



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Теоретическая и прикладная механика»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению лабораторных работ
по сопротивлению материалов на
установках лаборатории
механических испытаний ДГТУ
(ИЭиМ)**

Автор

Кравченко Б.И.,

к.т.н., доцент

Ростов-на-Дону, 2022

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ	4
2. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	5
2.1. Испытание на разрыв стального образца	5
2.2. Испытание на сжатие образцов из стали, чугуна и дерева.....	15
2.3. Испытание на кручение образцов из стали, чугуна и дерева.....	23
2.4. Определение модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона для стали	33
2.5. Испытание стали на срез	40
2.6. Методика испытания на выносливость при изгибе.	43
2.7. Определение ударной вязкости	51
3. ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ	56
3.1. Исследование распределения напряжений при поперечном изгибе	56
3.2. Внецентренное растяжении	71
3.3. Исследование перемещений при поперечном изгибе	77
3.4. Определение деформаций при косом изгибе балки	88
3.5 Проверка теоремы о взаимности перемещений.....	95
3.6. Определение опорной реакции в статически неопределимой балке	99
3.7. Испытание спиральной пружины	105
3.8. Исследование устойчивости стального стержня...	112
3.9. Проверка теории изгибающего удара	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЯ (справочное)	127



ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель лабораторного практикума по курсу сопротивления материалов:

— **привить** студентам навыки по экспериментальному определению механических характеристик различных материалов;

— **ознакомить** с методами исследования прочности и жесткости элементов конструкций с использованием стандартного оборудования;

— **научить** пользоваться аппаратурой для измерения деформаций и напряжений;

— **ознакомить** с методами обработки и представления результатов измерений.

Приведенные темы лабораторных работ из-за ограниченного объема учебных часов, не претендуют на охват всего многообразия задач сопротивления материалов, а включают лишь основные работы, выполняемые на установках лаборатории механических испытаний ДГТУ (ИЭМ)

Существуют и другие методы экспериментального исследования моделей, деталей машин и элементов конструкций (голографический, фотоупругости, хрупких покрытий, муаровых полос, рентгеновский и др.). Их применяют в зависимости от объекта исследования, наличия оборудования и др. Описание лабораторных работ, основанных на применении этих методов, можно найти в работах [2, 5, 7], приведенных в списке использованной литературы.

Перед тем как приступить к выполнению заданной лабораторной работы, студент должен:

— **усвоить** краткие теоретические сведения по теме;

— **изучить** принцип работы и устройство испытательной машины или установки, приборов для измерения напряжений и деформаций;

— **усвоить** методику выполнения работы и способы обработки экспериментальных данных.

1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

К выполнению лабораторных работ студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности, противопожарным мерам и росписи в специальном журнале.

Все механические испытания материалов проводятся учебно-вспомогательным персоналом на испытательных машинах. Студенты самостоятельно выполняют работы только на специальных лабораторных установках под руководством преподавателя.

Студентам категорически запрещается без разрешения преподавателя включать лабораторное оборудование в электросеть и изменять режим его работы.

Все измерения образцов, необходимые для выполнения лабораторных испытаний, проводятся до установки их в захваты испытательных машин, а размеры после испытания можно производить только после снятия образцов с машины. Для визуального осмотра результатов испытаний можно подходить к машине только с разрешения преподавателя. При использовании сменных грузов не следует складывать их на краю стола во избежание падения и, чтобы не травмировать ими окружающих.

При нарушении требований техники безопасности студент отстраняется от дальнейшего выполнения лабораторной работы. Если действия студента не привели к серьезным последствиям, то он может быть вновь допущен к лабораторным занятиям лишь после повторного инструктажа.

2. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1. Испытание на разрыв стального образца

Цель работы: изучение процесса деформирования при растяжении образца из малоуглеродистой стали, определение основных механических характеристик прочности, пластичности и марки стали.

Теоретическая часть работы. При определении качества конструкционных материалов, выпускаемых промышленностью, одним из основных видов испытаний являются испытания на растяжение. Результаты испытаний позволяют судить о прочности материалов при статических нагрузках, выбирать материал для проектируемой конструкции и использовать его характеристики при расчетах на прочность деталей машин и элементов конструкций.

Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали.

На специальных испытательных машинах получают автоматически диаграмму растяжения стандартного образца в координатах: нагрузка F - удлинение Δl . На этой диаграмме можно выделить следующие характерные участки (рис. 2.1.1.). Небольшой криволинейный начальный участок O_1A является результатом обжатия головок образца в захватах и устранения зазоров в узлах машины. Его исключают, аппроксимируя (удлиняя) участок AB до пересечения с осью абсцисс, и получают начало координат – O .

Участок OB называют зоной упругости. Здесь материал подчиняется закону Гука и удлинение прямо пропорционально нагрузке до некоторой силы $F_{ш}$ (точка B). После снятия нагрузки деформация $\Delta l = OB_1$ исчезает.

Деформацию, которая полностью исчезает, после снятия нагрузки называют **упругой деформацией**. При увеличении нагрузки до F_y (участок BC) начинается отклонение диаграммы от прямой, а после разгрузки появляются остаточные дефор-

го увеличения нагрузки F_T происходит существенное удлинение образца. Такой процесс деформации, называемый **текучестью материала**, он сопровождается **остаточными (пластическими)** деформациями, не исчезающими после разгрузки образца.

Участок DE называют зоной упрочнения, т.к. материал вновь способен сопротивляться растяжению с повышением нагрузки до величины F_B (точка E). Затем на участке EK на образце появляется местное сужение – **шейка**. Участок EK называют зоной местной текучести, т.к. здесь удлинение образца происходит за счет деформации в зоне шейки вплоть до момента разрыва в точке K . Упругая деформация $\Delta l''_y = NN_1$ при этом исчезнет и образец получит полную остаточную деформацию после разрыва $\Delta l_p = ON$.

Основные механические характеристики материала.

Диаграмма, показанная на рис. 2.1.1, характеризует свойства не **материала**, а **образца**, т.к. при испытании нескольких образцов из одного и того же материала, но различных размеров, получают различные подобные по форме диаграммы. Для получения данных о **свойствах** материала строят диаграмму в координатах $\sigma - \varepsilon$.

По диаграмме растяжения (рис. 2.1.1) определяют следующие механические характеристики материала:

а) характеристики прочности:

- **предел пропорциональности** – это максимальное напряжение, до которого материал подчиняется закону Гука ($\sigma = E \cdot \varepsilon$):

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}; \quad (2.1.1)$$

- **предел упругости** (условный) – это напряжение, при котором в материале возникают остаточные деформации не более $\varepsilon = 0,05\%$:

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}; \quad (2.1.2)$$

- **предел текучести** (физический) – это напряжение, при котором происходит рост пластической деформации без заметного увеличения нагрузки

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}. \quad (2.1.3)$$

У высокоуглеродистых сталей, цветных металлов, пластмасс и ряда других материалов диаграмма растяжения не имеет площадки текучести. В этом случае, например, для высокоуглеродистой стали (рис. 2.1.2) определяют **условный** предел текучести при нагрузке $F_{0,2}$, соответствующей остаточному удлинению образца $\varepsilon = 0,2\%$:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}; \quad (2.1.4)$$

- **предел прочности (временное сопротивление)** – это отношение максимальной силы, которую может выдержать образец, к его начальной площади

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_0}. \quad (2.1.5)$$

Кроме того, можно получить **истинное** сопротивление разрыву

$$\sigma_{ВИ} = \frac{F_K}{A_{III}}. \quad (2.1.6)$$

где A_{III} – площадь поперечного сечения образца в зоне разрыва шейки.

б) характеристики пластичности:

- **относительное остаточное удлинение** после разрыва

$$\delta = \frac{\Delta l_p}{l_0} 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100\%; \quad (2.1.7)$$

- **относительное остаточное сужение** после разрыва

$$\Psi = \frac{\Delta A}{A_0} 100\% = \frac{A_0 - A_{III}}{A_0} 100\%. \quad (2.1.8)$$

Удельная работа – характеризует способность материала поглощать энергию при разрыве, вязкость материала и сопротивляемость его воздействию динамических нагрузок:

$$a = \frac{W}{V_0} \left[H \cdot M / M^3 \right] \quad (2.1.9)$$

где W_F - работа, затраченная на разрыв образца и равная площади диаграммы $OA...EKN_1$, вычисляется с учетом масштабов нагрузки и удлинения по приближенной формуле:

$$W_F = 0,85 F_B \Delta l;$$

$V_0 = A_0 l_0$ - объём расчетной части образца до испытания.

Из всех выше перечисленных характеристик в инженерной практике используются основные характеристики: $\sigma_T, \sigma_B, \delta, \Psi, a$, т.к. их определение не вызывает технических затруднений.

Влияние повторных нагрузок на механические свойства материалов. Наклеп.

Если разгрузить образец после достижения в нем напряжений выше предела текучести σ_T , например, в точке L диаграммы, то перо самописца прочертит линию LM , параллельную линии OB . При этом упругая деформация $\Delta l_y' = MM_1$ исчезнет, а останется пластическая (остаточная) - $\Delta l_{ост} = OM$.

При повторном нагружении перо самописца прочертит линию, практически совпадающую с линией разгрузки. В результате получают диаграмму $MLEK$. При этом возрастает нагрузка, до которой материал подчиняется закону Гука, и исчезают площадка текучести и часть диаграммы, расположенная левее линии ML , т.е. начало координат фактически переместится в точку M . Остаточное удлинение после разрыва будет меньше, чем в образце, не подвергавшемся предварительной пластической деформации, т.е. $MN \angle ON$.

Явление повышения предела пропорциональности после пластической деформации материала при повторном нагружении называется **наклепом**. При этом снижаются пластические свойства материала.

Описание испытательной машины и образцов

Работу выполняют на универсальной гидравлической испытательной машине марки УГ-20, которая предназначена для испытаний образцов материалов и элементов конструкций статическими нагрузками.

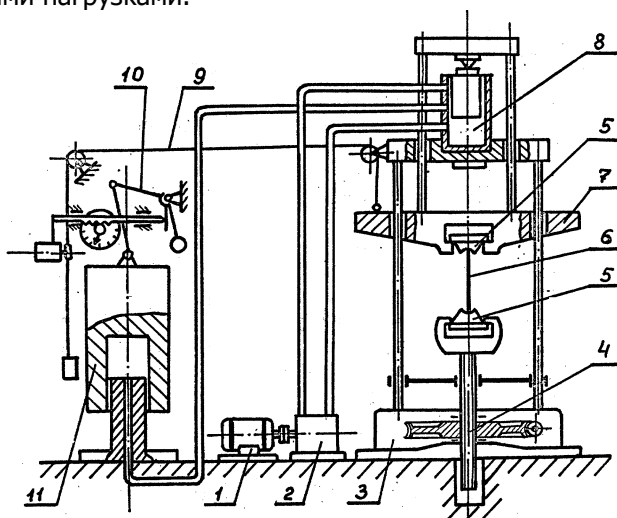


Рис. 2.1.3. Схема гидравлической испытательной машины УГ-20

Основными частями машина УГ-20 (рис. 2.1.3) являются: насосный агрегат, пресс, силоизмеритель.

Насосный агрегат состоит из электродвигателя 1 и масляного насоса высокого давления 2. Насос размещён в баке с залитым маслом. Максимальное давление рабочей жидкости (масла), создаваемое насосом, составляет около 20 МПа. Насос трубопроводами высокого давления сообщается с силовым гидrocилиндром 8 и с гидrocилиндром 11 силоизмерителя.

Пресс имеет основание 3, внутри которого находится червячный редуктор для подъёма и опускания винта 4 вместе с нижним захватом 5. Верхний захват смонтирован в траверсе 7. С помощью захватов 5 закрепляется образец 6, испытываемый на растяжение. Усилие к образцу передаётся от гидроцилиндра 8, перемещающего по направляющим траверсу (стол) 7. Перемещение траверсы через тросик 9 передаётся на барабан 12 для регистрации деформации (удлинения) образца.

Силоизмеритель через гидроцилиндр 11 передаёт усилие на рычажную систему 10 с противовесом и одновременно на рейку с закреплённым на ней пером самописца и стрелку циферблата, регистрируя нагрузку. Машина снабжена самопишущим диаграммным аппаратом 12 для записи диаграммы в координатах: нагрузка – перемещение.

Образцы для испытаний. Для определения механических характеристик материалов используют стандартные цилиндрические и плоские образцы согласно ГОСТ 1497-73 (рис. 2.1.4): а) длинный (десятикратный) образец, у которого расчетная длина $l_0 = 10d_0$ или $l_0 = 11,3\sqrt{A_0}$; б) короткий (пятикратный) образец, у которого $l_0 = 5d_0$ или $l_0 = 5,65\sqrt{A_0}$.

Расчетной длиной l_0 образца называется длина его цилиндрической части, в пределах которой производится измерение остаточного удлинения после разрыва. Конические переходы обеспечивают уменьшение **концентрации** напряжений и исключают вероятность разрушения образца у головок. Поверхность образца тщательно обрабатывают.

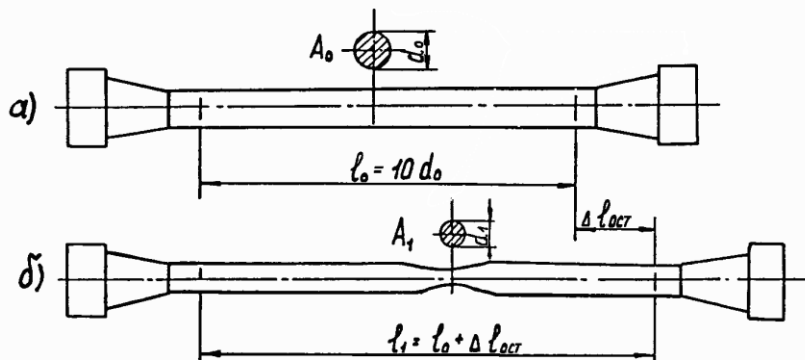


Рис. 2.1.4. Эскиз цилиндрического длинного образца

$$l_0 = 10 \cdot d_0$$

а – до нагружения; **б** – после разрыва

Для определения продольных деформаций на рабочей части образца наносят риски через 5 или 10 мм с помощью специальной делительной машины. Аналогичную форму имеют и плоские образцы.

Методика проведения опыта и обработка результатов:

1. Для испытания предлагаются круглые или плоские образцы, изготовленные из малоуглеродистой стали. Затем для цилиндрических образцов измеряют штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм в трех сечениях по длине диаметр d_0 , а для плоских – ширину b_0 и высоту h_0 поперечного сечения. По наименьшему из полученных размеров определяют A_0 . Замеряют расчетную длину образцов l_0 также с точностью 0,1 мм и заносят все данные в журнал наблюдений.

2. Вставляют образец в захваты 5 машины. Слегка натянув образец, проверяют диаграммный аппарат и наносят ось абсцисс диаграммы, проворачивая барабан 12 вручную.

3. Включают машину и начинают нагружение. В точке L диаграммы сбрасывают нагрузку практически до нуля, а затем

снова повышают её (демонстрация наклепа) и доводят образец до разрушения. При этом скорость нагружения не должна превышать 0,1 длины образца в минуту, иначе будут получены завышенные значения механических характеристик.

4. Вынимают разрушенный образец из захватов машины, измеряют диаметр его в месте разрыва $d_{ш}$ и длину после разрыва l_1 , сложив обе его части.

5. Зная масштаб полученной диаграммы, определяют значения F_T, F_B, F_K и вычисляют характеристики прочности σ_T и σ_B по формулам (2.1.3) и (2.1.5), а истинное значение сопротивления разрыву $\sigma_{вн}$ - по формуле (2.1.6).

6. Определяют характеристики пластичности δ и Ψ по формулам (2.1.7) и (2.1.8).

7. Вычисляют удельную работу A , затраченную на разрыв образца, по формуле (2.1.9).

8. По полученным значениям σ_T , σ_B и δ из справочных данных (см. Приложения – Таблица П.1) определяют марку стали. Остальные показатели характеризуют, но не определяют марку материала.

Содержание отчёта

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Испытательная машина (тип, марка).
4. Эскизы образцов (до и после испытания).
5. Исходные данные:
 - 5.1. Диаметр образца до испытания d_0 .
 - 5.2. Площадь поперечного сечения до испытания A_0 .
 - 5.3. Диаметр образца после испытания в месте шейки $d_{ш}$.
 - 5.4. Площадь поперечного сечения в месте шейки $A_{ш}$.
 - 5.5. Расчётная длина образца до испытания l_0 .
 - 5.6. Длина образца после испытания l_1 .

6. Копия машинной диаграммы растяжения образца. Масштаб нагрузок. Масштаб удлинения.
7. Результаты испытания:
 - 7.1. Нагрузка, соответствующая пределу текучести F_T .
 - 7.2. Нагрузка, соответствующая пределу прочности F_b .
 - 7.3. Нагрузка в момент разрыва образца F_K .
8. Основные механические характеристики прочности:
 - 8.1. Предел текучести σ_T .
 - 8.2. Предел прочности σ_B .
 - 8.3. Истинное напряжение разрыва σ_{BH} .
9. Основные механические характеристики пластичности после разрыва.
 - 9.1. Относительное остаточное удлинение δ .
 - 9.2. Относительное остаточное сужение ψ .
10. Прочие механические характеристики.
 - 10.1. Работа сил растяжения W_F .
 - 10.2. Удельная работа деформации a .
11. Анализ результатов. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Для чего нужна диаграмма растяжения материала, и в каких координатах она строится?
3. На какой машине проводятся испытания? Опишите её конструкцию.
4. Как работают силоизмерительное и записывающее устройство?
5. Какие образцы применяют при испытании на растяжение? Назовите их основные характеристики.
6. Почему диаграмма растяжения, полученная на машине, имеет начальный криволинейный участок O_1A ?
7. Что характеризует диаграмма растяжения, построенная в координатах $F - \Delta l$: свойства образца данных размеров или свойства материала?

8. Как определяется начало координат машинной диаграммы $F - \Delta l$?
9. Какие зоны имеет диаграмма растяжения? Опишите их.
10. Для какого участка диаграммы справедлив закон Гука?
11. Что понимают под пределом пропорциональности, пределом упругости, пределом текучести и пределом прочности?
12. Для каких материалов определяют условный предел текучести? Какова методика его расчета?
13. Какие деформации называют упругими, а какие остаточными (пластическими)? Как их определить на диаграмме растяжения?
14. Чем отличаются друг от друга диаграммы растяжения при пластичном и хрупком разрушении материалов?
15. Какие характеристики прочности материалов Вам известны?
16. Какие характеристики пластичности материалов Вам известны?
17. Что называют наклёпом? Как изменяются механические свойства материала после наклёпа?
18. Как используют в технике явление наклёпа? Приведите примеры.
19. Когда появляется шейка на образце?
20. Чем характеризуется удельная работа разрыва и как её определяют?
21. На основании каких данных испытаний определяют марку стали?

Литература: [5] - §§13 – 16; [6] - §§ 3.7 - 3.8; [7] - §10.

2.2. Испытание на сжатие образцов из стали, чугуна и дерева

Цель работы: изучение поведения пластичных, хрупких и анизотропных материалов при сжатии и определение их механических характеристик.

Теоретическая часть работы. Помимо испытания на растяжение вторым основным видом является испытание материалов на сжатие. При этом, так же как и при растяжении, получают диаграмму в координатах $F - \Delta l$. Рассмотрим особенности поведения различных материалов при сжатии.

б) сжатие чугунного образца (рис. 2.2.1, кривая 2). Линейной зависимости между нагрузками и деформациями не наблюдается практически с начала нагружения. Однако в условиях тех небольших деформаций, при которых чугун работает в деталях машин и сооружений, диаграмму $F - \Delta l$ принимают прямолинейной и считают, что материал подчиняется закону Гука. При этом на диаграмме четко выражена только разрушающая нагрузка F_g . Отношение F_g к первоначальной площади A_0 поперечного сечения образца называют **пределом прочности (временным сопротивлением)** чугуна на сжатие.

$$\sigma_g^{сж} = \frac{F_g}{A_0}. \quad (2.2.2)$$

Образец, укорачиваясь незначительно, принимает бочкообразную форму, и разрушается внезапно с образованием трещин, наклонённых к оси образца под углом $\alpha = (45 - 50)^\circ$ (рис. 2.2.2, б). Образец разрушается под действием максимальных касательных напряжений τ_{\max} , возникающих на площадках, наклонённых к оси на угол $\alpha = 45^\circ$. Нагрузочная способность чугуна при разрушении падает практически мгновенно, что характерно для **хрупких** материалов.

в) сжатие деревянных образцов вдоль и поперек волокон. Вследствие волокнистого строения древесины является **анизотропным** материалом, механические свойства которого **не одинаковы** по разным направлениям. При сжатии вдоль волокон (рис. 2.2.1, кривая 3) вплоть до разрушения образец приобретает меньшие остаточные деформации по сравнению со сжатием поперек волокон. При этом диаграмма $F - \Delta l$ внешне похожа на диаграмму сжатия чугуна. При предельной нагрузке F_g происходит образование поперечных складок и смятие торцов. Нередко возникают продольные трещины. Зависимость между нагрузкой и деформацией близка к линейной почти до самого разрушения. Отношение разрушающей нагрузки к первоначальной площади поперечного сечения называют **пределом прочности (временным сопротивлением)** дерева вдоль волокон и рассчитывают по формуле (2.2.2).

При сжатии образца поперек волокон (горизонтальное направление расположения волокон) диаграмма $F - \Delta l$ имеет другой вид (рис. 2.2.1, кривая 4). На начальном участке материал следует закону Гука, т.е. наблюдается прямолинейный участок при возрастании нагрузки до $F_{\text{пл}}$. Это позволяет определить **предел пропорциональности**

$$\sigma_{\text{пл}}^{\text{сж}} = \frac{F_{\text{пл}}}{A_0}. \quad (2.2.3)$$

Затем наблюдается быстрое возрастание деформации при незначительном увеличении нагрузки. Момент разрушения образца зафиксировать практически не удастся. Значительный рост деформаций позволяет считать, что несущая способность образца исчерпана (происходит процесс прессования). Поэтому за разрушающую принимают такую нагрузку F'_g , при которой образец укорачивается на одну треть своей первоначальной высоты h .

Условный **предел прочности (временное сопротивление)** дерева поперек волокон вычисляють по известной формуле (2.2.2). При этом прочность дерева при сжатии вдоль волокон в 8-10 раз больше, чем поперек волокон.

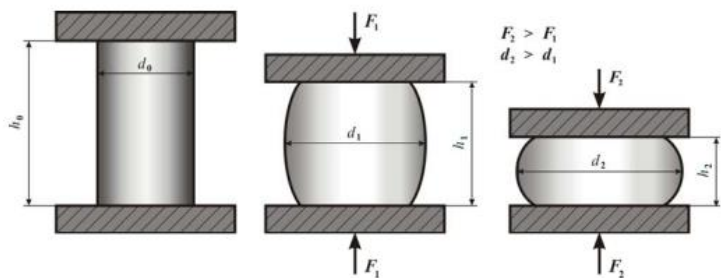
Описание испытательной машины и образцов.

Работа выполняется на универсальной испытательной машине УГ-20, описанной в лабораторной работе 2.1.

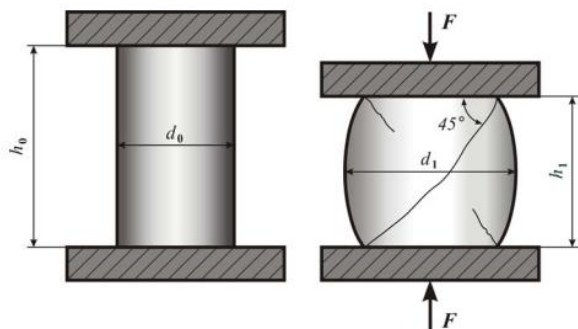
Для испытания на сжатие пластичных материалов (малоуглеродистые стали, медь, алюминий) и хрупких (чугун) применяют цилиндрические образцы диаметром d_0 и высотой $h_0 = (1,5 \div 2,0)d_0$ (рис. 2.2.2, а, б).

При меньшей высоте образца силы трения, возникающие на торцах, оказывают значительное влияние на развитие деформаций и на **прочность** материалов. Образцы с большей высотой не рекомендуется применять вследствие влияния продольного изгиба на результаты испытаний.

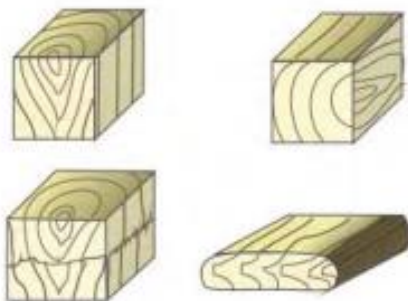
При испытании анизотропных материалов кубики изготавливают со стороной 20 мм (например, сосна).



