

ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
КУРС ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
Учебное пособие

Учебное пособие разработано в соответствии с Государственным образовательным стандартом РФ и рабочими программами по дисциплине «Сопротивление материалов» и предназначено для студентов механических специальностей, дневной и заочной форм обучения, а также для преподавателей.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
Обозначения, принятые в лабораторных работах.....	6
1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ....	9
2. ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	10
2.1. Определение основных механических характеристик стали на растяжение	10
2.2. Испытание на сжатие образцов из различных материа- лов.....	19
2.3. Испытание на кручение образца из малоуглеродистой стали.....	26
2.4. Определение модуля продольной упругости и коэффи- циента Пуассона для стали	36
2.5. Испытание металлов на выносливость	41
2.6. Испытание различных материалов на ударную вяз- кость.....	48
3. ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ.....	54
3.1. Определение нормальных напряжений в балке при пря- мом изгибе.....	54
3.2. Определение главных напряжений при совместном изгибе и кручении тонкостенной трубы	61
3.3. Определение напряжений при внецентренном растяже- нии бруса.....	68
3.4. Определение напряжений в стенке тонкостенного сосу- да	75
3.5. Определение деформаций при прямом поперечном из- гибе балки.....	79
3.6. Определение деформаций при косом изгибе балки	85
3.7. Определение момента в защемлении статически неоп- ределимой балки.....	89
3.8. Проверка интеграла Мора на примере плоской статиче- ски неопределимой рамы.....	93
3.9. Проверка теории изгибающего удара.....	104
3.10. Определение критической силы при продольном изги- бе	104

4. ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ	
ИЗМЕРЕНИЙ (краткие сведения).....	110
4.1. Основные понятия и определения.....	110
4.2. Виды измерений и погрешностей.....	110
4.3. Операции с приближенными числами.....	113
4.4. Числовые характеристики случайных величин.....	115
4.5. Вероятностный критерий грубых погрешностей.....	116
4.6. Обработка результатов наблюдений для прямых измере- ний.....	117
4.7. Математическая обработка результатов наблюдений при косвенных наблюдениях.....	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	122

ПРЕДИСЛОВИЕ

Познание свойств окружающего материального мира включает следующие основные этапы: наблюдение явления, создание гипотезы (теории) и ее проверка на опыте.

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.

Существуют и другие методы экспериментального исследования моделей, деталей машин и элементов конструкций (голографический, фотоупругости, хрупких покрытий, муаровых полос, рентгеновский и др.), которые 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, методику выполнения работы, а также способы представления обработки экспериментальных данных.

ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ

A -	площадь поперечного сечения бруса;
A_0 -	площадь поперечного сечения образца до испытания;
A_{III} -	площадь поперечного сечения образца после разрыва (площадь шейки);
a, a_1, a_2 -	удельная работа разрыва образца; ударная вязкость; расстояние от конца бруса до заданного сечения, плечо приложения внешней нагрузки;
b -	ширина поперечного сечения бруса;
D -	наружный диаметр трубы;
d -	внутренний диаметр трубы, диаметр зоны долома образца, диаметр шара;
d_0 -	диаметр образца до испытания;
d_{III} -	диаметр образца в месте образования шейки;
E -	модуль продольной упругости материала;
EJ -	жесткость сечения при изгибе относительно главной центральной оси;
F -	внешняя сосредоточенная сила;
ΔF -	абсолютное приращение внешней силы, ступень нагружения;
F_X, F_Y -	составляющие силы по направлению главных осей X, Y ;
$[F]$ -	допускаемая сжимающая нагрузка при расчете на устойчивость;
$F_{кр}$ -	критическая нагрузка при расчете на устойчивость;
F_{max} -	максимальное значение внешней сосредоточенной силы;
f -	стрела прогиба балки;
f_X, f_Y -	прогибы балки в направлении главных осей инерции сечения X, Y ;
G -	модуль сдвига материала;
H -	высота падения груза при ударе;
h -	высота поперечного сечения образца, балки, высота образца;
J_X, J_Y -	осевые моменты инерции поперечного сечения;
J_{max}, J_{min}	главные моменты инерции поперечного сечения;

