых отверстий значения коэффициента концентрации напряжений находятся в пределах $\alpha_K = 2,7 \dots 3,0$. Для *V*-образной острой выточки $\alpha_K = 3,0$.

Полученные опытные значения коэффициентов концентрации напряжений сравнить со справочными данными.

Оценить влияние округления вершины у *V*-образной выточки на степень концентрации напряжений.

Выводы

В выводах указать: наблюдается ли повышение напряжений в зоне таких конструктивных факторов, как малые отверстия, выточки, как влияет округление вершины *V*-образной выточки на степень концентрации напряжений.

Форма журнала лабораторной работы № 4

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы

1. Определить опытным путем значения коэффициента концентрации напряжений для малого круглого отверстия и *V*-образной выточки.

2. Сравнить полученные значения коэффициентов концентрации напряжений со справочными данными.

Исходные данные

Требования к испытанию (3 строки).

Используемые формулы (4 строки).

Испытательная машина (3 строки).

Измерительные приборы (6 строк).

Схема образца с датчиками (20 строк).

$E = \dots$

$\eta = \dots$

$b = \dots$

$d = \dots$

$t = \dots$

$e = \dots$

Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка F , кН	Датчики	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8
	Отсчеты n								
	Отсчеты n								
$\Delta F =$	Приращение отсчета Δn								

Результаты испытаний

Нормальные напряжения в опытных точках (9 строк).

Средние напряжения в поперечном сечении образца (13 строк)

Эпюра нормальных напряжений (12 строк).

Значения коэффициента концентрации напряжений:

а) для малого круглого отверстия (2 строки);

б) для V-образной выточки (2 строки);

в) для V-образной выточки с округлением (2 строки);

Сравнение результатов испытания (7 строк).

Выводы (5 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какие технологические факторы в конструкции называются концентраторами напряжений?

2. Как влияют концентраторы напряжений на характер распределения напряжений в смежных с ними зонах конструкции?

3. Каким коэффициентом оцениваются изменения напряжений?

4. По какой формуле определяется действительный коэффициент концентрации напряжений?

5. Какие измерительные приборы использовались в данной работе и какие параметры измерялись этими приборами?

6. Какие виды концентраторов исследовались в данной работе?

7. Для определения каких опытных параметров использовался закон Гука?

8. Изобразите схему распределения нормальных напряжений σ по ширине плоского образца с малым круглым отверстием.

9. Как влияет закругление у вершины V-образной выточки на степень концентрации напряжений?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ СДВИГЕ

В зависимость $\tau = G\gamma$, выражающую закон Гука при сдвиге, входит физическая постоянная G , называемая модулем упругости при сдвиге (модулем сдвига) и характеризующая жесткость материала, т.е. способность его сопротивляться упругому сдвиговому деформированию. Значение модуля сдвига зависит от физических свойств материала и определяется опытным путем.

Определить (значение) модуля G непосредственно из опыта на сдвиг (срез) не представляется возможным, т.к. обеспечить деформацию чистого сдвига (т.е. свободного от побочных деформаций) технически трудно. Поэтому опытное определение модуля G производится при кручении стержня круглого поперечного сечения (сплошного или полого), элементарные слои которого находятся в условиях чистого сдвига.

Среди допущений, принятых в курсе сопротивления материалов, имеется предположение, что в упругой стадии деформации материал подчиняется закону Гука, т.е. деформация пропорциональна нагрузке, и поперечные сечения при этом остаются плоскими.

Цель работы

Цель настоящей работы - определить опытным путем значение модуля сдвига для образца стали, а также подтвердить закон Гука при кручении (сдвиге) и теоретическую зависимость между тремя упругими постоянными материала (E , G , ν)

Для этого необходимо опытный образец подвергнуть деформации кручения и измерить углы поворота намеченных сечений.

Исходные данные

Требования к испытанию. Опытный образец следует нагружать статической нагрузкой, закручивающей стержень ступенями, желательны равными.

Максимальная нагрузка на образец не должна вызвать в нем напряжений, превышающих предел пропорциональности: $\tau_{\max} \leq \tau_{pr}$.

Используемые формулы. При выполнении лабораторной работы используются следующие формулы:

$$\Delta\theta = \frac{Tl}{GJ_p} \quad \text{для определения угла закручивания;} \quad (5.1)$$

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{W_p} \quad \text{для определения максимальных касательных напряжений при кручении;} \quad (5.2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{теоретическая зависимость между тремя упругими постоянными материала.} \quad (5.3)$$

Испытательная установка. Для выполнения работы используется настольная установка с нагружением опытного образца при помощи калиброванных грузов (гирь). Максимальный создаваемый закручивающий момент составляет 20 Нм.

Материал образца. Для испытания взят цилиндрический образец стали, для которого значения модуля продольной упругости и коэффициента поперечной деформации определены в работе № 3.

Измерительные приборы. Для измерения геометрических размеров опытного образца используется штангенциркуль с ценой деления 0,05 или 0,1 мм. Для измерения линейных перемещений в опыте используется стрелочный индикатор с ценой деления $\alpha = 0,01$ мм.

Схема опытной установки, на которой образец подвергается деформации кручения, и размещенные на ней измерительные приборы показаны на рис. 5.1.

Образец 1 диаметром d одним концом зашкремлен в опоре 2, а другим свободно установлен в подшипнике 3. К образцу жестко прикреплен рычаг 4, по которому можно перемещать груз весом Q , создающий скручивающий момент. Величина момента изменяется с изменением расстояния a , т. е. положения груза на рычаге.

На опытном образце метками I и II намечается участок длиной l_0 , называемой расчетной длиной, в пределах которой производится измерение деформации. К образцу в намеченных сечениях прикреплены трубины 5, которые, следуя за деформацией нагруженного образца, поворачиваются на некоторый угол θ .

Непосредственно измерить угол θ с необходимой точностью не представляется возможным. Поэтому при помощи стрелочных индикаторов 6 можно измерить линейные перемещения v фиксированных точек трубины 5, отстоящих на расстоянии L от оси стержня I . Тогда угол поворота сечения (угловое перемещение) определяется так:

$$\theta = \operatorname{tg} \theta = \frac{v}{L}$$

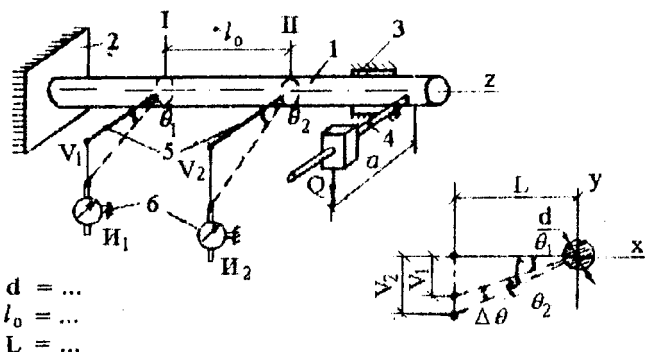


Рис. 5.1

Геометрические характеристики поперечного сечения образца. Вычислить полярный момент инерции I_p и полярный момент сопротивления W_p опытного образца

Максимальная допустимая нагрузка на образец. Поскольку поставленная в работе цель связана с законом Гука, максимальное напряжение в опытном образце не должно превышать предела пропорциональности. Исходя из этого максимальная допустимая нагрузка (скручивающий момент) $T_{max} = T_e$ определяется из условия

$$\tau_{max} = \frac{T_{max}}{W_p} \leq \tau_{pr} \quad (5.4)$$

Для стали предел пропорциональности при сдвиге $\tau_{pr} \approx (0,55 - 0,60) \times \sigma_{pr}$, где σ_{pr} - предел пропорциональности при растяжении-сжатии (принять $\sigma_{pr} = 200$ МПа).

Проведение испытания. После ознакомления с целью работы, схемой опытной установки можно приступить к проведению испытания.

Для исключения влияния возможных зазоров в опытной установке и повышения тем самым точности эксперимента к образцу необходимо приложить некоторый начальный скручивающий момент. После этого сделать первые отсчеты по обоим индикаторам и занести их в графу n таблицы опытных данных. Затем момент увеличить на несколько ньютонметров и снова сделать отсчеты по индикаторам. Провести 4-5 последовательных догрузений образца с записями показаний индикаторов.

После разгрузки образца обратите внимание на показания обоих индикаторов: они должны быть первоначальными, если испытание происходило в упругой стадии деформации.

Опытные данные

Таблица опытных данных. Обработка опытных данных в табличной форме заключается в вычислении приращений скручивающего момента ΔT_e и показаний индикаторов Δl_1 и Δl_2 . При этом из последующего отсчета вычитается предыдущий. Затем вычисляются среднеарифметические значения приращений момента $\Delta T_{e,m}$ и приращений показаний индикаторов $\Delta l_{1,m}$ и $\Delta l_{2,m}$.

Подумайте: почему приращения Δl по соответствующему индикатору равны или достаточно близки; по второму индикатору они больше, чем по первому?

График деформации. По результатам испытаний необходимо построить график зависимости углов поворота исследуемых сечений от скручивающего момента. Этот график можно строить в осях T_e и n , т.к. отсчеты n пропорциональны углу поворота сечений. Названные графики показаны на рис. 5.2.

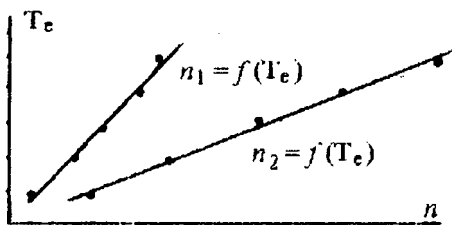


Рис. 5.2

По расположению опытных точек на графике видно, что изучаемая зависимость имеет линейный характер. Линию связи провести визуальным образом так, чтобы она располагалась как можно ближе ко всем опытным точкам.

Начальный участок диаграммы может оказаться нелинейным вследствие зазоров в элементах опытной установки.

По характеру графической зависимости можно сделать вывод, подтверждается ли закон Гука при кручении (сдвиге).

Результаты испытания

Исходя из величины максимального скручивающего момента в опыте подсчитывается по формуле (5.2) значение наибольшего касательного напряжения τ_{\max} . Сравните это значение с пределом пропорциональности τ_{pr}

Для определения значения модуля G необходимо вычислить среднее значение угла закручивания $\Delta\theta_m$ (т.е. угла поворота 2-го намеченного сечения по отношению к 1-му) в пределах расчетной длины l_0 для ступени нагружения $\Delta T_{e,m}$.

Углы поворота соответствующих сечений

$$\theta_1 = \frac{v_1}{L} = \frac{\Delta n_{1,m} \cdot \alpha}{L}; \quad \theta_2 = \frac{v_2}{L} = \frac{\Delta n_{2,m} \cdot \alpha}{L} \quad (5.5)$$

Угол закручивания на ступень нагрузки

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (5.6)$$

Опытное значение модуля сдвига $G_{оп}$ определить из формулы (5.1), приняв $T = \Delta T_{e,m}$, а $l = l_0$.

Затем вычислить значение модуля сдвига G_T из теоретической зависимости (5.3) между тремя упругими постоянными (при известных значениях модуля E и коэффициента ν), сравнить его с опытным значением $G_{оп}$ и сделать вывод о достоверности названной теоретической зависимости.

Выводы

Сделать заключение: подчиняется ли материал образца закону Гука при кручении (сдвиге); подтверждается ли теоретическая зависимость между тремя упругими постоянными материала? Приведите доказательства.

Сравнить опытные значения модуля сдвига для образца стали со справочными данными $G=70...82$ ГПа.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ СДВИГЕ

Цель работы

1. Определить опытным путем значение модуля упругости при сдвиге для образца из стали.
2. Подтвердить закон Гука при кручении (сдвиге) и теоретическую зависимость между тремя упругими постоянными для стали.

Исходные данные

Требования к испытанию (4 строки).

Используемые формулы (4 строки).

Испытательная установка (4 строки).

Материал образца (4 строки).

Измерительные приборы (4 строки).

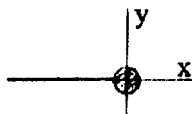
Схема опытной установки (26 строк).



$d = \dots$

$l_0 = \dots$

$L = \dots$



Геометрические характеристики поперечного сечения образца (8 строк).

Максимальная допустимая нагрузка на образец (4 строки).

Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка		Индикаторы			
$T_e, \text{Нм}$	$\Delta T_e, \text{Нм}$	I ₁		I ₂	
		n_i / n_1	Δn_1	n_i / n_2	Δn_2
Средние значения	$\Delta T_{e,m} =$	$\Delta n_{1,m} =$		$\Delta n_{2,m} =$	

График деформации (углов закручивания) (15 строк).

Результаты испытания

Максимальные напряжения в образце (4 строки).

Угол поворота сечения I (4 строки).

Угол поворота сечения II (4 строки).

Угол закручивания на ступень нагрузки (4 строки).

Модуль сдвига:

а) по опыту (4 строки);

б) по теоретической зависимости (4 строки).

Расхождение значений модуля (4 строки).

Выводы (10 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какой зависимостью выражается закон Гука при сдвиге?
2. Что характеризует и от чего зависит значение модуля упругости при сдвиге (модуля сдвига)?
3. Какой деформации подвергается опытный стержень при определении модуля сдвига?
4. По какой формуле определяется деформация (угол закручивания) при кручении?
5. Какое из допущений, принятых в курсе сопротивления материалов, проверяется в данной лабораторной работе?
6. Между какими тремя упругими постоянными материала существует теоретическая зависимость?
7. Сформулируйте общую цель лабораторной работы.
8. Какую из величин, входящих в формулу деформации при кручении, необходимо измерить в процессе определения модуля сдвига?
9. Основные требования, предъявляемые к испытанию.
10. Какие измерительные приборы использовались при проведении опыта?
11. Какие перемещения можно измерить при помощи стрелочного индикатора?
12. Как перейти от показания стрелочного индикатора к величине линейного перемещения?
13. Какова методика опытного определения угла поворота сечения?
14. Почему максимальные касательные напряжения, возникающие в образце в процессе опыта, не должны превышать предела пропорциональности?
15. Почему в таблице опытных данных равным приращениям скручивающего момента соответствуют равные или почти равные приращения отсчетов по индикаторам?
16. Какой характер зависимости угла поворота сечений от скручивающего момента наблюдается в опытах и о чем это свидетельствует?
17. Подтверждается ли теоретическая зависимость между тремя упругими постоянными материала? Приведите доказательства.
18. Как согласуется опытное значение модуля сдвига G со справочными данными?

ИСПЫТАНИЕ ВИНТОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРУЖИНЫ

Пружины являются широко распространенными упругими элементами машин и механизмов. Они используются в качестве амортизаторов, аккумуляторов энергии, силоизмерителей. Наиболее распространены цилиндрические винтовые пружины, работающие на растяжение-сжатие и имеющие круглое поперечное сечение стержня, из которого они изготовлены.

Точный расчет винтовой пружины на прочность и жесткость довольно сложный, т.к. стержень ее испытывает одновременно кручение, сдвиг и изгиб. У пружин с малыми углами наклона витков ($\alpha \leq 15^\circ$) влиянием сдвига, а также изгиба пренебрегают и при выводе формул учитывают лишь кручение стержня.

Полученные таким образом расчетные формулы просты и удобны для практики, но в некоторой степени приближены. Достоверность их определяется опытом.

Цель работы

Цель работы - определить опытным путем продольную деформацию винтовой цилиндрической пружины, подтвердить для этого случая соблюдение закона Гука.

Для этого опытная пружина подвергается нагружению растягивающей силой с одновременным измерением деформации (удлинения).

Исходные данные

Требования к испытанию. Опытная пружина должна нагружаться статической нагрузкой равными ступенями до напряжений, не превосходящих в материале предел пропорциональности: $\tau_{\max} \leq \tau_{pr}$.

Используемые формулы. Максимальное касательное напряжение в стержне пружины определяется по формуле

$$\tau_{\max} = \frac{8FD}{\pi d^3}, \quad (6.1)$$

а продольная деформация (осадка) - по формуле

$$\lambda = \frac{8FD^3m}{Gd^4} \quad (6.2)$$

Жесткость пружины, т.е. величина силы, вызывающей деформацию, равную единице удлинения, определяется по формуле

$$c = \frac{F}{\lambda} = \frac{Gd^4}{8D^3m}, \text{ Н/м.} \quad (6.3)$$

Испытуемым элементом является пружина растяжения с плотно сомкнутыми витками, имеющими малый угол наклона.

Стержень пружины стальной, значение модуля сдвига приведено в техническом паспорте опытной установки.

Измерительные приборы. Измерение деформации пружины, т.е. ее удлинение, осуществляется по мерной шкале опытной установки с ценой одного деления 1 мм.

Используется опытная установка настольного типа с нагружением опытной пружины калиброванными грузами (гириями).

Схема опытной установки с пружиной изображена на рис. 6.1.

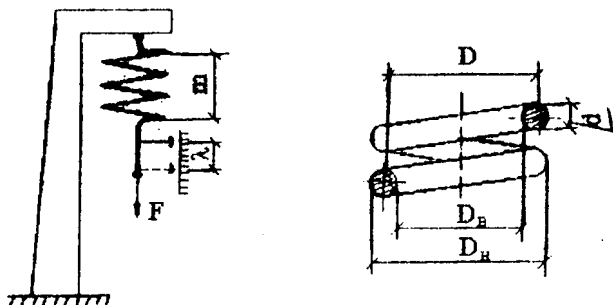


Рис. 6.1

Проведение испытания. Нагружение опытной пружины производится несколькими (желательно равными) ступенями, что позволит построить график деформации. На каждой ступени нагружения производится отсчет по мерной шкале линейки.

Значения нагрузки F и показаний n шкалы фиксируются в таблице опытных данных.

Опытные данные

Обработка таблицы опытных данных заключается в вычислении значений приращений нагрузки ΔF и деформации пружины $\Delta \lambda$, а затем их средних значений ΔF_m и $\Delta \lambda_m$.

Опытное значение деформации пружины от ступени нагрузки будет $\lambda_{оп} = \Delta \lambda_m$.

Результаты испытания

График деформации (удлинения пружины) построить в осях F и λ . Линия связи проводится визуально, как можно ближе к опытным точкам.

Опытное значение жесткости пружины определить по выражению $c = \Delta F_m / \Delta \lambda_m$.

Теоретический расчет

Значение теоретической деформации (удлинения) λ_T пружины от ступени нагрузки ΔF определить по формуле (6.2).