а)



б)



в)

Рис. 2.2.2. Особенности разрушения образцов из различных материалов: а) сталь; б) чугун; в) дерево вдоль и поперек волокон

Коэффициент анизотропии характеризует различие механических свойств материала вдоль и поперек волокон, равен отношению предела прочности материала при сжатии вдоль волокон $\sigma_{\epsilon}^{CЖ'}$ к пределу прочности при сжатии поперек волокон $\sigma_{\epsilon}^{CЖ''}$, т.е.

$$K = \frac{\sigma_{\epsilon}^{CЖ'}}{\sigma_{\epsilon}^{CЖ''}}. \quad (2.2.4)$$

Методика проведения опыта и обработка результатов.

1. Штангенциркулем измеряют поперечные размеры и высоту каждого образца с точностью 0,1 мм и записывают в журнал наблюдений.

2. Каждый образец помещают на испытательной машине в центре стола 10 (рис. 2.3). Опустив перо самописца на диаграммный барабан, проворачивают последний вручную и наносят нулевую отметку – ось Δl . Затем включают машину.

3. При испытании стального образца нагружение продолжают до тех пор, пока полная деформация его не составит примерно $\Delta h = 1/3$ от первоначальной высоты h . По диаграмме определяют положение площадки текучести и, зная масштаб нагрузки, вычисляют предел текучести на сжатие $\sigma_T^{CЖ}$ по формуле (2.2.1).

4. При испытании чугунного образца деформирование продолжают до его разрушения. По показанию контрольной стрелки силоизмерителя и по полученной диаграмме определяют разрушающую нагрузку F_{ϵ} и вычисляют предел прочности на сжатие $\sigma_{\epsilon}^{CЖ}$ по формуле (2.2.2).

5. При сжатии дерева вдоль волокон нагрузка после достижения разрушающего значения F_{ϵ} начнет уменьшаться. По

этой максимальной нагрузке вычисляют предел прочности на сжатие $\sigma_{\sigma}^{CЖ}$ по формуле (2.2.2).

6. При сжатии дерева поперек волокон образец устанавливают так, чтобы сжатие производилось в радиальном направлении по отношению к годовым кольцам. При нагружении явного разрушения не происходит. В процессе испытания ведут наблюдение за уменьшением высоты образца. Нагружение прекращают, когда высота образца уменьшается на одну треть от ее первоначального значения. По показанию контрольной стрелки силоизмерителя, соответствующему этому моменту, вычисляют условный предел прочности на сжатие $\sigma_{\sigma}^{CЖ}$ по формуле (2.2.2), а проведя касательную к начальному участку диаграммы и определив нагрузку $F_{пл}$, вычисляют предел пропорциональности $\sigma_{пл}$ на сжатие по формуле (2.2.3).

7. По формуле (2.2.4) рассчитывают коэффициент анизотропии для дерева.

8. В заключение вычерчивают эскизы образцов до и после испытания. Данные испытаний и вычислений заносят в таблицу журнала наблюдений. Делают анализ характера разрушения образца.

Содержание отчёта

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Испытательная машина.
4. Эскизы образцов.
5. Основные исходные данные:
 - 5.1. Размеры образцов: диаметр d ; высота h ; ширина a ; длина b .
 - 5.2. Площади поперечных сечений образцов A_0
6. Копии машинных диаграмм сжатия образцов.
7. Результаты испытаний.

Наименование величин	Обозначение	Размерность	Сталь	Чугун	Дерево	
					вдоль волокон	поперёк волокон
1	2	3	4	5	6	7
Нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности	$F_{пц}$					
Нагрузка, соответствующая пределу прочности	F_v					
Предел пропорциональности	$\sigma_{пц}$					
Предел прочности	σ_v					
Предел текучести	σ_T					

8. Анализ результатов. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. На какой машине выполняется работа?
3. Для чего нужна машинная диаграмма сжатия? В каких координатах получают ее при испытаниях?
4. Чем отличаются диаграммы сжатия пластичных и хрупких материалов?
5. Какие материалы называют анизотропными?
6. Приведите пример из техники с рациональным использованием анизотропных свойств материала.

7. Какие явления можно ожидать по сравнению с обычным испытанием стального образца на сжатие, если торцевые поверхности образца смазать машинным маслом?
8. Чем характерны площадки, наклоненные под углом $\alpha = 45^{\circ}$ к продольной оси центрально сжатых стержней?
9. Какие характерные особенности разрушения проявляются у образцов из стали, чугуна и дерева при испытании на сжатие?
10. Какие механические характеристики материалов получают при испытании на сжатие пластичных материалов? Хрупких? Анизотропных?
11. Отличаются ли значения пределов текучести при сжатии и растяжении образцов из малоуглеродистой стали?
12. Что происходит с образцом из дерева при испытании нагружением поперек волокон? Можно ли образец довести до полного разрушения?
13. Можно ли оценить механические свойства материалов непосредственно по машинной диаграмме?
14. В чем отличие в поведении стального образца при испытании на сжатие и на растяжение?
15. Как определить предельную нагрузку при сжатии образца из дерева вдоль и поперек волокон?
16. Как определить коэффициент анизотропии?

Литература: [5] - §13, 17; [6] - § 3.10; [7] - §10.

2.3. Испытание на кручение образцов из стали, чугуна и дерева

Цель работы: изучение процесса разрушения и определение механических характеристик стали, чугуна и дерева при кручении.

Теоретическая часть работы. В инженерной практике на кручение работают валы машин, витые пружины и др. При кручении стержня круглого и кольцевого поперечных сечений возникает деформация чистого сдвига. При этом максимальные касательные напряжения τ_{\max} возникают в поверхностном слое стержня в поперечных и продольных направлениях, а главные нормальные напряжения

$\sigma_1 = \tau_{\max}$, $\sigma_3 = -\tau_{\max}$ лежат в плоскости, касательной к поверхности стержня, и направлены под углом $\alpha = 45^\circ$ к его образующей (см. рис. 2.3.3, а).

В процессе закручивания стандартных образцов получают диаграммы в координатах крутящий момент M_K - угол закручивания φ .

При испытании **стального образца** (рис. 2.3.1, а) при увеличении крутящего момента от нуля до некоторой величины $M_{\text{плц}}$ сохраняется прямая пропорциональная зависимость между величиной угла закручивания и крутящим моментом M_K , т.е. в этом интервале справедлив закон Гука при сдвиге $\tau = G \gamma$, и угловую деформацию образца определяют по формуле

$$\varphi = \frac{M_K l_0}{GJ_P}. \quad (2.3.1)$$

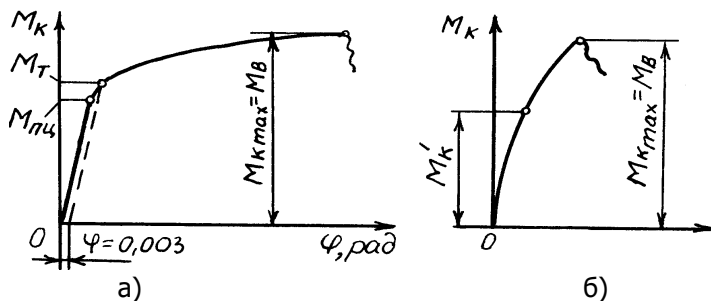


Рис. 2.3.1. Диаграммы кручения образцов:
а) малоуглеродистая сталь; б) чугун

Из этой формулы можно получить опытное значение модуля сдвига

$$G^0 = \frac{M_K l_0}{\varphi \cdot J_P} \quad (2.3.2)$$

Теоретическое значение модуля сдвига вычисляют, используя справочные данные, по известной формуле

$$G^T = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2.3.3)$$

где E и μ - табличные значения модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона для материала образца, соответственно.

Предел пропорциональности при кручении

$$\tau_{\text{пц}} = \frac{M_{\text{пц}}}{W_P} \quad (2.3.4)$$

где $W_P = \pi d_0^3 / 16$ - полярный момент сопротивления поперечного сечения стержня с расчетным диаметром d_0 .

При этом касательные напряжения в сечении распределяются по линейному закону (рис.2.3.2, а). Дальнейшее нагружение образца приводит к нарушению прямой пропорциональности (рис. 2.3.1, а), и диаграмма переходит в пологую кривую, т. е. в материале образца развиваются пластические деформации сначала в поверхностном слое при напряжениях, равных пределу текучести τ_T , а при дальнейшем деформировании эта зона достигает глубоких слоев, образуя кольцевую зону пластического деформирования. В центральной части сечения напряжения будут ниже τ_T , т. е. там остается упругая зона (рис. 2.3.2 б).

В качестве **предела текучести** τ_T условно принимают напряжения, при которых в образце появляются остаточные угловые деформации $\varphi = 0,003$ рад.

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_P} \quad (2.3.5)$$

В пределе пластическая зона заполнит все сечение (рис. 2.3.2, в), несущая способность материала будет исчерпана и напряжения во всех точках сечения будут равны пределу текучести τ_T .

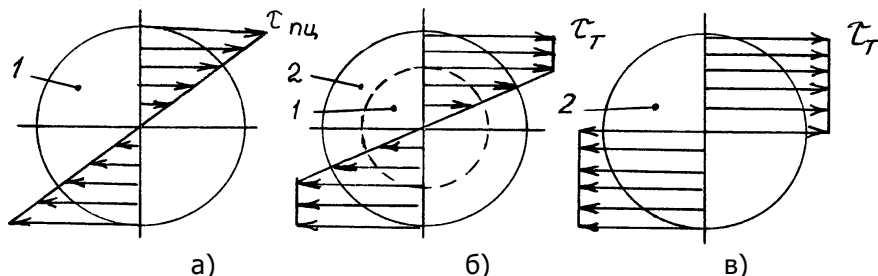


Рис. 2.3.2. Эпюры касательных напряжений при кручении
 а) упругая стадия; б) стадия пластического деформирования; в) стадия разрушения; 1 – упругая зона; 2 – пластическая зона

В момент разрушения образца вследствие упрочнения материала условная величина предела прочности τ_B может быть определена по формуле:

$$\tau_B = \frac{M_{\max}}{W_{\text{пл}}} \quad (2.3.6)$$

где $W_{\text{пл}} = \pi d_0^3 / 12$ – пластический момент сопротивления поперечного сечения при кручении.

Разрушение стального образца происходит по плоскости, перпендикулярной к оси образца, вследствие **сдвига (среза)** от действия τ_{\max} . Так разрушаются при кручении все пластичные материалы (рис.2.3.3, б).

Чугунный образец с увеличением крутящего момента не совсем строго следует закону Гука, т. е. диаграмма $M_K - \varphi$ вплоть до разрушения несколько криволинейна (рис. 2.3.1, б). Разрушение образца происходит вследствие **отрыва** по наклонным винтовым сечениям, расположенным под углом $\alpha \approx 45^\circ$ к его образующим (рис. 2.3.3, б), под действием главных растягивающих напряжений $\sigma_1 = \tau_{\max}$. Зернистый характер излома является следствием разрушения материала путём **отрыва** частиц. А условный **предел прочности** материала равен:

$$\tau_B = \tau_{\max} = \frac{M_{\kappa \max}}{W_P}. \quad (2.3.7)$$

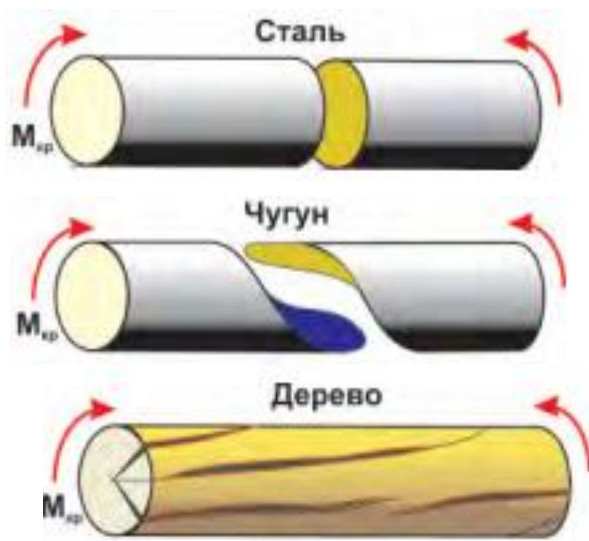
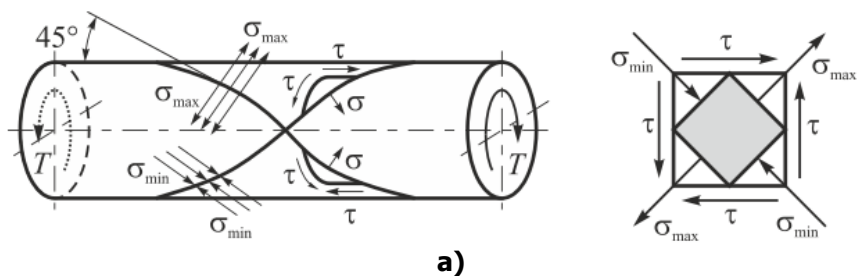


Рис. 2.3.3. Напряжённое состояние (а) и характер разрушения образцов (б) при кручении

Деревянный образец разрушается в результате возникновения продольных трещин (Рис. 2.3.3, б). Это подтверждает наличие касательных напряжений τ на продольных площадках, проходящих через ось стержня.

ОПИСАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ И ОБРАЗЦОВ. Работа выполняется на машине км-50 (рис. 2.3.4). машина имеет станину, на которой смонтированы механизмы нагружения и силоизмерения.

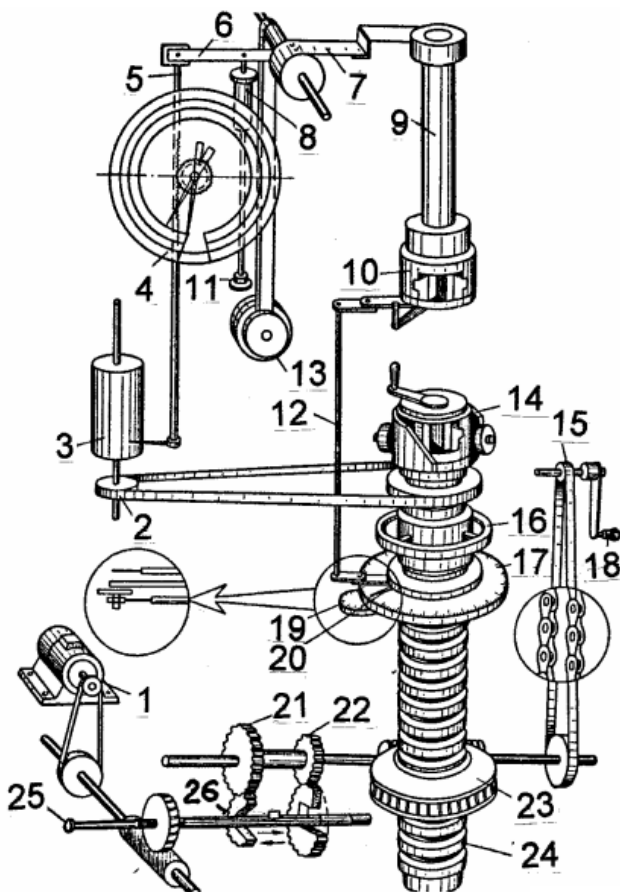


Рис. 2.3.4 Кинематическая схема испытательной машины КМ-50

Механизм нагружения. Нагружение образца, установленного в нижнем 14 и в верхнем 10 захватах машины, осуществляется следующим образом. Крутящий момент на валу

электродвигателя 1 через клиноременную передачу приводит во вращение червячную пару, которая через зубчатые зацепления 21, 22 и 23 вращает ходовой винт 24 с нижним захватом 14.

Для ручного нагружения образца машина снабжена также ручным приводом, состоящим из рукоятки 18 и цепной передачи 15, нижнее зубчатое колесо которого вращает через зубчатую передачу 23 ходовой винт 24. Нагружение можно производить при двух скоростях: 1 об/мин и 0,3 об/мин (перемещающая стержень 25 со скользящей шпонкой 26 до зацепления ее с зубчатыми колесами 21 или 22). При ручном приводе шпонка 26 вообще выводится стержнем 25 из зацепления с зубчатыми передачами 21 и 22. При закреплении в захватах машины образцов различной длины нижний захват 14 перемещают по высоте, вращая маховик 16. Угол закручивания в пределах 360° отсчитывают по шкале 17 со стрелочным указателем 20. Для отсчета целого числа оборотов машина снабжена счетчиком 19 с пределом измерения 10 оборотов. Показания угла закручивания по шкале 17 соответствуют относительному углу закручивания нижнего 14 и верхнего 10 захватов машины, что обеспечивается корректором 12.

Механизм силоизмерения. При кручении образца верхний захват 10 наматывает на свой вал 9 тонкую гибкую тягу 7, которая отклоняет маятник 13 до тех пор, пока не будет уравновешен крутящий момент, возникающий в образце.

При отклонении маятника 13 рычаг 6 перемещает зубчатую рейку 5, приводящую во вращение зубчатое колесо, насаженное на ось стрелки круговой шкалы 4 моментов. Одновременно перо, закрепленное на рейке 5, записывает на диаграммном аппарате 3 зависимость $M_K - \varphi$. Масштаб записи угла закручивания φ можно менять в пределах: 1 мм = $0,5^{\circ}$ или 1 мм = $0,1^{\circ}$. Барабан 3 приводится во вращение от ходового винта 24 гибкой связью 2. Для предотвращения резкого падения маятника 5 вниз после разрушения образца к рычагу 6 присоединен шток масляного амортизатора 8. Для регулирования скорости опускания маятника предусмотрен клапан 11.

Образцы для испытания на кручение (рис. 2.3.5). Длина рабочей цилиндрической части стандартного образца обычно составляет $l_0 = 10d_0$. Для закреплении в захватах

машины образцы имеют головки с лысками (гранями). С целью уменьшения концентрации напряжений переход от цилиндрической части образца к головкам выполнен по радиусу.

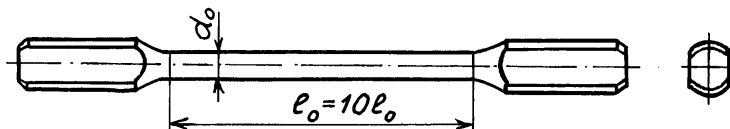


Рис. 2.3.5. Образец для испытания на кручение

Методика проведения опыта и обработка результатов:

1. Измеряют расчетную длину l , диаметры образцов d и вычисляют полярные моменты сопротивления сечений W_p . Результаты заносят в журнал наблюдений.

2. Закрепляют образец в захватах испытательной машины, включают ее и доводят образец до разрушения. При этом фиксируют величину момента M_T , соответствующего площадке текучести (для стального образца), величину максимального момента M_B при разрушении образцов и величину максимального угла закручивания φ_B . Результаты заносят в журнал наблюдений.

3. Оценивают характер разрушения образцов.

4. Вычисляют по формулам (2.3.5; 2.3.6) пределы текучести T_T и прочности T_B (для стального образца) и по формуле (2.3.7) предел прочности T_B для остальных образцов. Определяют относительный угол закручивания θ_B , результаты заносят в журнал наблюдений.

5. Изображают диаграммы кручения стального, чугунового и деревянного образцов.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель лабораторной работы.

3. Испытательная машина.
4. Эскиз образца до и после испытания.
5. Исходные данные:
 - 5.1. Расчетная длина l_0 .
 - 5.2. Расчетный диаметр d_0 .
 - 5.3. Полярный момент инерции сечения J_P .
 - 5.4. Полярный и пластический моменты сопротивления сечения $W_P; W_{ПЛ}$.

Материал образца	Диаметр d_0 (мм)	Расчетная длина l_0 (мм)	Момент сопротивления сечения	
			полярный W_P (мм ³)	пластический $W_{ПЛ}$ (мм ³)
Сталь				
Чугун				
Дерево				

6. Результаты испытаний.

Материал образца	Нагрузки и деформации	M_T (Нмм)	M_B (Нмм)	φ_B (град)	Характер разрушения образца
Сталь					
Чугун					
Дерево					

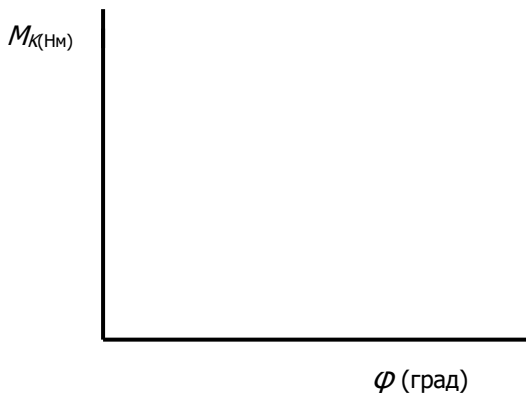
$$7. \text{Вычисления: } W_P = \pi d_0^3 / 16 = W_{ПЛ} = \pi d_0^3 / 12 = \tau_B^{cm} = \frac{M_{\max}}{W_{ПЛ}}$$

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_P} = \tau_B = \frac{M_B}{W_P} \quad \theta_B = \frac{\varphi_B}{l}$$

8. Характеристики прочности и пластичности материалов

Механические характеристики Материал образца	Предел текучести τ_T (МПа)	Предел прочности τ_B (МПа)	Относительный угол закручивания θ_B (град/см)
Сталь			
Чугун			
Дерево			

Диаграммы кручения



9. Выводы

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Из каких основных узлов состоит машина КМ-50? Расскажите их назначение и устройство?
3. Какое напряженное состояние возникает в каждой точке образца при кручении?
4. Как формулируется закон Гука при кручении?

5. Как вычисляются напряжения при кручении и как они распределяются в поперечном сечении образца при упругом и при пластическом деформировании?
6. Что называют жесткостью поперечного сечения стержня при кручении?
9. Что называют полярным моментом сопротивления?
7. Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?
8. Какая зависимость существует между величинами E , G и μ ?
9. Во сколько раз изменится величина угла закручивания, если диаметр образца уменьшится вдвое?
10. Каковы отличительные особенности диаграмм кручения стержней из пластичных и хрупких материалов?
11. Почему диаграмма кручения стального образца не имеет нисходящего участка?
12. Какие характеристики прочности можно получить при испытании образцов из пластичных и хрупких материалов?

Литература: [5] - §§ 20,21; [6] - §§ 5.1 – 5.3, 5.5;
[7] – §§ 26,37,39.

2.4. Определение модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона для стали

Цель работы: определение модуля продольной упругости и коэффициента Пуассона для стали.

Теоретическая часть работы. По закону Гука абсолютная продольная деформация стержня при растяжении – сжатии силой F в пределах упругих деформаций определяется по формуле:

$$\Delta l = \frac{N \cdot l}{E \cdot A}, \quad (2.4.1)$$

где $N=F$ – продольная (нормальная) сила; l – расчётная длина стержня;

E – модуль продольной упругости (модуль упругости при растяжении);

A – площадь поперечного сечения стержня.

Измерив опытным путем величину осевой нагрузки F и вызванную ею продольную деформацию Δl и зная размеры ис-

пытуемого стержня, можно вычислить модуль продольной упругости по формуле, полученной из (2.4.1).

$$E = \frac{F}{\varepsilon \cdot A}; \quad (N = F; \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}), \quad (2.4.2)$$

где ε – относительная продольная деформация.

Под воздействием внешней нагрузки изменяются как продольные, так и поперечные размеры стержня, соотношение между которыми при растяжении или сжатии для каждого материала является величиной постоянной в пределах упругих деформаций.

Коэффициентом Пуассона μ называют абсолютную величину отношения относительной поперечной деформации ε' к относительной продольной деформации ε , т. е.

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|, \quad (2.4.3)$$

где $\varepsilon' = \frac{\Delta b}{b}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$;

b и l - начальные поперечные и продольные размеры бруса, соответственно.

Коэффициент Пуассона можно вычислить, если измерить абсолютные линейные деформации бруса в поперечном Δb и продольном Δl направлениях при заданной осевой нагрузке F .

Модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ характеризуют упругие свойства материала и определяются экспериментально. Для различных материалов коэффициент Пуассона изменяется от нуля (для пробки) до величины, близкой к 0,5 (для резины и парафина). Для стали модуль упругости E принимает значения в пределах $(1,8 - 2,2) \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона μ - в пределах $(0,25 - 0,33)$.

Для повышения точности определения искомых упругих характеристик образец необходимо нагрузить ступенями 3-4 раза. Наибольшую нагрузку на образец можно определить по величине предела пропорциональности или предела текучести материала по формуле:

$$F_{\max} = \sigma_{\text{пл}} A \approx 0,83 \sigma_T A \quad (2.4.4)$$

Тогда при числе ступеней нагружений m величина ступени нагружения

$$\Delta F = \frac{F_{\max}}{m}. \quad (2.4.5)$$

Описание лабораторной установки.

На стальном образце прямоугольного поперечного сечения (рис. 2.4.1), закрепленном в захватах машины для испытаний на растяжение-сжатие, устройство которой описано в работе 2.1, установлены попарно (для увеличения точности измерений) рычажные тензометры: 1,2 – для измерения продольных деформаций, 3,4 – для измерения поперечных деформаций.

