

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

И.П. Николаева Е.Л. Яковлева

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторный практикум

Санкт-Петербург
2018

АННОТАЦИЯ
к описанию лабораторных работ
по курсу "Сопротивление материалов"

Представлено описание лабораторных работ по курсу "Сопротивление материалов". Приводится описание принципа действия измерительных приборов и установок, предназначенных для проведения лабораторных работ. Изложены методика проведения работ и форма обработки полученных результатов.

В описание вошли только лабораторные работы, выполняемые студентами инженерно-строительного института, поэтому в содержании указаны выборочные номера работ.

Рекомендуется студентам, изучающим курс "Сопротивление материалов" при выполнении лабораторных работ.

СОДЕРЖАНИЕ

Работа 1	Определение механических характеристик стали по диаграмме растяжения.....	4
Работа 3	Испытание на сжатие образцов различных материалов.....	8
Работа 5	Определение модуля нормальной упругости материала.....	10
Работа 6	Определение коэффициента поперечной деформации материала.....	12
Работа 7	Изучение упругих деформаций при кручении стержня круглого сечения.....	14
Работа 9	Определение деформаций и напряжений при плоском изгибе.....	16
Работа 10	Определение прогибов балок при плоском изгибе....	18
Работа 11	Определение прогиба листовой рессоры.....	20
Работа 12	Определение опорной реакции балки, заделанной одним концом и шарнирно-опертой другим.....	22
Работа 13	Определение реакции средней опоры двухпролетной неразрезной балки с консолями.....	24
Работа 15	Определение прогиба концевой сечения балки при косом изгибе.....	26
Работа 16	Исследование распределения напряжений при внецентренном сжатии.....	29
Работа 17	Определение критической силы при продольном изгибе.....	32
Работа 19	Определение перемещения концевой поперечной сечения коленчатого стержня.....	35

РАБОТА №1

Определение механических характеристик стали по диаграмме растяжения

Цель работы: получение и обработка диаграммы растяжения углеродистой стали с определением основных характеристик прочности и пластичности и построение истинной диаграммы деформирования. К характеристикам прочности относятся: предел пропорциональности, предел текучести, временное сопротивление и напряжение при разрыве образца. Характеристиками пластичности являются: относительное остаточное сужение площади поперечного сечения образца и относительное остаточное удлинение при разрыве, а также работа, затраченная на разрушение образца.

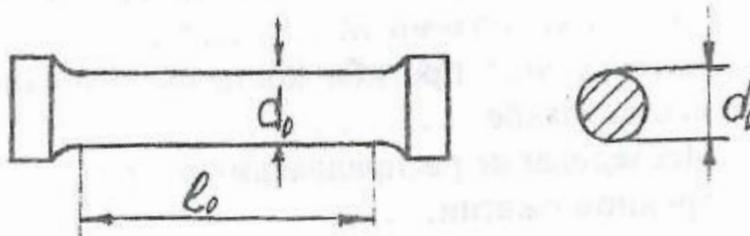


Рис. 1.1

Испытания проводят на прессе Гагарина, на цилиндрическом образце, с отношением длины рабочей части l_0 его к диаметру d_0 , равным пяти (рис. 1.1).

Пресс Гагарина предназначен для испытаний на сжатие. Для испытания образца на растяжение используют специальное приспособление, называемое реверсором. Принцип работы реверсора показан на рис. 1.2. Реверсор развинчивают для того, чтобы заложить в него образец. После сборки реверсор с образцом устанавливают в пресс. При нагружении происходит сжатие реверсора с одновременным растяжением образца.

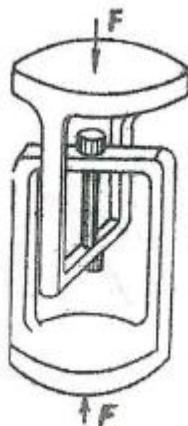


Рис. 1.2

Порядок проведения испытания и обработка результатов

До начала испытания необходимо измерить диаметр и рабочую длину образца. Измерение производят с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Эти данные заносят в отчет. Затем образец закрепляют в реверсоре, который устанавливают в пресс.

Вместе с выполнением основной задачи испытания демонстрируют закон разгрузки и образование остаточных деформаций в образце. Для этого после площадки текучести мотор прессы сначала останавливают, затем включают на разгрузку. После полной разгрузки образца мотор опять останавливают и вновь включают на нагружение. После предварительного деформирования образца изменяются свойства материала. При этом наблюдается снижение пластических свойств материала образца, уменьшение остаточной деформации к моменту разрыва, повышение предела пропорциональности и предела упругости. Такую обработку материала называют наклепом и применяют для изменения его свойств (например, вытяжка за предел упругости проводов линий электропередач). Далее испытание образца ведется до его разрушения.

Примерный вид полученной диаграммы представлен на рис. 1.3. Ее обработку начинают с проведения координатных осей. Отмечают на диаграмме точки: А - соответствующую концу прямолинейного участка; В - началу горизонтального участка; С - концу горизонтального участка; D - максимальной нагрузке; К - моменту разрыва. Измеряют ординаты, отвечающие намеченным точкам и, в масштабе сил получают соответствующие нагрузки. Значения этих нагрузок заносят в отчет.

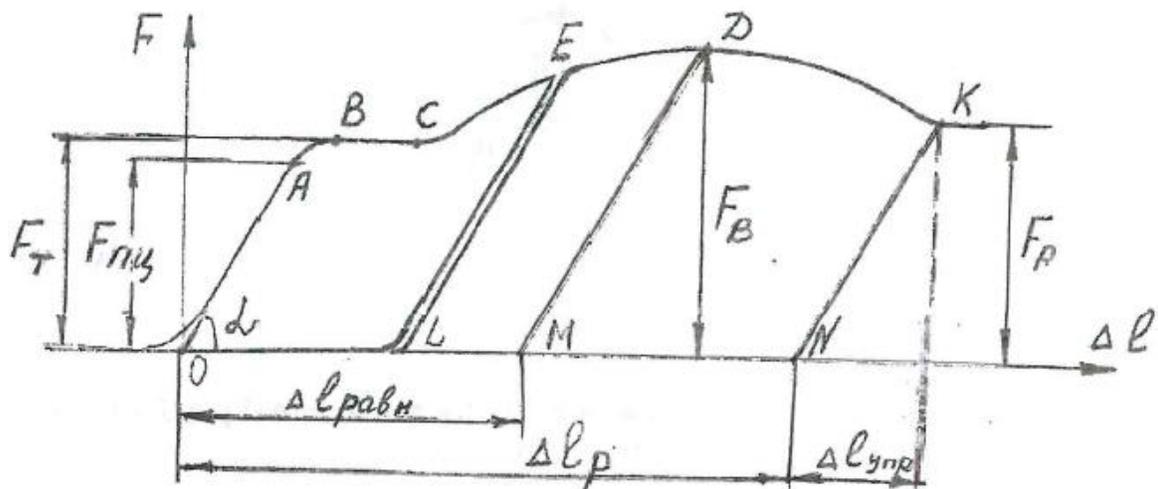


Рис. 1.3

В масштабе деформаций определяют отрезки OM и ON , для чего предварительно из точек D и K проводят линии, параллельные линии OA . Отрезок OM характеризует равномерную остаточную деформацию $\Delta l_{\text{равн}}$, а отрезок ON - остаточную деформацию к моменту разрыва Δl_p . Эти значения так же заносят в отчет. Необходимо также вычислить площадь диаграммы $OABCDKNO$, которая в указанном масштабе определяет работу, затраченную на пластическое деформирование образца к моменту разрыва. Для приближенного вычисления этой площади ее разбивают на несколько простых фигур (треугольников, трапеций, прямоугольников).

По полученным данным вычисляют и заносят в отчет:

- предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}}/A_0$ - наибольшее напряжение, до которого справедлив закон Гука, A_0 - площадь поперечного сечения образца до начала испытания.

- предел текучести $\sigma_T = F_T/A_0$ - напряжение, при котором происходит рост остаточной деформации при постоянной нагрузке;

- временное сопротивление $\sigma_v = F_v/A_0$ - напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке при растяжении образца;

- напряжение при разрыве $\sigma_p = F_p/A_0$.

Относительное остаточное удлинение при разрыве вычисляются по формуле

$$\delta = \frac{\Delta l_p}{l_0} * 100\%,$$

где Δl_p - остаточная деформация к моменту разрыва образца. Далее вычисляют относительное остаточное сужение площади поперечного сечения в шейке после разрыва

$$\psi = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0} * 100\%$$

где $A_{ш}$ - площадь поперечного сечения шейки.

Удельная работа, затраченная на остаточное деформирование:

$$\alpha = W/V_0,$$

где $V_0 = A_0 l_0$ - первоначальный объем рабочей части образца.

Для построения истинной диаграммы деформирования определяют:

- истинное напряжение, соответствующее временному сопротивлению, $\bar{\sigma}_v = \sigma_v(1 + \epsilon_{равн})$, где $\epsilon_{равн} = \Delta l_{равн} / l_0$;

- истинное напряжение в момент разрыва $\bar{\sigma} = F_p / A_{ш}$;

- истинное предельное равномерное относительное остаточное удлинение $\bar{\epsilon}_{равн} = \ln(1 + \epsilon_{равн})$;

- истинное относительное остаточное удлинение при разрыве

$$\bar{\epsilon}_p = \ln \frac{1}{1 + \psi}, \quad \text{где } \psi = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0}.$$

По истинным характеристикам в отчете строят истинную диаграмму деформирования (рис. 1.4).