Значение максимального касательного напряжения τ_{max} в стержне пружины определить по формуле (6.1) от наибольшей нагрузки, имевшей место в опыте.

Сравнение результатов

Сравнить значение максимального касательного напряжения, полученного в опыте, с пределом пропорциональности материала $\tau_{pr} = 120$ МПа.

Опытное значение деформации пружины $\lambda_{\text{оп}}$ сравнить с ее теоретическим значением λ_T и вычислить расхождение в процентах.

Сравнить значение тангенса угла наклона линии связи $F=f(\lambda)$ к оси абсцисс с опытным значением жесткости пружины c (контроль правильности построения графика деформации).

Выводы

В выводах указать: подтверждается ли закон Гука при растяжении пружины; приемлема ли для практики теоретическая формула, по которой определяется деформация пружины.

Форма журнала лабораторной работы № 6

Лабораторная работа № 6

ИСПЫТАНИЕ ВИНТОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРУЖИНЫ

Цель работы

1. Определить опытным путем деформацию цилиндрической винтовой пружины и ее жесткость.
2. Подтвердить соблюдение закона Гука.

Исходные данные

Требования к испытанию (2 строки).

Используемые формулы (6 строк).

Объект исследования (2 строки).

Схема пружины (8 строк).

Наружный диаметр $D_n = \dots$

Внутренний диаметр $D_b = \dots$

Средний диаметр $D = \dots$

Диаметр стержня $d = \dots$

Число витков $n = \dots$

Измерительные приборы (2 строки).

Схема опытной установки с пружиной (13 строк).

Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка, Н		Деформация, мм	
F	ΔF	$n = \lambda$	$\Delta \lambda$
$\Delta F_m =$		$\Delta \lambda_m =$	

Опытная деформация от ступени нагрузки $\lambda_{оп} = \dots$

Результаты испытания

График деформации (14 строк).

Жесткость пружины.

Теоретический расчет

Теоретическая деформация пружины (4 строки).

Максимальное касательное напряжение в стержне (4 строки).

Сравнение результатов (3 строки)

Выводы (5 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какие виды пружин наиболее распространены и для чего они используются в элементах машин?
2. Каким видам деформации подвергается стержень пружины?

3. Какой вид деформации стержня пружины является наиболее существенным?

4. Какому виду деформации подвергалась опытная пружина и какой параметр при этом измерялся?

5. Какие точки сечения стержня пружины являются опасными?

6. Максимальные напряжения в стержне опытной пружины не должны превышать какой величины?

7. Какие основные напряжения возникают в стержне пружины и по какой формуле они определялись?

8. По какой формуле определяется осадка пружины?

9. Что называется жесткостью и по какой формуле она определяется?

10. В каких осях строится график деформации и каков характер взаимосвязи параметров графика?

11. Выполняется ли закон Гука при растяжении пружины? Приведите доказательство.

12. Приемлема ли на практике теоретическая формула для определения осадки пружины? Приведите доказательство.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

При плоском поперечном изгибе в поперечных сечениях балки возникают нормальные σ и касательные τ напряжения. Анализ этого вида деформации более сложен, поэтому в теории плоского изгиба используются некоторые гипотезы и допущения. В числе их гипотеза плоских сечений (гипотеза Бернулли). Принято считать также, что в процессе деформации балки ее продольные волокна испытывают линейные и угловые деформации, что эти деформации протекают по закону Гука и что волокна в поперечном направлении не оказывают давления друг на друга.

Кроме того, в теории не учитываются некоторые другие факторы, влияние которых является сравнительно малым.

С учетом принятых гипотез и допущений теоретически доказано, что при плоском изгибе нормальные напряжения распределяются по высоте сечения балки по линейному закону, достигая наи-

больших значений в крайних волокнах и значений, равных нулю, в нейтральном слое. Положение нейтрального слоя совпадает с продольной центральной осью балки.

Полученные расчетные формулы плоского изгиба просты и удобны для практики, но в некоторой степени приближенны. Степень достоверности их устанавливается опытами.

Цель работы

Цель настоящей работы - выявить опытное распределение нормальных напряжений по высоте заданного сечения балки, определить значения этих напряжений и сравнить их с теоретическими.

На основании данных, полученных в результате испытания, подтвердить закон Гука при плоском изгибе, гипотезу плоских сечений и принцип распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки.

Для этого в намеченных точках на поверхности балки при помощи датчиков измеряются относительные линейные деформации волокон, по которым вычисляются значения нормальных напряжений.

Исходные данные

Требование к проведению опыта. При выполнении работы требуется, чтобы нагружение опытной балки осуществлялось статической нагрузкой ступенями, желательно равными, чтобы максимальная нагрузка на балку не вызывала напряжений, превышающих предел пропорциональности, т.е. $\sigma_{\max} \leq \sigma_{pr}$.

Используемые формулы. Теоретические нормальные напряжения при плоском изгибе в любой точке поперечного сечения балки определяются по формуле

$$\sigma = -\frac{M_x}{I_x} \cdot y \quad (7.1)$$

Для определения опытных напряжений используется закон Гука в виде

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (7.2)$$

Опытная установка. Для проведения опыта используется специальный балочный испытатель, включающий станину, нагрузочное устройство и регистрирующие приборы. Нагружение осуществляется гидравлическим домкратом с максимальным усилием в 100 кН.

Объект исследования. Опыт проводится на простейшем реальном элементе конструкции - двухопорной балке, выполненной из стального прокатного двутаврового профиля, изготовленного по ГОСТу.

Согласно СНиП-11-23-81 «Строительные конструкции. Нормы проектирования» при выполнении расчетов принять $E=206$ ГПа, $\nu=0,3$. Следует иметь в виду, что реальные значения упругих характеристик материала опытной балки могут несколько отличаться от нормальных.

Измерительные приборы. Для измерения относительных линейных деформаций балки используются датчики омического сопротивления (тензорезисторы) с базой 200 мм. Регистрация деформации производится измерителем деформации ИДЦ-1. Цена α единицы показаний измерителя приводится на его шкале, а коэффициент тензочувствительности K датчиков - в паспорте комплекта датчиков.

Схема опытной балки и расположение датчиков. Исследуемая балка (рис. 7.1) является однопролетной шарнирно-опертой, левая опора шарнирно-неподвижная, правая - шарнирно-подвижная. Нагружение производится сосредоточенной силой.

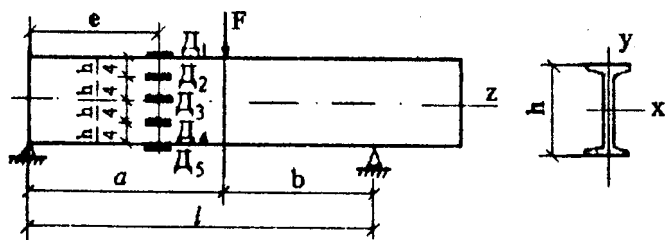


Рис. 7.1

В намеченном (по длине балки) поперечном сечении параллельно продольной оси наклеены пять датчиков: в крайних волокнах, на уровне нейтрального слоя и на четверти высоты от нейтрального слоя. При помощи этих датчиков измеряются продольные деформации указанных волокон балки, значения которых используются для вычисления нормальных напряжений в этих волокнах.

Максимальная допустимая нагрузка на балку определяется из условия, что максимальные нормальные напряжения в опасной точке балки не превышают значения предела пропорциональности.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{x, \max}}{W_x} \leq \sigma_{pr} = 200 \text{ МПа}, \quad (7.3)$$

где $M_{x, \max}$ - изгибающий момент в опасном сечении балки, равный

$$M_{x, \max} = \frac{F \cdot a \cdot b}{l}$$

Проведение опыта. Чтобы устранить имеющиеся зазоры в нагрузочном устройстве, т.е. исключить из расчета начальный участок деформации, балку загружают предварительной нагрузкой в 5-10 кН. При этой нагрузке снимают показания измерителя деформации по каждому датчику. Затем балку догружают несколько раз равными приращениями нагрузки ΔF .

Опытные данные

Обработка таблицы с опытными данными заключается в вычислении приращений нагрузки ΔF и разности показаний измерителя деформации Δl по каждому датчику. Принцип: последующий отсчет минус предыдущий. Поскольку было сделано несколько нагружений балки, для окончательных расчетов принимаются средние значения приращений ΔF_m и Δl_m .

Результаты испытаний

Сначала вычисляются относительные линейные деформации ($\epsilon_l = 2\Delta l_{l,m} \times \alpha / K$) в точке расположения датчиков, а затем по формуле закона Гука (7.2) определяются опытные значения нормальных напряжений в этих точках.

Обратите внимание, что величины этих опытных напряжений получены исходя из ступени нагрузки ΔF .

Теоретический расчет

Схема балки. Эпюры внутренних сил. Поскольку опытные напряжения получены исходя из ступени нагрузки ΔF , то и теоретические напряжения нужно определять от этой же нагрузки.

Определите опорные реакции, постройте эпюры Q_y и M_x , вычислите ординату M_x в сечении, где расположены датчики.

Нормальные напряжения вычислять по формуле (7.1) для всех пяти опытных точек. При вычислении напряжений соблюдайте размерность входящих в формулу величин, учитывайте знак изгибающего момента M_x и ординаты y .

Максимальное нормальное напряжение в балке вычислять по формуле (7.3) для сечения, где изгибающий момент наибольший, т.е. под силой F .

Сравнение результатов

Эпюры нормальных напряжений в исследуемом сечении балки строить по вычисленным теоретическим значениям и по найденным опытным путем, совместив их на одной оси. Эпюру теоретических напряжений покажите, например, сплошной линией, а опытных - пунктирной.

Расхождение между теоретическими данными и опытными подсчитывать по выражению

$$\Delta = \frac{\sigma_{оп} - \sigma_{т}}{\sigma_{т}} \cdot 100, \%$$

Следует обратить внимание, что поперечное сечение опытной балки имеет сложную форму, отчего реальные размеры сечения могут несколько (в допустимых пределах) отличаться от проектных.

Поэтому и расхождение между опытными и теоретическими данными в реальных элементах конструкции могут быть несколько большими, чем в случае испытания на специально изготовленных образцах. Этому способствуют и принятые для расчета нормативные значения E и ν .

Выводы

В выводах необходимо дать ответы на вопросы, поставленные целью работы (приводя доказательства): подтверждается ли закон Гука при плоском изгибе, гипотеза плоских сечений и принцип распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки.

По величине расхождения между теоретическими данными и опытными сделать вывод о допустимости применения тех гипотез и упрощений, которые приняты в теории плоского изгиба.

Форма журнала лабораторной работы № 7

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

Цель работы

1. Определить по опытным данным нормальные напряжения в заданных точках сечения балки и сравнить их с теоретическими значениями.

2. Подтвердить закон Гука, гипотезу плоских сечений и принцип распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки при плоском изгибе.

Исходные данные

Требования к испытанию (4 строки).

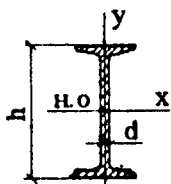
Используемые формулы:

для определения опытных параметров (5 строк);

для определения теоретических напряжений (5 строк).

Испытательная установка (14 строк).

Объект исследования.



$$I_y = \dots$$

$$I_x = \dots$$

$$h = \dots$$

$$W_x = \dots$$

$$d = \dots$$

$$S_x = \dots$$

Измерительные приборы (6 строк).

Схема опытной балки (16 строк).

Максимальная допустимая нагрузка (8 строк).

Опытные данные

Таблица опытных данных

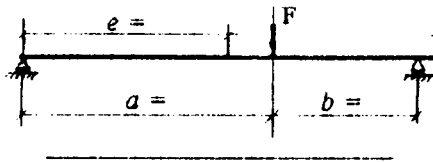
Нагрузка кН	Датчики ΔF , кН	Д-1		Д-2		Д-3		Д-4		Д-5	
		n	Δl	n	Δl	n	Δl	N	Δl	n	Δl
Средние значения	ΔF_m	$\Delta l_{m,1} =$		$\Delta l_{m,2} =$		$\Delta l_{m,3} =$		$\Delta l_{m,4} =$		$\Delta l_{m,5} =$	

Результаты испытаний

Продольные относительные деформации волокон балки (7 строк)
 Нормальные напряжения (7 строк).

Теоретический расчет

Схема балки. Эпюры изгибающих моментов (10 строк).



Нормальные напряжения (16 строк)
 Максимальное нормальное напряжение (4 строки)

Сравнение результатов

Эпюра нормальных напряжений (14 строк)

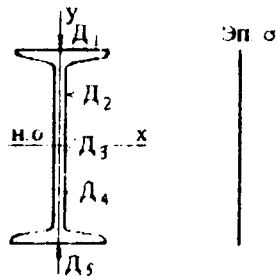


Таблица сравнения результатов

Напряжения	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5
Опытные, МПа					
Теоретические, МПа					
Расхождения, %					

Выводы (10 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какие виды напряжений возникают в сечениях балки при чистом изгибе, при плоском поперечном изгибе?
2. Какие гипотезы и допущения приняты в теории плоского изгиба?
3. В чем заключается гипотеза плоских сечений?
4. Что происходит с волокнами балки в процессе деформации и как волокна взаимодействуют друг с другом?
5. Как распределяются нормальные напряжения по высоте сечения балки?
6. Какое положение занимает нейтральный слой в балке?
7. Сформулируйте общую цель лабораторной работы.
8. Какие основные требования предъявляются к испытанию?
9. По какой формуле определяются нормальные напряжения в любой точке поперечного сечения балки при изгибе?
10. Какие измерительные приборы используются при проведении лабораторной работы?
11. Что непосредственно измеряется в данной работе при помощи датчиков сопротивления?
12. Как располагаются по отношению к продольной оси балки датчики, служащие для измерения деформации ее волокон?
13. Из каких соображений определяется минимальная допустимая нагрузка на опытную балку?
14. Какие закономерности обнаружены при анализе таблицы опытных данных?
15. По какой формуле можно вычислить нормальные напряжения в волокнах балки, если использовать средние значения приращений показаний измерителя деформации?
16. Подтверждает ли опыт закон Гука при плоском изгибе? Приведите доказательства.
17. Подтверждает ли опыт принцип распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки при плоском изгибе? Приведите доказательства.

18. Подтверждает ли опыт гипотезу плоских сечений при изгибе? Приведите доказательства

19. Оправданы ли те гипотезы и допущения, которые приняты в теории плоского изгиба?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

В теории курса доказывается, что при плоском поперечном изгибе в крайних волокнах балки имеет место линейное напряженное состояние, а во всех остальных - плоское.

Цель работы

Цель работы - выявить вид напряженного состояния в нескольких характерных точках опытной балки, сравнить значения главных напряжений, полученных по опытным данным, с теоретическими.

Для этого в намеченных точках балки при помощи датчиков измеряют относительные линейные деформации волокон, по которым вычисляют значения главных напряжений и устанавливают вид напряженного состояния.

Исходные данные

Требования к проведению опыта При проведении работы требуется, чтобы нагружение опытной балки осуществлялось статической нагрузкой и чтобы максимальное значение ее не вызывало напряжений, превышающих предел пропорциональности для материала балки.

Используемые формулы Опытные параметры в намеченных точках балки определяют по следующим формулам
относительные линейные деформации волокон - (3);
угловая деформация (угол сдвига) - (4).
экстремальные относительные линейные деформации - (5),
экстремальные нормальные напряжения - (7)
наибольшие касательные напряжения - (8),
положение главных площадок (направление главных напряжений) - (6).

Теоретические параметры в намеченных точках балки определять по следующим формулам:

$$\text{нормальные напряжения } \sigma_z = -\frac{M_x}{I_x} \cdot y; \quad (8.1)$$

$$\text{касательные напряжения } \tau_{zy} = \frac{QS_x}{bl_x}; \quad (8.2)$$

максимальные касательные напряжения

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2}; \quad (8.3)$$

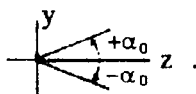
экстремальные нормальные напряжения

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2}; \quad (8.4)$$

min

положение главных площадок (направление главных напряжений)

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = -\frac{2\tau_{zy}}{\sigma_z}, \quad (8.5)$$



Испытательная установка. Для проведения опыта используется специальный балочный испытатель, состоящий из станины и нагрузочного устройства - гидравлического домкрата с максимальным усилием в 100 кН.

Объект исследования. Опыт проводится на стальной прокатной балке двутаврового профиля. Для выполнения расчетов принять $E=206$ МПа, $\nu=0,3$.

Измерительные приборы. Для измерения относительных деформаций волокон балки используются датчики омического сопротивления (тензорезисторы) с базой 20мм. Регистрация деформации производится измерителем деформации ИДЦ (-1)

Схема опытной балки и расположение датчиков показаны на рис. 8.1. Исследуемая балка является шарнирно-опертой. Нагружение производится сосредоточенной силой.

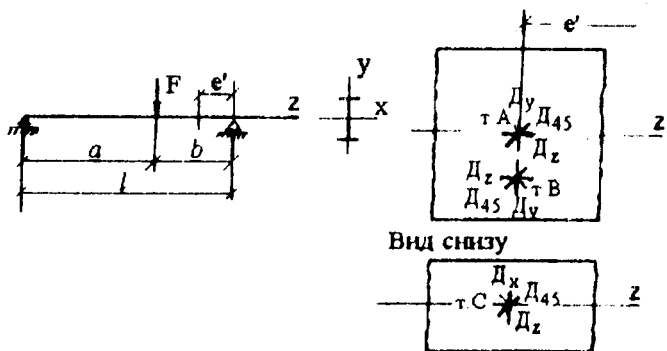


Рис. 8.1

Исследование напряженного состояния производится в трех точках выбранного сечения балки: на уровне нейтрального слоя (точка А), на четверти высоты от этого слоя (точка В) и в крайних нижних волокнах (точка С). В названных точках укреплены тензометрические розетки, состоящие из трех датчиков, два из которых взаимно перпендикулярны, а третий под углом 45° к первым. Взаимно перпендикулярная пара датчиков может располагаться произвольно по отношению к осям балки.

При помощи датчиков измеряются относительные продольные деформации волокон в направлении этих датчиков, которые затем используются для определения главных напряжений в опытных точках.

Проведение опыта. Балку загружают предварительной нагрузкой в 5-10 кН, чтобы исключить из расчета начальный участок деформации, содержащий, как правило, перемещения за счет зазоров в нагрузочном устройстве. При этой нагрузке снимают показания измерителя деформации по всем датчикам. Затем балку догружают основной нагрузкой и снова снимают отсчет.