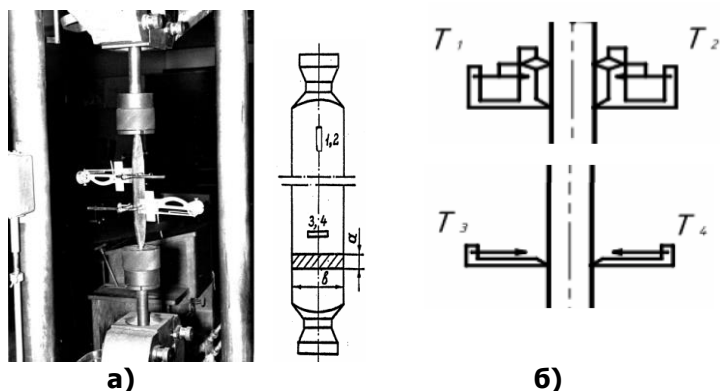


Рис. 2.4.1 Фото (а) и схема закрепления тензометров на образце (б)

Рычажный тензометр (рис. 2.4.2) крепятся к образцу с помощью струбины. Острия ножей с небольшой силой должны надавливать на поверхность образца, чтобы исключить их проскальзывание.

При деформациях образца расстояние между остриями ножей 1 и 2 изменяется и рычаг 3 поворачивается вокруг верхнего ребра ножа 2, жестко соединенного с рычагом 3. Перемещение верхнего конца рычага во столько раз больше перемещения нижнего острия ножа, во сколько раз длина рычага больше высоты ромбовидного ножа.

К верхнему концу рычага и к выступу на указательной стрелке 4 анкерной пружиной 5 прижат анкер 6. Движение

рычага через анкер передается указательной стрелке, которая будет перемещаться в сторону перемещения рычага, так как ось вращения ее расположена выше анкера. Перемещение конца стрелки будет во столько раз больше перемещения анкера, во сколько раз длина стрелки больше расстояния от анкера до оси стрелки. Таким образом, даже весьма малое перемещение нижнего острия подвижного ножа вызывает заметное перемещение стрелки по шкале. У тензометров ТР перемещение стрелки на одно миллиметровое деление соответствует перемещению подвижного ножа примерно на 0,001 мм.

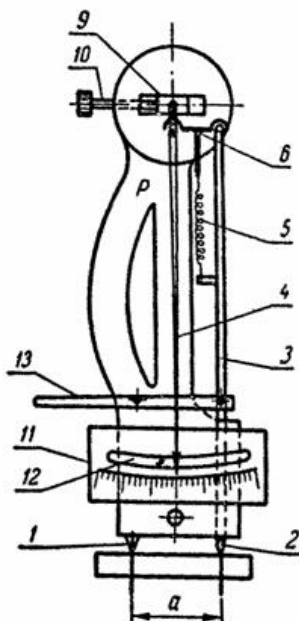


Рис. 2.4.2. Схема рычажного тензометра ТР

Назначение анкерной пружины 5 – плотно прижимать анкер к концу рычага и к выступу стрелки, чтобы устранить зазоры в сочленениях стрелки с рычагом, наличие которых могло бы исказить показания прибора.

Ось вращения указательной стрелки находится на ползунке 9, который может передвигаться в прорези рамки с по-

мощью микрометрического винта 10. Ползунок с винтом служат для первоначальной установки стрелки на шкале прибора. Шкала прибора 11 снабжена зеркальцем 12, позволяющим повысить точность отсчетов по шкале. При отсчете стрелка и ее отражение в зеркальце должны находиться на линии зрения наблюдателя.

Арретир 13 служит для закрепления рычага в неподвижном положении во время транспортировки и установки прибора (арретир освобождается только после того, как прибор уже установлен на образце).

Методика проведения опыта и обработка результатов.

1. Штангенциркулем измеряют поперечные размеры образца b и a с точностью 0,1 мм. По формулам (2.4.4) и (2.4.5) определяют величину ступени нагружения ΔF и число опытов m и записывают эти данные в журнал наблюдений.

2. Нагружают образец предварительной нагрузкой. Величину этой нагрузки и показания тензометров принимают за исходные и записывают в журнал наблюдений.

3. Нагружают образец равными ступенями ΔF и записывают соответствующие показания всех тензометров T_i .

4. Вычисляют среднее значение приращений показаний двух тензометров 1,2 для измерения продольных деформаций и двух тензометров 3,4 – для измерения поперечных деформаций по формулам соответственно:

$$\Delta T_{cp} = \frac{\sum \Delta T_i}{m} \quad \text{и} \quad \Delta T'_{cp} = \frac{\sum \Delta T'_i}{m}, \quad (2.4.6)$$

где m - число ступеней нагружения.

5. Вычисляют опытные значения абсолютных продольных Δl^{Δ} и поперечных Δb^{Δ} деформаций

$$\Delta l^{\Delta} = \frac{\Delta T_{cp}}{K}, \quad \Delta b^{\Delta} = \frac{\Delta T'_{cp}}{K}, \quad (2.4.7)$$

где K - коэффициент увеличения тензометра.

6. Определяют относительную продольную $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ и относительную поперечную $\varepsilon' = \frac{\Delta b}{b_0}$ деформации (l_0 - база тензометра).

7. По формуле (2.4.2) при $F = \Delta F$, определяют опытное значение модуля продольной упругости E^0 , а по формуле (2.4.3) получают опытное значение коэффициента Пуассона μ^0 .

6. Проводят анализ результатов опыта.

Содержание отчёта

1. Название лабораторной работы.
2. Цель лабораторной работы.
3. Испытательная машина.
4. Исходные данные.
 - 4.1. Поперечное сечение образца:
ширина b , высота a , площадь поперечного сечения A .
 - 4.2. База тензометров l_0 .
 - 4.3. Коэффициент увеличения тензометра K .
 - 4.4. Табличные значения:
 - модуль продольной упругости стали E ;
 - коэффициент Пуассона стали μ .

№ п/п	Нагрузка F н	Приращение нагруз- ки ΔF н	Продольная деформация				Поперечная деформация			
			I тензом.		2 тензом.		3 тензом.		4 тензом.	
			от- счёт T_1 де- лен.	раз- ность отсчё- тов ΔT_1 дел.	отсчёт T_2 делен.	разность отсчётов ΔT_2 дел.	от- счёт T_3 де- лен.	раз- ность отсчё- тов ΔT_3 дел.	отсчёт T_4 делен.	разность отсчётов ΔT_4 дел.
Средние значе- ния приращений			$\Delta F_{cp} = \Delta T_{cp} =$				$\Delta T_{cp}' =$			

5. Обработка результатов опыта.

5.1. Расчёт опытных значений абсолютной продольной Δl и абсолютной поперечной Δb деформаций.

5.2. Расчёт опытных значений относительной продольной \mathcal{E} и относительной поперечной \mathcal{E}' деформаций.

5.3. Расчёт опытных значений модуля продольной упругости E^{\ominus} и коэффициента Пуассона μ^{\ominus} .

6. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Как формулируется и записывается закон Гука при растяжении?

3. Что называют модулем продольной упругости материала? Каков его физический смысл.
4. Как записывается формула абсолютного удлинения бруса при растяжении? Что такое жесткость сечения бруса при растяжении?
5. Что происходит с поперечными размерами бруса при его растяжении в продольном направлении?
6. Что такое относительная продольная и относительная поперечная деформации бруса? Как их рассчитывают? Что такое коэффициент Пуассона? Каковы пределы его изменения?
7. Как устроен рычажный тензометр? Что им измеряют? Что такое коэффициент увеличения тензометра?
8. Что называют базой рычажного тензометра?
10. С какой целью к образцу прикладывают начальную нагрузку?
11. Что такое степень нагружения?
12. Как определяется наибольшая нагрузка, прикладываемая к образцу?

Литература: [5] - §§ 9,12; [6] - § 3.1; [7] - § 10.

2.5. Испытание стали на срез

Цель работы:

1. Определить экспериментально предел прочности стали τ_B при сдвиге и сравнить его с пределом прочности σ_B (временным сопротивлением) для образца из этого же материала при растяжении.
2. Изучить характер разрушения стального образца при срезе (сдвиге).

Теоретическая часть работы. Характер разрушения стали при срезе (сдвиге) и растяжении различный.

При срезе плоскость разрушения гладкая. Объем образца, подвергнутый пластическим деформациям, незначительный.

В случае растяжения плоскость разрушения имеет кристаллический (зернистый) вид, весь объем образца, особенно в зоне шейки, подвергается значительной пластической деформации.

На практике при расчётах условно считают, что в зоне среза действуют только касательные напряжения, равномерно распределенные по сечению. Они равны отношению нагрузки F к площади среза A_{cp} .

$$\tau = \frac{F}{A_{cp}} \quad (2.5.1)$$

При достижении касательными напряжениями предела прочности τ_B происходит разрушение материала. В действительности в зоне разрушения действуют ещё нормальные напряжения изгиба и смятия, что подтверждается формой образца после разрушения.

Предел прочности при срезе τ_B всегда меньше, чем при растяжении. Для стали принимают

$$\tau_B = (0,6 \dots 0,8) \sigma_B \quad (2.5.2)$$

Методика проведения опыта и обработка результатов.

Испытания проводят на разрывной машине УГ-20 или Р-20.

Принципиальная схема машины приведена в лабораторной работе 2.1.

Для испытания стали на срез применяют цилиндрические образцы (рис. 2.5.1) диаметром 10 мм. Для измерения образцов применяют штангенциркуль с пределом измерения 0-150 мм и ценой деления 0,1 мм.

Испытуемый образец устанавливают в приспособление (рис. 2.5.1, а). Кромки отверстий в приспособлении должны быть острыми и не производить смятие образца. Такое приспособление обеспечивает разрушение (срез) образца по двум плоскостям, по схеме двойного среза (рис. 2.5.1, б). Разрушение происходит без значительных остаточных деформаций.

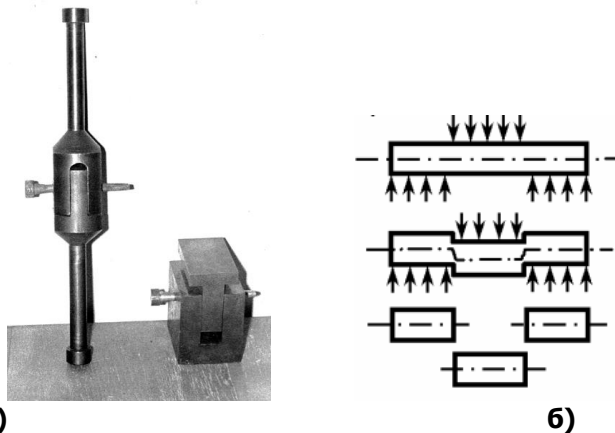


Рис. 2.5.1

- а) фото приспособления
 б) схема разрушения образца

Порядок проведения испытаний:

1. С помощью штангенциркуля выполнить обмер образца и результат (диаметр) записать в таблицу журнала отчета.
2. Вставить образец в приспособление. Образец должен заходить в отверстия приспособления свободно (от руки). Забивать образец в отверстия приспособления нельзя.
3. Установить приспособление с образцом на испытательной машине (на опорную плиту) либо закрепить в захватах разрывной машины.
4. Включить испытательную машину и плавно увеличивать нагрузку.
 В момент разрушения образца записать нагрузку. Машину, при движении штока на сжатие (сверху вниз), остановить, а затем перевести на обратный ход.
5. Ознакомиться с характером среза. Результаты испытания записать в журнал отчета, произвести вычисления и сделать выводы.

Содержание отчета

- Отчет по работе должен содержать:
1. Цель работы.

2. Схему образца и приспособления для испытаний на срез.
3. Схему разрушения образца при срезе и при растяжении.
4. Вычисления (напряжения предела прочности при срезе и при растяжении).
5. Вывод. В выводах характеристики прочности при растяжении и при срезе сравнить с табличными (справочными) данными.

Вопросы для самоконтроля

При сдаче работы студент должен ответить на теоретические вопросы по теме «Сдвиг» и по содержанию работы.

1. Какими внутренними силовыми факторами вызывается деформации среза (сдвига)?
2. Какие напряжения возникают в поперечных сечениях стержня при срезе (сдвиге)?
3. Что называется абсолютным сдвигом, относительным сдвигом и углом сдвига?
4. Напишите выражение закона Гука при сдвиге?
5. Какая существует зависимость между модулем упругости E и модулем сдвига G ?
6. Приведите пример деталей конструкций, работающих на сдвиг (срез)?

2.6. Методика испытания на выносливость при изгибе

Цель работы: Ознакомление с методом определения предела выносливости материала и исследование влияния на его усталостную прочность концентрации напряжений.

Теоретическая часть работы. Способность материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, циклически изменяющихся во времени, называется **выносливостью**.

Изменение напряжений во времени изображают графиком в координатах нормальные (или касательные) напряжения – время, т. е. $\sigma(\tau) - t$. Этот график обычно изображают в виде синусоиды. Совокупность всех последовательных переменных напряжений за один период их изменения называют **циклом**

напряжений. Цикл нормальных напряжений характеризуют следующие параметры (рис. 2.6.1):

а) алгебраически наибольшее напряжение цикла: σ_{\max} ;

б) алгебраически наименьшее напряжение цикла: σ_{\min} ;

в) среднее напряжение цикла (статическая составляющая цикла) – алгебраическая полусумма максимального и минимального напряжений цикла:

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 ;$$

г) амплитуда (переменное напряжение) цикла – алгебраическая полуразность максимального и минимального напряжений цикла:

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 ;$$

д) коэффициент асимметрии цикла: $R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$;

Среднее напряжение σ_m может быть как положительным, так и отрицательным. Амплитуда цикла σ_a всегда положительна. Максимальное и минимальное напряжения цикла можно выразить следующими зависимостями:

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a ; \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$$

Переменные напряжения далеко не всегда изменяются во времени по синусоиде. Но как показывают опыты, закон изменения напряжений во времени на усталостную прочность материала влияет незначительно. В основном она зависит от величины и знака напряжений σ_{\max} и σ_{\min} .

Испытания материалов на выносливость (усталостную прочность) выполняются как по нормальным напряжениям (при изгибе, при растяжении – сжатии), так и по касательным напряжениям (при кручении). Испытания проводят как при симметричном так и при пульсирующем циклах изменения напряжений.

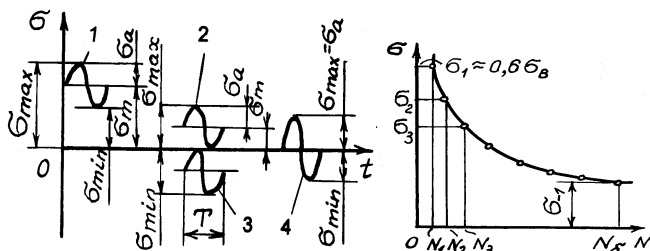


Рис.2.6.1. Виды циклов и их характеристики

- 1 - несимметричный цикл;
- 2,3 - пульсирующие циклы;
- 4 - симметричный цикл;

Рис. 2.6.2. Диаграмма испытаний стали на выносливость (диаграмма Вёлера)

Под **предел выносливости** материала понимают наибольшее напряжение цикла, при котором образец может сопротивляться без разрушения неограниченно долго.

Обозначают его $\sigma_R(\tau_R)$, где R - коэффициент асимметрии цикла. Так при симметричном цикле нагружения предел выносливости по нормальным напряжениям обозначают σ_{-1} , а при пульсирующем - σ_0 .

Предел выносливости σ_R определяют путём построения диаграммы испытаний на выносливость в координатах: максимальное напряжение цикла – число циклов. При этом о величине σ_R судят по результатам нагружения серии образцов (в количестве до 100 штук), одинаковых по форме, размерам и чистоте обработке. Диаграмму испытаний на выносливость называют диаграммой Вёлера (рис. 2.6.2).

При испытании первый образец нагружают так, чтобы создать в нем $\sigma_1 = 0,6\sigma_B$. Образец испытывают до разрушения, которое происходит при числе циклов N_1 . Второй образец испытывают при $\sigma_2 < \sigma_1$ (на 40-20 МПа). Очевидно, что необходимое число циклов N_2 для его разрушения будет больше, т. е.

$N_2 \gg N_1$. От образца к образцу, снижают напряжения до тех пор, пока очередной образец не выдержит N_{σ} циклов (N_{σ} – заданное техническими условиями **базовое** число циклов при определении предела выносливости). Обычно N_{σ} принимается не ниже следующих величин:

а) для стали и сплавов, имеющих горизонтальный участок на кривой усталости, - $N_{\sigma} = 10^7$ циклов;

б) для цветных металлов и легких сплавов, кривые которых не имеют горизонтального участка, - $N_{\sigma} = 10^8$ циклов.

Величина предела выносливости σ_R материала зависит от размера образца (масштабный фактор). С увеличением диаметра образца σ_R уменьшается. Также на σ_R влияют чистота обработки и концентрация напряжений.

При наличии на деталях машин концентраторов напряжений (выточек, отверстий, шпоночных канавок, резких переходов в размерах и т. п.) происходит снижение $\sigma_R(\tau_R)$, которое учитывают **эффективным (действительным)** коэффициентом концентрации напряжений $K_{\sigma}(K_{\tau})$. Его значения приведены в справочниках. Если нет экспериментальных данных, то $K_{\sigma}(K_{\tau})$ вычисляют по значениям теоретических коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_{K\sigma}$ и $\alpha_{K\tau}$ по формулам

$$K_{\sigma} = 1 + q(\alpha_{K\sigma} - 1); K_{\tau} = 1 + q(\alpha_{K\tau} - 1) \quad (2.6.1)$$

где q - коэффициент чувствительности материала к концентрации напряжений. Величина q возрастает с повышением прочности материала, но не может быть $q > 1$. Для деталей из серого чугуна $q \approx 0$, т. е. чугун не чувствителен к концентрации напряжений, что объясняется включениями графита между зёрнами чугуна. Это создает межкристаллическую концентрацию напряжений, которая в итоге оказывается больше внешней концентрации.

Снижают влияние концентрации напряжений двумя путями:

а) конструктивными мероприятиями (увеличение радиусов переходов и т. п.); б) термохимической обработкой деталей (например, закалка ТВЧ, азотирование зон концентрации).

Описание испытательной машины и образцов. Опыт проводится на машине типа МУИ-6000, предназначенной для испытания металлов и сплавов на усталость при **чистом** изгибе вращающегося образца по симметричному циклу нагружения. Обеспечивает максимальный изгибающий момент 500 кг·см (49 н·м).

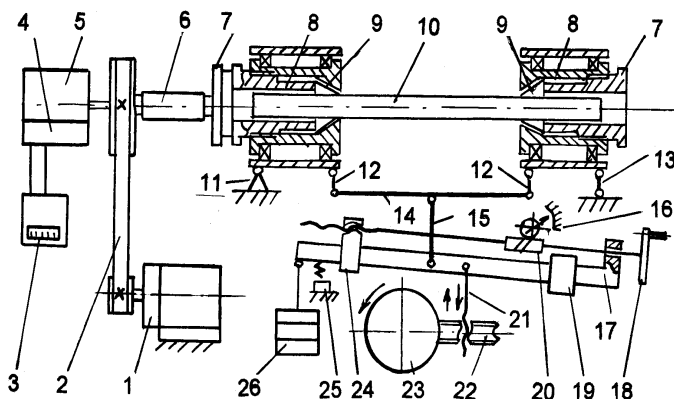


Рис. 2.6.3. Кинематическая схема машины МУИ-6000

Кинематическая схема машины представлена на рис. 2.6.3. От электродвигателя 1 через клиноременную передачу 2 и гибкий валик 6 вращение передается на шпindel 8, в котором заворачиванием резьбовой втулки 7 закреплен в цангах 9 испытуемый образец 10. Корпус шпинделя 7 закреплен на станине машины на шарнирно-неподвижной опоре 11. Второй конец образца закреплен аналогичным образом, но корпус этого узла опирается на шарнирно-подвижную опору 13. Усилие на образец передается через серьги 12, балочку 14 и тягу 15 от механизма нагружения, состоящего из рычага 17, подвешенного к тяге 15, подвижного 24 и сменных 26 грузов, и противовеса 19. Нагрузка устанавливается перемещением груза 24 по рычагу 17

при вращении маховичка 18, а величина ее определяется по шкале 16 при повороте стрелки червячной пары 20. Приложение установленной нагрузки на образец 10 осуществляется вращением маховика 23, который через червячную пару 22 опустит вниз шток 21, и рычаг 17 через тягу 15 нагрузит образец 10.

Вращение электродвигателя через редуктор 5, датчик импульсов 4 также передается на счетчик числа циклов 3. После поломки образца рычаг 17 с грузами сместится вниз и через микровыключатель 25 отключит электродвигатель 1, а на счетчике 3 будет зафиксировано число циклов N , при котором произошло разрушение образца. Схема нагружения образца представлена на рис. 2.6.4. Средняя рабочая часть образца подвергается **ЧИСТОМУ** изгибу, что следует из эпюр Q_y и M_x .

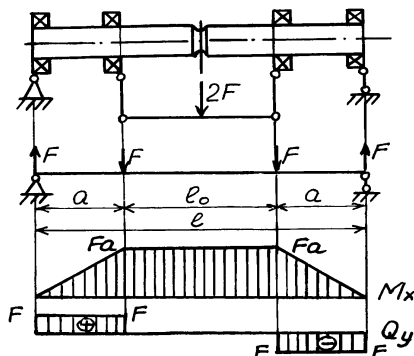


Рис.2.6.4. Схема нагружения образца

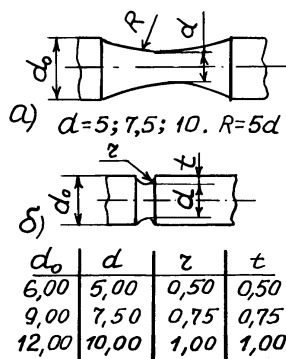


Рис. 2.6.5. Форма и размеры рабочей части образцов (взяты из работы [4]).

Образцы для испытаний на усталость выполняют в виде стержней с полированной поверхностью (с концентраторами и без них) и размерами согласно ГОСТ 25.502-79 с длиной рабочей части $l_0 = 5d_0$, где $l_0 = l - 2a$ (рис. 2.6.4).

Так как испытания образцов без концентраторов напряжений даже при одной нагрузке требуют много времени, то в настоящей работе предлагается испытать два образца одинакового диаметра с различными концентраторами напряжений.

Методика проведения опыта и обработка результатов.

1. Микрометром с точностью 0,01 мм измеряют диаметр образца в трех сечениях по его расчетной длине, определяют расстояние a от точки приложения нагрузки до опор по паспорту машины (рис. 2.6.4). Записывают эти данные в журнал наблюдений.

2. Вращая маховичок 18, по шкале 16 устанавливают, зная марку материала (предел прочности σ_B), максимальную нагрузку F . При этом нагрузку определяют из условия, что при симметричном цикле нагружения максимальные напряжения σ_{\max} в образце (рис. 2.6.4) при получении **первой** точки кривой Велера должны быть

$$\sigma_{\max} = 0,6\sigma_B \quad \text{или} \quad \sigma_{\max} = \frac{M_{X\max}}{W_X} = \frac{F(a/2)}{(\pi d^3)/32} \quad (2.6.2)$$

где d - диаметр выточки на образце (рис. 2.22).

Тогда после преобразований получают формулу для максимальной нагрузки

$$F = 0,0981(d^3 / a)\sigma_B.$$

3. Закрепляют в цапгах 9 машины образец с концентратором и, повернув маховик 23 против часовой стрелки, нагружают образец нагрузкой F . Показания счетчика 3 циклов нагружения сбрасывают на нуль, включают электродвигатель 1 и доводят образец до разрушения. Записывают в журнал наблюдений число циклов N_1 , которые выдержал образец до момента разрушения.

4. Устанавливают в цапгах 9 машины второй образец с концентратором большего радиуса и также доводят его до разрушения. Записывают число циклов N_2 , которое выдержал второй образец до момента разрушения.

5. Сравнивают полученные результаты, проводят анализ и делают выводы о влиянии формы концентратора на циклическую усталость материала.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Испытательная машина (тип, марка).
4. Эскизы образцов с указанием размеров.
5. Схема нагружения образца.
6. Вид цикла нагружения.
7. Исходные данные.
 - 7.1. Расстояние от точки приложения нагрузки до опоры a .
 - 7.2. Предел прочности для данной марки материала σ_b .
8. Максимальная нагрузка, при которой произошло разрушение испытанных образцов: F_{\max_1} , F_{\max_2} .
9. Число циклов N_1 и N_2 нагружения, выдержанных образцами до момента их разрушения.
10. Анализ результатов испытаний. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Как графически показывают закон изменения циклических напряжений?
3. Какими параметрами характеризуют цикл напряжений? Как их определяют?
4. Какие параметры цикла преимущественно влияют на усталостную прочность материала?
5. Как получают диаграмму усталости материала?
6. Что понимают под пределом выносливости материала? Как его обозначают?
7. Что понимают под базой испытаний? Какие ее значения принимают для различных металлов?
8. Какова форма, чистота обработки поверхности образцов для испытаний на усталость?
9. В каком случае возникает концентрация напряжений?
10. Что понимают под эффективным коэффициентом концентрации напряжений?