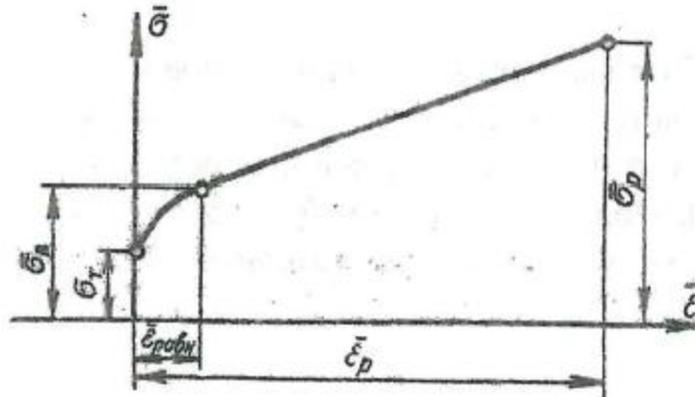


Рис. 1.4

Испытание на сжатие образцов различных материалов

В данной работе проводят сравнительное исследование свойств различных материалов при сжатии. Испытания проводят на образцах углеродистой стали, чугуна и дерева (деревянные образцы испытывают вдоль и поперек волокон). Получают диаграммы сжатия и вычисляют механические характеристики прочности этих материалов.

Испытания проводятся на гидравлическом прессе Амслера. Для испытания стали и чугуна применяется небольшой цилиндрический образец, так называемый крешер. Высота образца равна примерно 1,5 – 2 его диаметрам. Для испытания древесины используются кубические образцы.

Порядок проведения испытания и обработка результатов

Испытания всех образцов начинают с измерения при помощи штангенциркуля их размеров, которые заносят в отчет. Стальной и чугунный образцы измеряют с точностью до 0,1 мм, а деревянные образцы, из-за невысокой тщательности их изготовления, - лишь с точностью до 1 мм. Затем образцы последовательно устанавливают в пресс.

При нагружении стального образца через некоторое время после начала испытания стрелка силоизмерителя останавливается при продолжении нагружения. Наступает текучесть материала. Соответствующую нагрузку записывают в отчет. Затем стрелка снова приходит в движение - нагрузка вновь начинает возрастать. Образец непрерывно сжимается, поперечное сечение его увеличивается, и при отсутствии смазки по торцам образца он приобретает бочкообразную форму. Это объясняется тем, что имеются силы трения между торцами образца и опорными плитами прессы. При смазке торцов образца он сохраняет цилиндрическую форму. Стальной образец при испытании на сжатие не разрушается. Вид образца до и после испытания представлен на рис.3.1, примерное очертание диаграммы - на рис. 3.2. После окончания испытания вычисляют предел текучести материала и результат заносят в отчет.

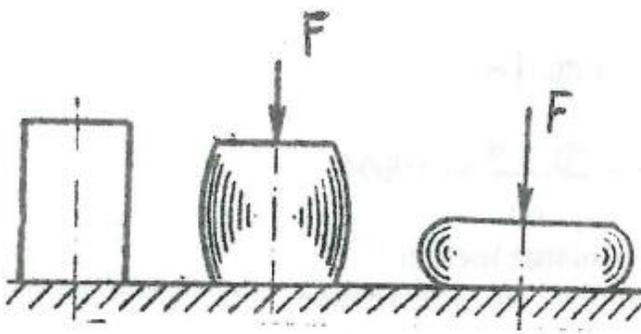


Рис. 3.1

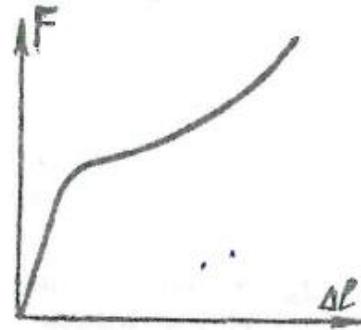


Рис. 3.1

При испытании чугунного образца нагружение продолжают до тех пор, пока не начнет падать нагрузка и не наступит разрушение образца. Значение максимальной нагрузки заносят в отчет. Вид образца до и после испытания представлен на рис. 3.3, примерный вид диаграммы на рис. 3.4. Вычисляют предел прочности материала и результат заносят в отчет.

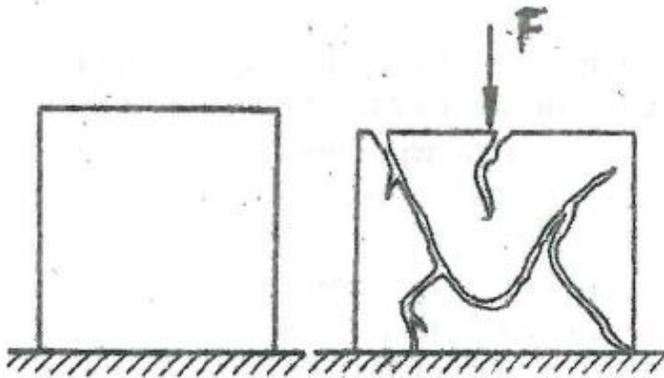


Рис. 3.3

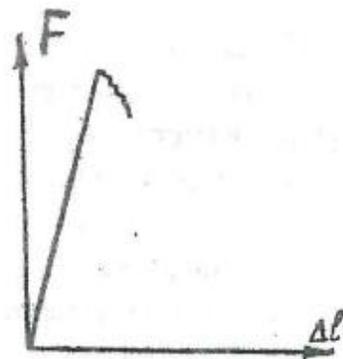


Рис. 3.4

Испытание деревянного образца, сжимаемого вдоль волокон, проходит подобно испытанию чугунного образца. Вид образца после испытания представлен на рис. 3.5. Примерное очертание диаграммы дано на рис. 3.6.

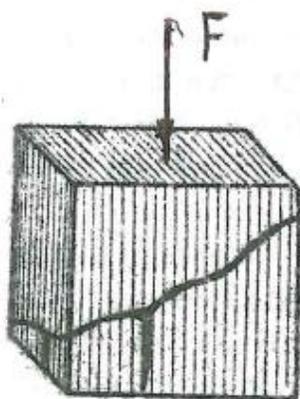


Рис. 3.5



Рис. 3.6

При испытании деревянного образца, сжимаемого поперек волокон, отмечают значение нагрузки, после которого ее рост сильно замедляется, а деформация продолжает возрастать. После этого продолжают деформирование образца до тех пор, пока его высота не уменьшится примерно на одну треть. Образец при испытании не разрушается (рис. 3.7). Примерное очертание диаграммы представлено на рис. 3.8. Вычисляют напряжения при максимальной нагрузке для испытаний обоих деревянных образцов и их значения заносят в отчет.

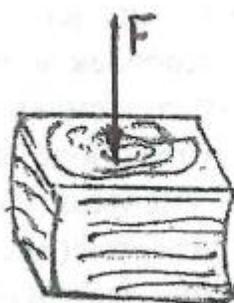
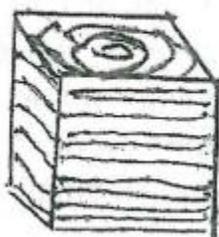


Рис. 3.7



Рис. 3.8

РАБОТА № 5

Определение модуля нормальной упругости материала

Упругие деформации различных материалов с высокой степенью точности следуют закону Гука, увеличиваясь пропорционально действующим напряжениям. В условиях линейного растяжения и сжатия закон Гука представляется зависимостью:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где: σ - нормальное напряжение, ε - относительное удлинение, E - модуль нормальной упругости, который является важнейшей характеристикой упругих свойств металлов.

В данной работе проводят экспериментальную проверку этой зависимости и определяют величину модуля нормальной упругости материала.

Образец и измерительные приборы

Растяжение образца проводят на универсальной пятитонной машине УМ-5. Испытанию подвергают образец круглого поперечного сечения. Для измерения деформаций применяют рычажные тензометры Гугенбергера. Схема тензометра приведена на рисунке 5.1.

Корпус тензометра 1 имеет неподвижную ножку 2, опирающуюся на образец. Вторая подвижная ножка 3, также опирающаяся на образец, может вращаться в гнезде 4, представляя собой рычаг первого рода. При таком вращении верхний конец подвижной ножки 3 заставляет в свою очередь вращаться стрелку 5, которая представляет собой рычаг второго рода, так как верхний конец ее прикреплен к корпусу тензометра. Нижний конец стрелки 5 перемещается по шкале 6. Соотношение плеч обоих рычагов (3 и 5) таково, что перемещение конца стрелки больше изменения расстояния между ножками тензометра (равного абсолютной деформации образца на этой длине) примерно в 1000 раз.

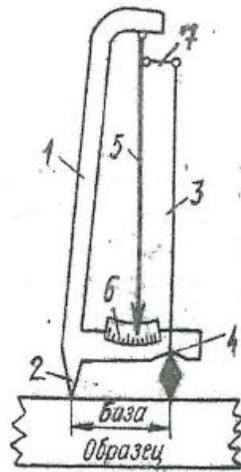


Рис 5.1

Точное значение коэффициента увеличения приводится в паспорте каждого прибора. Расстояние между ножками называется базой тензометра. С помощью специального удлинителья она может быть увеличена.

Шкала тензомера имеет пятьдесят делений. Если обозначить коэффициент увеличения прибора k , то цена каждого деления будет равна $1/k$ мм деформации образца. Для уничтожения параллакса при взятии отсчета следует смотреть на шкалу так, чтобы стрелка и ее изображение в имеющемся на шкале зеркале совпадали. На образце установлено два тензомера Гугенбергера, которые располагают диаметрально противоположно, в результате чего исключается возможность ошибки за счет изгиба образца в случае не вполне центрального приложения растягивающей силы.

Порядок проведения работы и обработка результатов

Прежде чем приступить к работе, необходимо ознакомиться с характеристиками приборов, установить размеры баз, значения коэффициентов увеличения применяемых тензомеров и установить величину ступени нагружения.

На машине УМ-5 начальное усилие устанавливают непосредственно на шкале циферблата. При этой нагрузке в отчете записывают показания силосмерителя и отсчеты по тензомерам. Далее нагрузку на образец увеличивают равными ступенями. По приборам снимают отсчеты соответствующие каждой ступени нагружения. Результаты опыта записывают в отчет. Величину модуля нормальной упругости подсчитывают по известной формуле

$$E = \frac{\Delta F \cdot \ell}{A \cdot \Delta \ell} ,$$

где ΔF - ступень нагружения, ℓ - расчетная длина (база прибора), A - площадь сечения образца, $\Delta \ell = \Delta t_{cp}/k$ - удлинение образца, отвечающие увеличению нагрузки на одну ступень, Δt_{cp} - среднее арифметическое разностей отсчетов, полученных для всех ступеней нагружения. По данным отчета строят график зависимости ($\Delta \ell - F$), подтверждающий закон Гука.