Опытные данные

Обработка опытных данных заключается в вычислении приращений нагрузки ΔF и показаний измерителя деформации Δl по каждому датчику.

Поскольку погрешность измерителя деформации ИДЦ-1 может достигать 1-2 единицы, разность показаний в этих пределах следует принять равной 0.

Результаты испытания

Из опытных данных по трем опытным точкам каждый студент использует их в расчете лишь для двух точек: С и А или В (по указанию преподавателя).

Вокруг опытной точки выделить бесконечно малый прямоугольный элемент, в центре которого показать розетку датчиков.

Линейные и угловые деформации в опытных точках вычислить по формулам (3) и (4). По полученным данным изобразить вид прямоугольного элемента после деформации (как показано на рис. 8.2).

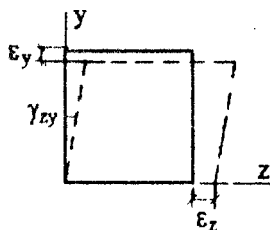


Рис. 8.2

Параметры, полученные с использованием опытных данных, определить по формулам (5-8).

Исходя из значений экстремальных нормальных напряжений обозначить найденные главные напряжения по принятой методике ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) и установить вид напряженного состояния по количеству главных напряжений, отличных от нуля.

Теоретический расчет

Для выполнения теоретического расчета необходимо изобразить схему балки, приложить ΔF , вычислить опорные реакции, построить эпюры Q_y и M_x , указав значения их ординат в исследуемом сечении.

Теоретические значения нормальных и касательных напряжений в опытных точках определить по формулам (8.1) и (8.2), другие параметры по формулам (8.3-8.5).

По значениям экстремальных нормальных напряжений обозначить главные напряжения ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) и установить вид напряженного состояния.

В заключение теоретического расчета необходимо изобразить прямоугольный элемент с исходными и главными площадками и возникающими по ним напряжениями (как показано на рис. 8.3).

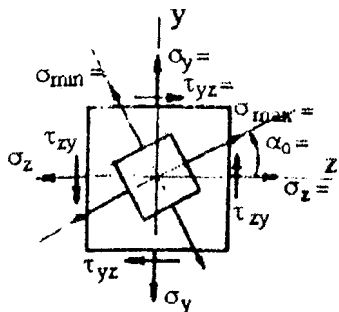


Рис 8.3

Сравнение результатов

Провести сравнение значений основных исследованных параметров, полученных по опытным данным, с теоретическими (в табличной форме) и вычислить отклонения в процентном отношении

Выводы

В выводах указать, подтверждаются ли на практике выводы теории о видах напряженного состояния в различных волокнах балки

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ
ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Цель работы

1. Установить опытным путем вид напряженного состояния в характерных точках изгибаемого элемента (балки).
2. Результаты опыта сопоставить с теоретическими выводами.

Исходные данные

Требования к испытанию (5 строк).

Используемые формулы

для определения опытных параметров в намеченной точке:

относительных линейных деформаций волокон (2 строки);

угловой деформации (угла сдвига) (2 строки);

экстремальных относительных линейных деформаций (4 строки);

экстремальных нормальных напряжений (8 строк);

наибольших касательных напряжений (4 строки);

положения главных площадок (направления главных напряжений) (4 строки);

для определения теоретических параметров в намеченной точке:

нормальных напряжений (4 строки);

касательных напряжений (4 строки);

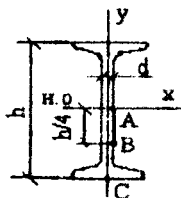
максимальных касательных напряжений (4 строки);

максимальных нормальных напряжений (4 строки);

положения главных площадок (направления главных напряжений) (4 строки).

Испытательная установка (4 строки).

Объект исследования (4 строки и рисунок).



$$I_{Nz} = \dots \quad I_x = \dots$$

$$h = \dots \quad W_x^A = \dots$$

$$b = \dots \quad S_x^A = \dots$$

$$t = \dots \quad S_x^B = \dots$$

$$d = \dots \quad S_x^C = \dots$$

$$E = \dots$$

$$\nu = \dots$$

Измерительные приборы и их размещение (4 строки и рисунок)
 Схема опытной балки (8 строк).

Параметры балки:

$$I = \dots \quad a = \dots \quad d = \dots \quad e' = \dots$$

Опытные данные

Таблица опытных данных

На- грузка F, кН	Опытные точки	А			В			С		
	Датчики	L_y	L_{45}	L_z	L_y	L_{45}	L_z	L_z	L_{45}	L_z
	Канал измер.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Отсчеты μ									
	Отсчеты μ									
$\Delta F =$	Приращения Δl									

Результаты испытания

Форма журнала результатов испытания для всех опытных точек одинакова (составляется для двух точек).

Вид прямоугольного элемента с датчиками (5 строк).

Измеренные параметры.

Относительные линейные деформации в направлении датчиков (8 строк).

Параметры, вычисленные по опытным данным:

угол сдвига элемента (3 строки);

вид прямоугольного элемента после деформации (7 строк);

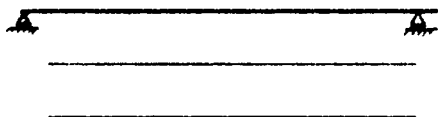
экстремальные относительные линейные деформации (6 строк);
экстремальные нормальные напряжения (6 строк);
наибольшие касательные напряжения (4 строки);
главные напряжения (3 строки);
вид напряженного состояния (1 строка).

Положение главных площадок (направление главных напряжений) (4 строки).

Схема прямоугольного элемента с главными площадками (напряжениями) (8 строк).

Теоретический расчет

Схема опытной балки. Эпюры внутренних сил (16 строк).



Форма журнала теоретического расчета для всех опытных точек одинакова.

Нормальные напряжения (σ_z, σ_y) (4 строки).

Касательные напряжения (4 строки).

Максимальные касательные напряжения (4 строки).

Экстремальные нормальные напряжения (6 строк).

Главные напряжения (3 строки).

Вид напряженного состояния (1 строка).

Положение главных площадок (направление главных напряжений) (4 строки).

Схема прямоугольного элемента с исходными и главными площадками и возникающими по ним напряжениями (12 строк).

Сравнение результатов

Таблица опытных и теоретических значений
исследованных параметров

Точки	А (В)				С			
Параметры	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	r_{\max} , МПа	α_0 , град	σ_{\max} , МПа	σ_{\min} , МПа	r_{\max} , МПа	α_0 , град
Опытные								
Теоретические								
Расхождение, %								

Выводы (10 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Что называется напряженным состоянием? Чем определяется вид напряженного состояния?
2. Какие виды напряженного состояния имеют место в поперечном сечении плоскоизогнутой балки?
3. Какие измерительные приборы использовались в данной работе и что непосредственно измеряют ими?
4. В каких точках поперечного сечения балки проведены исследования напряженного состояния?
5. Что такое тензометрическая розетка и как в ней расположены датчики?
6. По какому выражению можно определить опытные значения относительных линейных деформаций волокон балки?
7. Какие опытные параметры вычисляли по значениям относительных линейных деформаций?
8. Что означает «экстремальные (главные) напряжения»?
9. По какой теоретической формуле определяются нормальные напряжения при плоском изгибе?

10. По какой теоретической формуле определяются касательные напряжения при плоском поперечном изгибе?

11. Что означают понятия «главные напряжения» и «главные площадки»?

12. Какой вид принимает прямоугольный элемент, выделенный вокруг точки A , расположенной на нейтральной оси, после деформации? Какой вид напряженного состояния в этой точке и как направлены главные напряжения?

13. Какой вид принимает прямоугольный элемент, выделенный вокруг точки B , после деформации? Каков вид напряженного состояния и как направлены главные напряжения?

14. Какой вид принимает прямоугольный элемент, выделенный вокруг точки C , расположенной в крайних волокнах балки, после деформации? Каков вид напряженного состояния и как направлены главные напряжения?

15. Как обозначаются главные напряжения и как устанавливается вид напряженного состояния?

16. Изобразите прямоугольный элемент с исходными и главными площадками и возникающими по ним напряжениями.

17. Подтверждает ли опыт вывод теории о видах напряженного состояния в различных волокнах балки?

Факультативное задание

к лабораторной работе № 8 «Исследование напряженного состояния при плоском поперечном изгибе»

Цель задания

1. Исследовать изменение нормальных и касательных напряжений в точке B опытной балки в связи с изменением положения площадок прямоугольного элемента ($\alpha = 0 \dots 90^\circ$).

2. Выявить взаимосвязь между нормальными и касательными напряжениями по характерным площадкам.

Используемые формулы

для определения нормальных и касательных напряжений по наклонным площадкам:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_z \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha - \tau_{zy} \sin 2\alpha ;$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{zy} \cos 2\alpha ;$$

$$\sigma_{\beta} = \sigma_z \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha + \tau_{zy} \sin 2\alpha ;$$

$$\tau_{\beta} = -\left(\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{zy} \cos 2\alpha\right) ;$$

для определения наибольшего касательного напряжения:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_y)^2 + 4\tau_{zy}^2} ;$$

для определения положения площадки с наибольшим касательным напряжением:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_{\tau} = -\frac{\sigma_z - \sigma_y}{2\tau_{zy}} .$$

Выводы

В выводах указать на характерную взаимосвязь нормальных и касательных напряжений.

Пример выполнения задания для точки А опытной балки. Схема сечения балки, расположение опытной точки, а также прямоугольный элемент с исходными и наклонными площадками показаны на рис. 8.4.

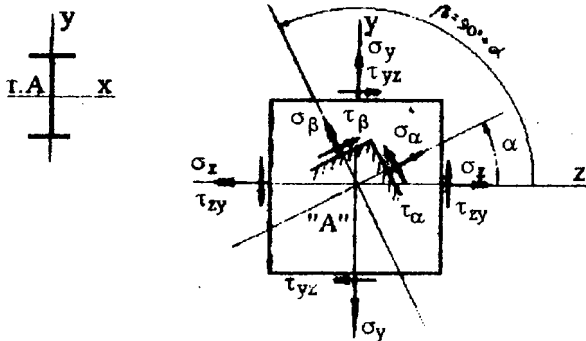


Рис. 8.4

Значения напряжений по исходным площадкам прямоугольного элемента (по данным лабораторной работы № 8): $\sigma_y=0$, $\sigma_z=0$, $\tau_{zy}=-32,5$ МПа.

Напряжения по наклонным площадкам:

$$\sigma_{\alpha} = 0 + 0 \cdot 32,5 \sin 2\alpha = 32,5 \sin 2\alpha \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\beta} = -32,5 \sin 2\alpha \text{ МПа};$$

$$\tau_{\alpha} = -32,5 \cos 2\alpha \text{ МПа};$$

$$\tau_{\beta} = 32,5 \cos 2\alpha \text{ МПа};$$

$$\alpha = 0^{\circ};$$

$$\sigma_{\alpha} = 0;$$

$$\sigma_{\beta} = 0;$$

$$\alpha = 15^{\circ};$$

$$\sigma_{\alpha} = 16,3 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\beta} = -16,3 \text{ МПа};$$

$$\alpha = 30^{\circ};$$

$$\sigma_{\alpha} = 28,1 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\beta} = -28,1 \text{ МПа};$$

$$\alpha = 45^{\circ};$$

$$\sigma_{\alpha} = 32,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\beta} = -32,5 \text{ МПа};$$

$$\alpha = 60^{\circ};$$

$$\sigma_{\alpha} = 28,1 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\beta} = -28,1 \text{ МПа};$$

$$\alpha = 75^{\circ};$$

$$\sigma_{\alpha} = 16,3 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\beta} = -16,3 \text{ МПа};$$

$$\alpha = 90^{\circ};$$

$$\sigma_{\alpha} = 0;$$

$$\sigma_{\beta} = 0;$$

$\tau_{\alpha} = -32,5 \text{ МПа};$	$\tau_{\beta} = 32,5 \text{ МПа};$
$\tau_{\alpha} = -28,1 \text{ МПа};$	$\tau_{\beta} = 28,1 \text{ МПа};$
$\tau_{\alpha} = -16,3 \text{ МПа};$	$\tau_{\beta} = 16,3 \text{ МПа};$
$\tau_{\alpha} = 0;$	$\tau_{\beta} = 0;$
$\tau_{\alpha} = 16,3 \text{ МПа};$	$\tau_{\beta} = -16,3 \text{ МПа};$
$\tau_{\alpha} = 28,1 \text{ МПа};$	$\tau_{\beta} = -28,1 \text{ МПа};$
$\tau_{\alpha} = 32,5 \text{ МПа};$	$\tau_{\beta} = -32,5 \text{ МПа};$

Наибольшее касательное напряжение в прямоугольном элементе

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(0+0)^2 + 4 \cdot 32,5^2} \cdot 10^6 = 32,5 \text{ МПа}.$$

Положение площадки с наибольшим напряжением

$$\operatorname{tg} 2\alpha_{\tau} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0}{2(-32,5) \cdot 10^6} = 0; \quad 2\alpha = 0; \quad \alpha = 0.$$

Эпюры напряжений

Эпюры нормальных и касательных напряжений строятся по вычисленным данным (рис. 8.5).

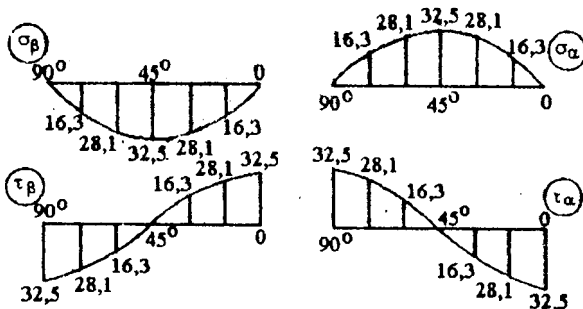


Рис. 8.5

Положение площадок с экстремальными напряжениями нормальными (а) и касательными (б) показано на рис. 8.6.

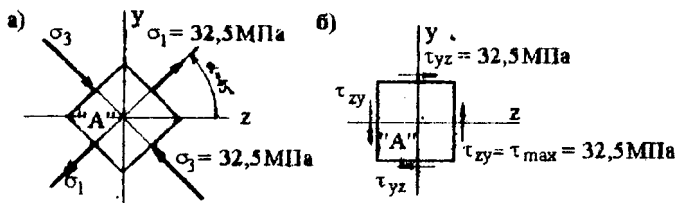


Рис. 8.6

Наблюдения

Анализ эпюр напряжений показывает, что по площадкам с наибольшими нормальными напряжениями касательные напряжения равны нулю. В точке *A* балки имеет место плоское напряженное состояние. Главные напряжения: $\sigma_1 = 32,5 \text{ МПа}$, $\sigma_3 = -32,5 \text{ МПа}$.

Выводы

1. Опыт подтверждает вывод теории о том, что на главных площадках нормальные напряжения экстремальны, касательные равны нулю.
2. Опыт подтверждает вывод о том, что площадки с наибольшими касательными напряжениями расположены под углом 45° к главным.

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

Под действием внешних сил балка деформируется, ось ее искривляется. Деформации изгиба характеризуются углом поворота поперечного сечения θ и прогибом v . Названные параметры могут быть определены теоретическими методами. Наиболее удобным является обобщенное уравнение оси изогнутой балки (метод

начальных параметров). Это уравнение получено как интеграл дифференциального уравнения упругой линии балки после исключения из него величин второго порядка малости. Кроме того, обобщенное уравнение не учитывает влияния поперечных сил, которые имеют место в исследуемой балке. Поэтому в силу названных упрощений расчеты по обобщенному уравнению относятся к наиболее простым, но результаты их до некоторой степени приближены.

Цель работы

Цель настоящей работы - проверить влияние названных упрощений на результаты расчетов. Для этого нужно измерить прогибы и углы поворота заданных сечений и сравнить их с результатами теоретического расчета. После сравнения этих параметров сделать выводы о степени достоверности теории плоского изгиба.

Необходимо также подтвердить зависимость между прогибом v и углом поворота сечения θ в дифференциальной форме ($dv/dz = \theta$) и пропорциональность зависимости прогибов от нагрузки (закон Гука).

Исходные данные

Опытную балку требуется нагружать статической нагрузкой равными ступенями. Наибольший относительный прогиб не должен превышать допустимого значения. Для данного случая $v_{\max} / l \leq 1/400$.

Используемые формулы. Обобщенные уравнения оси изогнутой балки применительно к испытываемой балке:

уравнение углов поворота сечения

$$EI \cdot \theta = EI \cdot \theta_0 + A \frac{(z - \kappa_A)^2}{2} - F \frac{(z - \kappa_F)^2}{2} + \frac{B(z - \kappa_B)^2}{2}; \quad (9.1)$$

уравнение прогибов

$$EI \cdot v = EI \cdot v_0 + EI \cdot \theta_0 z + \frac{A(z-\kappa_A)^3}{6} - F \frac{(z-\kappa_F)^3}{6} + B \frac{(z-\kappa_B)^3}{6}, \quad (9.2)$$

где v и θ - начальные параметры уравнений;

κ - абсцисса соответствующей силы, поскольку начало абсциссы всегда в центре тяжести крайнего левого сечения балки.

Опытная установка - специальный балочный испытатель с нагружением сосредоточенной силой при помощи гидравлического домкрата. Максимальное усилие, которое может обеспечить домкрат, составляет 100 кН.

Исследование проводится на стальной прокатной балке двутаврового профиля, выполненной по ГОСТу. При выполнении расчетов принять $E=206$ ГПа (согласно СНиПу).

Для измерения линейных перемещений в опытах используются стрелочные индикаторы. Цена одного деления α приводится на циферблате прибора. Прогибы v балки измеряются индикаторами непосредственно и вычисляются по выражению (1).

Углы поворота θ сечения измеряются косвенным образом: индикаторами измеряются линейные перемещения W точек M и N струбцины G , жестко укрепленной на балке (рис. 9.1).