11. Как теоретически вычислить коэффициент концентрации напряжений?
12. Почему в деталях из серого чугуна практически не возникает концентрация напряжений?
13. Каким образом в металлах и их сплавах уменьшить влияние концентраторов напряжений?
14. Опишите устройство и принцип действия испытательной машины.
15. Какой вид изгиба возникает в образце? Изобразите эпюру изгибающих моментов.
16. Разрушится ли образец, если при испытаниях в нем возникнут напряжения ниже предела текучести?
17. Какое практическое значение имеют испытания материалов при переменных напряжениях?
18. Выведите формулу для определения максимальной нагрузки, прилагаемой к образцу?
19. Влияет ли на величину предела выносливости выбор диаметра образца?
20. Можно ли по характеру излома определить при каких напряжениях (постоянных или переменных) проводилось испытание образца?

Литература: [5] - §§ 84-87; [6] - §§ 19.1 – 19.3, 19.5; [7] - §§ 99-100, 102.

2.7. Определение ударной вязкости

Цель работы: Определить экспериментальным путём ударную вязкость материала образца, дать характеристику его структуры в месте излома, приобрести навыки проведения испытаний на ударную вязкость.

Теоретическая часть работы. Удельной ударной вязкостью a материала называют отношение работы ΔW_F , затраченной маятником на разрушение стандартного образца к площади его поперечного сечения A в месте излома.

$$a = \frac{\Delta W_F}{A} \left[\frac{H \cdot M}{M^2} \right] \quad (2.7.1)$$

Чем больше величина **ударной вязкости**, тем лучше материал сопротивляется **динамической нагрузке**. Образцы из хрупких материалов ломаются легко, с небольшой затратой работы на разрушение. Образцы из пластичных материалов наоборот – требуют на разрушение большей энергии. Материалы, требующие большой затраты энергии на излом называют **вязкими**. Величина ударной вязкости очень сильно зависит от температуры. По мере понижения температуры ударная вязкость образцов из одного и того же материала уменьшается. У некоторых материалов существует температурный интервал, в котором удельная ударная вязкость резко меняет свое значение. Этот интервал называется **температурным интервалом хрупкости**. Чем больше смещен температурный интервал хрупкости в сторону низких температур, тем материал менее чувствителен к воздействию температуры при ударных нагрузках и тем более он надежен в работе.

Увеличению хрупкости материала способствует наличие остаточных напряжений, которые могут появиться в материале при закалке, наклепе.

Ударная вязкость понижается с увеличением количества углерода, т.е. с повышением предела прочности и уменьшением пластических свойств стали. Наличие фосфора также оказывает неблагоприятное влияние на величину удельной ударной вязкости. На результатах определения ударной вязкости сказывается и скорость маятника в момент удара.

Испытания проводятся для металлов согласно ГОСТ 9454-84; для пластмасс - по ГОСТ 4647-84.

Металлы испытываются на копрах с предельной энергией маятника до 300 Н·м и скоростью в пределах от 4 до 7 м/с, пластмассы - до 5 Н·м и $3,5 \pm 0,5$ м/с, соответственно.

Описание установки для испытаний. Испытание на ударную вязкость проводится на маятниковом копре МК-30А рис. 2.7.1. Копер состоит из массивного основания с двумя вертикальными стойками. К верхней части этих стоек на горизонтальной оси подвешен маятник с вырезом. На оси маятника установлена стрелка, а на стойке прикреплена шкала для отсчета затрат энергии на разрушение образца. Для фиксации маятника в исходном верхнем положении предусмотрена защелка.

При проведении испытаний маятник поднимают вверх и фиксируют защелкой. На опоры устанавливают испытуемый образец. Затем, повернув защелку, отпускают маятник, который при своем падении разрушит образец и, двигаясь далее, переместит стрелку по шкале, на которой считывают величину энергии, сохраненной маятником после разрушения образца.

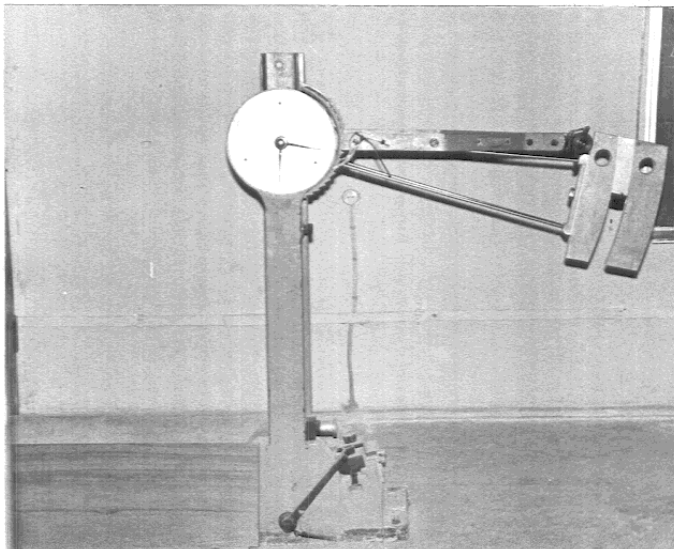


Рис. 2.7.1 Фото маятникового копра МК-30А

Форма и размеры образцов.

ГОСТ 9454—84 регламентирует ударные испытания на изгиб стандартного образца с надрезом на маятниковом копре. Образец лежит на двух опорах, а удар маятника осуществляется по сече-

нию образца со стороны противоположной надрезу (рис. 2.7.2, а). При этом у дна надреза возникает объемное напряженное состояние с растягивающими главными напряжениями (рис. 2.7.2, б), что затрудняет возникновение пластических деформаций в материале образца. Поэтому испытание образцов с надрезом позволяет оценить склонность материала к хрупкости при неравномерном распределении напряжений. Знание этого качества имеет большое практическое значение, поскольку высоко-

прочные металлы и сплавы могут иметь удовлетворительные характеристики прочности при обычных испытаниях, но хрупко разрушаются в реальных конструкциях при наличии концентраторов напряжений (шпоночные пазы, отверстия и т.д.).

Поверхность образцов должна быть гладкой, ровной, без трещин, сколов, вздутий и раковин.

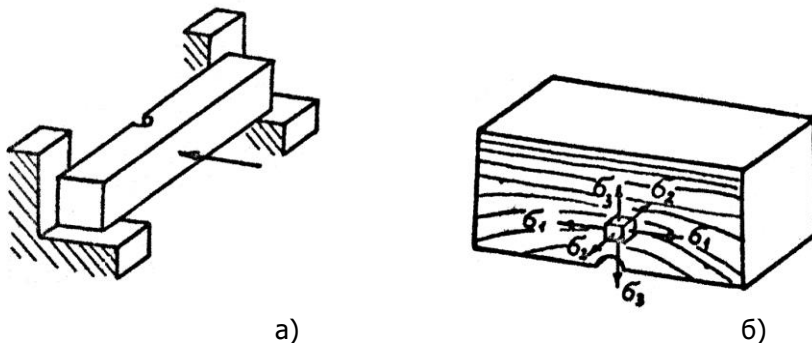


Рис. 2.7.2. Схема установки образцов

Порядок проведения опыта и обработка результатов.

1. Замеряют ширину и толщину образца штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Устанавливают образец на опоры (рис. 2.7.2, а). Поднимают маятник в верхнее исходное положение и закрепляют защелкой.

2. Освобождают маятник от защелки, который, падая вниз, разрушит образец.

3. Рассчитывают величину работы ΔW_F , затраченной на разрушение образца, как разность между начальной энергией маятника и его энергией после разрушения образца.

4. Вычисляют удельную ударную вязкость по формуле (2.7.1). Опыт повторяют еще для двух - трех образцов.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.

3. Испытательная машина (тип, марка).
4. Схема установки образцов.
5. Исходные данные.

№ п/п	Материал испытуемого образца	Ширина b	Длина l	Толщина δ	Площадь поперечного сечения A
1.					
2.					
3.					

6. Определение работы разрушения для образцов ΔW_F .
7. Определение удельной ударной вязкости для образцов

a.

8. Анализ результатов. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какая цель лабораторной работы?
2. Что такое удельная ударная вязкость?
3. В каких единицах измеряется удельная ударная вязкость?
4. Какие факторы влияют на величину ударной удельной вязкости?
5. О каких свойствах материала судят по величине ударной удельной вязкости?
6. Как определить энергию, запасенную маятником в самом верхнем положении?
7. Как влияет расстояние между опорами установки образца на величину удельной ударной вязкости?
8. Чем принципиально отличаются образцы из металла от образцов из других материалов?
9. Как изменится удельная ударная вязкость с изменением температуры?
10. Чем отличается маятниковый копер для определения ударной вязкости металлов от копра для испытаний неметаллических материалов?

11. Как влияет на ударную вязкость содержание в металле углерода и фосфора?
12. Что понимают под температурным интервалом хрупкости?

Литература: [7] -§ 96.

3. ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Исследование распределения напряжений при поперечном изгибе

Цель работы: Изучить характер распределения нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балки, экспериментально проверить зависимость для вычисления нормальных напряжений при поперечном изгибе и ознакомиться с методом электротензометрирования.

Теоретическая часть работы. Прямой изгиб имеет место, когда плоскость действия изгибающего момента, вызванного действием внешних нагрузок, проходит через одну из главных центральных осей поперечного сечения (рис.3.1.1, а).

Чистый изгиб (участок a-b, рис. 3.1.1,а) возникает, если в поперечном сечении балки действует только изгибающий момент ($Q=0$, $M_x = -M = const$). Если в сечении балки действует также и поперечная сила, то имеет место поперечный прямой изгиб (участок b-c, рис. 3.1.1, а).

При чистом изгибе справедлива гипотеза плоских сечений: поперечное сечение, плоское до деформации, остается плоским и после деформации. Данная гипотеза вместе с уравнениями статики позволяет получить зависимость для определения напряжений при чистом изгибе.

$$\sigma = \frac{M_x}{J_x} y \quad (3.1.1)$$

Здесь M_x — изгибающий момент в рассматриваемом сечении балки,
 J_x — осевой момент инерции сечения балки относительно нейтральной линии,
 y — расстояние от нейтральной линии до точки, в которой определяется напряжение.

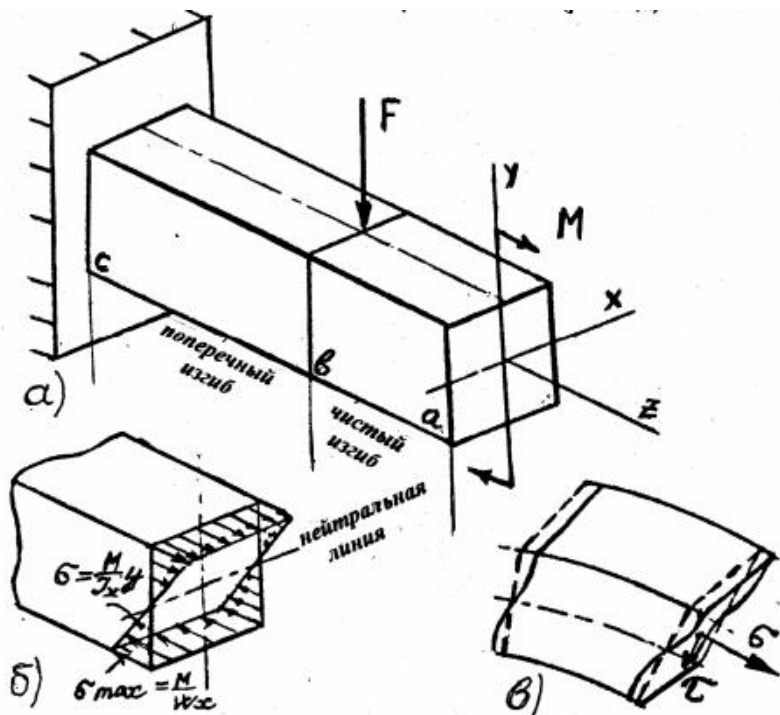


Рис.3.1.1.

Из выражения (3.1.1) видно, что нормальные напряжения зависят от величины " y " линейно. На рис 3.1.1,6 показана эпюра распределения нормальных напряжений при чистом изгибе. Наибольшей величины (σ_{\max}) напряжения достигают в точ-

ках (волокнах) наиболее удаленных от нейтральной линии, т.е. при $y = y_{\max}$, а на нейтральной линии они равны нулю.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{J_x} y_{\max} = \frac{M_x}{W_x}, \quad (3.1.2)$$

где $W_x = \frac{J_{\max}}{y_{\max}}$ — осевой момент сопротивления поперечного сечения.

ного сечения.

При поперечном изгибе в поперечном сечении балки возникает не только изгибающий момент M_x , но и поперечная сила Q_y , а, значит, наряду с нормальными напряжениями σ , появляются также и касательные τ . По закону парности касательных напряжений последние возникают и в продольных сечениях балки, вызывая деформацию поперечного сечения. В результате гипотеза плоских сечений при поперечном изгибе нарушается, плоские до деформации сечения слегка искривляются (рис. 3.1.1,в).

Теоретические и экспериментальные исследования этого вопроса показали, что влияние указанного эффекта невелико и поэтому влиянием сдвигов на закон распределения нормальных напряжений пренебрегают.

Таким образом, гипотеза плоских сечений условно распространяется также и на поперечный изгиб. Для определения нормальных напряжений при поперечном изгибе используют зависимость (3.1.1).

При выводе расчетной формулы (3.1.1) предполагалось, что волокна материала при поперечном изгибе испытывают только продольное растяжение или сжатие. Это допущение позволяет выразить зависимость между нормальным напряжением и деформацией законом Гука для одноосного растяжения.

Таким образом, при опытном определении напряжений в заданном слое балки измеряют упругие линейные деформации Δl , а затем, воспользовавшись законом Гука ($\sigma = E\varepsilon = E\Delta l/l$), определяют искомые напряжения.

Определение напряжений по измеренной деформации называют **тензометрированием**.

1. Электротензометрический метод измерения линейных деформаций основан на том, что деформация проводника вызывает изменение некоторых его электрических параметров (сопротивления, емкости, индуктивности). Элемент, воспринимающий деформацию тела, называют **датчиком**. Изменение электрического параметра передается на **регистрирующее устройство**. Наиболее широко используют в качестве электротензометров проволочные датчики омического сопротивления.

Основными преимуществами электротензометров являются: высокая точность измерения, малые размеры тензометров, возможность передачи показаний на расстояние и выдачи результатов на ЭВМ, возможность измерять деформации на поверхностях сложной конфигурации и в труднодоступных местах, практически полная безинерционность аппаратуры, возможность регистрации быстроизменяющихся процессов. Эти преимущества компенсируют недостатки электротензометрирования: сложность и значительную стоимость измерительной аппаратуры, необходимость высокой квалификации персонала.

Точность измерения деформации при помощи проволочных тензодатчиков несколько меньше, чем при измерении механическим или оптическим тензометром, но практически она вполне достаточна для надежного вычисления напряжений. В основе метода лежит зависимость омического сопротивления R проводника от его геометрических размеров – длины l и площади поперечного сечения A

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (3.1.3)$$

где ρ - удельное сопротивление проводника.

Чем длиннее проводник датчика, тем больше изменение омического сопротивления ΔR при деформации и тем точнее результаты измерений. В тоже время при неравномерной деформации исследуемого тела возникает необходимость проводить измерения на возможно меньшей длине (базе измерений). Конструктивно эта задача была решена путем укладки длинного проводника в виде петель на малой базе.

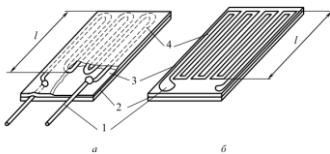


Рис. 3.1.2 Схема тензодатчика

Тензодатчик представляет собой плоский элемент (рис. 3.1.2), состоящий из тонкой (0,015 – 0,03 мм) проволоки (или фольги) 3, материал которой обладает высоким омическим сопротивлением (константан, нихром). Проволока укладывается зигзагообразно между двумя полосками специальной тонкой (0,002 – 0,005 мм) бумаги или полимерной пленки 2. К концам проволоки сваркой либо пайкой, что менее предпочтительно, присоединены латунные выводы 1 для соединения с регистрирующей аппаратурой.

Датчик вследствие зигзагообразной укладки проволоки реагирует на деформации только в продольном направлении и не чувствителен в поперечном направлении. **Базой тензодатчика** называют длину l прямолинейных участков проводника, из которого он изготовлен. Промышленность выпускает провололочные, а также фольговые датчики с базой $l = 5, 10, 20, 30$ мм и сопротивлением $R = 50, 100, 200, 300$ Ом. Следует учитывать, что с уменьшением базы датчика снижается его тензочувствительность из-за увеличения влияния криволинейных участков (петель датчика). Поэтому без необходимости применять датчики с малой базой не рекомендуется.

Место установки тензодатчика тщательно зачищают и обезжиривают спиртом или ацетоном. Тензодатчик наклеивают на поверхность балки при помощи специальных клеев (БФ-2 и др.) так, чтобы направление его базы l совпадало с направлением измеряемой деформации. При нагружении балки вместе с ней деформируется и тензодатчик, сопротивление которого из-

меняется и его величина будет зарегистрирована специальной аппаратурой, основой которой является мостовая схема – мостик Уитстона (рис. 3.1.3).

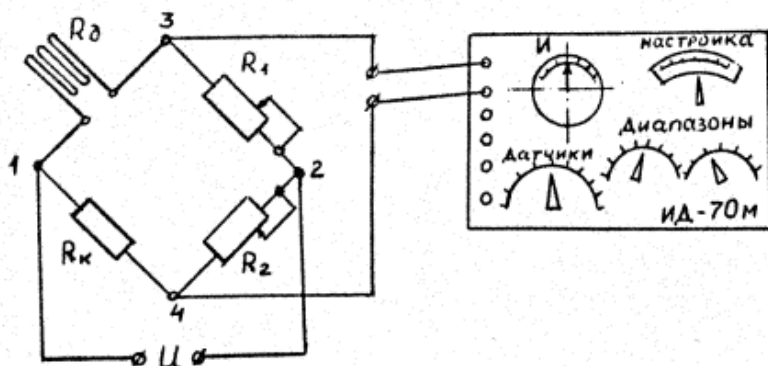


Рис.3.1.3 Схема измерения прибором ИД-70М

Экспериментальная установка представляет собой шарнирно опертую балку двутаврового поперечного сечения (рис. 3.1.4). Нагружение осуществляют вручную с помощью подвеса (I) и набора грузов (II). Положение подвеса с грузами по длине балки можно изменять.

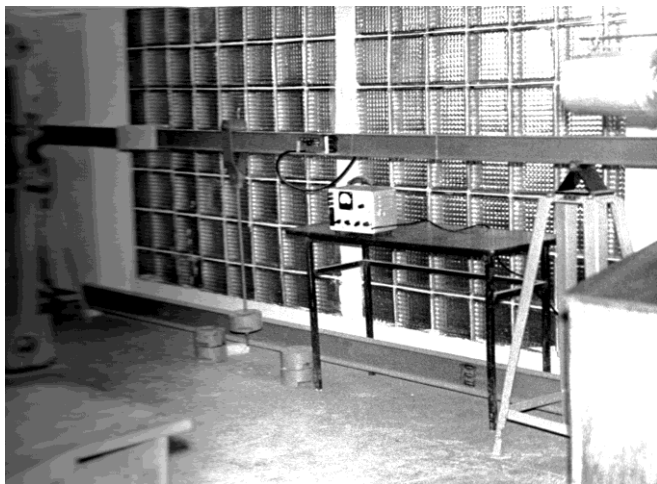
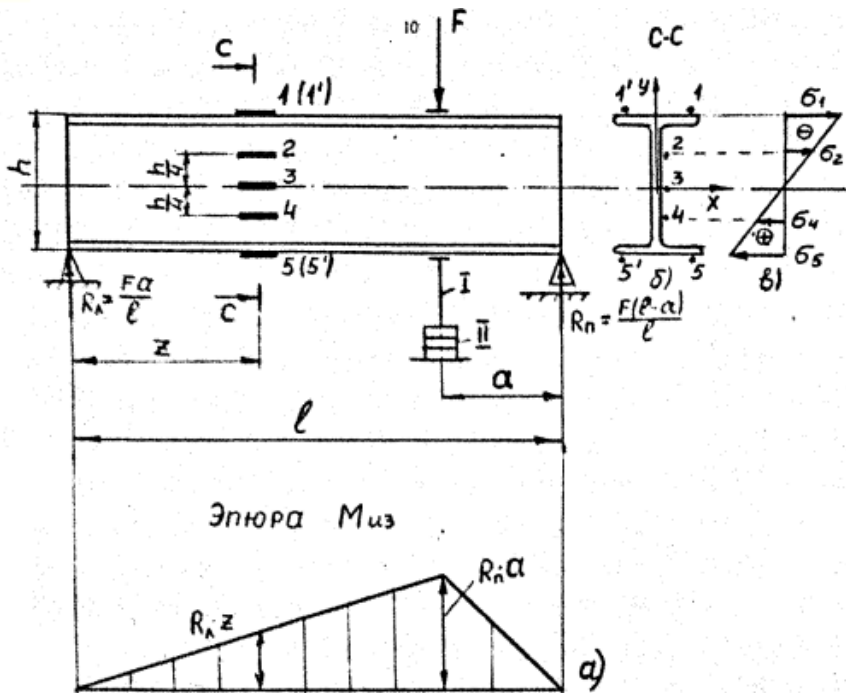


Рис. 3.1.4. Схема (а) и фото (б) лабораторной установки

Для замера нормальных напряжений в пяти точках заданного поперечного сечения "С" на балке (параллельно ее оси) наклеены 7 проволочных тензодатчиков активного сопротивления (рис. 3.1.4.а). Тензодатчики 1 и 1' наклеены на наружной поверхности верхней полки двутавра и при обработке результатов измерений берется среднее значение показаний этих датчиков. Аналогично поступают с показаниями тензодатчиков 5 и 5', наклеенных на нижней полке двутавра. Датчик 3 расположен на нейтральном слое, а датчики 2 и 4 - на расстоянии 1/4 высоты поперечного сечения от нейтрального слоя. Все тензодатчики имеют сопротивление 200 — 200,1 Ом и базу 20 мм, т. к. взяты из одной партии. При плотной приклейке тензодатчика к поверхности детали (двутавра) проволока удлиняется (укорачивается) вместе с волокнами исследуемого объекта. В результате омическое сопротивление датчика изменяется и регистрируется как показатель деформации, т.к. относительное изменение омического сопротивления $\Delta R_{\partial} / R_{\partial}$ пропорционально относительному удлинению (укорочению) ε .

$$\Delta R_{\partial} / R_{\partial} = \gamma_0 \varepsilon, \quad (3.1.4)$$

где γ_0 - коэффициент тензочувствительности датчика (безразмерная величина, зависящая от свойств материала тензодатчика).

Изменение начального сопротивления датчика R_{∂} при измерении деформаций составляет обычно 0.3 — 0.5%, Поэтому для более точного замера такого изменения тензодатчик соединен с измерительным прибором по мостовой схеме, показанной на рис. 3.1.3 (мост Уитстона).

Переменные резисторы R_1 , R_2 и источник питания "U" моста расположены в корпусе измерителя деформаций ИД-70 М.

Чтобы исключить влияние колебаний температуры на величину сопротивления датчика R_{∂} , используется компенсационный тензодатчик R_K . Его сопротивление примерно равно R_{∂} . Он наклеен вблизи датчика R_{∂} в месте не подверженном деформациям.

Величины сопротивлений R_1 , R_2 подбирают так, чтобы при отсутствии деформации детали (при $F=0$) мост был сбалансирован, т.е. при подаче напряжения "U" на одну диагональ моста (1—2), в другой (3—4) сила тока равнялась бы нулю. Для этого необходимо, чтобы

$$\frac{R_{\partial}}{R_k} = \frac{R_1}{R_2} \quad (3.1.5)$$

Выполнение условия (3.1.5) достигается путем поворота ручек "Диалог" и "Настройка" (рис.3.1.3). Если мост сбалансирован (при $F=0$), то стрелка индикатора "И" остановится против нулевого деления шкалы. При нагружении балки мост разбалансируется, что приводит к появлению тока в измерительной диагонали (3—4) моста. В результате стрелка индикатора отклонится вправо или влево от нуля. Это отклонение пропорционально величине напряжений σ в детали в месте наклейки тензодатчика R_{∂} .