РАБОТА № 6

Определение коэффициента поперечной деформации материала

Одной из постоянных, характеризующих упругие свойства материала, является коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

$$\mu = -\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}$$

где: ϵ - продольная, ϵ_n - поперечная относительные деформации, получающиеся при линейном напряженном состоянии.

В данной работе определяют величину коэффициента поперечной деформации при растяжении образца из углеродистой стали.

Образец и измерительные приборы

Образец растягивают на десятитонной машине Шоплера с механическим возбуждением силы и рычажным устройством для ее измерения.

Применяемый при испытании образец представляет собой широкую стальную полосу (рис.6.1). Такая его форма обусловлена тем, что для измерений весьма малых деформаций возникает необходимость в установке тензометра с увеличенной базой. Расположение тензометров показано на том же рисунке, где T_1 - продольный, T_2 - поперечный тензометры. В данной работе применяют рычажные тензометры (см. работу 5).

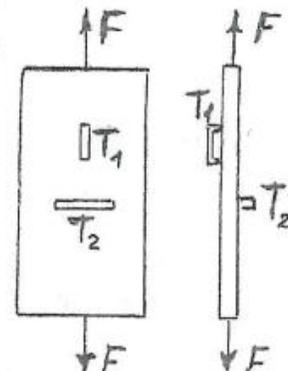


Рис.6.1

Порядок проведения испытаний и обработка результатов

После установки образца в машину и прикрепления к нему тензометров создают небольшую (порядка 500кгс) нагрузку, необходимую для надежной установки образца в захватах. При этой нагрузке в отчет записывают показания силоизмерителя и отсчеты по тензометрам. Затем нагрузку увеличивают до максимально допустимой в зависимости от предела упругости материала, размеров образца и конструкции машины и вновь записывают в отчет показания силоизмерителя и отсчеты по тензометрам. Чем больше ступень нагрузки, тем точнее результаты опыта. Далее вычисляют разность отсчетов по каждому из тензометров, для исключения возможной ошибки опыт повторяют. Для каждого из тензометров окончательную разность его показаний определяют как среднее арифметическое из результатов двух испытаний.

Для подсчета деформации служит зависимость

$$\epsilon = \frac{\Delta t}{k \cdot \ell},$$

где: Δt - разность показаний тензометра, k - коэффициент увеличения, ℓ - база тензометра, мм.

Коэффициент поперечной деформации определяют по формуле

$$\mu = -\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon} = \frac{\Delta t_{2cp} k_1 \ell_1}{\Delta t_{1cp} k_2 \ell_2}.$$

РАБОТА № 7

Изучение упругих деформаций при кручении стержня круглого поперечного сечения

Целью данной работы является определение величины модуля сдвига материала и подтверждение закона Гука при кручении.

Образец и измерительные приборы

Испытанию подвергают образец круглого поперечного сечения (рис.7.1). Для измерения угла закручивания, определяемого по разности углов поворота двух сечений 1 и 2 образца, применяют индикаторы часового типа T_1 и T_2 . Принципиальная схема индикатора и его описание приводятся на рис. 7.2. Индикатор состоит из круглой металлической коробки 1, внутри которой размещается весь механизм прибора. Индикатор с помощью специального штатива устанавливается так, чтобы выступающий наружу конец штифта 2 касался поверхности образца в некоторой точке А. При перемещении штифта 2 на 1 мм стрелка 3 делает полный оборот (большая шкала), а стрелка 4 (малая шкала) - 0,1 оборота. Циферблат 5 разделен на 100 частей, а циферблат 6 - на 10 частей. Таким образом, при взятии отсчетов по индикатору целые миллиметры должны отсчитываться по шкале циферблата 6, а десятые и сотые - по шкале циферблата 5. Оба индикатора закрепляются на станине машины, при этом головки индикаторов упираются в жесткие пластинки, прикрепленные к образцу в сечениях 1 и 2, расстояние между которыми соответствует расчетной длине образца ℓ . При приложении крутящегося момента к образцу сечение 1 повернется на угол φ_1 , а сечение 2 - соответственно на угол φ_2 . Углы поворота φ_1 и φ_2 вычисляют по показаниям индикаторов t_1 и t_2 по формулам

$$\varphi_1 = t_1 / B_1, \quad \varphi_2 = t_2 / B_2,$$

где B_1 и B_2 - расстояния от оси образца до головки индикатора. Разность углов закручивания $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ определяет взаимный поворот сечений 1 и 2.

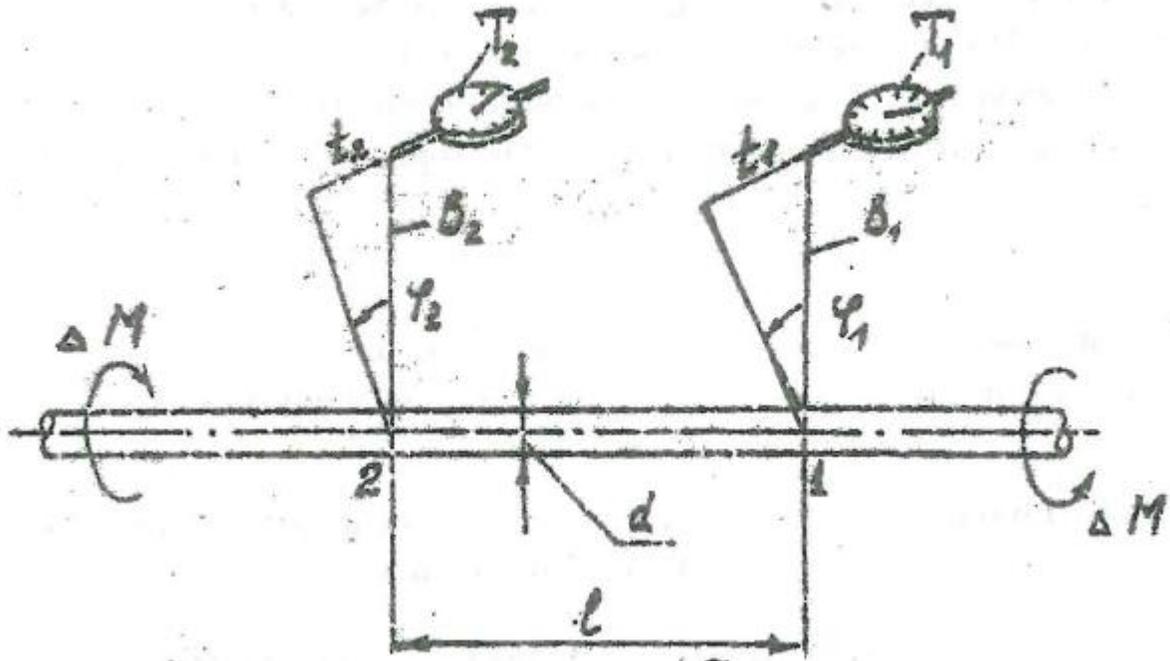


Рис. 7.1

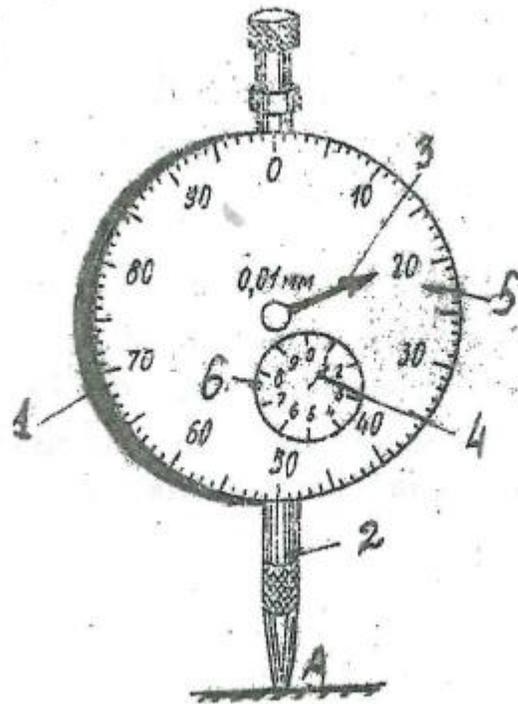


Рис. 7.2

Порядок проведения работы и обработка результатов

Образец нагружают начальным значением момента M и записывают показания индикаторов в отчет. Далее равными ступенями увеличивают значение момента и при каждой ступени нагружения показания индикаторов заносят в отчет.

По результатам опыта вычисляют значение модуля сдвига испытуемого материала.

$$G = \frac{\Delta M \ell}{I_p \Delta \varphi_{cp}},$$

где: ΔM - ступень нагружения, ℓ - расчетная длина, I_p - полярный момент инерции сечения стержня, $\Delta \varphi_{cp}$ - среднее арифметическое разностей отсчетов для всех ступеней нагружения.

Для подтверждения справедливости закона Гука, согласно которому равным приращениям крутящего момента ΔM должны соответствовать одинаковые приращения угла закручивания $\Delta \varphi$, строят график зависимости $\Delta \varphi$ от ΔM .

РАБОТА № 9

Определение деформации и напряжений при плоском изгибе

В работе проводится экспериментальная проверка справедливости допущений, положенных в основу вывода формулы для вычисления нормальных напряжений при плоском изгибе.

Образец и измерительная аппаратура

Установка для испытаний представляет собой стальную балку, заделанную одним концом. Сосредоточенная сила (в виде гирь, укладываемых на поддон) прикладывается на конце консоли. Деформации определяют с помощью датчика сопротивления в верхних и нижних волокнах балки, в сечении удаленном на заданное расстояние от свободного конца (рис. 9.1). С этой целью на поверхностях нижней и верхней продольных граней балки с помощью шеллакового или ацетонового клея приклеиваются проводочные датчики сопротивления. Проволочный датчик (рис. 9.2) изготавливается из тонкой нихромовой или константановой проволоки диаметром до 0,05 мм в виде одной или нескольких одинаковых проволочных петель 1, уложенных между двумя склеенными листками тонкой бумаги 2. Концы проволочных петель припаиваются к обыкновенной монтажной медной

проволоке 3 для последующего включения датчиков в измерительную схему. Длина петли проволоки датчика ℓ_0 носит название базы прибора.