Из рис. 9.1 следует, что

$$\operatorname{tg} \theta \approx \theta = \frac{W_M - W_N}{d} \quad \text{или} \quad \theta = \frac{(\Delta n_M - \Delta n_N) \cdot \alpha}{d} \quad (9.3)$$

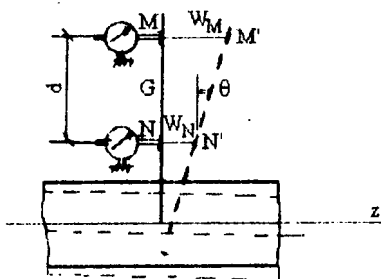


Рис 9.1

Схема опытной балки и расположение индикаторов. Исследуемая балка (рис. 9.2) закреплена на двух шарнирных опорах (неподвижной левой и подвижной правой) и имеет консольную часть. На этом же рисунке показано размещение индикаторов.

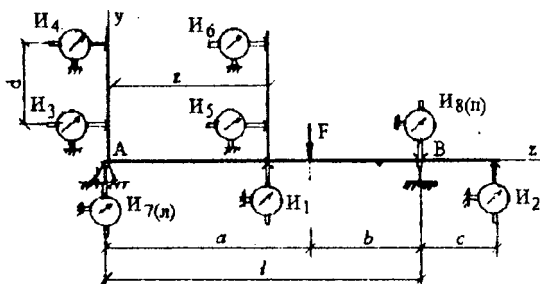


Рис. 9.2

Индикатор I_1 используется для определения прогиба намеченного сечения пролетной части балки, а I_2 - сечения на консоли. По данным индикаторов I_3 и I_4 можно определить угол поворота сечения в начале координат, т.е. θ_0 , а по индикаторам I_5 и I_6 - угол поворота сечения l .

Индикаторы I_n и $I_{n'}$, расположенные соответственно на левой и правой опорах, служат для контроля осадки этих опор, которые не являются абсолютно жесткими.

Проведение испытания. Опыт начинается с загрузки балки предварительной нагрузкой в 5-10 кН, чтобы устранить возможные зазоры в опорах и нагрузочном устройстве. Затем нагрузку увеличивают несколько раз на ступень ΔF , снимая и записывая каждый раз показания индикаторов.

Так как деформация балки проводилась в упругой стадии ее материала, то после снятия нагрузки индикаторы должны показать первоначальные отсчеты.

Опытные данные

Обработка опытных данных заключается в вычислении приращений нагрузки ΔF и показаний Δl всех индикаторов, а затем средних значений этих приращений - ΔF_m и Δl_m .

Если первое значение Δl заметно отличается от последующих, то при вычислении среднеарифметического значения Δl_m его исключают.

График деформации - зависимость прогибов v от нагрузки F - построить по данным индикаторов I_1 и I_2 . Так как отсчеты по индикаторам пропорциональны прогибам v , график можно построить в осях F и v .

Начальный участок графика может быть не совсем прямолинейным вследствие зазоров в элементах опытной установки.

Результаты испытания

Угол поворота θ сечения балки в начале координат исходя из данных индикаторов I_3 и I_4 определяется по выражению (9.3).

Угол поворота θ сечения балки, имеющего наибольший прогиб, определяется по данным индикаторов I_5 и I_6 с использованием того же выражения.

Прогибы в пролетной и консольной частях опытной балки необходимо подсчитать с учетом влияния осадки опоры (рис. 9.3а). На рисунке сплошной линией показана изогнутая ось балки, которая была бы при абсолютно жестких опорах, а пунктирной - реальная (с учетом возможных осадок опор).

Для определения перемещений ΔV за счет осадки опор рассмотрим рис. 9.3б. Перемещение в произвольном сечении с абсциссой z определяется по выражению

$$\Delta v_z = v_{7(l)} + ztg\alpha = v_{7(l)} + \frac{v_{8(l)} - v_{7(l)}}{L} z$$

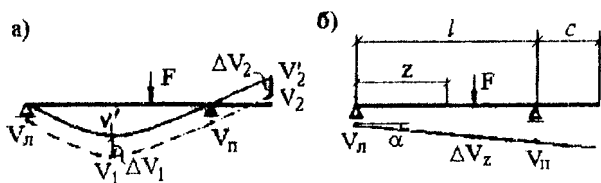


Рис. 9.3

Опытные перемещения v_1 и v_2 исследуемых сечений балки оп-
ределить по выражению (1).

Таким образом, опытные значения прогибов балки (без переме-
щений за счет осадки опор) будут

$$v_1' = v_1 - \Delta v_1, \quad v_2' = v_2 + \Delta v_2.$$

Максимальный абсолютный и относительный прогибы вычислить
от полной нагрузки для междуопорной (пролетной) части балки.

Теоретический расчет

Для выполнения теоретического расчета необходимо выбрать
начало отсчета оси z в крайнем левом сечении балки (т.е. на опоре
 A), определить опорные реакции от ступени нагрузки ΔF_m и по-
строить эпюру изгибающих моментов M_x .

Углы поворота θ и прогибы v выбранных сечений опытной
балки вычислить по уравнениям (9.1) и (9.2). Начальные параметры
 v_0 и θ_0 в этих уравнениях определить из условия деформации на
опорах балки.

В пролетной части балки максимальный прогиб обычно наблю-
дается вблизи середины пролета, т.е. на 1-м участке исследуемой
балки. Абсциссу z этого сечения необходимо определить из урав-
нения (9.1), имея в виду, что угол поворота его равен нулю.

По вычисленным значениям прогибов изобразить ось изогнутой
балки (эпюру прогибов), согласовав выпуклость ее с эпюрой изги-
бающих моментов. Обратите внимание на характер перемещений
консольной части балки при ее нагружении в пролете.

Сравнение результатов

Сравнить измеренные углы поворота θ и прогибы v заданных
сечений балки с их теоретическими значениями, вычислив расхож-
дения в процентах.

Целесообразно на теоретической эпюре прогибов отложить точ-
ки их опытных значений в исследованных сечениях.

Выводы

В выводах необходимо дать ответы на вопросы, поставленные задачей исследования: обоснованы ли те допущения, которые приняты в теории при выводе обобщенного уравнения оси изогнутой балки; подтверждается ли дифференциальная зависимость между углом поворота сечения θ и прогибом ν ; выполняется ли пропорциональность между прогибом и нагрузкой при плоском изгибе?

По пунктам выводов привести доказательства.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

Цель работы

1. В намеченных сечениях балки определить теоретическим и опытным путем углы поворота сечений, прогибы и сопоставить их значения.

2. Построить график деформации для указанных сечений балки и эпюру прогибов.

3. Подтвердить пропорциональную зависимость деформации от нагрузки.

Исходные данные

Требования к испытанию (4 строки).

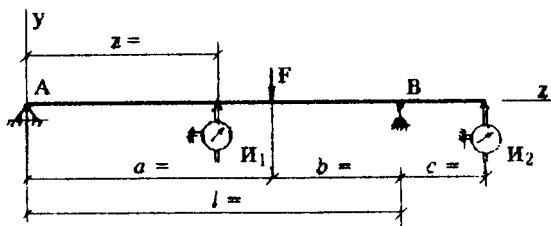
Используемые формулы (10 строк).

Опытная установка (4 строки).

Объект исследования (6 строк).

Измерительные приборы (4 строки).

Схема опытной балки (20 строк).



Опытные данные

Таблица опытных данных (1 страница)

Индикаторы Нагрузка		И ₁		И ₂		И ₃		И ₄		И ₅		И ₆		И _{7(в)}		И _{8(г)}	
		n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn	n	Δn
F, кН	ΔF, кН																
Средн. знач.	ΔF _m =	Δn _{1m} =		Δn _{2m} =		Δn _{3m} =		Δn _{4m} =		Δn _{5m} =		Δn _{6m} =		Δn _{7m} =		Δn _{8m} =	

График деформации (16 строк).

Результаты испытания

Угол поворота опорного(А) сечения при z=0 (5 строк).

Угол поворота сечения при z=... м (5 строк).

Перемещения за счет осадки опор:

а) сечение 1 (5 строк);

б) сечение 2 (5 строк).

Опытные перемещения (совместно с опорами):

а) сечение 1 (2 строки);

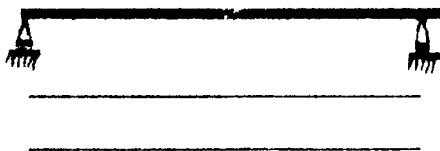
б) сечение 2 (2 строки).

Опытные прогибы (без осадки опор):

- а) сечение 1 (2 строки);
 - б) сечение 2 (2 строки).
- Максимальный абсолютный прогиб (3 строки).
 Максимальный относительный прогиб (3 строки).

Теоретический расчет

Схема опытной балки. Эпюры (22 строки)



Уравнения оси изогнутой балки:

- а) углов поворота (6 строк),
 - б) прогибов (6 строк).
- Начальные параметры уравнений (10 строк).

Прогибы:

- а) сечение 1 (6 строк);
 - б) сечение 2 (6 строк).
- Положение сечения с максимальным прогибом (6 строк).

Сравнение результатов

Таблица сравнения результатов

Параметры	θ_0 , рад	θ_z , рад	ν_1 , мм	ν_2 , мм
Значения				
Опытные				
Теоретические				
Расхождение, %				

Выводы (10 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какими параметрами характеризуется деформация при плоском изгибе?
2. Какие вы знаете методы определения этих параметров?
3. Какие упрощения допускаются в дифференциальном уравнении оси изогнутой балки?
4. Какая существует дифференциальная зависимость между прогибом и углом поворота сечения балки?
5. Сформулируйте цель лабораторной работы.
6. Запишите обобщенное уравнение углов поворота сечения применительно к исследуемой балке.
7. Запишите обобщенное уравнение прогибов применительно к исследуемой балке.
8. Что характеризуют начальные параметры в обобщенном уравнении оси изогнутой балки и как они определяются?
9. Как определить сечение балки, в котором прогиб будет максимальным?
10. Какие измерительные приборы используются в настоящей лабораторной работе?
11. Как по показаниям стрелочного индикатора вычислить измеренный прогиб?
12. Объясните принцип измерения углов поворота сечения.
13. Объясните, почему после разгрузки опытной балки измерительные приборы показывают первоначальные отсчеты?
14. Какие закономерности вы обнаружили в таблице опытных данных?
15. Какие опытные данные использованы для построения графика деформации?
16. Какой характер имеет зависимость деформации от нагрузки и о чем это свидетельствует?
17. Применимы ли для практики допущения, принятые при выводе обобщенного уравнения оси изогнутой балки?
18. Подтверждается ли опытом дифференциальная зависимость между углом поворота сечения и прогибом?
19. Выполняется ли закон Гука (по деформации) при плоском изгибе?

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕМЫ О
ВЗАИМНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Теорема о взаимности перемещений имеет широкое применение при расчете упругих систем. Использование ее позволяет снизить объем вычислительных работ.

В данном случае теорема формулируется следующим образом: при численно равных силовых воздействиях на упругую систему ($F_1 = F_2$) перемещение точки 1 под действием силы, приложенной в точке 2, равно перемещению точки 2 под действием силы, приложенной в точке 1.

Цель работы

Цель лабораторной работы - на модели упругой системы опытным путем подтвердить принцип теоремы о взаимности перемещений и сравнить опытные перемещения с теоретическими.

Исходные данные

Опытная установка настольного типа представляет собой балку прямоугольного поперечного сечения с одним зашпеленным концом, выполненную из стали. Значение модуля продольной упругости материала балки указано в паспорте установки. Схема опытной балки приведена на рис. 10.1.

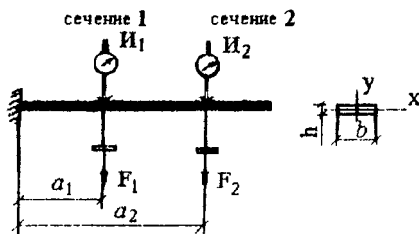


Рис. 10.1

Расстояния a_1 и a_2 в каждом опыте намечаются произвольно. Нагружение балки осуществляется при помощи грузов, укладываемых на подвески.

Для измерения перемещений намеченных точек опытной балки используются индикаторы стрелочного типа. Цена деления α_n шкалы индикатора указывается на самом приборе.

Математическая запись теоремы о взаимности перемещений имеет вид

$$\Delta_{12} = \Delta_{21}, \quad (10.1)$$

где Δ_{12} - перемещение точки 1, вызванное силой F_2 ;

Δ_{21} - перемещение точки 2, вызванное силой F_1 .

Для аналитического определения перемещений наиболее удобно воспользоваться методом начальных параметров. Уравнения линейных перемещений для сечений 1 и 2 опытной консольной балки (рис. 10.2) с принятой системой нагружения имеют следующий вид:

$$EI \cdot v_1 = EI \cdot v_0 + EI \cdot \theta_0 a_1 + M_A \frac{a_1^2}{2} + A_y \frac{a_1^3}{6}, \quad (10.2)$$

$$EI \cdot v_2 = EI \cdot v_0 + EI \cdot \theta_0 a_2 + M_A \frac{a_2^2}{2} + A_y \frac{a_2^3}{6} - F_1 \frac{(a_2 - a_1)^3}{6}$$

Опыт проводится в следующей очередности.

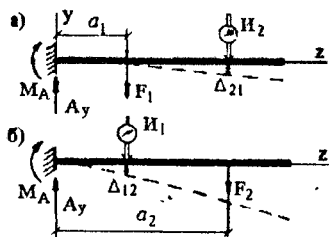


Рис. 10.2

Перед началом нагружения (при отсутствии грузов на подвесках) записать начальные показания индикаторов

Сначала (рис. 10.2а) нагружать подвеску 1, а перемещения измерять по индикатору I_2 . Затем (рис. 10.2б) нагружать подвеску 2, а перемещения измерять по индикатору I_1 .

Всего в опыте проводится 4-5 ступеней нагружения равными грузами $F_1 = F_2$.

Поскольку максимальная нагрузка на балку выбрана такой, чтобы материал ее в процессе опыта оставался в упругой стадии деформации, то после снятия нагрузки стрелки индикаторов должны возвратиться в исходное положение.

Опытные данные

Обработка опытных данных сводится к вычислению приращений ΔF нагрузки и соответствующих им приращений Δl , отсчетов по индикаторам, а затем их средних значений ΔF_m и Δl_m .

При анализе табличных данных следует обратить внимание на закономерности возрастания опытных величин по колонкам и дать им объяснение.

Результаты испытания

Опытные значения линейных перемещений намеченных точек балки, т.е. прогибы $v_{1(оп)}$ и $v_{2(оп)}$, определяются по средним значениям показаний индикаторов Δl_m с учетом цены их делений α_n .

$$\Delta l_{12} = v_{1(оп)} = \Delta l_{1m} \cdot \alpha_n, \quad \Delta l_{21} = v_{2(оп)} = \Delta l_{2m} \cdot \alpha_n.$$

Аналитический расчет

Для вычисления линейных перемещений (прогибов) v_1 и v_2 в опытной балке необходимо составить независимые расчетные схемы для обоих случаев нагружения (по аналогии с рис. 10.2) и использовать формулы (10.2).

Сравнение результатов опыта

Сравнить между собой значения опытных перемещений, полученных по обеим схемам нагружения ($v_{1(оп)}$ и $v_{2(оп)}$), а также эти перемещения с теоретическими v_1 и v_2 . Установить расхождение величин в процентном отношении.

Выводы

В выводах дать ответы на вопросы, обусловленные целью работы: выполняется ли экспериментально теорема о взаимности перемещений; хорошо ли согласуются опытные значения перемещений сечений балки с теоретическими.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 10

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕМЫ О ВЗАИМНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Цель работы

1. Подтвердить опытным путем теорему о взаимности перемещений.
2. Сравнить опытные значения перемещений с теоретическими.

Исходные данные

Схема опытной установки (15 строк).

Объект исследования (5 строк).

Измерительные приборы (3 строки).

Используемые формулы (9 строк).

Опытные данные

Таблица опытных данных (0,5 страницы)

Нагрузка на Π_1		Отсчеты по И_2	
F_1 , Н	ΔF_1 , Н	n_2	Δn_2
Среднее значение	$\Delta F_{1m} =$	$\Delta n_{2m} =$	

Нагрузка на Π_2		Отсчеты по И_1	
F_2 , Н	ΔF_2 , Н	n_1	Δn_1
Среднее значение	$\Delta F_{2m} =$	$\Delta n_{1m} =$	

Результаты испытаний

Опытные значения перемещений сечений 1 и 2 (4 строки).

Теоретический расчет

Расчетные схемы опытной балки (15 строк).

Значения теоретических перемещений сечений 1 и 2 (8 строк).

Сравнение результатов опыта (4 строки).

Выводы (4 строки)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1 Что называют перемещением?

2. Какие виды перемещений возникают в нагруженном теле при его деформации?

3. Какие связи существуют между нагрузками и перемещениями?
4. Перечислите известные аналитические методы определения перемещений в балках.
5. Как формулируется теорема о взаимности перемещений?
6. Какова принципиальная схема опытной проверки теоремы о взаимности перемещений?
7. Какой вид имеет установка для проведения опытов?
8. Какой вид сопротивления испытывает опытный стержень?
9. Какими свойствами должен обладать опытный стержень?
10. Какой порядок проведения опыта при выполнении этой лабораторной работы?
11. В каком порядке проводится нагружение опытного стержня?
12. Каков порядок определения перемещений в опыте?
13. Какой вид перемещения измеряли в опыте?
14. Какими приборами измеряли перемещения?
15. Как определить предельно допустимую нагрузку на опытный стержень?
16. Какое основное условие необходимо соблюдать при опытной проверке теоремы о взаимности перемещений?
17. Каким аналитическим методом пользовались при определении перемещений?

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ БАЛКИ

При расчете статически неопределимых систем для раскрытия статической неопределимости кроме уравнений статики необходимо составить дополнительные уравнения, основанные на перемещениях системы. Они составляются несколькими способами. Основными из них являются уравнения метода начальных параметров (для балок) и универсального метода Мора. Названные методы определения перемещений построены на некоторых допущениях. О них указывалось в лабораторной работе № 9.

Цель работы

Цель работы - подтвердить достоверность расчета статически неопределимых балок с применением уравнений перемещений.

Исходные данные

Используемые формулы. Для выполнения теоретического расчета используются: одно из уравнений статики и уравнение прогибов метода начальных параметров.

$$EI \cdot v = EI \cdot v_0 + EI \cdot \theta_0 z + \Sigma F \frac{(z-\kappa)^3}{\sigma} + \Sigma M \frac{(z-\kappa)^2}{2} + \Sigma q \frac{(z-\kappa)^4}{24}, \quad (11.1)$$

где z - абсцисса сечения, в котором определяется прогиб;

κ - абсцисса точки приложения соответствующего силового фактора.