Выводы от всех тензодатчиков, наклеенных на балку, соединены с измерителем деформаций ИД-70 М. Подключая поочередно тензодатчики 1-5 к измерителю деформаций (с помощью переключателя "Датчики"), можно определить величину нормальных напряжений σ в различных точках поперечного сечения балки.

Порядок проведения эксперимента

1. Включают измеритель деформаций ИД-70 М в электросеть и прогревают в течение 15 минут.
2. Ручкой "Датчики" подключают к измерителю деформаций тензодатчик 1' (при $F=0$).
3. Балансируют мост, вращением ручек "Диалог" и "Настройка" совмещают стрелку индикатора "И" с нулевым делением на шкале. Показания индикатора записывают в таблицу 1.
4. Производят поочередное подключение остальных датчиков и (без балансировки моста) записывают показания индикатора в таблицу 1. При отклонении стрелки влево от нулевого значения показания индикатора записывают со знаком "минус", а при отклонении вправо - со знаком "плюс".

5. Нагружают балку заданной силой F , и, подключая поочередно тензодатчики, записывают показания индикатора (с учетом знака) в таблицу 1. (графа 4).

Таблица 1

NN датчиков	Положение исследуемых волокон U_i мм	Показания индикатора		Разность отчетов $\Delta n_i = n_n - n_0$	Напряжения в МПа		Отклонение в %
		без нагрузки n_0	с нагрузкой n_n		эксперим. $\sigma_{\text{э}}$	теоретич. $\sigma_{\text{т}}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
1'							
1							
2							
3							
4							
5							
5'							

Обработка результатов измерений

1. Вычисляют для каждого тензодатчика разность показаний Δn_i индикатора в нагруженном и начальном (без нагрузки) состояниях балки.

2. Определяют величину нормальных напряжений в каждой точке поперечного сечения балки.

$$\sigma_i = \Delta n_i m,$$

где m - масштабный коэффициент (определяется тарировкой тензодатчиков).

Значение " m " можно определить из выражения

$$m = \frac{\sigma_{\text{max}}}{\Delta n_{\text{ср}}}$$

где $\sigma_{\text{max}} = \frac{R_{\text{fl}} \cdot z}{W_x}$ — расчетное напряжение в точках 1 и 1';

здесь $R_{Л}$ - реакция левой опоры балки (см. рис.3.1.1)

$$\Delta n_{\text{ср}} = \frac{\Delta n_1 + \Delta n_1'}{2} \text{ — среднее значение разности отсчетов датчиков 1 и 1' (графа 5 табл. 1).}$$

3. Строят эпюры распределения напряжений по высоте сечения балки.

4. Вычисляют погрешности эксперимента, сравнивая теоретические и экспериментальные значения напряжений.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.

Цель работы.

Схема лабораторной установки.

Электрическая схема мостика Уитстона.

Исходные данные.

Величина ступени нагружения ΔF .

Длина пролёта балки l , расстояние «а» от правой опоры до силы F .

Расстояния до слоев, в которых определяются напряжения Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 .

Расстояние до сечения, в котором определяется напряжение Z .

Осевой момент инерции сечения I_x .

6. Теоретический расчёт величины изгибающего момента в сечении «С» и напряжений в заданных слоях балки σ_i^T .

7. Экспериментальные значения напряжений в заданных слоях поперечного сечения балки $\sigma_i^Э$.

8. Заполненную таблицу 1.

9. Сравнение опытных и теоретических значений. Выводы.

2. Экспериментального определения напряжений при использовании механических тензометров.

Экспериментальное исследование закона распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки проводится на универсальной гидравлической испытательной машине УГ-20. Для этого балка устанавливается на траверсе на специальных опорах.

Схема шарнирно-опертой балки прямоугольного поперечного сечения, нагруженной сосредоточенной силой F , показана на рис. 3.1.5.

Экспериментально значения нормальных напряжений определяются в точках 1,2,3 по высоте сечения. В этих точках устанавливаются рычажные тензометры (рис. 3.1.6) для замера деформаций. Тензометры устанавливаются так, чтобы длина базы тензометра (l_0) совпадала с направлением измеряемой деформации — вдоль оси балки. Размещение трех тензометров в одном сечении неосуществимо, поэтому используя симметрию нагружения сечений 1,2 вдоль длины балки ($M_1=M_2$, рис. 3.1.5), тензометры T_1, T_2 закрепляют соответственно на верхней и нижней поверхностях прямоугольного сечения;

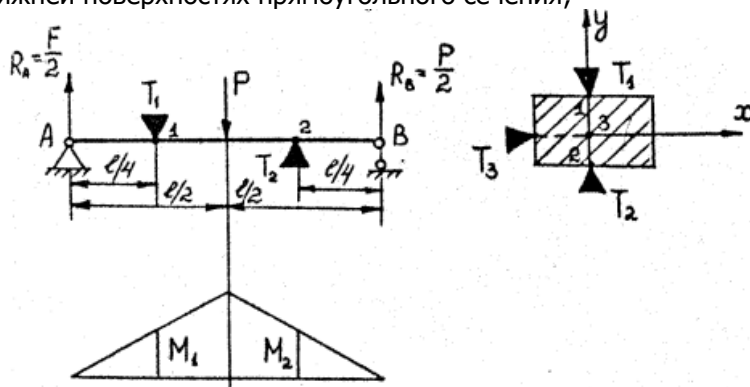


Рис. 3.1.5.

Место расположения вдоль оси балки тензометра T_3 на нейтральной линии балки принципиального значения не имеет. При указанном расположении тензометров, мы будем иметь зна-

чения деформаций (следовательно, напряжений $\sigma = \varepsilon E$) по высоте сечения.

Устройство рычажного тензометра

Рычажным тензометром измеряют малые линейные деформации.

Схема тензометра показана на рис.3.1.6. Тензометр прижимают к испытываемому образцу 7 при помощи струбцины двумя ножами: неподвижным — 2 и подвижным — 3. Расстояние (l_0) между ножами является базой тензометра, она равна $l_0 = 20$ мм. При деформации образца расстояние между ножами изменяется. Подвижный нож 3 поворачивается и отклоняет рычаг 4. Отклонение рычага 4 через коромысло 5 передается на стрелку 6, которая поворачивается вокруг оси, закрепленной на рамке тензометра 1. Разность отсчетов $\Delta A = A_2 - A_1$ (A_2, A_1 — начальный и конечный отсчеты) пропорциональна абсолютной деформации Δl .

Система рычагов обеспечивает увеличение деформации Δl (мм) в тысячу раз ($K = 10^3$ — коэффициент увеличения тензометра).

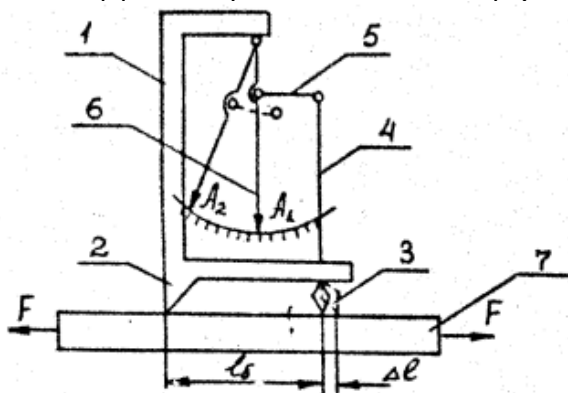


Рис. 3.1.6

1 - рамка тензометра, 2 - неподвижный нож, 3- подвижный нож (ромбическая призма), 4- рычаг, 5 - коромысло, 6 - стрелка, 7 - образец.

Порядок проведения эксперимента

1. После замера поперечных размеров и длины балки вычисляется максимальное значение нагрузки $F = F_{\max}^{\vartheta}$, обеспечивающее упругие деформации балки при проведении эксперимента. Это условие выполняется, если

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}^{\vartheta}}{W_x} \leq \sigma_{n \varphi}'$$

откуда $M_{\max}^{\vartheta} \leq \sigma_{n \varphi}' \cdot W_x$

из эпюры изгибающих моментов на рис. 3.5

$$M_{\max}^{\vartheta} = \frac{F_{\max}^{\vartheta} l}{4},$$

следовательно, получаем

$$F_{\max}^{\vartheta} \leq \frac{4\sigma_{n \varphi}' W_x}{l}.$$

2. Балка с закрепленными на ней рычажными тензometрами устанавливается на траверсе испытательной машины УГ-20.

3. Балка нагружается начальной нагрузкой F_0 и снимаются показания тензometров. Первоначальное нагружение необходимо для устранения возможного проскальзывания ножей рычажного тензometра относительно поверхности балки, а также для устранения возможных люфтов и зазоров в системе балка - испытательная машина.

4. Осуществляется ступенчатое нагружение балки (в пределах пропорциональности) силами $F_1 = F_0 + \Delta F$, $F_2 = F_1 + \Delta F$, $F_3 = F_2 + \Delta F$ ($F_3 < F_{\max}$) и снимаются соответствующие показания тензometров A_i . Каждая ступень нагружения равносильна одной повторности эксперимента с нагрузкой ΔF (рис.3.1.7).

5. Определяется среднее значение абсолютной продольной деформации Δl_{cp} по каждому тензометру и величина относительной продольной деформации $\xi = \frac{\Delta l_{cp}}{l_0}$.

6. По закону Гука вычисляют напряжения в каждой точке $\sigma^j = E * \xi$.

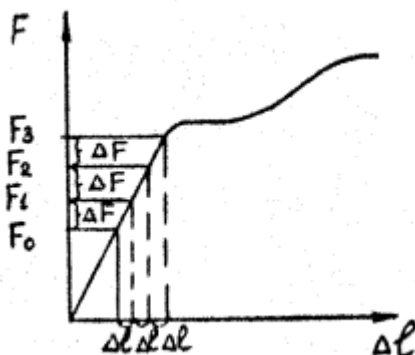


Рис. 3.1.7

Содержание отчета:

1. Цель работы.
2. Схему балки с нагрузкой и указанием точек закрепления рычажных тензометров как вдоль ее длины, так и по высоте сечения.
3. Вычисления теоретических значений нормальных напряжений ($\sigma_1^T, \sigma_2^T, \sigma_3^T$).
4. Таблицу наблюдений результатов измерений нагрузок и деформаций.
5. Вычисления, соответствующие обработке результатов эксперимента.
6. Эпюры распределения нормальных напряжений по высоте сечения, построенную по результатам теоретических вычислений и эксперимента.

7. Выводы; В выводах необходимо отметить какой закон распределения нормальных напряжений по высоте сечения наблюдается при прямом изгибе, и применима ли теоретическая зависимость (3.1.1).

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Каково устройство лабораторной установки?
3. Какой изгиб называют поперечным? Плоским?
4. Как теоретически определяют нормальные напряжения при плоском изгибе в любом слое поперечного сечения балки?
5. Как определяют максимальные нормальные напряжения в сечении балки при плоском изгибе?
6. Как распределяются нормальные напряжения по высоте сечения балки при плоском изгибе? Покажите эпюру?
7. Что называют тензометрированием?
8. На чем основан метод электротензометрирования?
10. Как устроен тензодатчик?
11. Что называют базой тензодатчика?
12. Какие соображения должны учитываться при обосновании выбора базы тензодатчика?
13. Как подключается тензодатчик в измерительную систему? Опишите её?
14. Что понимают под балансом моста?
15. Как определяют тарировочные коэффициенты?
16. Как проводят определение напряжений при помощи тензодатчиков в исследуемой балке?
17. Для чего применяют компенсационный датчик и где и как он должен быть расположен?

Литература: [5]- § 29; [6] - § 6.2; [7] - § 52.

3.2. Внецентренное растяжении

Цель работы: Определить опытным путем нормальные напряжения в крайних волокнах поперечного сечения

бруса при внецентренном растяжении и сравнить их с напряжениями, вычисленными теоретически.

Теоретическая часть работы. Внецентренным растяжением называют такой вид деформации, при котором внешние продольные силы F приложены с некоторым эксцентриситетом e относительно центра тяжести поперечного сечения бруса (рис. 3.2.1).

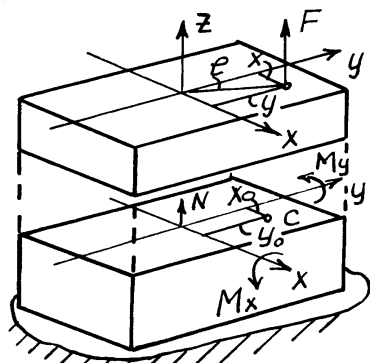


Рис. 3.2.1. Схема для определения внутренних силовых факторов

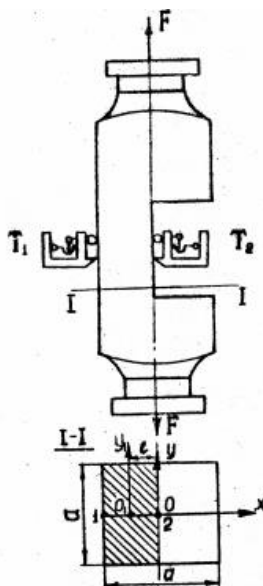


Рис. 3.2.2 Размещение рычажных тензометров

На основании принципа независимости действия сил нормальные напряжения в любой произвольной точке C поперечного сечения бруса (рис. 3.2.1), имеющей координаты x_0 и y_0 будут складываться из напряжений от продольной силы N и напряжений от чистого изгиба моментами M_x и M_y :

$$\sigma_C = \sigma_C^N + \sigma_C^{M_x} + \sigma_C^{M_y}, \text{ или}$$

$$\sigma_c = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{J_x} Y_o \pm \frac{M_y}{J_y} X_o \quad (3.2.1)$$

Для сечения в виде прямоугольника напряжения в крайних волокнах можно рассчитать по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_x}{W_x} \pm \frac{M_y}{W_y} \quad (3.2.2)$$

При этом знаки в формуле выбирают на основании анализа расчетной схемы. Если в бруске прямоугольного поперечного сечения (рис. 3.2.2) точка приложения растягивающей силы F будет находиться на одной из главных осей поперечного сечения, например, на оси X , то напряжения в крайних волокнах (в точках 1 и 2) на основании (3.7) от продольной силы $N = F$ будут одинаковы, т. е.

$$\sigma_1^N = \sigma_2^N = \frac{N}{A} = \frac{F}{a \times a/2} \quad (3.2.3)$$

От изгибающего момента в точке 2 возникают растягивающие напряжения, а в точке 1 - сжимающие. Тогда получают

$$\sigma_{1,2}^M = \pm \frac{M_y}{W_y} \quad (3.2.4)$$

где $M_y = F \times \frac{a}{2}$; $W_y = \frac{a \times (a/2)^2}{6}$

Суммарные напряжения в точках 1 и 2 с учетом формул (3.2.3) и (3.2.4) будут равны :

$$\sigma_1 = \frac{2F}{a^2} - \frac{3F}{4a^2} \quad (3.2.5)$$

$$\sigma_2 = \frac{2F}{a^2} + \frac{3F}{4a^2} \quad (3.2.6)$$

В итоге получают: наибольшие напряжения возникают, как и при изгибе, в наиболее удаленных от нейтральной оси точках.

Наибольшую нагрузку F_{\max} , которую можно приложить к образцу, определяют из (3.2.7), учитывая, что максималь-

ные напряжения не должны вызывать пластических деформаций, т. е. $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{пл}}$. Тогда с учетом формулы (3.2.6) получают

$$\sigma_{\max} = \frac{2F}{a^2} + \frac{3F}{4a^2} \leq \sigma_{\text{пл}}. \quad (3.2.7)$$

Описание лабораторной установки.

Работа выполняется на машине УГ-20. Фрагмент испытательной машины с установленным на ней образцом показан на рис. 3.2.3.

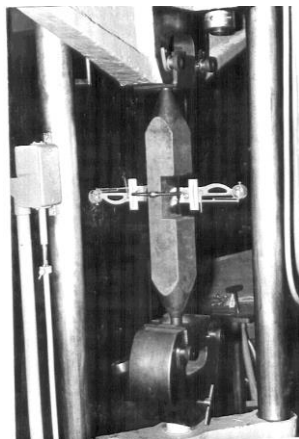


Рис. 3.2.3. Фото образца с рычажными тензометрами

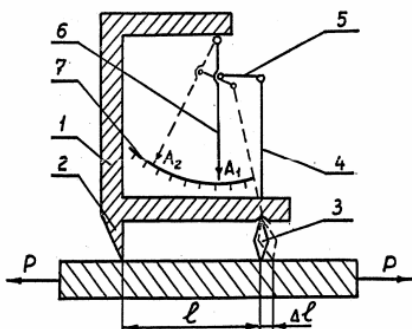


Рис. 3.2.4. Схема тензометра

Образец для испытания имеет в ослабленном сечении прямоугольную форму $a \times a/2$ (рис.3.2.2). Растягивающая нагрузка прикладывается с эксцентриситетом $e = a/4$, взятым вне ядра сечения, чтобы получить в крайних волокнах напряжения разных знаков.

Для измерения деформаций в крайних волокнах на образце установлены два рычажных тензометра (рис.3.2.3) для измерения малые линейные деформации. Тензометр прижимают к образцу при помощи струбины. Расстояние между двумя но-

жами: неподвижным — 2 и подвижным — 3 называется базой тензометра, она равна $l_6 = 20$ мм. При деформации образца расстояние между ножами изменяется. Подвижный нож 3 поворачивается и отклоняет рычаг 4. Отклонение рычага 4 через коромысло 5 передается на стрелку 6, которая поворачивается вокруг оси, закрепленной на рамке тензометра 1. Разность отсчетов $\Delta A = A_2 - A_1$ (A_1, A_2 — начальный и конечный отсчеты) пропорциональна абсолютной деформации Δl . Система рычагов обеспечивает увеличение деформации Δl (мм) в тысячу раз ($K = 103$ — коэффициент увеличения тензометра).

Методика выполнения опыта и обработка результатов.

1. Штангенциркулем с точностью 0,1 мм измеряют размеры поперечного сечения образца, а также эксцентриситет e приложения нагрузки. Эти величины, а также значения модуля продольной упругости E и базу тензометров и заносят в журнал наблюдений.

2. Из формулы (3.2.7) определяют максимальную нагрузку F_{\max} и, приняв начальную нагрузку F_0 , определяют величину ступени нагружения ΔF такой, чтобы можно было выполнить 3 – 4 нагружения образца. Затем прикладывают начальную нагрузку F_0 для выбора всех зазоров. Снимают показания тензометров T_1 и T_2 и записывают в таблицу журнала наблюдений.

3. Увеличивают нагрузку равными ступенями 3 – 4 раза, снимают показания тензометров и заносят в таблицу.

4. Определяют среднее значение абсолютной продольной деформации $\ell_{cp} = \frac{\Delta T_{cp}}{K}$ по каждому тензометру и величину относительной продольной деформации $\xi = \Delta l_{cp} / l_6$. ($K = 103$ — коэффициент увеличения тензометра).

5. По закону Гука вычисляют напряжения в каждой точке $\sigma^3 = E * \xi$.

6. Вычисляют теоретические значения напряжений в точках 1 и 2 (σ_1^T и σ_2^T) по формулам (3.2.5, 3.2.6) при ступени

нагрузки ΔF , строят совмещенные эпюры нормальных напряжений по опытным и теоретическим данным и сравнивают полученные значения напряжений.

Содержание отчёта

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Испытательная машина.
4. Измерительные приборы.
5. Схема установки.
6. Исходные данные.
 - 6.1. Модуль продольной упругости E .
 - 6.2. Размеры поперечного сечения образца h и b .
 - 6.3. База тензометров l_0 .
 - 6.4. Цена деления шкалы тензометров C .
 - 6.5. Координаты приложения силы x , y .
 - 6.6. Площадь поперечного сечения образца A .
 - 6.7. Осевой момент сопротивления сечения W_y .
7. Результаты эксперимента.

№ п/п	Нагрузка F Н	Приращение нагрузки ΔF Н	Показания тензометров		Приращение показаний тензометров	
			T_1	T_2	ΔT_1	ΔT_2
Средние значения приращений		$\Delta F_{cp} =$	X	X	$\Delta T_1^{cp} =$	$\Delta T_2^{cp} =$

8. Опытное определение напряжений $\sigma_1^э$ и $\sigma_2^э$.
9. Теоретическое определение напряжений σ_1^T и σ_2^T .
10. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Какой случай сложного сопротивления называют внецентренным растяжением (сжатием)? Чем отличается частный случай внецентренного растяжения (сжатия) от общего? Приведите примеры.
3. Какие внутренние силовые факторы возникают в поперечном сечении бруса при внецентренном растяжении (сжатии)?
4. По какой формуле можно теоретически определить напряжения в любой точке сечения при внецентренном растяжении (сжатии)?
5. Какая линия называется нейтральной и как она располагается?
6. Как определить опытным путем напряжения в крайних волокнах сечения бруса?
7. Как устроен рычажный тензомер?
8. Почему брус нагружают равными ступенями? С какой целью прикладывается начальная нагрузка?
9. В каких точках поперечного сечения бруса возникают наибольшие напряжения при внецентренном растяжении (сжатии)?

Литература: [5] - § 36; [7] - § 80.

3.3. Исследование перемещений при поперечном изгибе

Цель работы: экспериментальное определение прогибов балки при плоском поперечном изгибе и сравнение их с величинами, вычисленными теоретическим расчетом.

Теоретическая часть работы: При прямом изгибе плоскость действия изгибающего момента (силовая

плоскость) проходит через одну из главных центральных осей поперечного сечения.

Изогнутая ось балки, называемая упругой линией, лежит в силовой плоскости.

Перемещение любого сечения балки характеризуется прогибом Y и углом поворота θ сечения (рис.3.5.1).

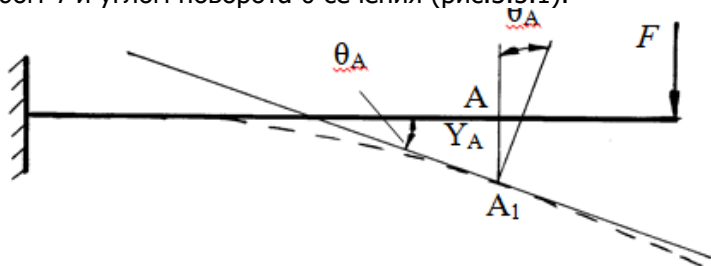


Рис. 3.3.1.

Теоретические величины перемещений балки могут быть определены различными способами. Наиболее общим методом определения перемещений стержневых систем является метод Мора. При определении перемещений с помощью интеграла Мора:

$$\Delta_{iF} = \sum_{i=1}^n \int_{l_i} \frac{M_F M_i}{EJ_x} dz \quad (3.3.1)$$

часто используется графо-аналитический прием вычисления интеграла, называемый способом Верещагина.

Напомним порядок определения перемещений:

1. Строится единичное состояние системы. Для этого заданная балка освобождается от внешних нагрузок и в том сечении, где ищется перемещение, прикладывается единичная обобщенная сила в направлении искомого перемещения.

2. Для заданного (грузового) и единичного состояний строятся эпюры изгибающих моментов.

3. Грузовая M_F и единичная M_i эпюры перемножаются по формуле Верещагина

$$\Delta_{iF} = \sum_{i=1}^n \frac{A_F M_i^C}{EJ_x}, \quad (3.3.2)$$

где A_F – площадь грузовой эпюры M_F на участке перемножения эпюр;

M_i^C – ордината, взятая из единичной эпюры M_i под центром тяжести грузовой;

EJ_x – жесткость балки на данном участке.

Используя (3.14), получим

$$\Delta_{iF} = \frac{1}{EJ_x} (A_F^{(1)} M_i^{C_1} + A_F^{(2)} M_i^{C_2}) = \frac{1}{6EJ_x} (2ac + 2bd + ad + bc). \quad (3.3.3)$$

Формула трапеций (3.3.3), справедливая для перемножения линейных эпюр, может быть использована в данной лабораторной работе.

Процесс перемножения эпюр может быть формализован, если использовать матричную форму записи выражения (3.3.3). Матричная форма записи особенно удобна при использовании в расчетах ЭВМ.

Можно проверить, выполнив необходимые матричные операции, что формуле трапеций (3.3.3) соответствует следующая матричная запись:

$$\Delta_{iF} = [c \ d] \frac{l}{6EJ_x} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}. \quad (3.3.4)$$

Обозначая M_x и M_F^o матрицы, составленные из ординат единичной M_i и грузовой M_F эпюр

$$M_x = \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix}; \quad M_F^o = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix};$$

запишем выражение (3.3.4) в следующем виде:

$$\Delta_{iF} = M_x^T L M_F^o, \quad (3.3.5)$$

где Δ_{iF} – искомое перемещение;

M_F^o – транспонированная матрица, составленная из ординат единичной эпюры;

M_x^T – матрица, составленная из ординат грузовой эпюры.