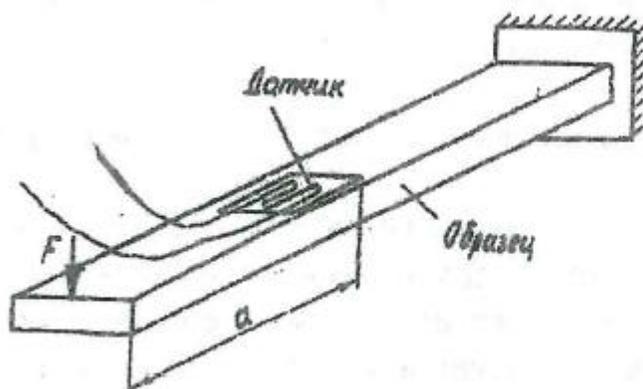


Рис. 9.1

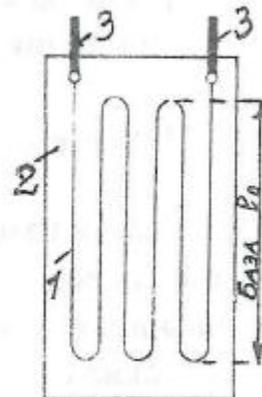


Рис. 9.2

Принцип работы проволочного датчика сопротивления основан на известной из электротехники зависимости

$$R = \rho \frac{L}{A},$$

где: R - омическое сопротивление проволоки датчика, L - длина проволоки, A - площадь ее поперечного сечения, ρ - удельное сопротивление материала проволоки.

Так как приклеенный к детали датчик составляет с ней одно целое, то при деформации детали вместе с ней будет происходить и деформация проволоки датчика, а следовательно, изменяться ее омическое сопротивление. При деформации растяжения за счет увеличения длины и уменьшения площади поперечного сечения сопротивление проволоки будет увеличиваться ($\rho = \text{const}$), а при сжатии, наоборот, уменьшаться. Величина изменения омического сопротивления будет служить мерой относительной деформации $\epsilon = \Delta \ell / \ell_0$, в том месте детали, где наклеен датчик.

Порядок проведения измерений и обработка результатов

К балке прикладывают начальную нагрузку и снимают показания прибора, подключая попеременно к каждому из датчиков источник тока. Затем балку нагружают заданной конечной нагрузкой и вновь берут пока-

зания прибора. Результаты заносят в отчет.

Величины нормальных напряжений в крайних волокнах определяют по закону Гука.

$$\sigma_{\text{раст}} = E \cdot \varepsilon_{\text{раст}} , \quad \sigma_{\text{сж}} = E \cdot \varepsilon_{\text{сж}} , \quad .$$

где $\varepsilon_{\text{раст}} = \omega_0 \Delta t_{1\text{cp}} , \quad \varepsilon_{\text{сж}} = \omega_0 \Delta t_{2\text{cp}} .$

Здесь ω_0 - цена деления прибора, $\Delta t_{1\text{cp}}$ и $\Delta t_{2\text{cp}}$ - средние величины разностей отсчетов по прибору.

Полученные величины напряжений необходимо сравнивать с их значениями, определяемыми по формуле для плоского изгиба. Далее определяются величины расхождения теоретических результатов с опытными данными.

РАБОТА №10

Определение прогибов балок при плоском изгибе

Дифференциальное уравнение упругой линии выводится на основании двух допущений. Во-первых, предполагается, что балка имеет большую жесткость, вследствие чего в выражении для ее кривизны не учитывается величина квадрата первой производной. Во-вторых, при выводе уравнения используется зависимость между кривизной и изгибающим моментом, полученная для чистого изгиба на основании гипотезы плоских сечений. При наличии поперечных сил эта гипотеза не отвечает действительности, так как за счет сдвигов, вызываемых касательными напряжениями, происходит искривление поперечных сечений балки. Однако, как показывают точные исследования, принятие подобных допущений приводит при определении прогибов балок к очень незначительным погрешностям. В этом легко убедиться с помощью эксперимента.

Цель работы: определение опытным путем величин прогибов отдельных сечений балок и сравнение этих величин с результатами теоретических расчетов, основанных на указанных допущениях.

Описание установок и измерительных приборов

В качестве установок используются две балки: балка на двух опорах и

балка, заделанная одним концом. Поперечные сечения балок – прямоугольник или тавр. Схемы обеих установок приведены на рис. 10.1 (а, б). Нагружение балок осуществляют с помощью гирь, которые укладывают на поддон. Поддон можно передвигать и устанавливать в любом сечении балки. Величины прогибов сечений измеряются с помощью индикаторов. Принцип работы индикаторов приведен в работе №7.

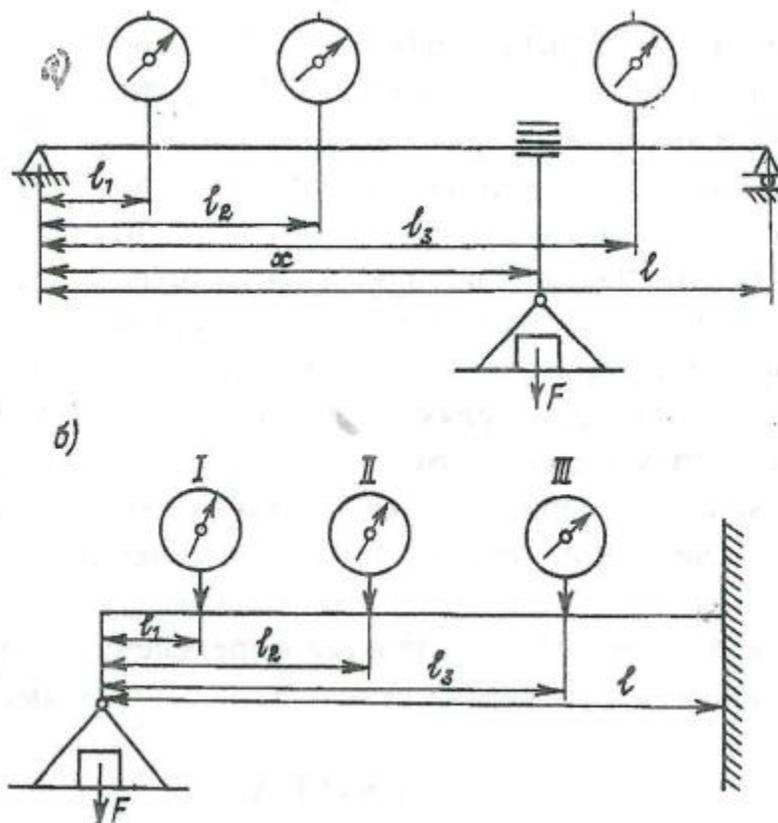


Рис. 10.1

Порядок проведения работы и обработка результатов

Прежде чем приступить к работе, необходимо занести в отчет схемы установок с указанием всех размеров. К балке прикладывают начальную нагрузку F_1 , при которой записывают показания всех индикаторов. Далее, добавляя гири на поддон, нагрузку увеличивают до значения F_2 , после чего вновь записывают показания приборов. Разности отсчетов по индикаторам будут равны величинам прогибов, в соответствующих сечениях при расчетной нагрузке $\Delta F = F_2 - F_1$. Опыт рекомендуется проделать три раза, и результаты измерений занести в отчет. Опытные значения величин прогибов сечений определяются как среднее арифметическое разностей отсчетов по трем измерениям.

Для сравнения экспериментальных результатов с теоретическими не-

обходимо подсчитать величины прогибов в тех же сечениях аналитическим методом. Затем определяются (в процентах) величины расхождения теоретических результатов с опытными данными.

РАБОТА № 11

Определение прогиба листовой рессоры

Листовая рессора представляет собой балку равного сопротивления изгибу с переменной шириной и постоянной высотой. При выводе теоретической формулы для определения величины прогиба листовой рессоры не учитываются влияние кривизны продольной оси рессоры и трения между листами на величину прогиба. Однако если влияние кривизны оси очень мало, то наличие трения оказывается обычно более заметным, вследствие чего теоретически вычисленный прогиб всегда несколько больше действительного.

Цель работы: опытная проверка допустимости применения приближенной формулы для определения наибольшего прогиба листовой рессоры.

Установка для испытания

Установка представляет обычную листовую рессору на двух шарнирных опорах, нагружаемую с помощью динамометра сосредоточенной силой F в середине пролета (рис. 11.1). В этом же сечении с помощью индикатора измеряется прогиб рессоры. Штифт индикатора во время опыта опирается на горизонтальную поверхность скобы, скрепляющей листы рессоры в среднем сечении. Увеличение нагрузки вызывает прогиб рессоры и одновременно равное ему перемещение штифта индикатора.