Исследуемая балка. Для исследования принята балка с одним защемленным и другим шарнирно-опертым концами (рис. 11.1), нагруженная в пролетной части сосредоточенной силой F .

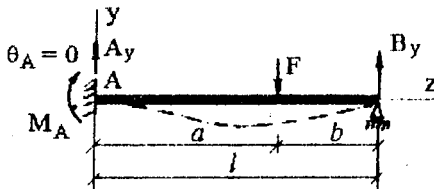


Рис. 11.1

Анализ связей и возможных уравнений статики показывает, что названная балка является один раз статически неопределимой ($4-3=1$).

Для опытного раскрытия статической неопределимости необходимо измерить один из опорных факторов. Наиболее просто получить опытное значение опорного момента M_A .

При этом используется опытная балка, схема которой приведена на рис. 11.2.

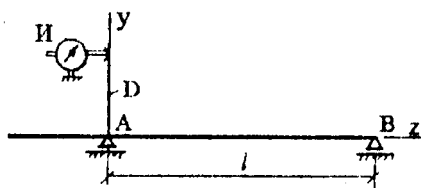


Рис. 11.2

Это двухопорная балка с консольной частью является статически определимой ($3-3=0$). На шарнирно-неподвижной опоре A к балке жестко присоединен стержень D . Он совместно с индикатором I служит для контролирования углового перемещения опорного сечения.

Принцип испытания. В защемленной опоре A исследуемой балки (рис. 11.1) угловое перемещение сечения отсутствует ($\theta_A = 0$). На опоре A опытной балки (рис. 11.3а) под действием нагрузки F опорное сечение окажется повернутым на некоторый угол ($\theta_A \neq 0$).

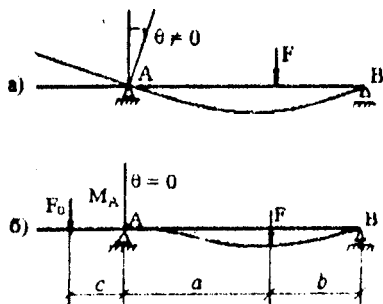


Рис. 11.3

Для того чтобы на опоре A опытной балки (рис. 11.3а) создать условия, эквивалентные условиям на опоре A исследуемой балки (рис. 11.3б), необходимо на консоли приложить груз F_0 , подобрав такое расстояние c , чтобы угол поворота опорного сечения стал равным нулю (рис. 11.3б).

При этом в опорном сечении A опытной балки возникнет изгибающий момент $M_A = F_0 \cdot c$. Это и есть искомый момент в защемлении статически неопределимой балки.

Измерительными приборами являются индикатор стрелочного типа и миллиметровая шкала на консольной части балки. Цена деления индикатора указана на шкале прибора.

Проведение опыта начинается с установки стрелки индикатора в нулевое (или иное) положение при отсутствии нагрузки. В выбранном сечении пролетной части балки прикладывается первая ступень нагрузки ΔF . Затем на консольной части балки размещается груз F_0 и подбирается такое расстояние c , при котором стрелка индикатора возвратится в первоначальное положение.

Всего проводится 4...5 ступеней догружения.

Опытные данные

Обработка опытных данных сводится к вычислению приращений нагрузки ΔF и приращений расстояний Δc . Затем вычисляются средние значения их ΔF_m и Δc_m .

Результаты испытаний

Значение опорного момента M_A на опоре A статически неопределимой балки определяется параметрами F_0 и Δc_m , т.е.

$$M_A = F_0 \cdot \Delta c_m.$$

Теоретический расчет

Для определения теоретического значения опорного момента M_A статически неопределимой балки (рис. 11.1) необходимо составить одно уравнение статики ($M_B=0$) и уравнение прогибов (для сечения B), используя формулу (11.1) и приняв начало отсчета на опоре A .

В отчете показать характер эпюры изгибающих моментов исследуемой балки.

Сравнение результатов

Сравнить значение опорного момента в защемлении статически неопределимой балки, полученного опытным путем, с теоретическим и подсчитать расхождение в процентах.

Выводы

В выводах дать ответ на вопросы, предусмотренные целью лабораторной работы.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ БАЛКИ

Цель работы

Определить для заданной статически неопределимой балки опытным путем опорный момент в защемлении и сравнить его с теоретическим значением.

Исходные данные

- Используемые формулы (4 строки).
- Схема исследуемой балки (10 строк)
- Схема опытной балки (10 строк).
- Измерительные приборы (2 строки).

Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка, Н			Плечо, см	
F	ΔF	F_0	c	Δc
Среднее значение	$\Delta F_m =$		$\Delta c_m =$	

Результаты испытаний

Опытное значение момента в защемлении балки (2 строки).

Теоретический расчет

Уравнение статики (2 строки).

Уравнение прогибов (6 строк).

Значение опорного момента (5 строк).

Эпюра изгибающих моментов исследуемой балки (8 строк).

Сравнение результатов (3 строки).

Выводы (3 строки)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какую конструкцию называют балкой?
2. Какие балки называют статически неопределимыми?
3. Какие балки называют неразрезными?
4. Какие опоры в балках называют абсолютно необходимыми?
5. Какие связи налагает на балку опора с жесткой заделкой?
6. Какой вид перемещения соответствует моменту заделки или защемления?
7. В каком порядке производится опытное определение момента защемления?
8. Какие измерительные приборы использовались в опыте?
9. Перечислить известные аналитические методы определения перемещения.
10. Каким аналитическим методом пользовались в данной работе для определения момента защемления?
11. Какие допущения положены в основу расчета по этому методу?
12. Какова роль подвижного груза в опыте?

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

При косом изгибе в поперечных сечениях балки возникают нормальные и касательные напряжения. Первостепенное значение имеют нормальные напряжения, касательные учитываются редко.

Поскольку косоугольный изгиб как вид сложного сопротивления представляет собой сочетание двух изгибов, происходящих в главных плоскостях балки, в теории используются те же гипотезы и допущения, что и при прямом изгибе. Кроме того, используется принцип независимости действия сил: деформации и напряжения равны сумме их частей, полученных от составляющих нагрузки. Применение этого принципа предполагает, что деформации балки малы, а между ними и нагрузками существует пропорциональная зависимость (выполняется закон Гука).

В связи с использованием ряда гипотез и допущений, принятых в теории, расчетные формулы косоугольного изгиба являются в некоторой степени приближенными.

Цель работы

Цель настоящей лабораторной работы - проверить применимость для практических целей расчетных формул, принятых в теории косоугольного изгиба. Для этого в намеченных точках опытного стержня экспериментально определяются нормальные напряжения, которые затем сравниваются с соответствующими теоретическими значениями.

Исходные данные

Для выполнения опыта требуется, чтобы максимальные нормальные напряжения в опасном сечении опытной балки не превышали значений предела пропорциональности ($\sigma_{\max} < \sigma_{pr}$), нагружение велось статической нагрузкой ступенями (желательно равными).

Для вычисления нормальных напряжений по опытным данным используется закон Гука в виде

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

Значения теоретических нормальных напряжений в произвольной точке поперечного сечения балки при косом изгибе определяются по следующей формуле:

$$\sigma = -\frac{M_x}{I_x} y - \frac{M_y}{I_y} x, \quad (12.2)$$

где M_x, M_y - изгибающие моменты в сечениях балки относительно главных центральных осей;

I_x, I_y - главные центральные моменты инерции сечения;

x, y - координаты точек (в системе главных центральных осей сечения), в которых определяются напряжения.

Положение нейтральной линии в сечении балки определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{M_y I_x}{M_x I_y}, \quad (12.3)$$

где φ - угол наклона нейтральной линии к оси абсцисс сечения (главной центральной оси x).

Положительные значения угла φ отсчитываются против хода часовой стрелки.

Опытная установка настольного типа. Нагружение опытного стержня производится калиброванными грузами (гирами). Максимальная нагрузка не должна превышать 70 Н.

Исследование проводится на консольной балке прямоугольного поперечного сечения, выполненной из стали. Значение модуля продольной упругости материала балки приведено в паспорте установки.

Для измерения деформаций волокон опытной балки, необходимых для определения нормальных напряжений, используются датчики омического сопротивления (тензорезисторы) с базой 20 мм. Индикация результатов опыта осуществляется на измерителе деформации ИДЦ-1, цена α единицы показаний которого приводится на шкале прибора. Величина коэффициента тензочувствительности K датчиков приводится в паспорте партии датчиков.

Схема опытной балки и расположение измерительных приборов показаны на рис. 12.1

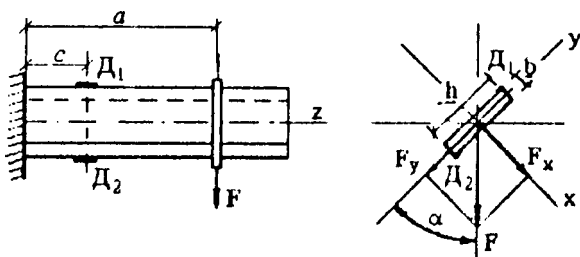


Рис. 12.1

Опытную балку можно поворачивать вокруг продольной оси z на заданный угол α . При этом нагрузочное устройство обеспечивает отвесное положение нагрузки. Поперечное сечение балки располагают так, что главная центральная ось y составляет угол α с направлением нагрузки, т.е. с вертикалью, чем обеспечивается деформация косоугольного изгиба.

Для исследования выбраны угловые точки поперечного сечения балки, в которых нормальные напряжения наибольшие. Поскольку в этих точках имеет место линейное напряженное состояние и направление главных напряжений известно, датчики наклеены по направлению этих напряжений, т.е. параллельно продольной оси балки.

Для проведения опыта поперечное сечение балки поворачивают на заданный угол α и закрепляют, а подвеску для грузов устанавливают на заданном расстоянии a от защемления. После укладки груза на подвеску снимают показания измерителя деформации по каждому датчику. Всего делается 4-5 равных ступеней нагружения.

Опытные данные

Обработка таблицы опытных данных заключается в вычислении приращений нагрузки ΔF и показаний измерителя деформации Δl , а затем их средних значений ΔF_m и Δl_m . При этом следует обратить внимание на характер изменения приращений Δl на каждой ступени нагрузки ΔF .

Результаты испытаний

По средним значениям приращений показаний измерителя деформации Δl_m вычислить относительные деформации ($\epsilon = 2\Delta l_m \alpha / K$) в точках расположения датчиков, а затем по формуле закона Гука (12.1) - опытные значения напряжений в этих точках.

Теоретический расчет

Для выполнения теоретического расчета необходимо построить э п ю р ы изгибающих моментов в главных плоскостях инерции опытной балки, расположив ее так, чтобы главные центральные оси x, y были бы вертикально-горизонтальны. Нагрузку ΔF разложить по главным центральным осям сечения балки.

Н о р м а л ь н ы е напряжения в намеченных точках выбранного сечения опытной балки определить по формуле (12.2), в которую значения изгибающих моментов и координат точек подставляются с учетом их знаков. Знаки слагаемых в формуле (12.2) можно установить и по характеру деформации волокон (растяжение или сжатие) в рассматриваемых точках балки.

Положение н е й т р а л ь н о й линии характеризуется углом наклона φ к оси абсцисс (x) и определяется по формуле (12.3).

Сравнение результатов исследования

По теоретическим данным построить эпюру распределения нормальных напряжений в выбранном сечении опытной балки и отложить на ней значения напряжений, полученные по опытным данным. Вычислить расхождения в значениях напряжений, выразив их в процентах.

Выводы

В выводах привести доводы, оправдывающие допущения, принятые в теории косоугольного изгиба.

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

Цель работы

1. Определить по опытным данным нормальные напряжения в выбранных точках заданного сечения балки.
2. В этих же точках вычислить нормальные напряжения теоретическим путем и сравнить их с напряжениями, полученными экспериментально.

Исходные данные

Требования к испытанию (2 строки).

Используемые формулы (10 строк).

Опытная установка (3 строки).

Объект исследования (3 строки).

Измерительные приборы (3 строки).

Схема опытной балки (20 строк).

Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка, Н		Датчик 1		Датчик 2	
F	Δl	n_1	Δl_1	n_2	Δl_2
Средние значения	$\Delta l_m =$	$\Delta l_{1m} =$		$\Delta l_{2m} =$	

Результаты испытания

Относительные деформации волокон в исследуемых точках балки (5 строк).

Нормальные напряжения в исследуемых точках балки (5 строк).

Теоретический расчет

Схема опытной балки и эпюры изгибающих моментов (14 строк).

Изгибающие моменты в рассматриваемом сечении балки (5 строк).

Нормальные напряжения в исследуемых точках балки (7 строк).

Положение нейтральной оси (4 строки).

Сравнения результатов исследования

Эпюра нормальных напряжений (2 строки).

Расхождение значений исследуемых напряжений (3 строки).

Выводы (3 строки)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какие деформации испытывают продольные волокна балки при косом изгибе?
2. Какие напряжения возникают в сечениях балки при косом изгибе?
3. Какие гипотезы и допущения приняты в теории косоугольного изгиба?
4. При каком условии применим в балках принцип независимости действия сил?
5. Сформулируйте цель работы.
6. По какой формуле определяют нормальные напряжения в любой точке сечения балки при косом изгибе?
7. Как распределяются нормальные напряжения по сечению балки при косом изгибе?
8. По какой формуле определяется положение нейтральной линии и как она проходит в поперечном сечении балки при косом изгибе?

9. Каково взаиморасположение линии действия внешних сил и нейтральной линии?

10. Основные требования к проведению опыта при косом изгибе.

11. Почему максимальные нормальные напряжения в опыте не должны превышать предела пропорциональности?

12. Для чего непосредственно служат используемые в опыте датчики сопротивления?

13. Какой физический параметр (фактор) можно вычислить по измеренной в опыте линейной деформации волокон балки?

14. Назовите вид напряженного состояния в угловой точке поперечного сечения балки при косом изгибе. Как в этой связи необходимо располагать датчики?

15. Какие закономерности обнаружены при анализе таблицы опытных данных?

16. Какой основной закон сопротивления материалов лежит в основе формулы для определения нормальных напряжений по опытным деформациям волокон балки?

17. Почему теоретически вычисленные нормальные напряжения в исследуемых точках оказались равными по величине, но противоположными по знаку?

18. Как распределяются нормальные напряжения по сечению балки при косом изгибе?

19. Подтверждает ли опыт закон Гука при косом изгибе?

20. По каким результатам опыта можно судить, что принятые в теории косоугольного изгиба гипотезы и допущения приемлемы для практики?

Лабораторная работа № 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

Косой изгиб как вид сложного сопротивления представляет собой сочетание двух плоских поперечных изгибов в главных плоскостях. Поэтому для определения перемещений используются те же методы, что и при плоском изгибе, в теории которого используются некоторые гипотезы и допущения (см. лабораторную работу № 9). Кроме того, используется принцип независимости (сложения) действия сил, предполагающий, что деформации малы, а меж-

ду ними и нагрузкой соблюдается пропорциональная зависимость (выполняется закон Гука). В этой связи опытные значения перемещений при косом изгибе могут в некоторой степени отличаться от теоретических.

Цель работы

Цель настоящей лабораторной работы - проверить применимость для практических целей принятых в теории косоугольного изгиба методов определения перемещений. Кроме того, необходимо подтвердить закон Гука при косом изгибе и проверить соответствие положений силовой плоскости и плоскости деформации по отношению к направлению нейтральной линии.

Для этого в выбранном сечении балки измеряются горизонтальные и вертикальные линейные перемещения.

Исходные данные

При выполнении работы требуется, чтобы деформация волокон опытной балки не превосходила упругой стадии, нагружение велось статической нагрузкой ступенями, желательно равными.

Используемые формулы. Для вычисления линейных перемещений u и v свободного конца балки вдоль главных центральных осей (x и y) сечения балки используется любая из известных методов - метод начальных параметров, формула Мора.

Полный прогиб сечения

$$f_{tot} = \sqrt{u^2 + v^2} . \quad (13.1)$$

Направление полного прогиба определяется углом β , который отсчитывается от оси ординат (оси y) и вычисляется по формуле

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{I_x}{I_y} \operatorname{tg} \alpha , \quad (13.2)$$

где α - угол между силовой плоскостью и главной центральной осью y .

Положение нейтральной линии характеризуется углом наклона φ к оси абсцисс (оси x) и определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_x}{I_y} \operatorname{tg} \alpha \quad (13.3)$$

Положительные значения углов α и φ отсчитываются от соответствующих главных центральных осей сечения балки против хода часовой стрелки.

Используется опытная установка настольного типа с нагружением опытной балки калиброванными грузами (гириями). Максимальная нагрузка F не должна превышать 70 Н.

И с с л е д о в а н и е проводится на балке (стержне) прямоугольного поперечного сечения. Материал балки - сталь. Значение модуля продольной упругости в паспорте установки

Для измерения линейных перемещений используются стрелочные индикаторы, цена одного деления α которых указывается на шкале прибора.

С х е м а опытной балки и расположение измерительных приборов показаны на рис. 13.1. Индикаторы располагаются в крайнем (свободном) сечении балки. Один из них служит для измерения вертикальных (f_v), а другой для горизонтальных (f_h) перемещений.

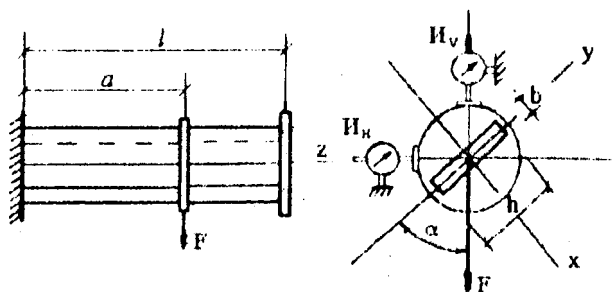


Рис. 13.1

Опытную балку - консоль - можно поворачивать вокруг продольной оси z и устанавливать на заданный угол α , отсчитываемый от вертикали до главной центральной оси у сечения. Нагрузка на балку действует вертикально.

Опыт проводится путем плавной укладки грузов на подвеску и снятия показаний по индикаторам. Всего в опыте принято проводить 4-5 равных ступеней нагружения.

Опытные данные

Обработка таблицы опытных данных заключается в вычислении приращений нагрузки ΔF и показаний индикаторов Δl , а затем их средних значений ΔF_m и Δl_m .