Выражение $L = \frac{l}{6EJ_x} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ получило название матрицы

податливости. Множитель $\frac{l}{6EJ_x}$ содержит информацию о длине и

жесткости рассматриваемого участка. Вид матрицы $\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$ соот-

ветствует случаю перемножения линейных эпюр, т.е. зависит от

вида внешней нагрузки. Если балка имеет несколько участков перемножения эпюр, то:

1. Составляется квазидиагональная матрица податливости вида:

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & L_n \end{bmatrix},$$

где L_1, L_2, \dots, L_n – матрицы податливости по участкам.

2. Матрицы M_x и M^0 формируются из ординат единичной и грузовой эпюры, имеющих сквозную нумерацию вдоль длины балки.

Экспериментальная установка и измерительные приборы.

Исследование проводят на стальной балке ($E = 2 \times 10^5$ МПа) прямоугольного поперечного сечения (рис.3.3.3). Нагружение осуществляется с помощью универсальной испытательной машины УГ-20 (рис. 3.3.4). Прогибы балки в сечениях В и К измеряют стрелочными индикаторами часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм. Индикаторы (I_1 и I_2) закрепляют на штативах так, чтобы шток индикатора упирался в верхнюю (нижнюю) поверхность балки (рис.3.3.3).

Для измерения линейных размеров балки применяют штангенциркуль и линейку.

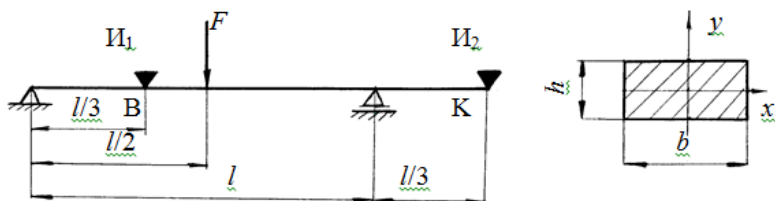


Рис. 3.5.3 Схема установки

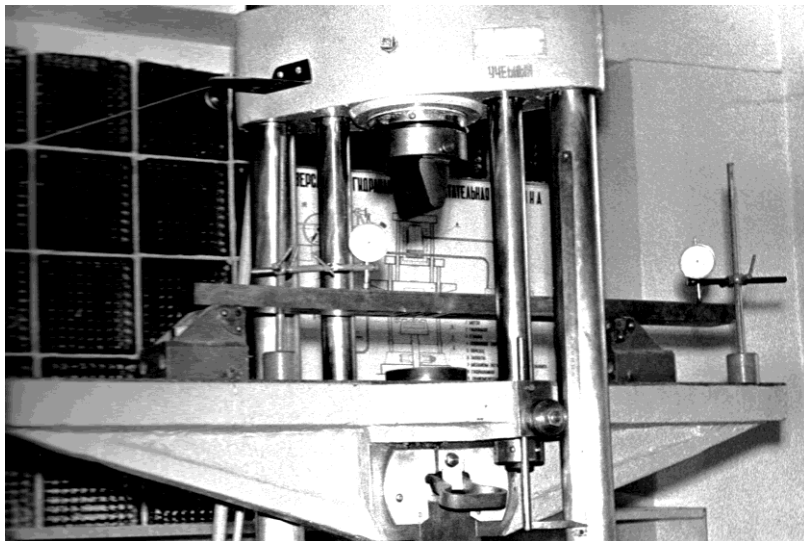


Рис. 3.5.4. Фото установки

Вычисление теоретических значений перемещений

В данной лабораторной работе предполагается два возможных варианта вычисления теоретических значений прогибов в сечениях В и К балки (рис. 3.3.3):

1. Определение перемещений по способу Верещагина.
2. Реализация матричного способа определения перемещений на ЭВМ.

Найдем прогиб в сечении К балки по способу **Верещагина**:

1. Строим единичное состояние (рис. 3.3.5, д).
2. Построим эпюры изгибающих моментов для грузового M_F (рис.3.3.5, г) и единичного M_2 (рис. 3.3.5, е) состояний.
3. Перемножим эпюры M_F и M_2 по формуле трапеций (3.3.3). Перемножение производим в пределах двух участков:
 - участок АС – перемножаются два треугольника;
 - участок СД – перемножаются треугольник и трапеция.

$$\Delta_{2F} = Y_K = \frac{l}{6EJ_x} \left\{ \frac{l}{2} \left(2 \frac{Fl}{4} \frac{l}{6} \right) + \frac{l}{2} \left(2 \frac{Fl}{4} \frac{l}{6} + \frac{Fl}{4} \frac{l}{3} \right) \right\} = \frac{Fl^3}{48EJ_x} \quad (3.3.6)$$

Аналогично можно найти прогиб в сечении В.

Обратимся к алгоритму матричного способа определения перемещений. Он сводится к вычислениям согласно выражению:

$$\Delta_{iF} = M_x^T L M_F^o \quad (3.3.7)$$

1. Из построенных эпюр видно, что перемножению подлежат три участка. Нумеруем границы этих участков (рис. 3.3.5, **в, г**):

I участок АВ (точки 1, 2);

II участок ВС (точки 3, 4);

III участок CD (точки 5, 6).

2. Составляем матрицу M_x , для чего записываем в столбец ординаты единичной эпюры M_1 в шести пронумерованных точках.

Из ординат грузовой эпюры M_F формируем матрицу M_F^o

$$M_x = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2}{9}l \\ \frac{2}{9}l \\ \frac{l}{6} \\ \frac{l}{6} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad M_F^o = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F}{6}l \\ \frac{F}{6}l \\ \frac{Fl}{4} \\ \frac{Fl}{4} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.3.8)$$

Теоретическая и прикладная механика

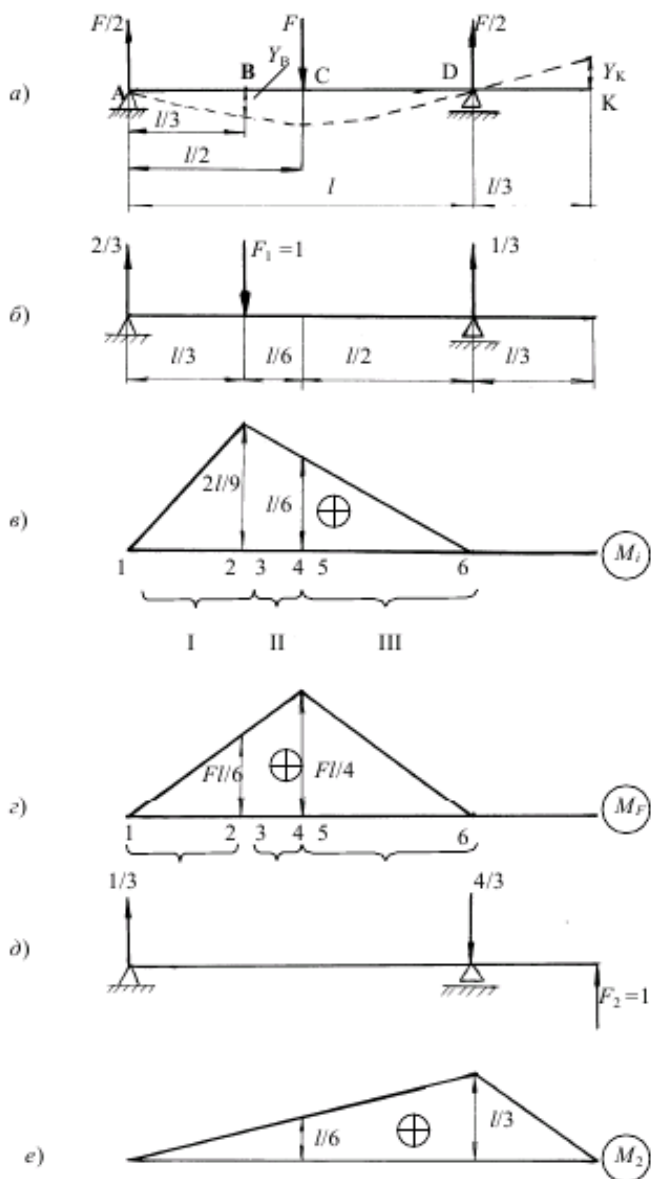


Рис. 3.3.5

Найдем перемещение в сечении В. На рис. 3.3.5. **б, в** показано единичное состояние и соответствующая ему эпюра M_1 , а на рис. 3.5.5, **г** – грузовая эпюра M_F .

3. Формируем матрицы податливости L_i для каждого из

трех участков

$$L_1 = \frac{l/3}{6EJ_x} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} = \frac{1}{6EJ_x} \begin{bmatrix} 2l & l \\ l & 2l \end{bmatrix}; \quad L_2 = \frac{l/6}{6EJ_x} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} = \frac{1}{6EJ_x} \begin{bmatrix} l & l \\ l & 2l \end{bmatrix};$$

$$L_3 = \frac{l/2}{6EJ_x} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} = \frac{1}{6EJ_x} \begin{bmatrix} l & l \\ l & l \end{bmatrix}. \quad (3.3.9)$$

4. Составляем квазидиагональную матрицу податливости для всей балки:

$$L = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{6EJ_x} \begin{bmatrix} \frac{2}{3}l & \frac{l}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{l}{3} & \frac{2}{3}l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{3} & \frac{l}{6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{6} & \frac{l}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l & \frac{l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{l}{2} & l \end{bmatrix}. \quad (3.3.10)$$

Аналогично составляются матрицы M_x , M^p , L при определении прогиба в сечении К. На этом подготовка исходных данных закончена. Далее необходимо выполнить матричные операции согласно блок-схеме (рис.3.3.6). Наличие стандартных подпрограмм операций над матрицами в библиотеке вычислительной машины позволяет второй этап выполнить на ЭВМ.

Ниже приводится программа вычисления перемещений на алгоритмическом языке «Паскаль»:

```
uses crt;
var
m1: array [1..10] of real;
f: array [1..10] of real;
l: array [1..20, 1..20] of real;
v1: array [1..20] of real;
m, i, j: integer;
```

```

S, e, il, d: real;
begin
clrscr; textcolor (7) ;goto xy (20, 7) ;
write ( ' Определение перемещений ' ) ;
goto xy (10,15); textcolor (2);
writeln ( ' Введите число строк матрицы L податливости m=
' ) ;
read (m) ; clrscr;
writeln ( ' Введите единичную матрицу Mx ' ) ;
for i:=1 to m do
begin
write ('Mx(' ,i, ')=' ); read (ml[i]); write ( ' ' );
end; clrscr;
writeln ( ' Введите грузовую матрицу MF ' ) ;
for i:=1 to m do
begin
write ('MF(' ,i, ') = '); readln (f[i]);
end; clrscr;
writeln ('Введите матрицу податливости L по строкам');
for i : =1 to m do
for j : =1 to m do
begin
write ('L(' ,i,',' j, ') = '); read (l[i,j]); write ( ' ' );
end; clrscr;
for i:=1 to m do
begin
S:=0;
for j : =1 to m do
begin
S:=S+ml[j]*l[j,i] ; end;
vl[i]:=S;
end; S:=0;
for i:=1 to m do
begin
S:=S+vl[i]*f[i];
end;
writeln ('Введите модуль упругости в МПа E=');
read (e) ;
writeln ('Введите момент инерции сечения в см4 Ix=');

```

```
read (i1)
begin
d:= 100000000*d/e/il/6;
writeln ('Величина прогиба в мм D=',d:2:3);
end;end.
```

Порядок проведения испытаний

1. Вычислить предельную нагрузку для балки из условия, чтобы напряжения в балке не превышали предела пропорциональности ($\sigma_{\text{пц}} = 200 \text{ МПа}$)

$M_{\text{пц}} = \sigma_{\text{пц}} I_x$, где $M_{\text{пц}}$ – изгибающий момент в сечении С (рис. 3.3.5, r).

2. Установить большие стрелки индикатора I_1 и I_2 на «0».

3. Нагрузить балку предварительной нагрузкой F_0 и записать показания индикаторов. Предварительное нагружение позволяет устранить неплотности в местах соприкосновения балки с опорами и нагружающим приспособлением.

4. Увеличить нагрузку на ΔF ($F_1 = F_0 + \Delta F$) и записать показания индикаторов.

5. Повторить опыт (пункт 4), увеличив нагрузку несколькими ступенями $F_2 = F_1 + \Delta F$, $F_3 = F_2 + \Delta F$ (величина F_3 должна быть меньше предельной нагрузки, см. п. 1).

6. Результаты замеров и все вычисления занести в таблицы журнала для лабораторных работ.

7. Вычислить экспериментальные значения прогибов в сечения В и К (средние арифметические значения).

8. Сравнить значения прогибов экспериментальные и теоретические. Вычислить величину погрешности в процентах.

9. Построить диаграмму перемещений для сечения В (зависимость величины прогиба балки в сечении В от нагрузки F).

Результаты эксперимента.

№ п/п	Нагрузка F Н	Прираще- ние нагруз- ки ΔF Н	Показания индикаторов		Приращения показаний индикаторов	
			I_B делен.	I_K де- лен.	ΔI_B делен.	ΔI_K делен.
Среднее значение приращений		$\Delta F_{CP} =$	X	X	$\Delta I_B^{cp} =$	$\Delta I_K^{cp} =$

Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Схему лабораторной установки.
3. Схему индикатора часового типа.
4. Журнал (таблицу) наблюдений с результатами измерений и вычислений.
5. Таблицу сравнения экспериментальных данных с теоретическими.
6. Диаграмму перемещений.
7. Вычисления.
8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Порядок определения перемещений по способу Верещагина.
2. От чего зависит количество участков при определении перемещений по способу Верещагина?

3. Как получить единичное состояние при вычислении прогиба и угла поворота в заданном сечении?
4. Как влияет жесткость балки на величину прогиба и угла поворота в заданном сечении?
5. Записать формулу Верещагина в матричной форме?
6. Как составляется матрица податливости для балки?
7. Как составляются матрицы M_x , M^0 для балки?
8. Какую механическую характеристику материала нужно знать, чтобы определить прогиб?
9. Пояснить устройство и принцип работы индикатора часового типа.
10. С какой целью нагружение балки производится ступенчато?

Литература: [6] - §§ 8.3, 8.5; [7] - §§ 58 – 60.

3.4. Определение деформаций при косом изгибе балки

Цель работы: определить опытным путем величину и направление прогиба свободного конца консоли при косом изгибе и сравнить полученные результаты с величинами, вычисленными теоретически.

Теоретическая часть работы. Косым изгибом называют такой вид изгиба, при котором плоскость действия внешних нагрузок (силовая плоскость) не совпадает ни с одной из главных центральных осей инерции поперечного сечения бруса.

Косой изгиб представляют в виде двух прямых изгибов относительно главных центральных осей инерции поперечного сечения (рис. 3.4.1). При этом сила F раскладывается на две составляющие:

$$F_x = F \sin \alpha, \quad F_y = F \cos \alpha. \quad (3.4.1)$$

Эти силы вызывают соответствующие прогибы свободного конца балки f_x и f_y , которые определяют, например, способом Верещагина.

Результирующий прогиб f (рис. 3.4.1) определяют гео-

метрическим суммированием прогибов по формуле:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (3.4.2)$$

При этом максимальные напряжения в бруске не должны превышать предел пропорциональности ($\sigma \leq \sigma_{\text{пл}}$).

Угол φ между направлением прогиба f и осью Y (рис. 3.4.1) определяется так же, как и угол β (угол наклона нейтральной линии к оси X) из формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \beta = \frac{f_x}{f_y} = \frac{J_x}{J_y} \operatorname{tg} \alpha; \quad \varphi = \beta. \quad (3.4.3)$$

Таким образом, перемещение центра тяжести любого поперечного сечения при косом изгибе происходит в плоскости, перпендикулярной к нейтральной линии и не совпадает с силовой плоскостью (рис. 3.4.1).

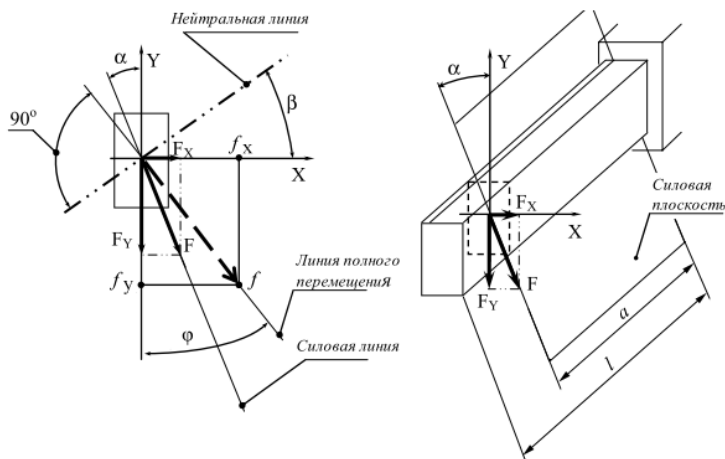


Рис. 3.4.1

Величины прогибов свободного конца консольной балки при приложении внешней силы на расстоянии a от защемления и длине консоли l (рис. 3.4.1) определяют по формулам:

$$\begin{aligned}
 f_y &= \frac{F_y \cdot a^2 \cdot (3l - a)}{6EJ_x} = \frac{F \cdot a^2 \cdot (3l - a) \cdot \sin \alpha}{6EJ_x}, \\
 f_x &= \frac{F_x \cdot a^2 \cdot (3l - a)}{6EJ_y} = \frac{F \cdot a^2 \cdot (3l - a) \cdot \cos \alpha}{6EJ_y}.
 \end{aligned}
 \tag{3.4.4}$$

Описание лабораторной установки.

Для проведения работы используется испытательная установка, представленная на рис. 3.4.2. Установка состоит из исследуемой балки 1, левый конец которой закреплён в неподвижной опоре 2; основания 3; гиревого подвеса 4 и набора грузов 5. Гиревой подвес может перемещаться вдоль оси балки и содержит шарикоподшипник, обеспечивающий вертикальное приложение нагрузки при повороте сечения балки. Неподвижная опора содержит зажим, управление которым осуществляется при помощи винта 6. Отпуская зажим поворотом винта 6, можно повернуть сечение балки рукояткой 7 на угол в пределах от 0° до 90°. Угол поворота устанавливается по шкале 8. Измерение вертикальной f_y и горизонтальной f_x составляющих полного прогиба f осуществляют индикатором часового типа 9 с ценой деления 0,01мм. Индикаторы крепятся специальными удлинителями 10 к штативной стойке 11. Суммарный прогиб свободного конца балки можно также приблизительно определить по шкале 12, закрепленной на штативной стойке. Шкала выполнена из оргстекла и снабжена сеткой вертикальных и горизонтальных линий с ценой деления 2мм. Отсчет по этой шкале осуществляют при помощи втулки с кольцевым выступом и иглой 13, которые закреплены на свободном конце балки.

наблюдений показания индикаторов $T_{верт}$ и $T_{гор}$.

7. Разгрузить балку.

8. Вычислить:

а) разности показаний индикаторов $\Delta T_{верт}$ и $\Delta T_{гор}$;

б) средние значения разностей показаний индикаторов $\Delta T_{иср}$;

в) средние значения величин приращений составляющих прогиба в вертикальной $\Delta f_{верт}$ и горизонтальной $\Delta f_{гор}$ плоскостях. Результаты занести в табл. (результаты испытаний и расчётов).

8. Определить значение полного прогиба f_3 и занести его в таблицу.

9. Определить угол φ_3 между плоскостью изгиба и силовой плоскостью и занести его величину в таблицу.

10. Определить теоретические значения полного прогиба по формулам (3.4.2) и (3.4.4), а также углы β и φ (3.4.3). Результаты занести в таблицу.

11. Определить расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями прогиба f и угла φ по формулам:

$$\delta_f = \left| \frac{f_T - f_3}{f_T} \right| \cdot 100\%;$$

$$\delta_\varphi = \left| \frac{\varphi_T - \varphi_3}{\varphi_T} \right| \cdot 100\%.$$

Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

1. Цель работы.

2. Расчётную схему.

3. Схему установки и исходные данные.

Длина балки мм	Размеры поперечного сечения балки, мм		Моменты инерции поперечного сечения балки, мм ⁴		Модуль упругости МПа	Координата приложения силы мм	Угол наклона силы, град.	Угол наклона нейтральной линии, град.
	b	h	J_x	J_y	E	a	α	β
l								

4. Результаты испытаний и расчётов

Нагрузка, Н	$\alpha = ___^\circ$			
F	Осчёт по индик. $T_{верт}$	Разность отсчётов $\Delta T_{верт}$	Отсчёт по индик. $T_{гор}$	Разность отсчётов $\Delta T_{гор}$
0				
10				
20				
30				
$\Sigma \Delta T_i$				
$\Delta T_{icp} = \frac{\Sigma \Delta T_i}{3}$				
$\Delta f_{верт} = 10^{-2} \cdot \Delta T_{icp}$				
$\Delta f_{гор} = 10^{-2} \cdot \Delta T_{icp}$				
$f_{\Sigma} = \sqrt{\Delta f_{верт}^2 + \Delta f_{гор}^2}$				
$\varphi_{\Sigma} = \arctg \frac{\Delta f_{гор}}{\Delta f_{верт}}$				

5. Сравнение экспериментальных и теоретических значений.

Угол α , град.	Прогиб f , мм			Угол φ , град.		
	f_T	f_{Σ}	$\delta_f, \%$	φ_T	φ_{Σ}	$\delta_{\varphi}, \%$
$\alpha = \text{---}^\circ$						

6. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

- Какова цель лабораторной работы?
- Как устроена лабораторная установка?
- Какой изгиб называют косым? Какие виды изгибов Вы еще знаете?
- Что называют плоскостью изгиба? Силовой плоскостью?
- Что называют нейтральной (нулевой) линией при косом изгибе балки и как она расположена относительно плоскости действия изгибающего момента (силовой плоскости)?
- Как расположена линия полного прогиба по отношению к плоскости действия изгибающего момента? По отношению к нулевой линии сечения?
- Как вычислить теоретически составляющие и суммарный прогиб конца консольной балки при косом изгибе?
- Как будет изменяться суммарный прогиб конца консоли от действия постоянной нагрузки при увеличении угла α ? При его уменьшении?
- Как определяют положение нулевой линии?
- Как определяют угол между суммарным прогибом и силовой плоскостью?
- Какие силовые факторы действуют в поперечных сечениях балки при косом изгибе?
- Как определить суммарный прогиб опытным путем?
- Как изменится соотношение величин прогибов, если прямоугольное сечение балки заменить круглым, квадратным?
- Назовите формы поперечных сечений балок, для которых невозможен косой изгиб.

Литература: [5] - §§ 34; [7] - §§ 75.

3.5 Проверка теоремы о взаимности перемещений

Цель работы – экспериментальная проверка теоремы о взаимности перемещений и сравнение результатов эксперимента с теоретическими данными.

Теоретическая часть работы. Теорема о взаимности работ гласит, что работа первой силы на перемещении точки ее приложения под действием второй силы равна работе второй силы на перемещении точки ее приложения под действием первой силы, т.е.

$$F_1 y_{12} = F_2 y_{21} = W \quad (3.5.1)$$

Если силы равны, то теорема переходит в теорему о взаимности перемещений: перемещение первого сечения под действием силы, приложенной во втором сечении, равно перемещению второго сечения под действием той же силы, но приложенной в первом сечении.

$$y_{12} = y_{21} \quad (3.5.2)$$

Описание лабораторной установки.

Опыты проводятся на настольной установке СМ-4 (рис.3.5.1). Установка представляет собой балку, изготовленную из стальной полосы 7х40 мм, опирающуюся на две шарнирные опоры.

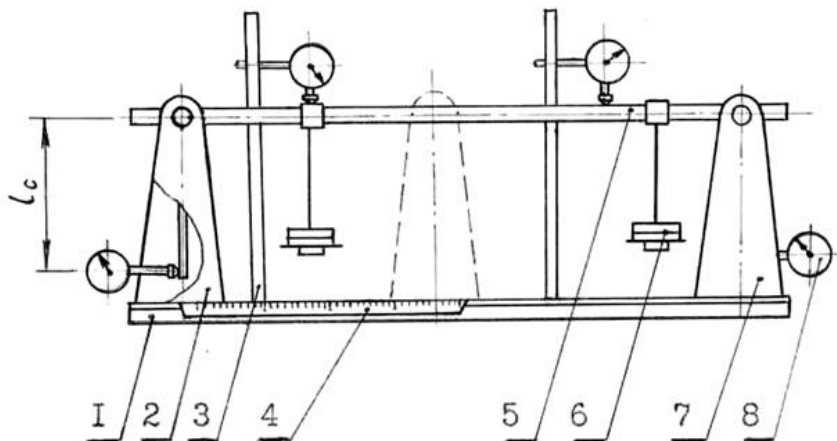


Рис. 3.5.1. Установка СМ-4 для определения перемещений при изгибе:

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

Нагружение осуществляется с помощью гиревого подвеса и набора грузов. Нагрузка прикладывается сосредоточенно.