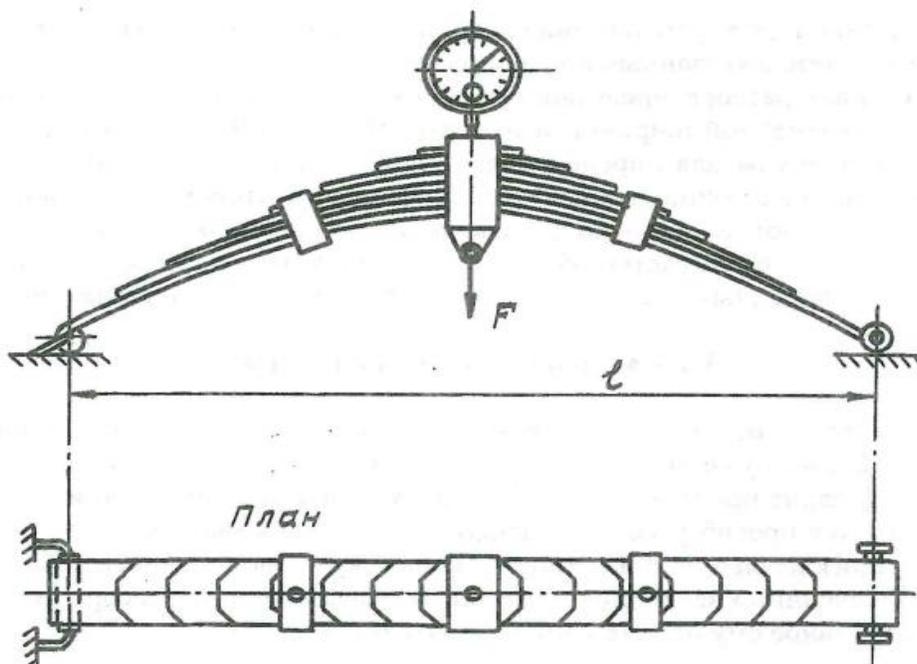


Рис. 11.1

Порядок проведения работы и обработка результатов

Перед испытанием необходимо записать размеры поперечного сечения листов рессоры, число листов в среднем сечении, расстояние между опорами рессоры и значение модуля нормальной упругости материала

Испытание начинают с приложения начальной нагрузки F_1 , при которой берут отсчет по индикатору. Затем с помощью динамометра увеличивают нагрузку до величины F_2 и снова фиксируют показания индикатора. Начальный и конечный отсчеты и соответствующие им значения нагрузки записывают в отчет. Разность конечного и начального отсчетов представляет собой искомое значение прогиба среднего сечения рессоры.

Опыт повторяют три раза. Экспериментальное значение прогиба рессоры под нагрузкой $\Delta F = F_2 - F_1$ определяют как среднее арифметическое из результатов трех опытов и сравнивают со значением прогиба, вычисленным

$$f_{теор} = \frac{F \ell^3}{32EI_0}, \quad EI_0 = E \frac{nbh^3}{12},$$

где: b и h - ширина и толщина одного листа, n - число листов в среднем сечении.

Величину расхождения между теоретическим и опытным значениями прогибов оценивают в процентах.

Определение опорной реакции балки, заделанной одним концом и шарнирно опертой другим

Цель работы: экспериментальная проверка применимости методов раскрытия статической неопределенности балок (аналитический, с помощью теоремы Кастильяно, метод сравнения перемещений).

Расчетная схема балки приведена на рис. 12.1. Балка, на которой проводится испытание, является основной системой для статически неопределимой балки *AB*.



Рис. 12.1

Установка для испытаний

Установка, схема которой приведена на рис. 12.2, представляет собой стальную балку *AB* прямоугольного поперечного сечения, жестко заделанную концом *A*. Конец *B* при помощи тяги I шарнирно соединен с жестким коромыслом 2, ко второму концу которого подвешена чашка для гирь 3. Коромысло представляет собой рычаг первого рода, который может вращаться вокруг оси в точке *O*. При помощи серьги к балке подвешен поддон 4, на который кладется груз, изгибающий балку. Серьгу с подвешенным к ней поддоном можно перемещать по длине балки. Вертикальные перемещения конца балки *B* фиксируют с помощью индикатора, прикрепленного к неподвижному держателю (либо с помощью простой линейки, также неподвижно установленной рядом с концом балки *B*).

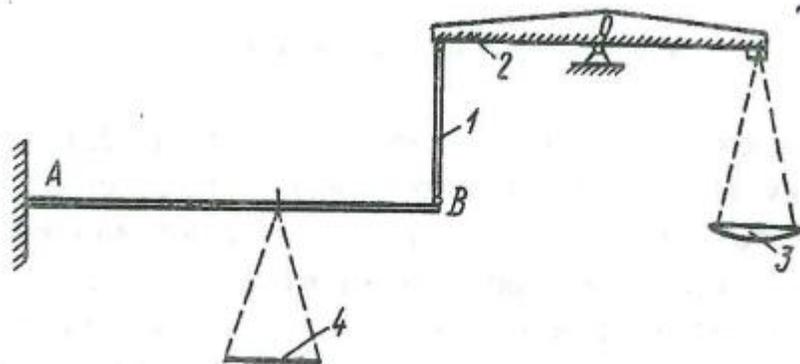


Рис. 12.2

Порядок проведения работы и обработка результатов

До начала работы необходимо записать длину балки и расстояние от заделки до точки приложения силы. В ненагруженном состоянии балки ее ось прямолинейна и горизонтальна. Такое ее положение изображено на рис. 12.3,а. Первоначальное положение конца балки **B** необходимо зафиксировать, записав показания индикатора (либо цифру делений шкалы линейки). Затем на поддон помещают груз F . Балка прогибается, конец ее **B** опускается, коромысло, увлекаемое тягой, поворачивается, чашка для гирь поднимается (рис. 12.3,б). После этого в чашку помещают такое количество гирь, которое возвращает конец балки **B** в первоначальное положение. Это состояние определяется возвращением стрелки индикатора к первоначальному отсчету или по шкале линейки к первоначальной цифре (рис. 12.3,в). Вес гирь, положенных в чашку, с учетом равенства плеч коромысла и будет равен экспериментальному значению реакции в опоре **B**. Действительно, состояние балки (рис. 12.3,в) эквивалентно ее состоянию, изображенному ранее (см. рис. 12.1, конец балки не переместился в вертикальном направлении), следовательно, сечение **B** может рассматриваться как шарнирно закрепленное сечение).

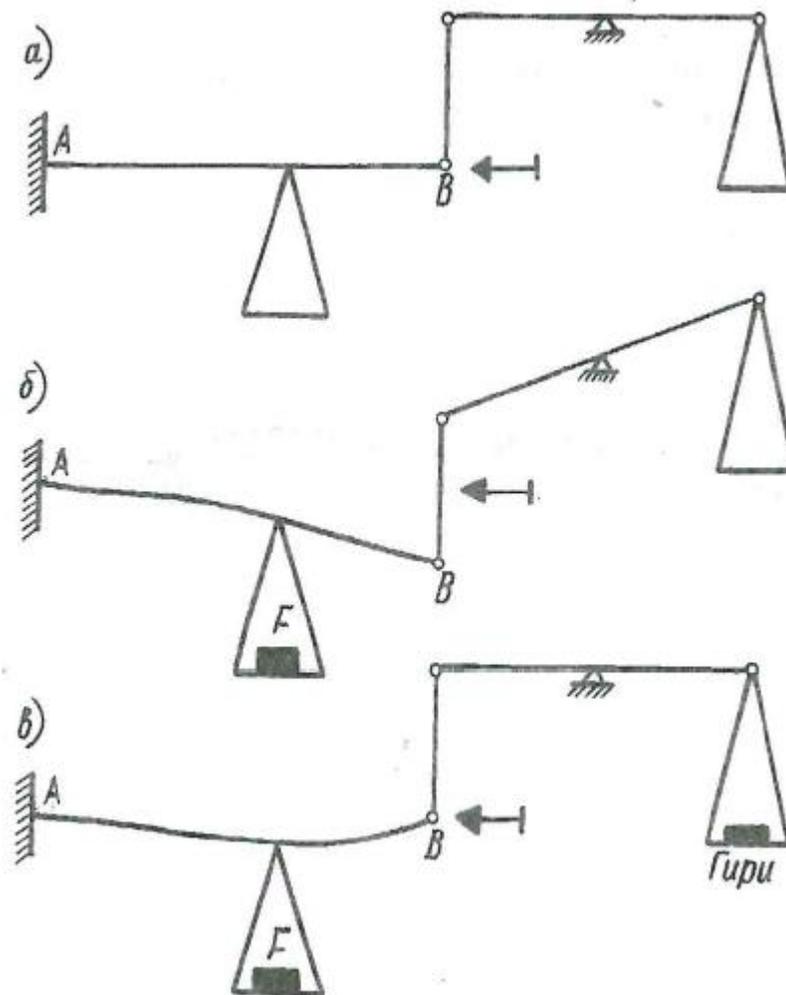


Рис. 12.3

Величина силы, удерживающей сечение B в его первоначальном положении, равна реакции опоры B балки, представленной на рис. 12.1. Теоретическое определение опорной реакции сечения B может быть произведено любым из известных способов.

В заключении работы подсчитывают в процентах величину расхождения между теоретическим и экспериментальным значениями реакции.

РАБОТА № 13

Определение реакции опоры двухпролетной неразрезанной балки с консолями

Цель работы: экспериментальная проверка теоретических подсчетов вели-

чины лишней неизвестной, для статически неопределимой балки (рис. 13.1). Балка, на которой проводится работа, является основной системой для статически неопределимой балки.

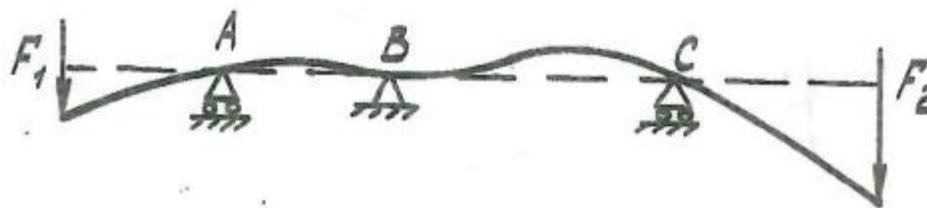


Рис. 13.1

Установка для испытаний

Установка, схема которой приведена на рис. 13.2, представляет собой стальную балку прямоугольного поперечного сечения, свободно лежащую на двух опорах A и C. К концам консолей подвешены поддоны, на которые кладут грузы, изгибающие балку. Между опорами в сечении B подвешен еще один поддон для грузов, который можно передвигать по длине балки. В том же сечении B установлен индикатор, отмечающий вертикальное перемещение этого сечения. Индикатор прикреплен к неподвижному держателю.