Следует обратить внимание на характер изменения приращений Δl на каждой ступени нагрузки ΔF . Если первое значение Δl заметно отличается от последующих, то при вычислении Δl_m его исключают.

Для подтверждения закона Гука при косом изгибе необходимо по данным индикаторов построить графики зависимости перемещений от нагрузки. Целесообразно это сделать в виде $n_i = f(F)$, т.к. отсчеты n пропорциональны перемещениям f_v и f_n .

По расположению опытных точек установите характер взаимосвязи перемещений с нагрузкой.

Начальный участок диаграммы может быть несколько нелинейным из-за зазоров в элементах опытной установки.

Результаты испытания

Перемещения свободного конца балки f определить по средним значениям приращений Δl_m индикаторов ($f = \Delta l_m \alpha$). Вычислить следующие перемещения: вертикальное f_v , горизонтальное f_n и полный прогиб свободного конца балки

$$f_{tot} = \sqrt{f_v^2 + f_n^2}.$$

Опытное значение угла $\gamma_{оп}$, определяющего положение полно- го прогиба к линии действия силы F , вычислить из выражения $tg\gamma_{оп} = f_H / f_V$, поскольку f_V и силовая плоскость совпадают.

Теоретический расчет

Перемещение свободного конца балки u и v в направлении главных центральных осей x и y можно определить любым из известных методов. Рекомендуется воспользоваться формулой Мора.

Полный прогиб свободного конца балки определяется по формуле (13.1), а направление его - по формуле (13.2).

Положение нейтральной линии определить по формуле (13.3). В связи с принятой схемой нагружения опытная балка испытывает плоский косой изгиб. Поэтому в любом сечении деформируемой части ее отношение $M_y/M_x = const$, а следовательно, и угол $\varphi = const$ (см. лабораторную работу № 12). Значение угла φ распространяется и на недеформированную часть балки от места приложения нагрузки до концевое сечение, где определяются перемещения. На рис. 13.2 показан след нейтральной линии (н.л.)

Сравнение результатов исследования

Для наглядности исследования необходимо изобразить схему перемещений свободного конца опытной балки (рис. 13.2), строго соблюдая масштаб построения. Векторы теоретических и опытных перемещений желательно изобразить различными цветами

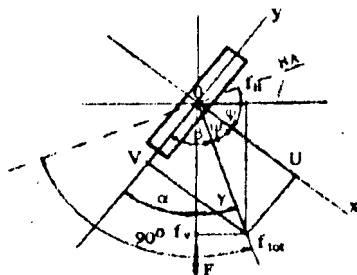


Рис. 13.2

Следует обратить внимание на то, что в опытной установке из-за наклонного положения главных центральных осей сечения балки и принятого расположения индикаторов (вертикального и горизонтального) значения теоретических и измеренных в опытах составляющих полного прогиба не совпадают. Сопоставлять следует лишь теоретический и опытный полные прогибы f_{tot} .

Для проверки перпендикулярности направления полного прогиба f_{tot} и нейтральной линии (н.л.) воспользуемся условием, вытекающим из рис. 13.2: если $\beta + \psi = \varphi + \psi = 90^\circ$, то $\beta = \varphi$ или $\gamma = \beta - \alpha$. По исходному углу α и вычисленному β определяется теоретическое значение угла γ_T . Значение $\gamma_{оп}$ находится по опытным перемещениям f_n и f_U .

На рис. 13.2, выполненном по исходным теоретическим и опытным данным, отчетливо видно, что нейтральная линия не перпендикулярна линии действия внешней силы (т.е. силовой плоскости), но практически перпендикулярна к направлению полного прогиба.

Вычислить расхождение опытных данных с теоретическими (прогибы и углы), выразив их в процентах.

Выводы

Привести доводы, оправдывающие допущения, принятые в теории косоугольного изгиба. Указать, выполняется ли закон Гука при косоугольном изгибе.

Подтвердить выводы теории о неперпендикулярности нейтрального слоя и силовой линии и о перпендикулярности полного прогиба к нейтральному слою.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 13

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

Цель работы

1. В заданном сечении балки определить опытные и теоретические перемещения и сопоставить их значения.

2. Подтвердить закон Гука при косом изгибе.
3. Проверить положение силовой плоскости и плоскости деформации по отношению к нейтральному слою.

Исходные данные

- Требования к испытанию (2 строки).
- Используемые формулы (4 строки).
- Опытная установка (2 строки).
- Объект исследования (2 строки).
- Измерительные приборы (2 строки).
- Схема опытной установки (20 строк).

Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка		Индикатор I_U		Индикатор I_n	
$F, \text{Н}$	$\Delta F, \text{Н}$	n	Δl	n	Δl
Средние значения	$\Delta F_m =$	$\Delta l_{U,m} =$		$\Delta l_{n,m} =$	

График перемещений (14 строк)

Результаты испытания

- Перемещение опытного сечения:
 - вертикальное (1 строка),
 - горизонтальное (1 строка).
- Полный прогиб (2 строки).
- Направление полного прогиба (3 строки).

Теоретический расчет

Перемещение опытного сечения u и v по направлению главных центральных осей (20 строк).

Полный прогиб (3 строки).

Направление полного прогиба (3 строки).

Значение угла γ_T (1 строка).

Сравнение результатов

Схема перемещений (20 строк).

Расхождение прогибов (2 строки).

Расхождение углов (2 строки).

Выводы (7 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какие гипотезы и допущения приняты в теории косоугольного изгиба?
2. В чем заключается принцип независимости действия сил для балок?
3. Сформулируйте цель работы.
4. Какими методами можно определить перемещения центра тяжести сечения вдоль главных центральных осей сечения балки?
5. Что такое полный прогиб сечения и по какой формуле определяется величина его?
6. Как определяется направление полного прогиба?
7. Каково взаиморасположение направлений полного прогиба и нейтральной линии?
8. Основные требования к проведению опыта при косоугольном изгибе.
9. Для чего служат стрелочные индикаторы?
10. Какие закономерности обнаружены при анализе таблицы опытных данных?
11. Каков характер связи нагрузки с измеренными перемещениями и какой вывод из этого следует?

12. Характеризуют ли отсчеты по стрелочным индикаторам непосредственно перемещения?

13. Подтверждает ли опыт закон Гука при косом изгибе?

14. По каким результатам опыта можно судить о приемлемости для практики принятых в теории косого изгиба гипотез и допущений?

15. Подтверждается ли вывод теории о том, что полный прогиб перпендикулярен нейтральной оси?

Лабораторная работа № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Внецентренное растяжение является одним из видов сложного сопротивления и представляет собой сочетание нескольких простых деформаций: центрального растяжения и одного или двух плоских чистых изгибов. Поэтому в теории используются все те же гипотезы и допущения, что и в перечисленных простых видах деформации: предположения о применимости к материалу закона Гука, гипотезы плоских сечений, линейного закона распределения нормальных напряжений по поперечному сечению. Кроме того, используется принцип независимости действия сил, позволяющий суммировать напряжения, которые получены для отдельных простых деформаций.

В связи с использованием в теории названных гипотез и допущений достоверность расчетных формул внецентренного растяжения может быть подтверждена лишь опытом.

Цель работы

Цель настоящей работы - проверить применимость для практических целей формулы нормальных напряжений для внецентренного растяжения. С этой целью в намеченных точках опытного стержня экспериментально определяются значения нормальных напряжений, которые затем сравниваются с теоретическими, и характер распределения их по поперечному сечению.

Исходные данные

Опытный стержень нагружают статической нагрузкой до напряжений, не превышающих предела пропорциональности:

$$\sigma_{\max} < \sigma_{pr}$$

Ступени нагрузки принять неравными (для ознакомления с особенностями обработки опытных данных в таких случаях нагружения).

При выполнении лабораторной работы используют следующие формулы.

Для определения нормальных напряжений в произвольной точке поперечного сечения стержня при внецентренном растяжении используют формулу

$$\sigma = \frac{N}{A} - \frac{M_x}{I_x} y - \frac{M_y}{I_y} x, \quad (14.1)$$

где N - продольная сила в сечении стержня;

M_x, M_y - изгибающие моменты относительно главных центральных осей;

A - площадь поперечного сечения;

I_x, I_y - главные центральные моменты инерции сечения;

x, y - координаты точки, в которой определяется напряжение.

Для определения координат точек пересечения нейтральной линии с главными центральными осями применяют формулы

$$x_o = -\frac{I_y}{A \cdot x_F}, \quad y_o = -\frac{I_x}{A \cdot y_F}, \quad (14.2)$$

где x_F, y_F - координаты точки приложения внешней силы к стержню.

Для определения нормальных напряжений по опытным данным используется закон Гука в виде

$$\sigma = E\varepsilon \quad (14.3)$$

Испытание проводится на гидравлическом прессе типа Р-50 с максимальным усилием в 500 кН.

Исследованию подвергается короткий стальной стержень прямоугольного поперечного сечения. Значение модуля продольной упругости материала стержня приведено в его техническом паспорте.

Чтобы определить опытные значения нормальных напряжений, необходимо измерить линейные деформации продольных волокон, проходящих через намеченные точки опытного стержня. Для этого используются датчики омического сопротивления (тензорезисторы) с базой 20мм в сочетании с измерителем деформации ИДЦ-1. Цена α единицы показания измерителя приводится на его шкале, а коэффициент тензочувствительности K датчиков - в паспорте комплекта датчиков.

Схема опытного стержня и расположение измерительных приборов показаны на рис. 14.1.

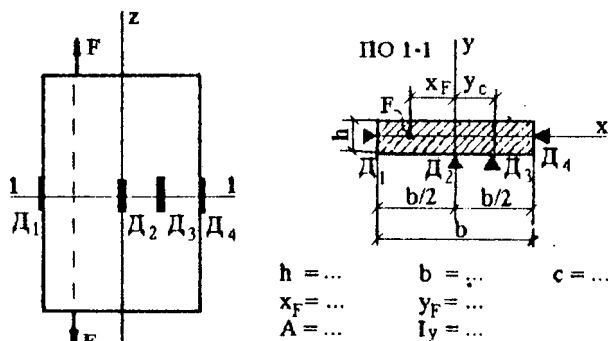


Рис. 14.1

В среднем сечении стержня датчики расположены: в крайних волокнах, на продольной центральной оси и на нейтральном слое.

При внецентренном растяжении стержня во всех волокнах имеет место линейное напряженное состояние. Направление главных напряжений совпадает с направлением продольной оси стержня, поэтому датчики наклеены по направлению этих главных напряжений, т.е. параллельно продольной оси стержня.

Обратите внимание, что линия действия силы F параллельна продольной оси стержня, но не совпадает с ней и точка приложения этой силы расположена на оси x .

При проведении опыта нагрузку на стержень следует увеличивать произвольными долями. Всего сделать 7-9 догрузений (ступеней) в пределах максимально допустимой нагрузки. Первые отсчеты по измерителю деформации делать при нагрузке не менее 10 кН, чтобы возникающие деформации стержня несколько превосшли чувствительность датчиков.

Опытные данные

Таблица опытных данных. Начальные отсчеты (при нулевой нагрузке) по всем каналам ИДЦ неодинаковы. Для удобства построения графиков деформации целесообразно по каждому датчику эти отсчеты привести к единому начальному значению. Для этого из каждого последующего отсчета n_i нужно вычесть его значение при нулевой нагрузке n_0 . Таким образом, приведенные отсчеты получаются: $n = n_i - n_0$.

График деформации. Закон Гука при внецентренном растяжении представляется зависимостью деформации волокон стержня от нагрузки: $\epsilon = f(F)$. Так как отсчеты n пропорциональны ϵ , график можно построить в осях F и n . Графики (рис. 14.2) желательно строить для всех датчиков на миллиметровой бумаге.

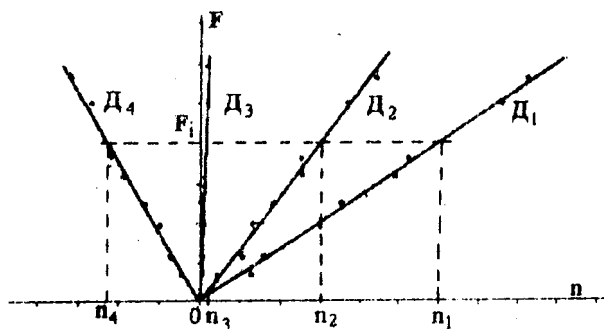


Рис. 14.2

По расположению на графике опытных точек установить характер зависимости деформации волокон от нагрузки и провести на графике линию связи (визуально), располагая ее как можно ближе к опытным точкам. Начальный участок графика может быть нелинейным, что обусловлено степенью чувствительности тензодатчика.

Для последующих расчетов по графику деформации для выбранного значения нагрузки F_i , снять соответствующие ей значения отсчетов n_i по всем датчикам.

Результаты испытаний

По снятым с графика деформации значениям n при выбранной нагрузке F вычислить относительные деформации в точках расположения датчиков ($\epsilon = 2n \cdot \alpha / K$), а затем по формуле закона Гука (14.3) опытные значения напряжений в этих точках.

Теоретический расчет

Н о р м а л ь н ы е напряжения в намеченных точках опытного стержня определить по формуле (14.1) от выбранного значения нагрузки F_i . Значения изгибающих моментов и координаты точек подставить в формулу с учетом их знаков и размерностей. Знаки слагаемых в формуле (14.1) можно установить также и по характеру деформации (растяжение или сжатие) волокон в рассматриваемой точке стержня.

Координаты нейтральной линии определить по формуле (14.2). При этом следует помнить, что нейтральная линия и точка приложения силы должны находиться по разные стороны от центра тяжести сечения.

После определения положения нейтральной линии и значений нормальных напряжений в опытных точках следует проанализировать характер распределения этих напряжений по поперечному сечению стержня и установить: почему $\sigma_{(3)}=0$; почему $\sigma_{(1)}$ и $\sigma_{(4)}$ не только различны по величине, но и противоположны по знаку?

Сравнение результатов

По теоретическим данным построить эпюру распределения нормальных напряжений в сечении опытного стержня, строго соблюдая масштабы абсциссы и ординаты, и отложить на ней значения напряжений, полученные по опытным данным. Вычислить расхождения в значениях напряжений, выразив их в процентах.

Выводы

В выводах необходимо указать, выполняется ли закон Гука при внецентренном растяжении, привести доказательства. Привести доводы, оправдывающие допущения, принятые в теории. Подтвердить теоретический вывод о положении нейтральной линии при внецентренном растяжении и законе распределения нормальных напряжений.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ

Цель работы

1. В намеченных точках опытного стержня экспериментально определить нормальные напряжения и установить характер распределения их по сечению.
2. В этих же точках вычислить нормальные напряжения теоретическим путем и сравнить их с экспериментальными.

Исходные данные

Требования к испытанию (2 строки).

Используемые формулы (8 строк).

Испытательная машина (2 строки).

Объект исследования (2 строки).

Измерительные приборы (3 строки).

Схема опытного стержня и расположение датчиков (22 строки).

Сравнение результатов

Эпюры нормальных напряжений (12 строк).

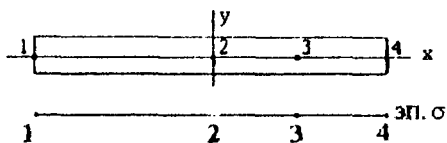


Таблица сравнения результатов

Напряжения, МПа	$\sigma(1)$	$\sigma(2)$	$\sigma(3)$	$\sigma(4)$
Опытные				
Теоретические				
Расхождения, %				

Выводы (10 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какие гипотезы и допущения приняты в теории внецентренного растяжения-сжатия?
2. В чем заключается принцип независимости действия сил?
3. Сформулируйте цель лабораторной работы.
4. Какой принцип нагружения опытного стержня принят в данной работе?
5. Основные требования к проведению опыта при внецентренном растяжении.
6. По какой формуле определяются нормальные напряжения в произвольной точке поперечного сечения стержня при внецентренном растяжении-сжатии?
7. Как распределяются нормальные напряжения по поперечному сечению стержня при внецентренном растяжении-сжатии?

8. По каким формулам определяется положение нейтральной линии при внецентренном растяжении-сжатии?

9. Какое положение занимает нейтральная линия в плоскости поперечного сечения стержня при внецентренном растяжении-сжатии?

10. Какие измерительные приборы использованы в опыте и что непосредственно ими измерялось?

11. Какая общая тенденция связи между нагрузкой и отсчетами по измерителю деформации обнаружена в результате опыта?

12. Вследствие чего нормальные напряжения, полученные из опыта, в крайних точках поперечного сечения стержня оказались разной величины и противоположных знаков?

13. О чем свидетельствует факт, что в точке D_3 поперечного сечения опытного стержня нормальное напряжение, полученное из опыта, оказалось равным или близким к нулю?

14. Почему для внецентренно растянутого опытного стержня одно из слагаемых формулы нормальных напряжений равно нулю?

15. Почему в сечении опытного стержня нейтральная линия перпендикулярна одной из главных осей инерции?

16. Каково взаиморасположение точки приложения силы, центра тяжести сечения и нейтральной линии?

17. Подтверждают ли результаты опыта, что принятые в теории внецентренного растяжения-сжатия гипотезы и допущения приемлемы для практики?

18. Подтверждает ли опыт закон распределения нормальных напряжений по поперечному сечению внецентренно растянутого стержня?

Лабораторная работа № 15

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

Изгиб с кручением как вид сложного сопротивления представляет собой сочетание нескольких простых деформаций: кручения и одного или двух плоских изгибов. Поэтому в теории сложного сопротивления используются все те гипотезы и допущения, что и в теории простых деформаций. Кроме того, используется принцип независимости (сложения) действия сил.

В связи с этими допущениями по расчетным формулам для изгиба с кручением можно получить значения искомых величин с отклонениями от действительных (опытных).

Цель работы

Цель настоящей работы - проверить применимость на практике формулы, определяющей экстремальные нормальные напряжения при изгибе с кручением, и установить вид напряженного состояния.

Для этого в намеченной точке опытного стержня экспериментально определяются деформации волокон, по значениям которых вычисляются экстремальные нормальные напряжения.