Измерение прогибов и углов поворота опорных сечений балки производится с помощью индикаторов линейных перемещений часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Для измерения угла поворота опорных сечений в конструкции шарнирной опоры установки предусмотрен рычаг (стержень) длиной $l_c = 150$ мм, закрепленный перпендикулярно к оси балки и поворачивающийся вместе с сечением балки в результате ее деформации. При этом свободный конец рычага описывает дугу (радиуса l_0), длину которой и замеряет индикатор линейных перемещений, закрепленный на стойке опорного устройства и упирающийся штифтом в свободный конец рычага.

Конструкция установки позволяет изменять длину пролета, точку приложения нагрузки и ее величину, а также получать двухопорную консольную балку (рис.3.5.2).

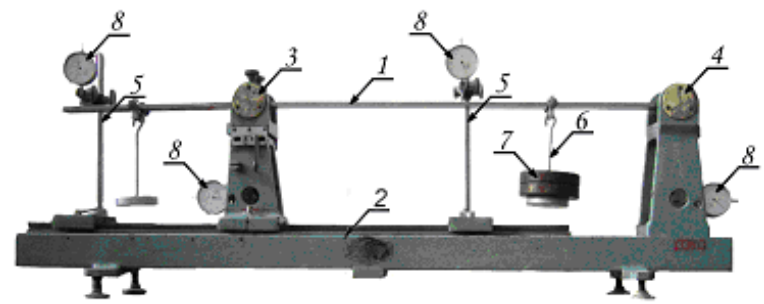


Рис. 3.5.2. Двухопорная консольная балка:
 1–балка; 2–основание; 3–подвижная опора; 4–неподвижная опора; 5–индикаторная стойка; 6–гиревой подвес; 7–набор грузов; 8–индикатор часового типа

Методика выполнения опыта и обработка результатов.

Проверка теоремы о взаимности перемещений (рис. 3.5.3) выполняется следующим образом.

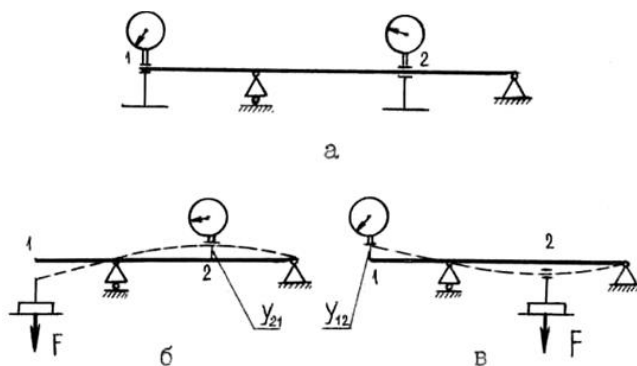


Рис. 3.5.3. Проверка теоремы о взаимности перемещений

1. В двух произвольных сечениях балки устанавливаются индикаторы и гиревые подвесы (сечения 1 и 2 рис. 3.5.3, а). На индикаторе сечения 2 снимается начальный отсчет, балка нагружается в сечении 1 нагрузкой F и снимается отсчет инди-

катора, установленного в сечении 2 (см. рис. 3.5.3, б). Разность данного и начального отсчетов равна величине прогиба y_{21} в сечении 2.

2. Затем балка разгружается, а данные F и y_{21} заносятся в журнал испытаний.

3. Далее на индикаторе, установленном в сечении 1, снимается начальный отсчет, балка нагружается в сечении 2 той же нагрузкой F и по разности отсчетов индикатора 1 определяется величина прогиба y_{12} (см. рис. 3.5.3, в).

4. Балка разгружается и значение y_{12} заносятся в журнал испытаний.

5. Сопоставлением полученных данных по равенству (3.5.2) проверяется теорема о взаимности перемещений. Если равенство (3.5.2) не соблюдается, определяют процент погрешности

$$\delta_y = \frac{y_{12} - y_{21}}{y_{12}} \cdot 100\%$$

6. Делают выводы.

Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Расчётную схему.
3. Схему установки и исходные данные.
4. Результатами измерений.
5. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими.
6. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте теорему о взаимности работ и взаимности перемещений.
2. Поясните, как можно проверить теорему о взаимности перемещений в лабораторных условиях. Изложите порядок проведения работы.
3. Где можно использовать свойства теоремы о взаимности перемещений?

3.6. Определение опорной реакции в статически неопределимой балке

Цель работы – определить опытным путем лишнюю опорную реакцию однажды статически неопределимой балки и сравнить полученный результат с теоретическим.

Теоретическая часть работы. Система называется статически определимой, если внутренние усилия в ее элементах и реакции связей можно определить из условий равновесия статики. Система называется геометрически неизменяемой, если взаимные перемещения точек системы возможны лишь за счет деформации ее элементов.

Число внешних связей, при котором достигается геометрическая неизменяемость системы, называется необходимым числом связей. Всякую связь, наложенную сверх необходимой, называют дополнительной («лишней»).

Наложение дополнительных связей на статически определимую систему увеличивает ее жесткость и прочность, но превращает ее в статически неопределимую систему, в которой реакции опорных связей и внутренние силовые факторы не могут быть определены с помощью уравнений равновесия статики. Степень статической неопределимости соответствует числу дополнительных связей.

Известно несколько методов расчета статически неопределимых систем. Наиболее простой и универсальный из них – **метод сил**, который заключается в следующем:

- **устанавливается** степень статической неопределимости системы;
- **отбрасываются** дополнительные связи, их действие заменяется неизвестными реакциями;
- **записываются** условия равенства нулю перемещений по направлению отброшенных связей; эти уравнения называются уравнениями совместности деформаций или **каноническими** уравнениями метода сил;
- **коэффициенты** канонических уравнений, представляющие собой линейные или угловые перемещения, обычно определяются энергетическими методами.

Совместное решение уравнений статики и уравнений совместности деформаций дает возможность определить реакции всех связей.

При решении статически неопределимых задач вводятся следующие понятия: заданная система, **эквивалентная** система.

Любая рассматриваемая при решении статически неопределимая система называется заданной. **Эквивалентной** системой называется любой из статически определимых (геометрически неизменяемых) вариантов рассматриваемой системы, полученный путем освобождения ее от лишних связей и замены их действия «лишними» неизвестными X_i .

Рассмотрим вопрос определения лишней неизвестной для следующей заданной статически неопределимой системы (рис. 3.6.1,а). После выбора эквивалентной системы (рис.3.6.1,б) запишем каноническое уравнение метода сил

$$\delta_{11} \cdot X_1 + \Delta_{1F} = 0, \quad (3.6.1)$$

где Δ_{1F} — перемещение точки приложения силы X_1 от действия нагрузки F ;

δ_{11} — перемещение точки приложения силы X_1 от её единичного значения.

Данные перемещения можно определить, например способом Верещагина и из формулы (3.6.1) вычислить теоретическое значение «лишней» неизвестной X_1 .

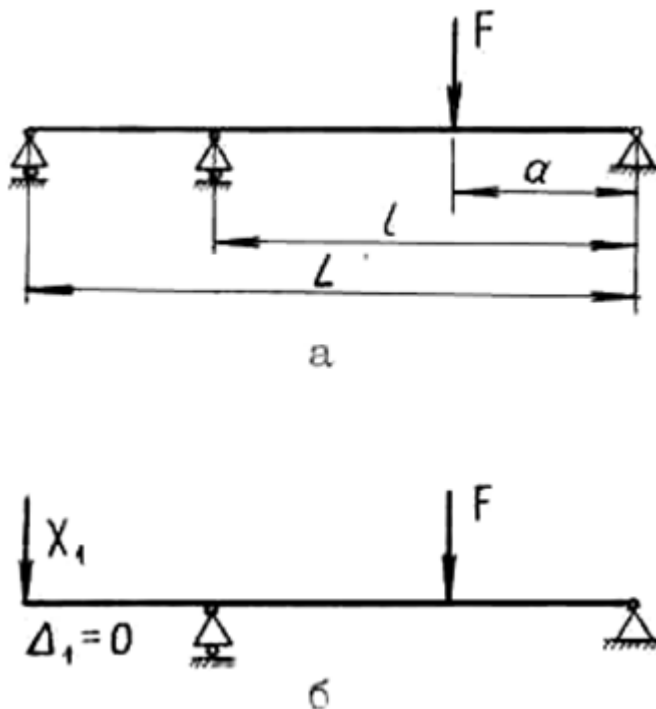


Рис.3.6.1

Напомним порядок определения перемещений способом Верещагина :

— Строится единичное состояние системы. Для этого заданная балка освобождается от внешних нагрузок и в том сечении, где ищется перемещение, прикладывается единичная обобщенная сила в направлении искомого перемещения.

— Для заданного (грузового) и единичного состояний строятся эпюры изгибающих моментов.

— Грузовая M_F и единичная M_i эпюры перемножаются по формуле Верещагина

$$\Delta_{iF} = \sum_{i=1}^n \frac{A_F M_i^C}{EJ_x}, \quad (3.6.2)$$

где A_F – площадь грузовой эпюры M_F на участке перемножения эпюр;

M_i^c – ордината, взятая из единичной эпюры M_i под центром тяжести грузовой;

EJ_x – жесткость балки на данном участке.

Эквивалентная система для балки (рис.3.6.1, б) может быть реализована на настольной установке двухопорной балки СМ-4 (рис.3.6.2). Для иллюстрации определения лишней неизвестной в однажды статически неопределимой системе заданную систему (рис. 3.6.1, а) выбираем такой, чтобы один из вариантов эквивалентной системы (см. рис. 3.6.1, б) представлял собой, двухопорную балку с консолью.

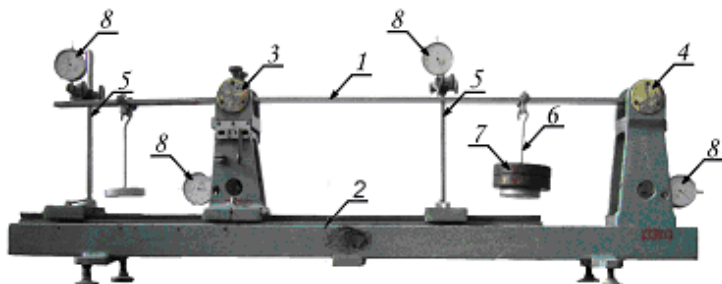


Рис. 3.6.2. Двухопорная консольная балка:

1–балка; 2–основание; 3–подвижная опора; 4–неподвижная опора; 5–индикаторная стойка; 6–гиревой подвес; 7–набор грузов; 8–индикатор часового типа

Методика выполнения опыта и обработка результатов.

Порядок проведения испытаний следующий:

— устанавливаем гиревые подвесы на конце консоли и в сечении приложения нагрузки F , при этом индикатор перемещений устанавливаем на конце консоли, (рис. 3.6.3, а);

— снимаем начальный отсчет с индикатора M_1 (на конце консоли);

— прикладываем заданную нагрузку F (опустить гирию весом, равным F) на гиревой подвес, расположенный в заданном по расчетной схеме сечении (см. рис. 3.6.3, б);

— на индикаторе перемещений снимаем отсчет I_2 . Разность отсчетов

$\Delta I = I_2 - I_1 = \Delta_1$ показывает величину перемещения консоли в двухопорной балке (рис.3.6.3, б);

— чтобы эквивалентная система соответствовала заданной, необходимо на гиревой подвес, закрепленный на консоли, приложить нагрузку X_1 такой величины, чтобы перемещение конца консоли стало равным нулю (из набора разновесов последовательно догружать гиревой подвес до тех пор, пока отсчет на индикаторе вернется к значению I_1 , т.е. $\Delta I = \Delta_1 = 0$ (см. рис. 3.6.3, в));

— при этом величина X_1 (общий вес разновесов на гиревом подвесе консоли) будет соответствовать реакции дополнительной связи в заданной статически неопределимой системе;

— опытное значение реакции X_1 сравниваем со значением, полученным теоретическим расчетом (например, с помощью канонического уравнения метода сил), определив процент отклонения $X_{оп}$ от X_T , полученные значения заносим в журнал наблюдений.

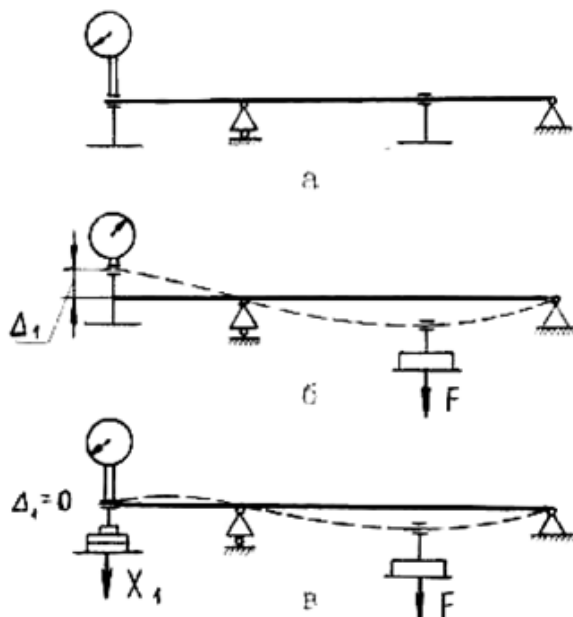


Рис. 3.6.3. Опытное определение лишней неизвестной
Содержание отчета

Отчет по работе должен содержать:

1. Цель работы.
2. Расчётную схему.
3. Схему установки и исходные данные.
4. Теоретическое определение реакции X_1 .
5. Результатами измерений.
6. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими.
7. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие системы называются статически неопределимыми?
2. Как определяется степень статической неопределимости?

3. Каков порядок решения статически неопределимых задач методом сил?

4. В какой форме записывается каноническое уравнение метода сил? Каков физический (геометрический) смысл всего уравнения, его слагаемых и сомножителей каждого слагаемого члена уравнения?

5. Какая система называется основной и эквивалентной? Какие необходимо выполнять условия при выборе основной системы?

6. Изложите порядок определения лишней неизвестной опытным путем в выполняемой лабораторной работе.

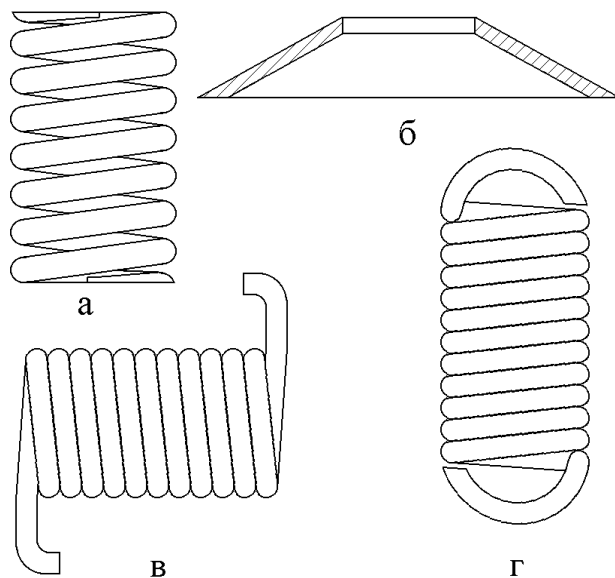
Литература: [6] - § 9.1; [7] - §§ 63,64.

3.7. Испытание спиральной пружины

Цель работы: Экспериментальное определение осадки и жёсткости цилиндрической пружины и сравнение их с теоретическими значениями.

Теоретическая часть работы.

Пружины являются одним из наиболее распространенных упругих элементов современных механизмов и машин. По конструкции их классифицируют на: спиральные (витые, многожильные витые и др.), стержневые (торсионы), тарельчатые, кольцевые, пластинчатые (листовые) и другие. По виду нагружения: пружины сжатия, растяжения, кручения, изгиба и комбинированного действия. Некоторые типы пружин приведены на рис.3.7.1.



а – пружина сжатия; б – тарельчатая; в – кручения; г – растяжения

Рис.3.7.1. Типы пружин

В свою очередь, наиболее распространенные спиральные пружины можно также подразделить на цилиндрические, конические, плоские и фасонные. Различают пружины и по форме сечения прутка: круг, квадрат, прямоугольник и другие, а также переменного сечения.

В машиностроении в качестве материала пружин применяют качественную рессорно-пружинную горячекатаную сталь. Листовые рессоры изготавливают из сталей 65С2, 60С2, 60С2А и 60С2Н2А. Для автомобильных рессор используют стали 50ХГ, 50ХГА. По мере развития технического прогресса для пружинных сталей применяются всё новые добавки, совершенствуются конструкции и технологии изготовления пружин.

Цилиндрическая спиральная пружина может рассматриваться как пространственно изогнутый брус, осевая линия кото-

рого, в простейшем случае, представляет собой винтовую линию. Форма осевой линии пружины определяется диаметром витка D , числом витков n и шагом пружины h , который зависит от угла подъема α (рис. 3.7.2). Упругие свойства пружины зависят от параметров D , n , формы и размеров сечения витка. Обычно пружины изготавливаются (навиваются) из круглой стальной проволоки с поперечным сечением диаметром d .

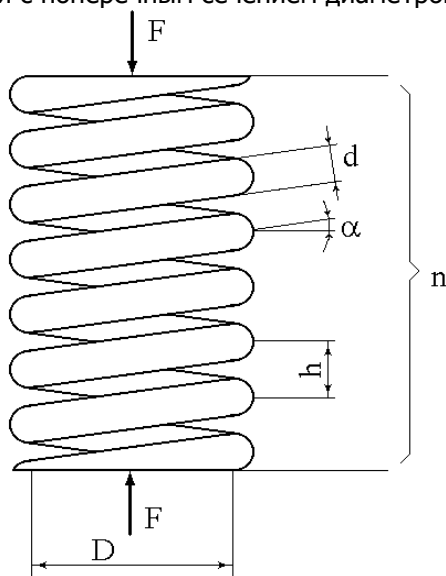


Рис.3.7.2

При действии на пружину центрально приложенной нагрузки происходит перемещение её концов – осадка пружины λ . Осадка пружины определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{8FD^3n}{Gd^4},$$

где F – внешняя сила; D – средний диаметр пружины; d – диаметр проволоки пружины; n – число витков пружины; G – модуль упругости при сдвиге материала пружины.

Помимо осадки характеристикой пружины является её жёсткость. Жёсткость пружины C – это величина силы F , при которой осадка пружины равна единице длины (например, 1 см). С учётом формулы (3.7.1) жёсткость пружины равна:

$$C = \frac{F}{\lambda} = \frac{Gd^4}{8D^3n}. \quad (3.7.2)$$

Между осадкой λ и силой F существует линейная зависимость. Поэтому жёсткость пружины C является постоянной и определяется по формуле:

$$C = \frac{\Delta F}{\lambda_{cp}} \quad (3.7.3)$$

где ΔF - нагрузка, соответствующая ступени нагружения;
 λ_{cp} - среднее значение осадки пружины на ступень нагружения.

Для экспериментального определения жёсткости необходимо получить зависимость осадки λ от силы F , график $F=f(\lambda)$.

Описание лабораторной установки.

Для проведения лабораторной работы используется испытательная машина УГ-20, настроенная на максимальную нагрузку 4 кН (4т) рис.2.1.3. Фрагмент установки показан на рис.3.7.3

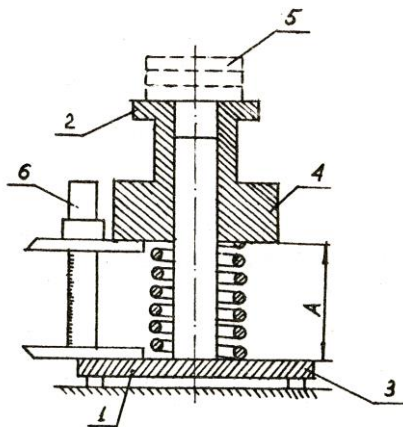


Рис.3.7.3

Исследуемая пружина устанавливается на траверсе 1-3 машины УГ-20. В неё вставляется цилиндрическая направляющая с подвижным нагружающим фланцем 4. Жёсткая исследуемая пружина изготовлена из стальной проволоки круглого поперечного сечения. Модуль упругости при сдвиге материала проволоки $G = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа}$. Нагружение пружины осуществляется через фланец 4 от силового цилиндра 5. Измерение осадки пружины можно производить с помощью штангенциркуля 6 либо по шкале перемещений траверсы. Получаемая при этом точность измерений 0,1 мм. Диаграммный механизм испытательной машины вычерчивает диаграмму $F=f(\lambda)$.

Методика выполнения опыта и обработка результатов.

1. Измеряют геометрические параметры - наружный диаметр пружины D_H ; внутренний диаметр пружины D_B ; диаметр проволоки пружины d ; вычисляют средний диаметр пружины: $D = 1/2 \cdot (D_H + D_B)$; определяют число витков пружины n .

Результаты измерений занести в таблицу 1.

2. Устанавливают пружину в собранном виде на траверсу испытательной машины. Нагрузку на пружину от веса фланца

принимают за нулевую. С помощью штангенциркуля измеряют расстояние A от основания до нижней границы нагружающего фланца (рис. 3.7.3).

3. Нагружают предварительной нагрузкой F_0 для устранения неплотностей в системе и замеряют расстояние A .

4. Выполняют ступенчатое нагружение $F_1 = F_0 + \Delta F$; $F_2 = F_1 + \Delta F$;

$F_3 = F_2 + \Delta F$ и измеряют расстояние A (рис.3.7.3), соответствующее каждой нагрузке. Результаты измерений занести в табл.2 .

5. Разгружают пружину и повторяют опыт. Результаты измерений заносят в табл.2 (второе нагружение).

6. Для каждого нагружения определяют разность отсчётов ΔA - осадку пружины, соответствующую ступени нагружения. Вычисляют среднее значение осадки пружины для каждого нагружения и результаты заносят в табл. 2. По результатам двух нагружений определить среднее значение осадки пружины, приходящееся на ступень нагружения. Результат заносят в табл. 2 и табл. 3.

7. По формулам (3.7.1) и (3.7.2) определяют теоретические значения осадки и жёсткости пружины при нагрузке, равной ступеням нагружения эксперимента. Результаты заносят в табл. 3.

8. По формуле (3.7.3) вычисляют экспериментальные значения жесткости C для обеих пружин. Результаты заносят в табл. 3.

9. Определяют расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями осадки и жёсткости пружины в процентах по формулам:

$$\delta_{\lambda} = \frac{|\lambda_{теор} - \lambda_{эксн}|}{\lambda_{теор}} \cdot 100\%;$$

$$\delta_C = \frac{|C_{теор} - C_{эксн}|}{C_{теор}} \cdot 100\%.$$

Результаты занести в табл. 3.

10. По экспериментальным данным первого нагружения пружин строится график зависимости осадки λ от силы F .

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема установки (рис.3.7.3).
3. Результаты испытаний и расчетов.

Параметры исследуемых пружин

Таблица 1

№	Наименование параметров	
1	Материал проволоки	
2	Наружный диаметр пружины D_H (мм)	
3	Внутренний диаметр пружины D_B (мм)	
4	Средний диаметр пружины D (мм)	
5	Диаметр проволоки d (мм)	
6	Число витков n	

Результаты измерений осадки пружины

Таблица 2

№	Нагрузка F (кг, Н)	первое нагружение		второе нагружение	
		отсчет A (мм)	разность отсчетов ΔA (мм)	отсчет A (мм)	разность отсчетов ΔA (мм)
0					
1					
2					
3					
Среднее значение осадки для каждого нагружения		$\lambda_1 = \Delta A_{cp} =$		$\lambda_2 = \Delta A_{cp} =$	
Среднее значение осадки на ступень нагружения		$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$			

4. Определение теоретических значений осадки и жёсткости пружины (формулы (3.7.1) и (3.7.2)).

5. Определение экспериментального значения жёсткости пружины (формула (3.7.3)).

6. Сравнение экспериментальных и теоретических значений и график зависимости осадки λ от силы F .

Таблица 3

Характеристики пружины	Пружина №1		
	Теор.	Эксп.	Расхожд. в%
Осадка пружины λ на ступень нагружения (см)			
Жёсткость C (кг/см, Н/см)			

7. Графики зависимости осадки λ от силы F

8. Выводы

Примечание: в выводах необходимо отметить следующее: как зависит осадка пружины от внешней нагрузки; какие основные характеристики пружины определены в работе;

каковы расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями осадки и жёсткости пружин и чем эти расхождения можно объяснить.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные типы пружин, применяемых в технике.

2. По каким признакам классифицируют пружины?

3. Какую роль выполняют пружинные устройства в механизмах и конструкциях?

4. Из каких сталей изготавливают пружины?

5. Назовите основные параметры и характеристики цилиндрических спиральных пружин.

6. Где применяют плоские, спиральные, тарельчатые и листовые пружины?