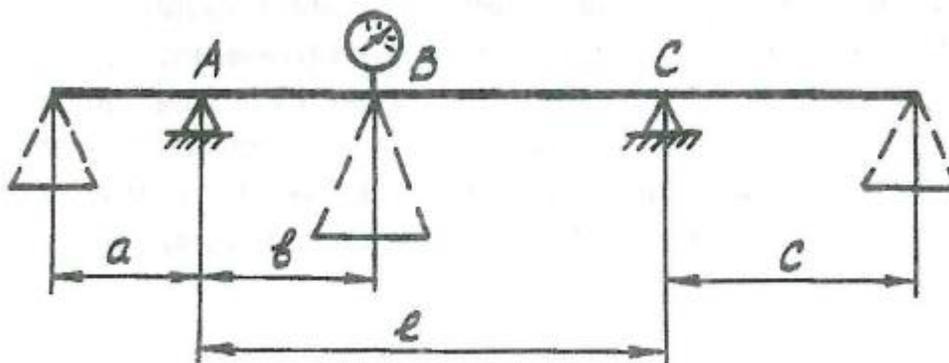


Рис. 13.2

Порядок проведения работы и обработка результатов

До начала работы необходимо записать длины консолей и пролетов балки в отчет. Одновременно следует отметить показания индикатора.

Балка не нагружена, ось ее прямолинейна и горизонтальна (рис.

13.3,а). На крайние поддоны помещают грузы F_1 и F_2 . Балка изгибается, при этом сечение B поднимается (рис. 13.3,б). После этого на средний поддон осторожно помещают необходимое количество гирь, которые возвращают сечение B в первоначальное положение, что определяется восстановлением первоначального показания индикатора. Вид балки в данном состоянии изображен на рис. 13.3,в. Вес гирь на среднем поддоне и будет равен экспериментальному значению реакции в опоре B . Действительно, состояние балки, изображенное на рис. 13.3,в, эквивалентно ее состоянию, показанному на рис. 13.1. Сечение балки B не переместилось, следовательно, оно может рассматриваться как сечение, закрепленное шарнирно. Величина силы, удерживающей сечение B в его первоначальном положении, равна реакции опоры балки, изображенной на рис.13.1.

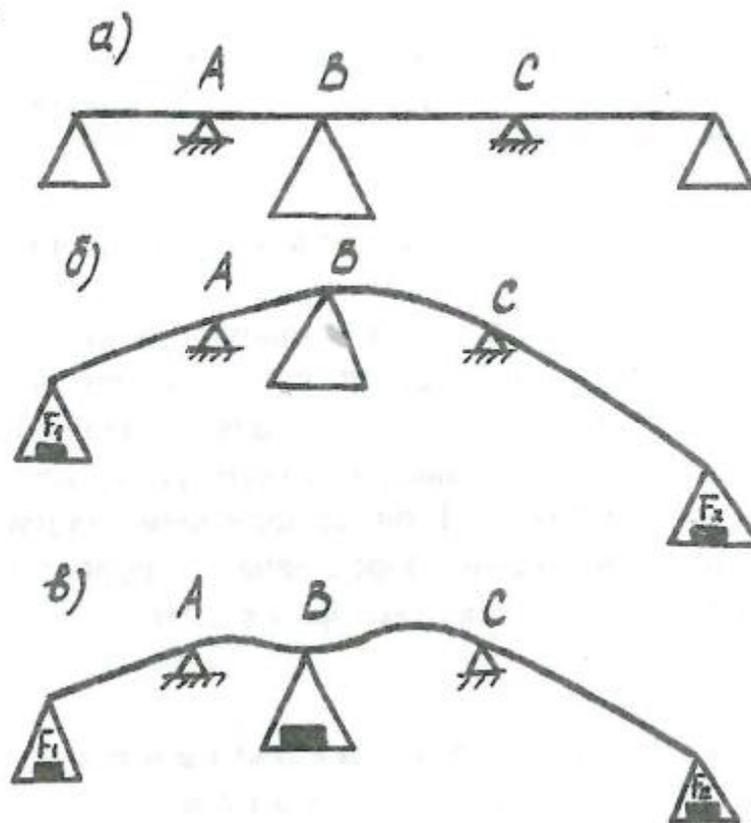


Рис. 13.3

РАБОТА № 15

Определение прогиба концевого сечения балки при косом изгибе

При изучении деформации косоугольного изгиба, как и при изучении других

случаев сложного сопротивления, исходят из принципов независимости действия сил. Этот принцип может быть использован, если материал подчиняется закону Гука.

Цель работы: опытная проверка допустимости применения принципа независимости действия сил путем сравнения величины прогиба балки, найденного из опыта, с теоретически вычисленным его значением.

Установка для испытания

Установка представляет собой стальную балку 1 прямоугольного поперечного сечения, заделанную одним концом в станину 2 (рис. 15.1).

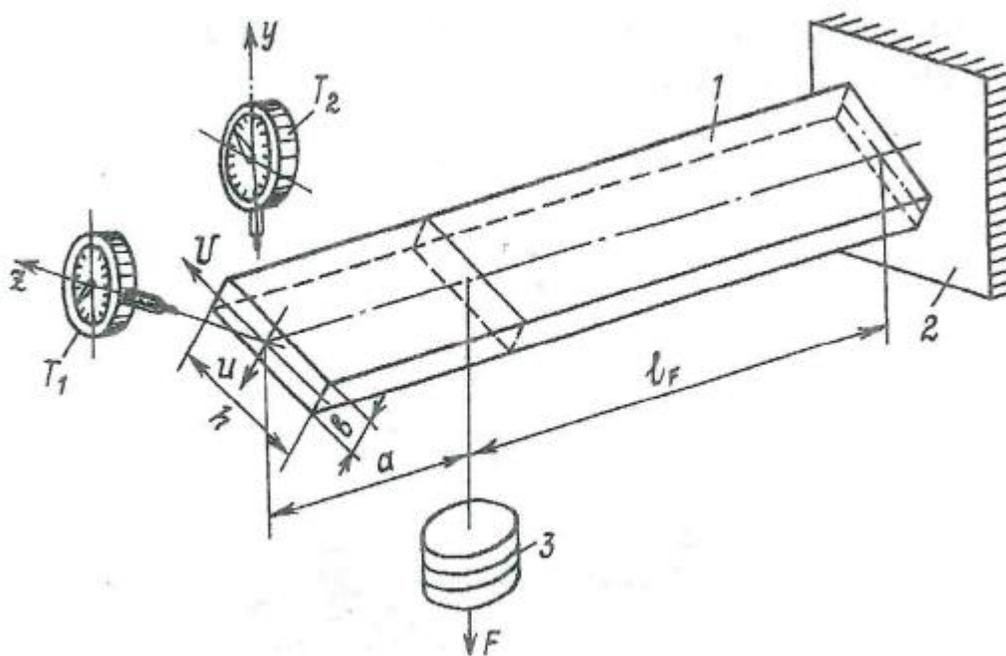


Рис. 15.1

Заделка осуществлена так, что позволяет поворачивать балку вокруг ее продольной оси и устанавливать боковые грани под любым углом к направлению действия нагрузки. К балке подвешен поддон 3, который может перемещаться по длине балки. Перед началом проведения работы преподаватель фиксирует поддон на некотором расстоянии от свободного конца балки. На конце консоли установлены два индикатора (T_1 и T_2), для измерений вертикального и горизонтального перемещений конца балки.

Порядок проведения испытания и обработка результатов

В отчете должны быть записаны размеры поперечного сечения балки,

ее длина, значение модуля нормальной упругости материала.

Во время опыта определяют перемещение центра тяжести концевого сечения балки в вертикальном и горизонтальном направлениях (рис. 15.2).

Для измерений применяют индикаторы, описанные в работе 7.

Работу начинают с приложения начальной нагрузки F_1 , при которой берут отсчеты по шкалам индикаторов. Затем прикладывают конечное значение нагрузки F_2 , при этом гири необходимо укладывать на поддон без ударов, и вновь берут отсчеты по индикаторам. Начальные и конечные отсчеты записывают в отчет наблюдений. Разности отсчетов и представляют собой искомые значения составляющих прогиба балки в вертикальном и горизонтальном направлениях.

После первого испытания балку разгружают (до нагрузки F_1), проверяют возвращение стрелок индикатора в первоначальное положение и затем повторяют опыт, по крайней мере, еще два раза. Экспериментально найденные значения составляющих прогиба f_y, f_z в вертикальном и горизонтальном направлениях под нагрузкой $\Delta F = F_2 - F_1$ определяют как среднее арифметическое результатов из трех опытов. Теоретические значения перемещений f_u, f_v в главных осях U и V вычисляют на основании известных методов определения перемещения в балках.

Величину полного прогиба балки при косом изгибе определяют по формуле

$$f = \sqrt{f_u^2 + f_v^2} = \sqrt{f_y^2 + f_z^2}.$$

Необходимо обратить внимание на то, что направление прогиба f всегда отклоняется от линии действия силы к направлению прогиба, перпендикулярного оси, относительно которой балка обладает наименьшей жесткостью (на рис. 15.2 - к оси U).

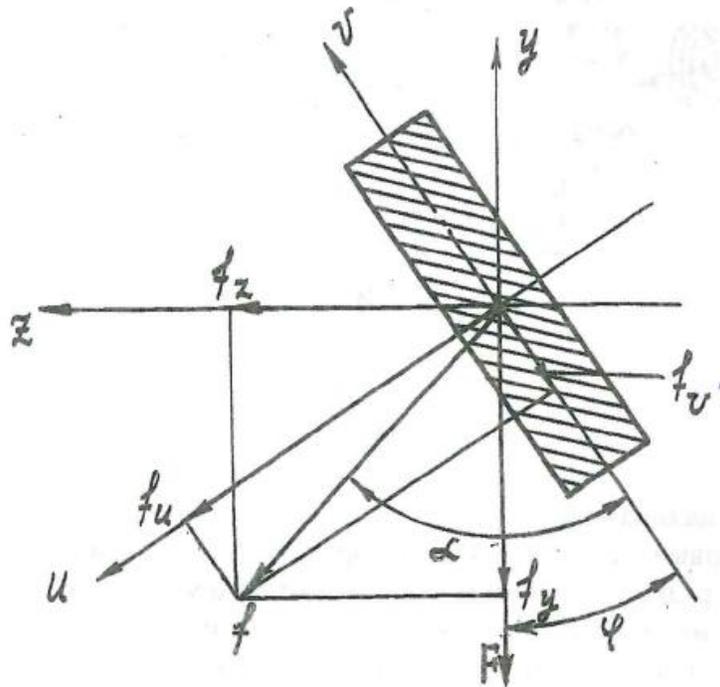


Рис. 15.2

Сравнение полученного из опыта значения прогиба с его теоретическим значением позволяет судить о большей или меньшей достоверности допущений, положенных в основу изучения деформации косоугольного изгиба. При сравнении результатов необходимо определить расхождение между теоретическим и опытным значениями прогибов.