Исходные данные

Максимальная нагрузка на опытный стержень ограничивается таким значением, при котором наибольшее главное нормальное напряжение не превышает предел пропорциональности:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{pr}.$$

При выполнении работы используются следующие формулы:

а) по результатам опыта и опытным данным -
для вычисления относительных деформаций волокон

$$\varepsilon = 2\Delta l \alpha / K ; \quad (15.1)$$

для определения экстремальных относительных линейных деформаций

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_u + \varepsilon_v}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_u - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_v - \varepsilon_z)^2} ; \quad (15.2)$$

для определения направления экстремальных относительных линейных деформаций

$$\operatorname{tg} 2\alpha_o^{\text{оп}} = - \frac{\varepsilon_u + \varepsilon_v - 2\varepsilon_z}{\varepsilon_u - \varepsilon_v} ; \quad (15.3)$$

для определения экстремальных нормальных напряжений

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{\max} + \nu \varepsilon_{\min}) ; \quad (15.4)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_{\min} + \nu \varepsilon_{\max}) ;$$

б) теоретические -

для определения нормальных и касательных напряжений

$$\sigma_z = \frac{\Delta M_x}{W_x} ; \quad (15.5)$$

$$\tau_{zx} = \frac{\Delta T}{W_p} ; \quad (15.6)$$

для определения экстремальных нормальных напряжений

$$\sigma_{\frac{\max}{\min}} = \frac{\sigma_z}{2} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\sigma_z^2 + 4\tau_{zx}^2} ; \quad (15.7)$$

для определения направления главных напряжений

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0^r = -\frac{2\tau_{zx}}{\sigma_z} . \quad (15.8)$$

Работа выполняется на установке настольного типа с гибким нагруженным опытным стержнем.

Максимальная допустимая нагрузка $F=200$ Н.

Опытный стержень изготовлен из алюминия и имеет кольцевое сечение.

Значения модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона приведены в паспорте установки.

Для измерения деформации волокон опытного стержня используются датчики омического сопротивления (тензорезисторы) с базой 10 мм в сочетании с измерителем деформации ИДЦ-1. Цена единицы показания измерителя приводится на шкале прибора, коэффициент тензочувствительности датчиков K - в паспорте комплекта датчиков.

Схема опытной установки показана на рис. 15.1.

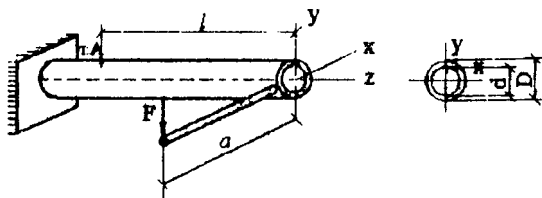


Рис. 15.1

Левое крайнее сечение опытного стержня находится в защемлении, а к свободному правому прикладывается нагрузка со смещением от продольной оси, т.е. к поперечному стержню, прикрепленному к опытному. При этом стержень будет подвергаться изгибу и кручению.

В теории исследуемого вида деформации показано, что в большинстве своем точки элемента испытывают плоское напряженное состояние. Поэтому для опытного исследования стержня используется тензометрическая розетка (рис. 15.2), в которой пара взаимно перпендикулярных датчиков совмещена с осями u и v , нанесенными на поверхности под углом 45° к продольной оси z опытного стержня. Третий датчик направлен вдоль оси z .

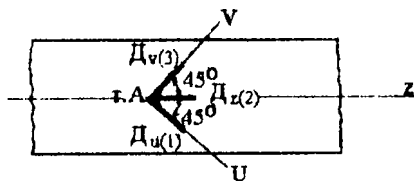


Рис. 15.2

Нагружение опытного стержня и снятие показаний по ИДЦ-1 производится дважды: при предварительной нагрузке $F=50$ Н и окончательной, равной 200 Н.

Опытные данные

Обработка опытных данных заключается в вычислении приращений нагрузки ΔF и показаний измерителя деформации Δl по всем трем датчикам.

Результаты испытаний

По приращениям Δl вычислить опытные значения относительных линейных деформаций в направлениях наклеенных датчиков по формуле (15.1) от приращения нагрузки ΔF .

Значения экстремальных относительных деформаций в исследуемой точке стержня найти по формуле (15.2), а направление их, определяемое углом α_0 , - по формуле (15.3).

Положительное значение угла α_0 откладывается против хода часовой стрелки от оси u (рис. 15.3). Если $\epsilon_u > \epsilon_v$, получим направление ϵ_{\max} , если $\epsilon_u < \epsilon_v$, направление ϵ_{\min} .

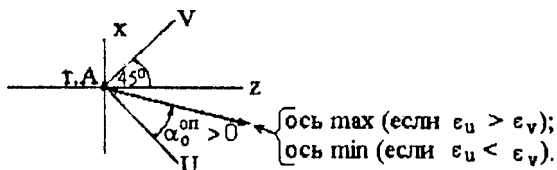


Рис. 15.3

Численные значения экстремальных нормальных напряжений по опытным данным определить по формуле (15.4).

После этого с учетом значений и знаков экстремальных напряжений обозначить главные напряжения по принятой символике и правилу ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) и установить вид напряженного состояния.

Изобразите схему по рис. 15.3 и покажите направление главных напряжений и главных площадок.

Теоретический расчет

Необходимо изобразить расчетную схему опытного стержня и показать действующие внешние силы (нагрузки). Затем построить эпюры возникающих усилий, отметив их ординаты, относящиеся к исследуемому сечению.

Значения теоретических нормальных и касательных напряжений в опытной точке определить по формулам (15.5; 15.6).

Затем изобразить прямоугольный элемент, выделенный вокруг опытной точки (одна грань которого перпендикулярна оси z), и показать возникающие по его граням нормальные и касательные напряжения.

Значения экстремальных нормальных напряжений определить по формуле (15.7). После этого обозначить главные напряжения и установить вид напряженного состояния.

Угол, определяющий направление главных напряжений, вычислить по формуле (15.8) и отложить (в данном случае) от оси z против хода часовой стрелки, если $\alpha_o^T > 0$, и наоборот. При этом получим направление σ_{\max} для случая $\sigma_z > \sigma_x$, а в случае $\sigma_z < \sigma_x$ - направление σ_{\min} .

Используя значения угла α_o^T , показать на выделенном прямоугольном элементе направления главных напряжений и площадок, по которым они возникают.

Сравнение результатов

Поскольку угол α_o по опытным и теоретическим данным отсчитывается от разных осей (u и z), расположенных между собой под углом 45° , для сравнения результатов исследования (по углу α_o) следует использовать зависимость $|\alpha_o^T| + |\alpha_o^{оп}| = 45^\circ$. Полученное отклонение суммы углов α_o от 45° составит погрешность опыта $\Delta\alpha = 45^\circ - (|\alpha_o^T| + |\alpha_o^{оп}|)$. Затем опытные значения исследо-

ванных параметров (σ_1, σ_3 и α_0) сравнить с теоретическими и вычислить расхождение. При оценке погрешности угла следует $\Delta\alpha_0$ отнести к α_0^T .

Выводы

В выводах указать: подтверждает ли опыт вид напряженного состояния, установленный теорией в исследуемой точке опытного стержня при изгибе с кручением, и насколько приемлемы теоретические расчетные формулы для практических целей.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 15

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

Цель работы

1. В намеченной точке опытного стержня определить главные напряжения и установить вид напряженного состояния.
2. В этой же точке вычислить теоретическим путем главные напряжения и сравнить их с опытными значениями.

Исходные данные

Требования к испытанию (3 строки).

Используемые формулы:

- а) по результатам опыта и опытными данными (12 строк);
- б) теоретические (12 строк).

Опытный стержень (4 строки).

Измерительные приборы (10 строк).

Схема опытной установки (16 строк).

Опытные данные

Таблица опытных данных

Нагрузка F, H	Датчики	D_1	D_2	D_3
	Канал измерителя	1	2	3
	Отсчеты n			
	Отсчеты n			
$\Delta F =$	Приращение отсчетов Δl			

Результаты испытания

Относительные линейные деформации волокон (7 строк).

Экстремальные относительные деформации (12 строк).

Направление экстремальных относительных деформаций (6 строк).

Экстремальные нормальные напряжения (8 строк).

Главные напряжения (3 строки).

Вид напряженного состояния (2 строки).

Схема элемента с главными напряжениями (8 строк).

Теоретический расчет

Расчетная схема и эпюры внутренних сил (10 строк).

Геометрические характеристики сечения опытного стрежня (7 строк).

Нормальные и касательные напряжения в точке А стержня (7 строк).

Прямоугольный элемент с нормальными и касательными напряжениями (8 строк).

Экстремальные нормальные напряжения (8 строк).

Главные напряжения (3 строки).

Вид напряженного состояния (2 строки).

Направление главных напряжений (4 строки).

Схема элемента с главными напряжениями (8 строк).

Сравнение результатов

Погрешность опыта по углу α_0 (1 строка).

Таблица сравнения результатов

Параметры	σ_1 , МПа	σ_3 , МПа	α_0 , град.
Опытные			
Теоретические			
Расхождения, %			

Выводы (4 строки)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется напряженное состояние в точке тела?
2. Назовите виды напряженного состояния.
3. Какие площадки называются главными?
4. Какие напряжения возникают по главным площадкам?
5. Какие параметры необходимо знать, чтобы оценить вид напряженного состояния в точке тела?
6. Какова цель лабораторной работы?
7. Назовите виды напряженного состояния.
8. Что представляет собой изгиб с кручением как вид сопротивления?
9. Какие измерительные приборы используются в данной лабораторной работе? Каков принцип их работы?
10. Что представляет собой тензометрическая розетка датчиков?
11. Какой параметр деформации измеряли непосредственно датчиком?
12. Какие параметры напряжения можно вычислить по измеренным относительным линейным деформациям?
13. Как обозначаются главные напряжения и устанавливается вид напряженного состояния?

14. Какой вид напряженного состояния выявлен в исследованной точке опытного стержня?

15. Какого рода напряжения возникают в поперечном сечении стержня при изгибе с кручением и по каким формулам они определяются?

Лабораторная работа № 16

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНО СЖАТОГО СТЕРЖНЯ

Сжатый стержень большой гибкости при некотором значении сжимающей силы, называемой критической, выходит из состояния устойчивого равновесия. При этом стержень с прямой осью несколько искривляется и считается утратившим устойчивость.

Значение критической силы для стержней большой гибкости определяется по формуле Эйлера, полученной путем использования приближенного дифференциального уравнения оси изогнутого стержня, которое справедливо при малой кривизне оси. Вследствие этого формула Эйлера верна лишь при малых искривлениях стержня. По Эйлеру, ось изогнутого стержня искривляется по закону синусоиды.

Цель работы

Цель настоящей работы - изучить явление потери устойчивости при центральном сжатии стержня большой гибкости; определить опытным путем величину критической силы выбранного стержня и сопоставить ее с теоретическим значением; подтвердить теоретический характер искривления оси стержня.

Исходные данные

Опытный стержень нагружается осевой, плавно возрастающей нагрузкой. При этом максимальные нормальные напряжения не должны превосходить предел пропорциональности.

При выполнении работы используются следующие формулы:
для определения величины критической силы (формула Эйлера)

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu l)^2}, \quad (16.1)$$

где μ - коэффициент приведения длины стержня к расчетной, зависящий от способа закрепления его концов;
для определения гибкости стержня

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}, \quad (16.2)$$

где $i_{\min} = \sqrt{I_{\min} / A}$ - минимальный радиус инерции сечения стержня;

для определения предельной гибкости стержня

$$\lambda_u = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{pr}}}; \quad (16.3)$$

для определения критического напряжения

$$\sigma_{cr} = \frac{F_{cr}}{A}. \quad (16.4)$$

Искривление стержня, утратившего устойчивость, происходит по синусоиде и описывается выражением

$$u = B \sin\left(\frac{\pi}{l} z\right), \quad (16.5)$$

где B - постоянная интегрирования дифференциального уравнения оси изогнутого стержня (физический смысл ее - амплитуда кривой).

Работа выполняется на настольной установке СМ20 с ручным (при помощи червячной передачи) нагружением. Величина нагрузки контролируется по осадке динамометрической

пружины, для которой имеется тарировочный график: $m=f(F)$, где m - показания шкалы установки.

Опыт проводится на прямом стержне прямоугольного поперечного сечения, выполненном из стали. Значения модуля продольной упругости и предела пропорциональности для материала образца приведены в паспорте установки.

Для измерения отклонений опытного стержня от начального положения при потере устойчивости используются стрелочные индикаторы, цена деления которых приведена на шкале прибора.

Схема опытной установки и расположение измерительных приборов приведены на рис. 16.1

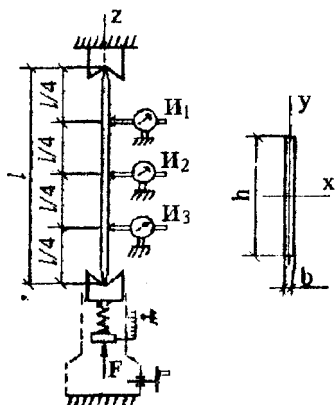


Рис. 16.1

Концы опытного стержня вставлены в опоры, которые относятся к типу шарнирных.

Потеря устойчивости продольно сжатого стержня сопровождается искривлением его продольной оси. На рис. 16.2 показаны графически две формы зависимости отклонения u оси стержня от величины сжимающей силы F : теоретическая кривая ОАВ (по Тимошенко) и опытная - ОВД.

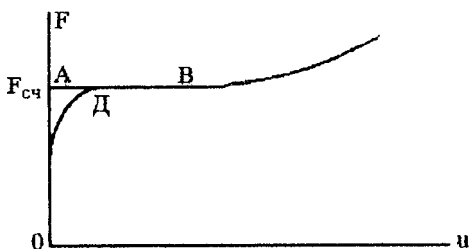


Рис. 16.2

Согласно теории предполагается, что пока сжимающая нагрузка меньше критической, стержень остается прямолинейным, сохраняя устойчивое равновесие (участок ОА). При нагрузке $F=F_{cr}$ стержень внезапно искривляется, приобретая состояние безразличного равновесия (участок АВ). Это значит, что при одной и той же нагрузке он может занимать несколько равновесных положений, пока отклонения u небольшие. Затем при незначительных возрастаниях нагрузки отклонения увеличиваются быстро.

Практически связь между искривлением стержня и нагрузкой в начальной стадии нагружения зависит в незначительной степени от точности центровки нагрузки, степени прямолинейности стержня, однородности материала его и осуществляется на графике по кривой ОД. При небольших нагрузках, меньших критического значения, стержень сохраняет первоначальное положение или искривляется незначительно и плавно. Затем искривление плавно возрастает, а в момент достижения силой критического значения резко увеличивается. Дальнейшее искривление (стержня) идет в соответствии с теоретической схемой.

Чем строже выполнен эксперимент, тем ближе опытная кривая на графике к теоретической.

В качестве критерия потери устойчивости может быть принято условие значительного увеличения отклонения u при малых приращениях нагрузки F .

Кроме названного критерия оценки критического состояния сжатого стержня можно использовать и метод "проб". Он заключается в периодическом небольшом принудительном отклонении от начального положения оси нагруженного стержня кратковремен-

ным действием побочной силы. Если при этом нагрузка $F < F_{cr}$, искривленный стержень легко возвращается в первоначальное положение, что свидетельствует о его устойчивости. По мере роста нагрузки F восстановление первоначального положения становится более затруднительным, а при $F = F_{cr}$ стержень уже не возвращается в первоначальное положение, что свидетельствует об утрате им устойчивости.

Опытные данные

Значения сжимающей силы F снимаются с тарировочного графика пружины по отсчетам m .

Значения отклонений u стержня вычисляются по показаниям индикаторов n (с учетом цены деления α).

По опытным данным строится график $u = f(F)$.

Результаты испытания

Значение критической силы F_{cr} устанавливается по графику деформации. За критическую силу принимается величина нагрузки, после небольшого увеличения которой происходит значительный рост отклонения стержня.

Поперечные перемещения опытных точек стержня, необходимые для дальнейшего анализа результатов испытания, принимаются из таблицы опытных данных для критической силы.

Теоретический расчет

Гибкость опытного стержня определить по формуле (16.2), а ее предельное значение - по формуле (16.3).

После сравнения названных значений гибкостей установить применимость формулы Эйлера к данному опытному стержню. В случае выполнения условия $\lambda > \lambda_u$ по формуле (16.1) вычислить теоретическое значение критической силы, а по формуле (16.4) - величину критического напряжения. Для стержней большой гибкости величина критического напряжения должна быть меньше предела пропорциональности.

Данные для построения оси изогнутого стержня вычислить по выражению (16.5), в котором параметр "В" принять равным отклонению стержня и посередине его длины при нагрузке, равной критической.

Сравнение результатов

Сравнить опытные значения критической силы для испытанного стержня с теоретическим значением, установить степень их расхождения.

Построить по теоретическим данным ось изогнутого стержня, отложить на ней опытные точки и установить степень расхождения значений прогибов.

Выводы

В выводах указать (привести доказательства): подтверждается ли формула Эйлера для сжатого стержня большой гибкости, подтверждается ли теоретический характер искривления оси стержня, утратившего устойчивость.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 16

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНО СЖАТОГО СТЕРЖНЯ

Цель работы

1. Определить опытным путем величину критической силы для центрально сжатого стержня и сопоставить ее с теоретическим значением.

2. Подтвердить теоретический характер искривления оси стержня, утратившего устойчивость.

Теоретический расчет

- Предельная гибкость (4 строки).
- Гибкость опытного стержня (4 строки).
- Сопоставление гибкостей (2 строки).
- Критическая сила (по Эйлеру) (4 строки).
- Критическое напряжение (4 строки).
- Сопоставление σ_{cr} и σ_{pr} (2 строки).
- Параметр B (4 строки).
- Отклонения оси z стержня (6 строк).

Сравнение результатов

Критическая сила:

а) по опыту $F_{cr} = \dots$

б) по формуле Эйлера $F_{cr} = \dots$

Расхождение значений, %.

Изогнутая ось стержня (расположить вертикально) (22 строки).



Выводы (10 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какую силу называют критической? Опишите поведение стержня, сжатого этой силой.
2. Что означает понятие "стержень утратил устойчивость"?
3. Сформулируйте цель лабораторной работы.
4. Основные требования, предъявляемые к опыту.
5. Как определяется критическая сила? Запишите формулу Эйлера для сжатых стержней.
6. Как определяется критическое напряжение? Каким образом, зная величину критической силы, вычислить критическое напряжение?
7. По какой формуле определяется гибкость стержня?

8. Что такое предельная гибкость, по какой формуле она определяется и для чего используется?

9. Какую форму принимает ось стержня, утратившего устойчивость, и каким выражением она описывается?