7. Какие внутренние силовые факторы действуют в поперечных сечениях витка при нагружении?
8. Какова цель и методика эксперимента?
9. Как зависят осадка и жесткость пружин от ее конструктивных размеров и упругих свойств материала пружины?
10. Что необходимо отметить в выводах о работе?

3.8. Исследование устойчивости стального стержня

Цель работы – исследовать явление потери устойчивости прямолинейной формы равновесия при осевом сжатии, проверить опытным путем справедливость формулы Эйлера.

Теоретическая часть работы. У стержней, длина которых значительно больше поперечных размеров, при определенной величине осевой сжимающей силы происходит искривление оси. Это явление носит название продольного изгиба. Переход прямолинейной формы равновесия в криволинейную называется потерей устойчивости.

Сжимающая сила, при которой прямолинейная форма равновесия перестает быть устойчивой, называется критической. Ее можно определить по формуле Эйлера

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2} \quad (3.8.1)$$

где E – модуль продольной упругости материала;

l – длина стержня;

J_{\min} – минимальный момент инерции сечения;

μ – коэффициент приведения длины, который зависит от способов закрепления концов стержня.

Формула Эйлера применима лишь в том случае, если потеря устойчивости стержня происходит при напряжениях, меньших предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$, т.е. когда справедлив закон Гука

$$\sigma_{кр} = \frac{F_{кр}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_{\text{пц}} \quad (3.8.2)$$

Здесь A – площадь поперечного сечения;

$\lambda = \mu \cdot l / i_{\min}$ – гибкость стержня;

$i_{\min} = \sqrt{I_{\min} / A}$ – минимальный радиус инерции сечения.

Предельная гибкость, начиная с которой можно использовать формулу Эйлера, определяется по формуле

$$\lambda_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{\text{пл}}}} \quad (3.8.3)$$

зависит лишь от физико-механических свойств и является постоянной для данного материала. Так, например, для стали Ст.3 $\lambda_{\text{пред}} = 100$, для древесины $\lambda_{\text{пред}} = 110$, для чугуна $\lambda_{\text{пред}} = 80$, для дюралюминия $\lambda_{\text{пред}} = 60$.

Стержни, у которых $\lambda > \lambda_{\text{пред}}$, называются стержнями большой гибкости.

При меньших значениях гибкости (стержни средней гибкости) критические напряжения $\sigma_{\text{кр}} > \sigma_{\text{пл}}$ определяются по эмпирическим формулам или соответствующим им таблицам (графикам). Например, формула Ясинского для определения критических напряжений имеет вид

$$\sigma_{\text{кр}} = a - b \lambda, \quad (3.8.4)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты. Например, для стали Ст.3 $a = 310$ МПа, $b = 1,14$ МПа, для древесины (сосна) $a = 28,7$ МПа, $b = 0,19$ МПа.

Эмпирические формулы, особенно для древесины, дают лишь приближенный результат.

Для стержней малой гибкости, у которых $\sigma_{\text{кр}}$, подсчитанные по формуле Ясинского, получаются больше, чем опасные (предельные) напряжения, принимают: $\sigma_{\text{кр}} = \sigma_{\tau}$ – для пластичных материалов; $\sigma_{\text{кр}} = \sigma_{\text{пл}}$ – для хрупких материалов.

Итак, критические напряжения ($\sigma_{\text{кр}}$) и критическую силу $F_{\text{кр}}$ (теоретические), при которых происходит потеря устойчивости определяют по формулам

$$\sigma_{кр} = \begin{cases} \sigma_T, & \text{если } 0 < \lambda < 40 \\ a - b\lambda, & \text{если } 40 < \lambda < \lambda_{пред} \\ \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, & \text{если } \lambda > \lambda_{пред} \end{cases} \quad (3.8.5)$$

$$F_{кр} = \sigma_{кр} \cdot A \quad (3.8.6)$$

Порядок определения теоретической критической силы.

1. Определяют гибкость стержня $\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}$,

для чего:

а) определяют коэффициент μ , учитывающий способы закрепления концов стержня;

б) измеряют, длину стержня l и размеры поперечного сечения;

в) вычисляют главный центральный (наименьший) момент инерции сечения J_{\min} ;

г) определяют площадь поперечного сечения стержня A ;

д) находят наименьший радиус инерции $i_{\min} = \sqrt{\frac{J_{\min}}{A}}$.

е) вычисляют гибкость λ .

2. В зависимости от гибкости, используя формулы (3.8.5) и (3.8.6) определяют теоретически силу $F_{кр}$.

Примечания:

1) при определении гибкости, критического напряжения и критической силы, необходимо иметь одинаковую размерность величин.

2) Если стержень изготовлен из прокатной стали, необходимо определить его номер (по замеренным поперечным размерам) и из ГОСТ выписать необходимые данные (A , J_{\min} , i_{\min}).

Методика выполнения опыта и обработка результатов.

Опыты по исследованию устойчивости сжатого стержня могут выполняться в двух вариантах: на специальной установке (рис.3.8.1) либо на настольной установке СМ-20 (рис.3.8.2).

На специальной установке нагружение осуществляется гидравлическим домкратом, а величина критической силы определяется по шкале манометра 9, проградуированной в Н.

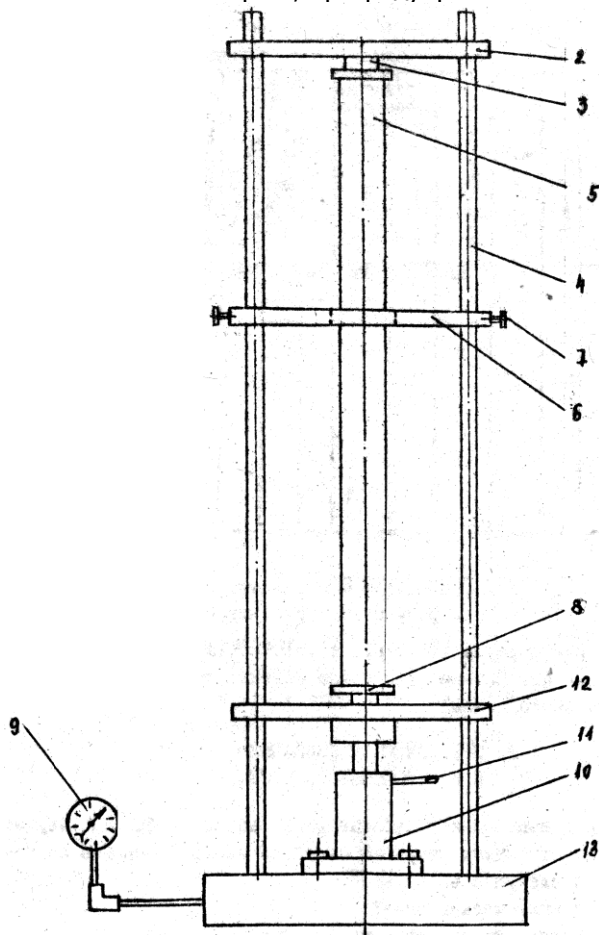


Рис.3.8.1

На установке СМ-20 (рис. 3.8.2) нагружение производится с помощью винтовой пары (подъемный винт-гайка) через тарированную пружину; величина нагрузки определяется по осадке пружины δ , которая пропорциональна сжимающей силе:

$$F = C \cdot \delta,$$

где C – жесткость пружины, определяется из тарировочного графика.

Установка СМ-20 позволяет определить критическую силу для стержня с шарнирно опертыми концами ($\mu = 1$).

Порядок проведения испытаний и обработки результатов следующий.

1. Измеряем длину и размеры поперечного сечения образца, определяем геометрические характеристики сечения и гибкость стержня (I_{\min} , A , i_{\min} , λ).

2. Сравниваем значения λ и $\lambda_{пред}$, выясняем, по какой формуле следует определять критическую силу.

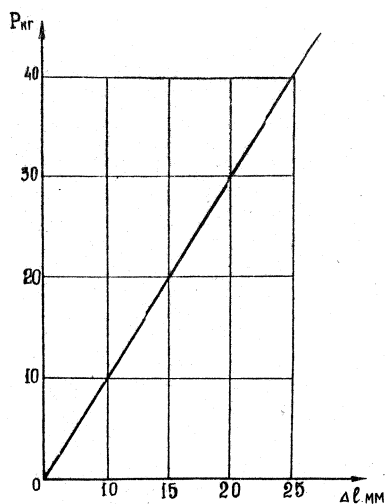
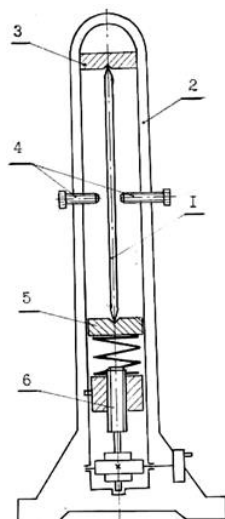


Рис. 3.8.2. Схема установки СМ-20:

1 – образец; 2 – корпус; 3 – верхняя опора; 4 – ограничительные упоры;

5 – нижняя опора; 6 – силовое устройство

3. Вычисляем теоретическое значение критической силы.
4. Устанавливаем стержень на опорах установки.
5. Упоры при помощи винтов устанавливаем примерно на одинаковых расстояниях (2 – 3 мм) от испытуемого образца.
6. Производим нагружение стержня путем плавного и медленного вращения маховика по часовой стрелке, с возрастанием нагрузки нужно непрерывно следить за поведением образца.

Если при $F < F_{кр}$ слегка изогнуть стержень рукой и отпустить, после некоторых колебаний он вновь выпрямится (устойчива прямолинейная форма равновесия).

При достижении нагрузкой критического значения стержень слегка искривляется и касается одного из упоров. Если изогнутый стержень руками вернуть в исходное прямолинейное положение и отпустить, он вновь искривится, т.е. прямолинейная форма перестала быть устойчивой.

7. Снимаем отсчет по шкале осадки пружины δ и заносим его в журнал испытаний, разгружаем образец вращением маховика против часовой стрелки.

8. Определяем по паспорту установки коэффициент жесткости пружины C .

9. Вычисляем опытное значение критической силы

$$F_{кр}^э = c \cdot \delta .$$

10. Сравниваем величины $F_{кр}^э$ и $F_{кр}^т$, определяем процент расхождения и делаем соответствующие выводы.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема установки.
3. Определение теоретических значений критической силы.
4. Результаты испытаний и расчетов.
5. Отклонение теоретических значений от экспериментальных в %.
6. Выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой изгиб называется продольным?
2. Что понимается под критической силой?
3. От чего зависит величина критической силы?
4. Когда применима формула Эйлера?
5. Что такое коэффициент приведения длины и чему он равен при различных случаях закрепления концов сжатых стержней?
6. Как определяется критическое напряжение, если формула Эйлера неприменима?
7. Чему равна гибкость стержня?
8. Как определить предельную гибкость?
9. Как опытным путем определить значение критической нагрузки?

Литература: [5] - §§ 81-84; [6] - §§ 15.1 – 15.4; [7] - §§ 86-89.

3.9. Проверка теории изгибающего удара

Цель работы: опытное определение динамического коэффициента при изгибающем ударе и сравнение его с динамическим коэффициентом, полученным расчетом.

Теоретическая часть работы. При ударе груза F , падающего на балку с высоты H , балка прогнется. Изогнутая ось балки (эпюра динамического прогиба) будет иметь вид, показанный на рис. 3.9.1, а. Изогнутая ось балки от статически приложенной силы F (эпюра статических прогибов) – вид, изображенный на рис. 3.9.1, б.

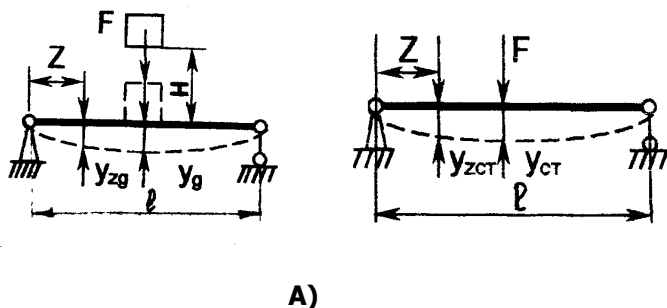


Рис. 3.9.1. Эпюры динамического и статического прогибов

В основе приближенной теории удара, рассматриваемой в курсе сопротивления материалов, лежит гипотеза о том, что эпюра перемещений системы от груза F при ударе (в любой момент времени) подобна эпюре перемещений, возникающей от этого груза, но действующего статически. На основании указанной гипотезы и рис. 3.9.1,а для динамического коэффициента получают зависимость

$$K_D = \frac{y_{зд}}{y_{зст}} = \frac{y_D}{y_{ст}}$$

где $y_{зд}$ ($y_{зст}$) и y_D ($y_{ст}$) - динамический (статический) прогибы в произвольном сечении Z балки и в сечении, где приложена внешняя нагрузка F , соответственно.

При расчетах без учета массы балки динамический коэффициент K_D при падении груза с высоты H определяют по формуле:

$$K_D = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{y_{ст}}} \quad (3.9.1)$$

Если высота падения груза H во много раз больше статического перемещения $y_{ст}$, то в формуле (3.11.1) можно пренебречь единицами и принять:

$$K_D = \sqrt{\frac{2H}{y_{ст}}} \quad (3.9.2)$$

При расчете на удар с учетом массы балки Q/g динамический коэффициент определяют по формуле:

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\gamma_{CT} \cdot (1 + \beta Q/F)}}. \quad (3.9.3)$$

При этом упругая система с распределенной массой мысленно заменяется системой, обладающей такими же упругими свойствами, но с приведенной массой $\beta Q/F$, сосредоточенной в точке удара (β - коэффициент приведения массы, g - ускорение свободного падения). В случае изгибающего удара посередине балки, лежащей на двух опорах, принимают $\beta = 17/35$.

Описание лабораторной установки.

Работа выполняется на установке типа СМ 21 М (рис. 3.9.2).

Установка состоит из следующих основных частей:

- основания 1, на котором установлен исследуемый образец;
- балки 8 прямоугольного поперечного сечения, опирающейся на шарнирно-подвижную 2 и шарнирно-неподвижную 7 опоры;
- индикатора 4 часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм, закрепленного на стойке 3;
- штанги 9 с электромагнитом 11 и микрометрическим винтом 5 с ценой деления 0,01 мм, установленной по середине пролета балки 8;
- пульта управления 6.

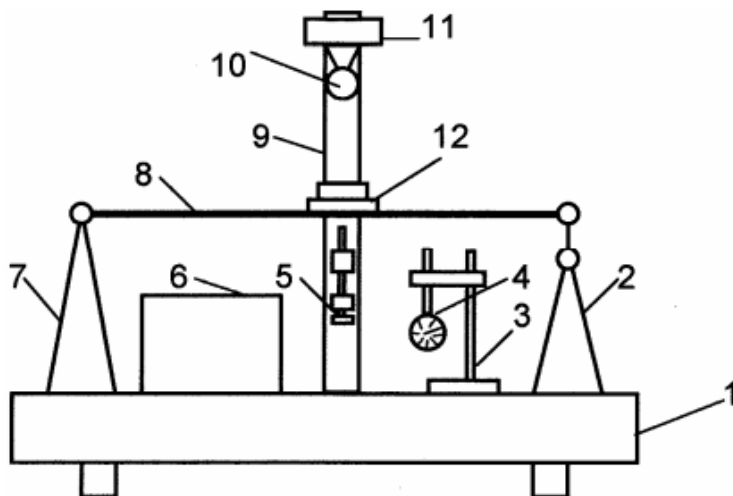


Рис. 3.9.2. Схема и фото лабораторной установки типа СМ 21 М

Электромагнит 11 предназначен для удержания падающего шарика 10 на требуемой высоте H над исследуемой балкой 8. Для предупреждения возможного отскока шарика балка снабжена специальным ловителем 12, внутренняя поверхность которого выполнена конусной. Определение статического прогиба балки производят индикатором часового типа 4 с учетом веса ловителя 12 и соединенных с ним деталей. В процессе удара индикатор отводится в сторону. Величина динамического прогиба определяется с помощью микрометрического винта 5 в момент контакта его торца с колеблющейся балкой.

Методика проведения опыта и обработка результатов. 1. Штангенциркулем измеряют размеры поперечного сечения балки b и h с точностью 0,1 мм, линейкой определяют длину пролета l , устанавливают электромагнит 11 на заданную высоту H и заносят данные в журнал наблюдений.

2. Определяют статический прогиб балки Y_{CT} от веса шарика 10, веса ловителя 12 и веса балки 8. Для этого при помощи индикатора 4 замеряют прогиб балки Y_{CT} от груза массой 1 кг после его установки на ловитель 12. Затем индикатор 4 снимают и вычисляют

$$Y_{CT} = (F + \beta \cdot Q + Q_1) \cdot \bar{Y}_{CT}, \quad (3.9.4)$$

где: вес шарика $F = 0,0665$ кг; вес ловителя $Q_1 = 0,0875$ кг; вес балки $Q = 7,8 \cdot 10^{-3} bhl$ кг (размеры b , h и l в см); \bar{Y}_{CT} - статический прогиб балки от груза, весом 1 кг.

3. Определяют максимальный динамический прогиб $Y_{D_{\max}}$. Для этого подключают установку к сети и включают тумблер "220В". При этом загорается лампа "Сеть". Тумблером "Электромагнит" подают напряжение на электромагнит 11.

С помощью микрометрического винта 5 определяют положение балки 8 до удара, а затем выворачивают вниз микрометрический винт 5 до упора. Устанавливают шарик 10 на острие сердечника электромагнита 11 и выключают тумблер "Электромагнит". Шарик 10 нанесет удар по балке. Постепенно, ввинчивая винт 5 и нанося удары шариком по балке, добиваются

касания балкой винта 5. Момент касания балки с винтом при ударе фиксируется загоранием лампы “Контакт” на пульте 6 установки. Динамический прогиб определяют не менее трех раз при одинаковой высоте падения шара H . Затем отключают установку от сети.

Максимальный динамический прогиб определяют как разность отсчетов по лимбу в начальном (до удара) и конечном (при ударе) положении винта 5 в момент касания его с балкой 8. Все данные измерений и показания приборов заносят в журнал наблюдений.

4. По формуле (3.9.3) определяют расчетное значение динамического коэффициента K_d и производят сравнение теоретических и опытных значений.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Лабораторная установка. Расчетная схема.
4. Измерительные приборы.
5. Исходные данные.

5.1. Ширина поперечного сечения балки b .

5.2. Высота поперечного сечения балки h .

5.3. Длина пролета l .

5.4. Высота, с которой падает шарик H .

6. Теоретические расчеты.

6.1. Определение статического прогиба балки U_{CT} .

6.2. Определение динамического коэффициента K_{D_1} .

6.3. Определение динамического коэффициента K_{D_2} ,

если высота во много раз превышает статический прогиб.

6.4. Определение коэффициента K_{D_3} с учетом массы

балки.

7. Результаты испытаний.

7.1. Статический прогиб балки от груза в 1 кг \bar{v}_{CT} .

7.2. Статический прогиб балки Y_{CT} от веса шарика F , веса ловителя Q_1 и веса балки Q .

7.3. Максимальный динамический прогиб при падении шарика с высоты H (отсчет по лимбу) $Y_{Д1}, Y_{Д2}, Y_{Д3}$.

7.4. Среднее значение прогиба для трех величин $Y_{Д}$.

7.5. Динамический коэффициент $K_{Д} = Y_{\Delta CP} / Y_{CT}$.

8. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Каково устройство лабораторной установки?
3. Какое явление называется ударом и результатом чего он является?
4. Какая гипотеза лежит в основе теории удара, рассматриваемой в курсе сопротивления материалов?
5. Что называют динамическим коэффициентом при ударе?
6. Как учитывают в выражении динамического коэффициента массу упругой системы, подвергающейся удару?
7. Что такое "внезапное действие нагрузки" и чему равен динамический коэффициент при таком ее действии?
8. Как определяют перемещения и напряжения при ударе?
9. Применением каких конструктивных мероприятий можно уменьшить напряжения при ударном действии нагрузки?
10. Зависят ли напряжения при ударе от модуля упругости материала системы, подвергающейся удару?
11. Как определяют статический прогиб балки от собственного веса?
12. Как определяют динамический прогиб балки при ударе в опыте?

Литература: [5] - § 111; [6] - §§ 17.3 – 17.4; [7] - §§ 94, 95.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабораторный практикум по курсу «Сопротивление материалов»/Под ред. Мачихина Ю. А., Данилова В. Н. – М.: Изд. Моск. техн. ин-та пищ. пром., 1974. – 133 с.
2. Афанасьев А. М., Марьин В. А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. – М.: Наука, 1975. – 288 с.
3. Сопротивление материалов: Лабораторный практикум: Учебное пособие / М.Д. Подскебко, О.И. Мисуно, С.А. Легенький. – Мн.: Амалфея, 2001. – 272 с.
4. Цурпал И. А., Барабан Н. П., Швайкс В. М. Сопротивление материалов. Лабораторные работы. – Киев: Вища школа, 1978. – 192 с.
5. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
6. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1995. - 560 с.: ил.
7. Сопротивление материалов. Учебное пособие / Н.А. Костенко, С.В. Балясникова, Ю.Э. Волошановская и др.; под. ред. Н.А. Костенко. – М.: Высш. шк., 2000. – 430 с.
8. Пирогов А.Н., Грачев В.Н., Яремчук А.И., Попова А. А. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум. Учебное пособие. – Кемерово, 2004. - 125 с.: ил.

ПРИЛОЖЕНИЯ (СПРАВОЧНОЕ)

Таблица П.1

Механические характеристики некоторых сталей

Материал	Марка	Пределы		Относительное		Твердость по Бриннелю Н. В.	Удельная ударная вязкость, $\alpha_H \cdot 10^{-5}$ Н·м/м ²
		текущие, σ_T МПа	прочности, σ_B МПа	удлинение, δ %	сужение, ψ %		
Сталь углеродистая обыкновенного качества горячекатанная	Ст 2	220	340 – 420	31	-	140	-
	Ст 3	240	380 – 470	25 – 27	-	-	-
	Ст 4	260	420 – 520	23 – 25	-	-	-
	Ст 5	280	500 – 620	19 – 21	-	-	-
Сталь углеродистая качественная конструкционная	30	290	480	21	50	179	3 – 4
	35	310	520	20	45	187	2,5 – 3,5
	40	320	570	19	45	217	2,6 – 3,0
	45	340	600	16	40	241	2,3
	50	350	630	14	40	241	2,5 – 3,0
Сталь хромистая	40Х	800	1000	10	45	217	6
	50Х	900	1100	8	40	229	4
Сталь хромоникелевая	40Х	800	1000	11	10	207	7
	50Х	900	1100	8	8	207	5



Таблица П.2. - **Упругие свойства некоторых материалов при нормальной температуре**

Материал	Модуль		Коэффициент Пуассона μ
	продольной упругости E , МПа	сдвига G , МПа	
1	2	3	4
	Металлы и сплавы		
Стали малоуглеродистые и высоколегированные	$(2,0 - 2,1) \cdot 10^5$	$(7,8 \div 8,0) \cdot 10^4$	0,28
Высокоуглеродистые	$2,2 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^4$	0,29
Чугуны серые, белые, новые	$(0,8 \div 1,6) \cdot 10^5$	$4,5 \cdot 10^4$	0,23 – 0,27
Модифицированные	$(0,9 \div 1,6) \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^4$	-
Медь			
горячекатанная	$1,1 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^4$	0,31 – 0,4
холоднокатанная	$1,3 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^4$	-
Алюминий			
катанный	$0,7 \cdot 10^5$	$(2,6 \div 2,7) \cdot 10^4$	0,32 – 0,36
Алюминевая проволока тянутая	$0,7 \cdot 10^5$	-	-
Свинец	$0,17 \cdot 10^5$	$0,7 \cdot 10^4$	-
Дюралюмин			
катанный	$0,17 \cdot 10^5$	$3,7 \cdot 10^4$	-
	Неметаллические материалы		
Известняк, гранит	$(0,42 \div 0,49) \cdot 10^5$	-	-
Кирпичная кладка	$(0,025 \div 0,03) \cdot 10^5$	-	-
Железобетон			
при сжатии	$(0,18 \div 0,43) \cdot 10^5$	-	0,16 – 0,18
изгибе	$(0,11 \div 0,27) \cdot 10^5$	-	-



Продолжение таблицы П.2.

1	2	3	4
Древесина		-	-
вдоль волокон	$(0,1 \div 0,12) \cdot 10^5$	$(0,045 \div 0,065) \cdot 10^4$	-
поперек волокон	$(0,005 \div 0,01) \cdot 10^5$	-	-
Каучук	80	-	0,47
Текстолит	$(0,96 \div 1,0) \cdot 10^5$	-	-
Гетинакс	$(0,1 \div 0,17) \cdot 10^5$	-	-
Целлулоид	$(0,014 \div 0,028) \cdot 10^5$	-	-