РАБОТА № 16

Исследование распределения напряжений при внецентренном сжатии

Цель работы: опытная проверка допустимости применения принципа независимости действия сил при внецентренном сжатии.

Действие сжимающей силы, приложенной внецентренно, можно рассматривать как результат действия осевой сжимающей силы и изгибающего момента, обусловленного внецентренностью приложения нагрузки. Основываясь на гипотезе плоских сечений и законе Гука $\sigma = E\varepsilon$, легко вычислить величины напряжений, которые в этих условиях должны возникать в поперечных сечениях стержня. Для этого необходимо вычислить относительную деформацию ε , по результатам, полученным из опыта.

Установка для испытаний

Для проведения испытаний применяется гидравлический пресс, схема которого приведена на рис. 16.1. Пресс состоит из следующих основных частей: большого цилиндра 1, крестообразной колонки с манометром 2, малого цилиндра с насосом 3, балки для масла 4. В большом цилиндре движется поршень с опорной плитой 5. Над поршнем укреплена на двух стержнях верхняя плита 6. Образец 7 устанавливается между опорной плитой 5 и верхней неподвижной плитой 6. Между плитами 5 и 6 и нижней и верхней плоскостями образца установлены небольшие шарики из закаленной стали. По отношению к оси образца шарики располагаются с эксцентриситетом, благодаря чему сжимающая нагрузка действует на образец внецентрично.

Малый цилиндр с поршнем служит для нагнетания масла и является одновременно насосом для подачи масла в пресс. Поршень насоса приводят в движение рукояткой 8, образующей рычаг с осью 9. Вентиль 10 открывает трубопровод для подачи масла в большой цилиндр.

Образец и измерители деформаций

Применяемый при испытании образец представляет собой стальной стержень круглого поперечного сечения. Деформации образца измеряют вдоль расположенных в плоскости изгиба наружных волокон, в которых деформации и напряжения достигают своих экстремальных значений. Для измерения деформаций применяются тензометры Гугенбергера, описание которых дано в работе 5. Тензометры T_1 и T_2 прикреплены к образцу с помощью струбцин.

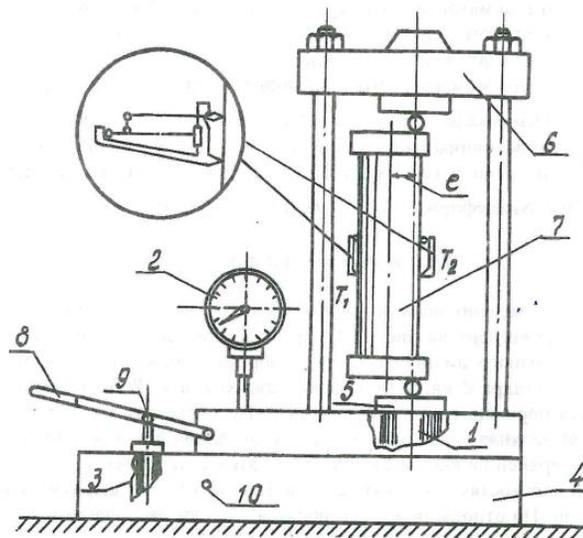


Рис. 16.1

Порядок проведения испытаний и обработка результатов

Перед началом испытания необходимо записать диаметр образца, величину эксцентриситета приложенной нагрузки, базы и коэффициенты увеличения обоих тензометров, а также значение модуля нормальной упругости материала образца. Испытания начинают с приложения начальной нагрузки F_1 , после чего нагрузку увеличивают до максимально допустимой F_2 . При обоих значениях приложенных нагрузок F_1 и F_2 снимают показания по тензометрам T_1 и T_2 и заносят их в отчет. Для исключения возможной ошибки опыт повторяют. Вычисляют приращение нагрузки $\Delta F = F_2 - F_1$ и разность показаний по каждому из тензометров.

Дальнейшая обработка результатов заключается в определении относительной деформации по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{K\ell}$$

а затем напряжения

$$\sigma = \frac{\Delta t}{K\ell} E,$$

где: Δt - разность показаний каждого из тензометров, вычисленная как среднее арифметическое, K - коэффициент увеличения тензометра, ℓ - его база (мм), E - модуль упругости материала образца. После вычисления опытной величины напряжений строят в масштабе эпюру их распределения по диаметру сечения. Ее вид показан пунктирной линией на рис. 16.2.

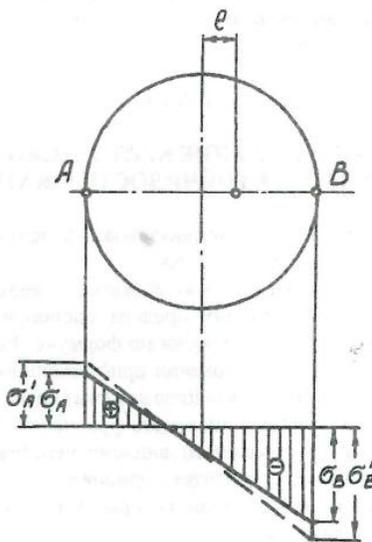


Рис. 16.2

Теоретическую величину напряжений подсчитывают по формуле

$$\sigma_{теор} = \frac{\Delta F}{A} \pm \frac{\Delta F e}{W},$$

где: ΔF - приращение нагрузки, A - площадь поперечного сечения образца, e - эксцентриситет приложения нагрузки, W - осевой момент сопротивления поперечного сечения образца.

Полученные данные также откладываются в масштабе на построенной ранее эпюре экспериментальных напряжений. В заключение подсчитывают в процентах величины расхождений между теоретическими и опытными значениями.

РАБОТА № 17

Определение критической силы при продольном изгибе

Цель работы: экспериментальная проверка формулы Эйлера для критической силы при сжатии стержня.

Для достаточно гибких стержней, которые теряют устойчивость при напряжениях, не превышающих предела пропорциональности, критическая сила определяется теоретически на основе формулы Эйлера. Однако, поскольку формула Эйлера получается с помощью приближенного дифференциального уравнения упругой линии, то в основе ее лежат те же допущения, что и при выводе указанного уравнения. Кроме того, решение Эйлера не учитывает возможного влияния неизбежного начального искривления стержня, эксцентриситета приложения нагрузки, неоднородности материала и других факторов, которые могут отразиться на действительном характере явления.

Одновременно опыты позволяют продемонстрировать характерные особенности деформации продольного изгиба, формы искривления стержня, получающиеся при разных его закреплениях, влияние закреплений и материала стержня на величину критической силы.

Испытание стального стержня

Для проведения испытаний применяется стальной образец, представляющий собой стержень прямоугольного поперечного сечения. Испытания выполняются на прессе Гагарина.

Для проведения испытаний на прессе Гагарина вместо реверсора на

коротком плече рычага силоизмерителя пресса устанавливается подставка 2 (рис. 17.1). На нагрузочный винт пресса одевается насадка 3. В специальных захватах закрепляется стержень 1. Конструкция захватов выполнена так, чтобы дать возможность осуществить различные виды закрепления концов стержня. Так, если гайка 4 одного из захватов отпущена, то этот конец стержня через втулку 5 опирается на шарик, т. е. стержень закреплен шарнирно. Если гайка 4 затягивается, то втулка 5 зажата между конусом гайки 4 и шариком 6, т. е. конец стержня защемлен. Аналогично выполняется и второй захват. При этом следует иметь виду, что при изменении схем закрепления концов изменяется расчетная длина стержня.

Величина критической силы для каждого из видов закрепления концов определяется по диаграмме деформирования (рис. 17.2)