10. Какие измерительные приборы используются в лабораторной работе и что при помощи их измеряется?

11. Изобразите схему испытания стержня?

12. Какой вид имеет график испытания стержня в соответствии с теорией и по опытными данным?

13. Какова закономерность нарастания отклонения оси стержня по мере увеличения сжимающей силы?

14. Что принято за критерий утраты устойчивости по принятой в лабораторной работе методике?

15. Применима ли формула Эйлера для опытного стержня и почему?

16. Превышало ли критическое напряжение в стержне предел пропорциональности материала?

17. Применима ли формула Эйлера для практических целей?

18. Подтверждается ли теоретический характер искривления оси стержня, утратившего устойчивость?

Лабораторная работа № 17

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА УДАР

При установлении марки углеродистой стали, поставляемой в зависимости от механических свойств и химического состава, а также при выборе материала для деталей машин и элементов конструкций, подвергающихся динамическим нагрузкам, наряду с показателями статических необходимо учитывать показатели динамических испытаний. Особенно это относится к деталям машин и элементам конструкций, имеющих выточки, отверстия, канавки и другие факторы, вызывающие концентрацию напряжений.

Одним из видов динамического воздействия нагрузки является ударное воздействие (удар). Для проверки способности материала сопротивляться ударным нагрузкам применяется особый вид испытания - ударный отрыв и ударный изгиб (излом). Показателем испытания является ударная вязкость материала.

При динамическом действии нагрузки на образец скорость деформирования значительно выше, чем при статическом, это ведет к снижению пластических свойств материала, и он проявляет склонность к хрупкому разрушению.

Хотя данные об ударной вязкости не используются непосредственно при расчетах на прочность, они позволяют оценить качество материала, его способность к сопротивлению динамическим нагрузкам.

Цель работы

Цель работы - определить ударную вязкость для образцов пластичного и хрупкого материалов.

Для этого образцы материалов подвергаются ударному изгибу (излому) с фиксацией энергии, затраченной на разрушение.

Исходные данные

Требования к испытанию. Испытание проводится согласно ГОСТ 9454-78, предназначенному для черных и цветных металлов, при температуре 20^{+15}_{-10} °С.

Используемые формулы. Ударная вязкость материала определяется по формуле

$$a = W/A \text{ (Дж/м}^2\text{)}, \quad (17.1)$$

где W - работа, затраченная на разрушение образца;

A - площадь ослабленного поперечного сечения образца.

Испытательная машина - маятниковый копер типа 2130 КМ-0,3, предназначенный для испытаний на ударный изгиб. Номинальное значение потенциальной энергии маятника 300 Дж. Скорость движения маятника в момент удара составляет 5 м/с.

Измерительные приборы. Для измерения геометрических размеров образцов используется штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм

Образец для испытания. При выборе материала для элементов конструкций и деталей машин, испытывающих ударные воздействия, используются данные об ударной вязкости, полученные на стандартных образцах с U -образным надрезом (рис. 17.1).

Надрез в образце делается с целью ужесточения условий испытания и выявления склонности материала к хрупкому разрушению.

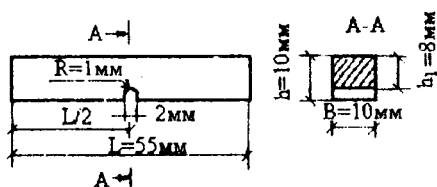


Рис. 17.1

Для испытания приняты образцы типа I, имеющие следующие размеры: $B=10$ мм, $h=10$ мм, $h_1=8$ мм.

Схемы копра и испытания показаны на рис. 17.2.

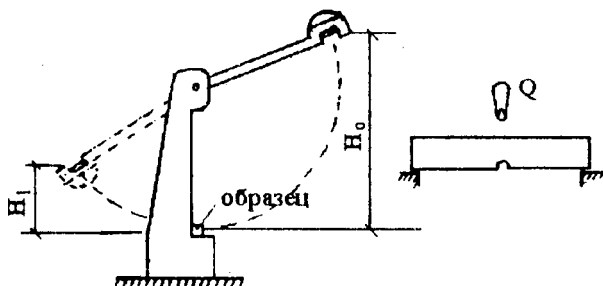


Рис. 17.2

На рисунке показаны положения маятника до удара H_0 и после H_1 . По этим значениям определяется энергия, затраченная на разрушение образца:

$$U = W = Q(H_0 - H_1) = mg(H_0 - H_1).$$

На копре типа 2130 КМ-0,3 затраченная на разрушение образца энергия определяется автоматически и высвечивается на цифровом табло.

Проведение испытания. Маятник копра поднимается на фиксированную высоту H_0 и удерживается защелкой. Образец материала укладывается на упоры копра так, чтобы удар ножа маятника приходился напротив надреза с противоположной его стороны.

После отпуска защелки маятник падает вниз, ударяет по образцу, разрушает его на части (хрупкий материал) или изгибает дугообразно (пластичный материал), затрачивая на это определенную часть энергии.

За счет оставшейся энергии маятник поднимается с противоположной стороны на высоту H_1 .

Опытные данные

Опытными данными являются значения энергии W , затраченной на разрушение образцов.

Результаты испытания

Результатом испытания являются значения ударной вязкости, вычисленные по формуле (17.1), для образцов стали и чугуна.

Целесообразно сравнить полученные значения ударной вязкости для стали со справочными. Так, для стали Ст3, в зависимости от вида проката и его толщины, ударная вязкость должна быть в пределах 70...100 Дж/см².

Выводы

В выводах указать способность пластичных и хрупких материалов оказывать сопротивление действию ударной нагрузки

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 17

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА УДАР

Цель работы

Определить ударную вязкость для образцов пластичного (сталь) и хрупкого (чугун) металлов.

Исходные данные

Требования к испытанию (2 строки).
Используемые формулы (2 строки).
Измерительные приборы (2 строки).
Образец для испытания (8 строк).
Схемы копра и испытания (16 строк).

Опытные данные

Энергия, затраченная на разрушение образцов:
стального (1 строка);
чугунного (1 строка).

Результаты испытания

Ударная вязкость образцов:
стального (1 строка);
чугунного (1 строка).
Для стали Ст3 по техническим нормам $a = \dots$

Выводы (5 строк)

Работу выполнил ...
Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Чем характерно динамическое действие нагрузки?
2. Что называется явлением удара?
3. Как отражается на значениях напряжения и деформаций тела динамическое действие нагрузки?
4. Как при расчетах учитывается динамический характер действия нагрузки?
5. Какое свойство материалов снижается при динамическом действии нагрузки?
6. Сформулируйте цель лабораторной работы.
7. Что такое ударная вязкость материала?

8. Как определяется ударная вязкость материала?
9. Где и как используется значение ударной вязкости?
10. Чем отличаются значения ударной вязкости материала, полученные в опытах на излом и на отрыв?

Лабораторная работа № 18

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ

В инженерной практике часто встречаются случаи динамического воздействия нагрузки на элементы конструкций и детали машин. Одним из видов такого воздействия является удар, наблюдающийся, например, при свободном падении груза на элемент конструкции. При этом деформации и возникающие в элементе напряжения оказываются большими, чем от статического действия того же груза.

Учет ударного действия нагрузки производится с помощью динамического коэффициента, который зависит от массы и высоты падения ударяющего груза, массы и жесткости ударяемой конструкции и ряда других факторов.

Динамическая нагрузка оказывает на конструкцию очень сложное воздействие, которое методами сопротивления материалов не всегда можно учесть. В теории удара используется ряд допущений, облегчающих расчет. Принято считать, что соблюдается закон Гука, сохраняется значение модуля упругости, удар остается абсолютно неупругим и др. В этой связи теоретические формулы для расчета на ударное действие нагрузки нуждаются в опытной проверке.

Для "смягчения" удара, т.е. снижения энергии удара, и при этом уменьшения деформации и напряжения применяют различного рода амортизирующие элементы (резиновые прокладки, пружины и др.), поглощающие часть энергии.

Цель работы

Цель работы - определить опытным путем прогиб балки при поперечном ударе и сравнить его с теоретическим значением. Подтвердить амортизирующее действие пружины при ударе.

Исходные данные

Требования к испытанию. Напряжения, вызванные ударным действием нагрузки, не должны превышать предела пропорциональности материала балки: $\sigma_{\max} \leq \sigma_{pr}$.

Используемые формулы. При выполнении лабораторной работы используются следующие теоретические формулы:
для определения перемещения точки удара от статического действия сосредоточенного груза Q -

$$v = \frac{Qa^3}{3E \cdot I_x}, \quad (18.1)$$

для определения динамического коэффициента -

$$\mu = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot H}{v \cdot \beta}}, \quad (18.2)$$

где H - высота падения груза Q ;

$\beta = 1 + \alpha_Q \cdot Q_0 / Q$ - параметр, учитывающий влияние массы ударяемой конструкции;

α_Q - коэффициент приведения массы ударяемого элемента (балки) к месту удара (зависит от способа закрепления балки и вида удара);

Q - вес падающего (ударяющего) груза;

Q_0 - вес ударяемого элемента (балки).

Прогиб от динамического действия груза определяется следующим образом:

$$v_d = v \cdot \mu. \quad (18.3)$$

Максимальное нормальное напряжение от статического действия груза Q определяется по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{x, \max}}{W_x}, \quad (18.4)$$

а от динамического действия груза -

$$\sigma_{d, \max} = \sigma_{\max} \cdot \mu. \quad (18.5)$$

Измерительные приборы. Для измерения статического прогиба балки используется индикатор стрелочного типа, а динамического - мерная шкала с точностью отсчета 0,1 мм.

Используется опытная установка напольного типа с нагружением калиброванными грузами (гирями).

Схема установки показана на рис. 18.1 в вариантах с амортизатором (а) и без него (б).

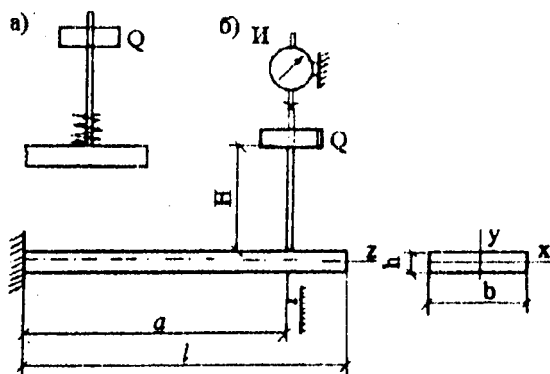


Рис. 18.1

Испытуемая балка - консольная из стальной полосы, прямоугольного поперечного сечения.

Исходя из вида материала опытной балки, размеров ее и требований к испытанию подобраны значения ударяемого груза Q и высота падения его H .

Проведение опыта. Вначале опытную балку в выбранном сечении подвергают статическому воздействию груза Q . Для

этого по шкале индикатора H необходимо записать начальный отсчет. Затем плавно уложить груз Q на балку и записать конечный отсчет.

При динамическом воздействии груза Q необходимо: снять начальный отсчет по миллиметровой мерной шкале, поворотом держателя груз Q сбросить на балку, зафиксировать конечный отсчет по той же шкале.

Опыт с амортизирующей пружиной проводится аналогично. Только в ударяемом сечении между балкой и ударяющим грузом Q устанавливается пружина. Опыт желательно повторить 2-3 раза, воздействуя одним и тем же грузом Q .

Опытные данные

Обработка опытных данных заключается в вычислении приращений отсчетов Δl по индикатору H и мерной шкале, а затем их средних значений Δl_m .

Результаты испытаний

Опытный прогиб от статического действия груза Q определить по выражению $\nu = \Delta l_m \cdot \alpha$, где α - цена одного деления индикатора.

Прогиб $\nu\alpha$ от ударного действия груза равен разности отсчетов по мерной шкале (без пружины, а затем с ней): $\nu\alpha = \Delta l_{d,m}$.

Теоретический расчет

Прогиб балки ν от статического действия груза Q вычислить по формуле (18.1).

Динамический коэффициент μ вычислить по формуле (18.2). Коэффициент приведения массы балки к месту удара " α_Q " при поперечном ударе по консольной балке равен 0,236.

Прогиб от динамического действия груза Q вычислить по формуле (18.3).

Максимальное нормальное напряжение от статического действия груза Q определить по формуле (18.4), а от динамического - по формуле (18.5).

Сравнение результатов

Сравнить опытное значение прогиба балки от динамического действия груза с вычисленным по теоретической формуле. Расхождение значений вычислить в процентах.

Следует иметь в виду, что из-за принятых в теории отклонений от реальных условий формула (18.2) дает несколько завышенные значения динамического коэффициента. Поэтому значение динамического прогиба может существенно отличаться от опытного. Этому способствует и то обстоятельство, что вес опытной балки Q_0 незначительно превышает вес падающего груза Q .

Оценить влияние амортизирующей пружины на величину динамического прогиба (для случая опытной пружины).

Сопоставить максимальное нормальное напряжение от динамического действия груза с пределом пропорциональности материала балки ($\sigma_{pr} = 200 \text{ МПа}$).

Завышенные значения нормальных напряжений от динамического действия нагрузки, полученные по теоретической формуле, по сравнению с опытными относят в запас прочности конструкции (балки).

Выводы

В выводах указать: насколько пригодны для практических расчетов теоретические формулы для определения прогибов балки при ударном действии нагрузки, оказывает ли пружина амортизирующее действие при ударе.

Форма журнала лабораторной работы

Лабораторная работа № 18

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ

Цель работы

1. Определить опытным путем прогиб балки при поперечном ударе и сравнить его с вычисленным по теоретической формуле.
2. Подтвердить амортизирующее действие пружины при ударе.

Исходные данные

Требования к испытанию (2 строки)

Используемые формулы (20 строк)

Измерительные приборы (3 строки)

Схема опытной установки (по рис. 23.1)

$E =$	$Q =$
$l =$	$H =$
$a =$	$Q_0 =$
$v =$	
$h =$	
$H =$	

Опытные данные

Таблица опытных данных

№ опыта	Груз Q, H	Статическая нагрузка			Динамическая нагрузка					
					без пружины			с пружиной		
		Отсчеты по индикатору, l			Отсчеты по шкале, мм			Отсчеты по шкале, мм		
		нач.	конечн.	приращ.	нач.	кон.	приращ.	нач.	кон.	приращ.
Средн. знач.										

Результаты испытания

Прогиб от статического действия груза Q (1 строка)

Прогиб от ударного действия груза Q (1 строка)

Прогиб от ударного действия груза Q при наличии пружины (1 строка)

Теоретический расчет

Расчетная схема балки (6 строк)

Момент инерции сечения балки (4 строки)

Момент сопротивления сечения балки (4 строки)

Максимальный изгибающий момент (1 строка)

Прогиб от статического действия груза (4 строки)

Динамический коэффициент (4 строки)

Прогиб от динамического действия груза (1 строка)

Максимальное нормальное напряжение от статического действия груза (4 строки)

Максимальное нормальное напряжение от ударного действия груза (1 строка)

Сравнение результатов

При ударном действии груза Q :

опытный прогиб балки (1 строка);

теоретический прогиб балки (1 строка).

Расхождение, % (1 строка).

Прогиб при наличии пружины (1 строка).

"Смягчение" удара, % (1 строка).

Сравнение максимального нормального напряжения при ударе с пределом пропорциональности материала балки (1 строка).

Выводы (10 строк)

Работу выполнил ...

Работу принял ...

Контрольные вопросы

1. Какие виды воздействия груза на элемент конструкции считаются динамическими?
2. При помощи какого коэффициента производится учет ударного действия нагрузки?
3. От каких факторов зависит динамический коэффициент?
4. Какие допущения приняты в теории удара?

5. Какие и с какой целью применяются амортизирующие элементы?
6. Какова цель лабораторной работы?
7. Сопоставьте значения прогибов от статического и динамического действия нагрузки.
8. Как определить нормальные напряжения при динамическом действии нагрузки?
9. Какие измерительные приборы используются при выполнении лабораторной работы?
10. Какой амортизирующий элемент использовался в данной работе?
11. Как повлияла амортизирующая пружина на значение динамического прогиба и напряжения?
12. Как влияет масса ударяемой конструкции на динамический коэффициент?
13. Что называют приведенной к месту удара массой?
14. Как учитывается в расчетах масса ударяемой конструкции?
15. От чего зависит коэффициент приведения массы к месту удара?
16. Какие предпосылки используются при определении значений коэффициента приведения массы к месту удара?

Содержание

Введение	3
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	3
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ПРАВИЛА ОБРАЩЕНИЯ С ПРИБОРАМИ	4
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	5
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИИ	11
Лабораторная работа № 1	
ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ	16
Лабораторная работа № 2	
ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ	27
Лабораторная работа № 3	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ПОПЕРЕЧНОЙ ДЕФОРМАЦИИ	33
Лабораторная работа № 4	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ	42
Лабораторная работа № 5	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ СДВИГЕ ..	48
Лабораторная работа № 6	
ИСПЫТАНИЕ ВИНТОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРУЖИНЫ	57
Лабораторная работа № 7	
ИССЛЕДОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ	62
Лабораторная работа № 8	
ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ	71
Факультативное задание к лабораторной работе № 8 «Исследование напряженного состояния при плоском попе- речном изгибе»	80
Лабораторная работа № 9	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ	84
Лабораторная работа № 10	
ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРЕМЫ О ВЗАИМНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	94

Лабораторная работа № 11 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ БАЛКИ	99
Лабораторная работа № 12 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ	105
Лабораторная работа № 13 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ	111
Лабораторная работа № 14 ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕЦЕНТРЕННОГО РАСТЯЖЕНИЯ ..	119
Лабораторная работа № 15 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ	127
Лабораторная работа № 16 ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНО СЖАТОГО СТЕРЖНЯ	136
Лабораторная работа № 17 ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА УДАР	144
Лабораторная работа № 18 ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ ..	149

Учебное издание

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
(лабораторный практикум)

Составители: БАЛЫКИН Михаил Кириллович
ПЕНЬКЕВИЧ Владимир Александрович
ЗАЯЦ Владимир Николаевич
ГОЛУБЕВ Иван Архипович

Под общей редакцией В Н Зайца

Редактор И Ф Антаневич. Корректор М П Антонова

Подписано в печать 30.09.99.

Формат 60x84 1/16. Бумага тип. № 2. Офсет печать.

Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 7,3. Тираж 500. Зак. 100.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусская государственная политехническая академия

Лицензия ЛВ № 155 от 30.01.98. 220027, Минск, пр Ф Скорины, 65