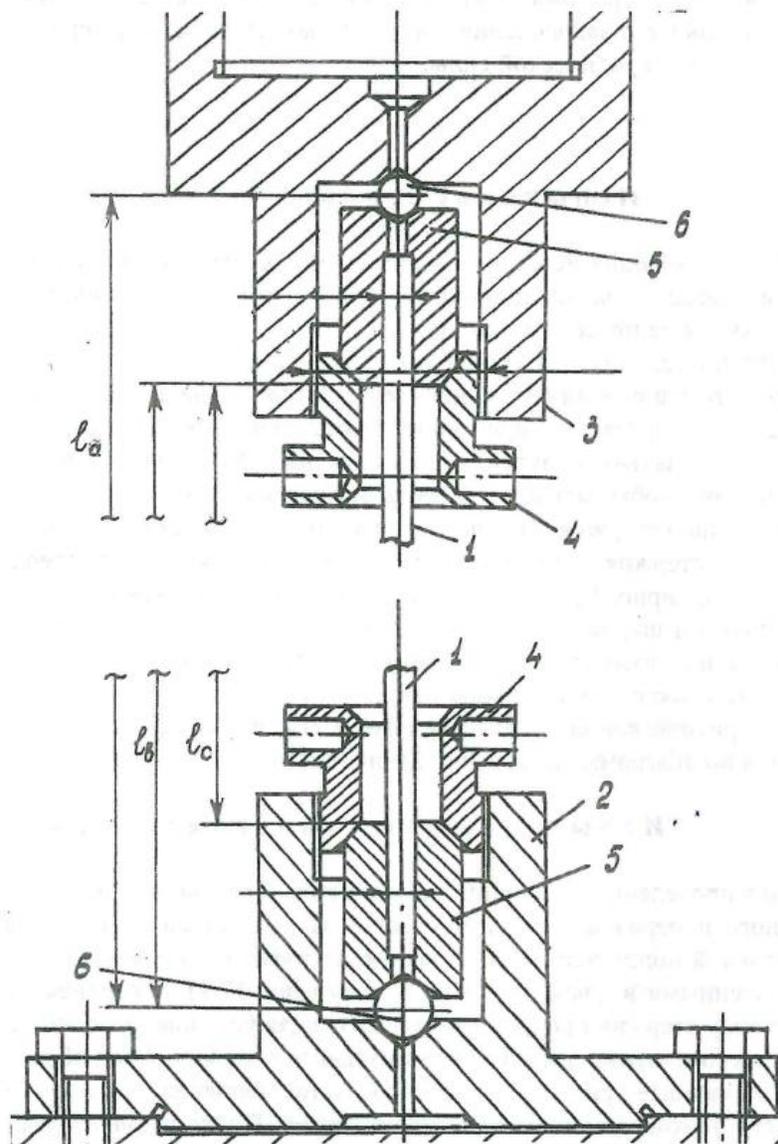


Рис. 17.1

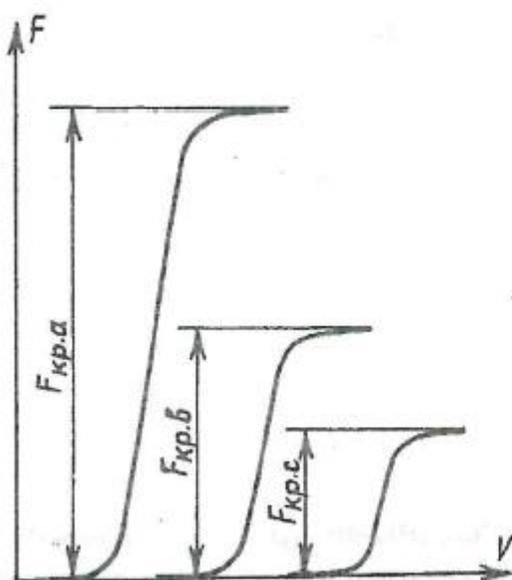


Рис. 17.2

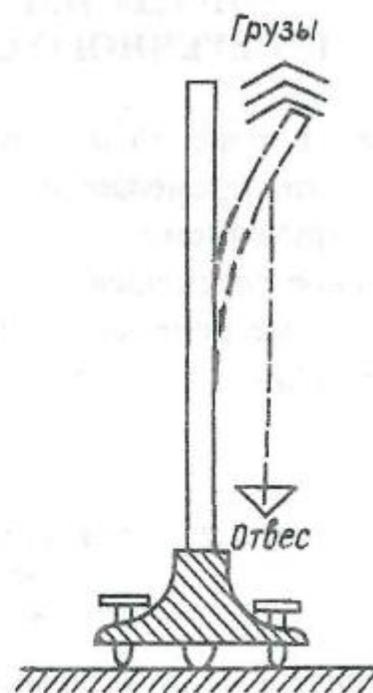


Рис. 17.3

Испытание деревянного стержня

Для проведения испытаний применяется деревянный стержень прямоугольного поперечного сечения, жестко закрепленный нижним концом в специальной подставке, которая снабжена тремя установочными винтами, расставленными в плане по треугольнику (рис. 17.3). К верхнему свободному концу стержня прикреплен отвес. Вращая установочные винты и следя за отвесом, можно добиться вертикального положения оси образца.

Сжимающее усилие в стержне создается непосредственным нагружением его верхнего конца при помощи грузов. После проверки вертикальности оси стержня начинается постепенное его нагружение. На верхний свободный конец последовательно помещаются грузы различного веса. После каждого очередного груза верхний конец стержня рукой слегка отводится в сторону (рис. 17.3) и отпускается. Возвращение стержня в первоначальное вертикальное положение означает, что нагрузка еще не достигла критической. Во время опыта надо внимательно следить за тем, чтобы была обеспечена максимально возможная центрированность приложения нагрузки.

Нагружение продолжают до тех пор, пока стержень, будучи отведен от прямолинейного положения, не останется в криволинейном состоянии

(штриховые линии на рис. 17.3). Затем подсчитывают вес грузов, включая вес гирьки отвеса. Эта нагрузка и является критической.

Обработка результатов испытаний

Записывают в отчет величины модулей нормальной упругости материала, размеры стального и деревянного стержней, значения критической силы, полученной из проведенных опытов. По формуле Эйлера определяют теоретические значения критической силы для стального и деревянного стержней при соответствующих условиях закрепления. Затем вычисляют в процентах величины расхождения теоретического и экспериментального значений критической силы.

РАБОТА № 19

Определение перемещения концевого поперечного сечения коленчатого стержня.

Цель работ: проверить экспериментальным путем расчетные зависимости, применяемые для определения перемещений при сложном изгибе с кручением.

Полное перемещение центра тяжести поперечного сечения f определяется как геометрическая сумма проекций перемещения на координатные оси (f_x, f_y, f_z):

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2 + f_z^2},$$

где f_x, f_y, f_z определяются по теореме Кастильяно;

$$f_x = \frac{\partial U}{\partial F_x}; \quad f_y = \frac{\partial U}{\partial F_y}; \quad f_z = \frac{\partial U}{\partial F_z};$$

т. е. обобщенные перемещения являются частными производными от полной потенциальной энергии деформации U по соответствующей обобщенной силе F_x, F_y, F_z .

Если в рассматриваемой системе имеют место только деформации изгиба и кручения, как в данной работе, то в выражении для потенциальной энергии деформации учитывают лишь составляющие, зависящие от крутящего и изгибающего моментов.

Установка для испытаний

Установка (рис. 19.1) представляет собой коленчатый стержень квад-

ратного поперечного сечения, расположенный в горизонтальной плоскости; один конец его жестко закреплен, а на другом (свободном конце) установлен индикатор, с помощью которого измеряется вертикальное перемещение. Другими составляющими полного перемещения можно пренебречь ввиду их малости. Коленчатый стержень нагружают с помощью гирь, укладываемых на поддон. Поддон можно перемещать по длине стержня.

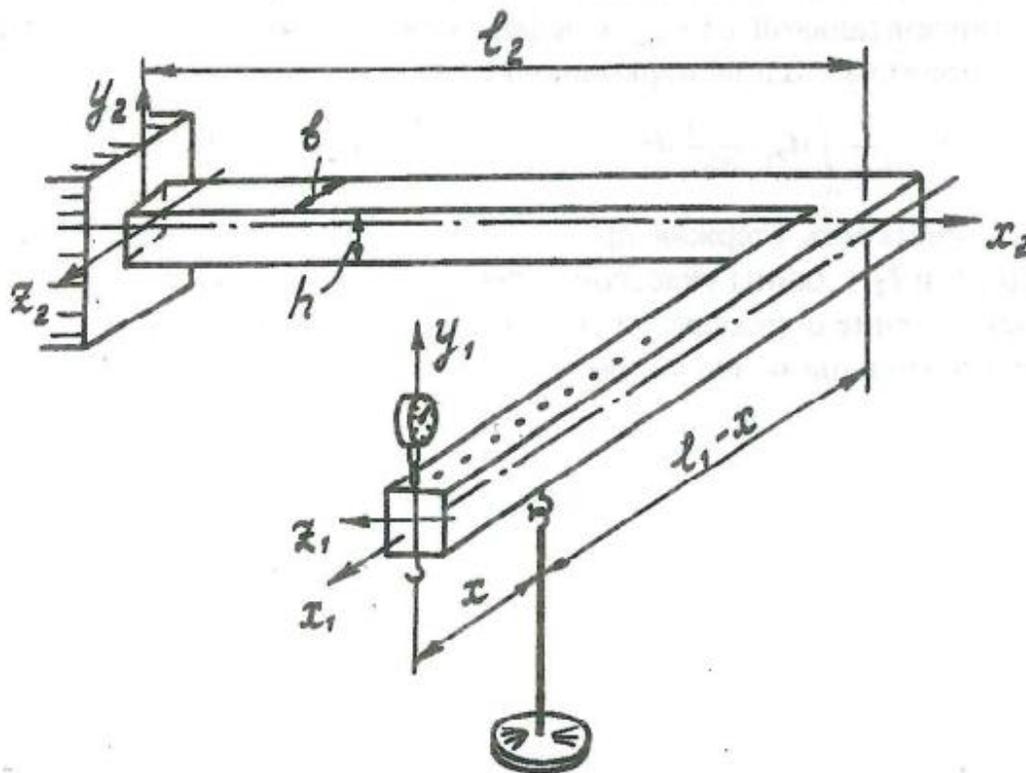


Рис. 19.1

Порядок проведения работы и обработка результатов

Перед началом испытания заносят в отчет исходные данные. На поддон помещают начальный груз F_1 и фиксируют показание индикатора. Затем груз увеличивают до значения F_2 и вновь записывают показание индикатора. Опыт рекомендуется проделать три раза для получения достоверных данных. Разность показаний Δt индикатора, соответствующих конечной и начальной нагрузке, и представляет собой вертикальное перемещение центра тяжести поперечного сечения конца коленчатого стержня. Окончательное значение Δt_{cp} находят как среднее арифметическое из полученных результатов.

Далее выполняется теоретический расчет соответствующего переме-

щения по теореме Кастильяно при нагружении коленчатого стержня силой на свободном конце. Первый участок испытывает деформацию изгиба относительно горизонтальной оси z_1 , а второй - деформацию изгиба относительно горизонтальной оси z_2 и деформацию кручения относительно оси x_2 . Таким образом, полное перемещение

$$f = \frac{1}{EI_z} \int_{l_1} M_{z1} \frac{\partial M_{z1}}{\partial F} dx_1 + \frac{1}{EI_z} \int_{l_2} M_{z2} \frac{\partial M_{z2}}{\partial F} dx_2 + \frac{1}{GI_k} \int_{l_2} M_{x2} \frac{\partial M_{x2}}{\partial F} dx_2,$$

где: EI_z - жесткость стержня при изгибе, GI_k - жесткость стержня при кручении, l_1 и l_2 - длины участков коленчатого стержня.

В заключение работы определяется величина расхождения между расчетными и опытными значениями перемещения.