J_p -	полярный момент инерции поперечного сечения;
K -	коэффициент увеличения рычажного тензометра, тарировочный коэффициент датчика омического сопротивления, цена деления индикатора часового типа, коэффициент анизотропии;
K_y -	коэффициент запаса устойчивости;
l -	длина стержня, балки;
l_0 -	расчетная длина образца, база тензометра, расстояние, на котором определяется угол закручивания;
l_1 -	длина образца после разрыва;
Δl -	абсолютное удлинение образца;
$M_{И}, M_K$ -	внешние изгибающий и крутящий моменты;
M_X, M_Y -	внутренние изгибающие моменты в сечении балки относительно главных осей X, Y;
m -	число ступеней нагружения, число опытов;
n_i -	число циклов нагружения образца;
P -	внутреннее давление в сосуде;
ΔP -	ступень давления;
r -	радиус срединной поверхности тонкостенного сосуда;
T_z -	внутренний крутящий момент;
t -	толщина стенки тонкостенного сосуда;
V_0 -	объем рабочей части образца до испытания;
W_I -	работа внешних сил при разрыве образца;
W_P -	полярный момент сопротивления круглого или кольцевого поперечного сечения;
W_x, W_y -	осевые моменты сопротивления сечения относительно главных осей X, Y;
$u_{ст}$ -	статический прогиб балки;
u_i -	расстояние от нейтральной оси до слоя, в котором определяется напряжение;
u_d -	прогиб балки динамический при ударе;
u_0 -	прогиб в сечении балки, где выбрано начало координат;
α -	угол между направлением внешней нагрузки и главной осью сечения;

$\varepsilon', \varepsilon$	- относительная линейная поперечная, продольная деформации;
$\varepsilon_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y$	- относительные линейные деформации в направлении осей Z, X, Y;
θ_l, θ_n	- угол поворота левого, правого концевых сечений балки;
θ_0	- угол поворота сечения балки, в котором выбрано начало координат;
λ	- гибкость стержня;
λ_i	- число делений шкалы рычажного тензометра, индикатора тензоусилителя, индикатора часового типа ИЧ – 10;
$\Delta\lambda$	- приращение показаний тензометров, индикаторов и др., приходящихся на ступень внешнего нагружения;
μ	- коэффициент Пуассона, коэффициент приведения длины стержня при расчете на устойчивость;
ρ	- плотность материала; удельное омическое сопротивление проводника;
ρ_m	- радиус кривизны меридионального сечения;
ρ_l	- радиус кривизны окружного сечения;
σ_y	- предел упругости материала;
$\sigma_{m\phi}$	- предел пропорциональности материала;
σ_T	- предел текучести материала;
σ_B	- предел прочности материала;
σ_m	- меридиональные напряжения в стенке тонкостенного сосуда;
σ_t	- окружные напряжения в стенке тонкостенного сосуда;
φ	- угол закручивания; угол между направлением плоскости изгиба и главной осью сечения.

1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

К выполнению лабораторных работ студенты допускаются только после прослушивания инструктажа по технике безопасности и противопожарным мерам. После инструктажа каждый студент расписывается 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. Студентам также не разрешается отлучаться из лаборатории до полного окончания лабораторных работ.

Все измерения образцов, необходимые для выполнения лабораторных испытаний, проводятся до установки их в захваты испытательных машин. Измерения образцов после испытания можно производить только после снятия последних 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 травмирования 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 *Определение основных механических характеристик стали на растяжение*

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. Они являются основными 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 характерные участки (рис. 2.1.). Небольшой криволинейный начальный участок O_1A является результатом обжатия головок образца в захватах и устранения зазоров в узлах машины. Его исключают, аппроксимируя 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 $F_{\text{пл}}$ (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 от прямой и после разгрузки появляются остаточные деформации (F_y фиксируют при появлении остаточных деформаций $\varepsilon = 0,001-0,005\%$).

Участок CD называют зоной общей текучести, а горизонтальную его часть – *площадкой текучести*. Здесь без заметного увеличения нагрузки F_T происходит существенное удлинение образца. Такой процесс деформации, называемый *текучестью материала*, сопрово-

ждается *остаточными (пластическими)* деформациями, не исчезающими после разгрузки образца.

Участок DE называют зоной упрочнения, т.к. материал вновь способен сопротивляться растяжению с повышением нагрузки до 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 при нагрузке $F_K < F_B$. Упругая деформация $\Delta l''_y = NN_1$ при этом исчезнет и образец получит полную остаточную деформацию после разрыва $\Delta l_p = ON$.

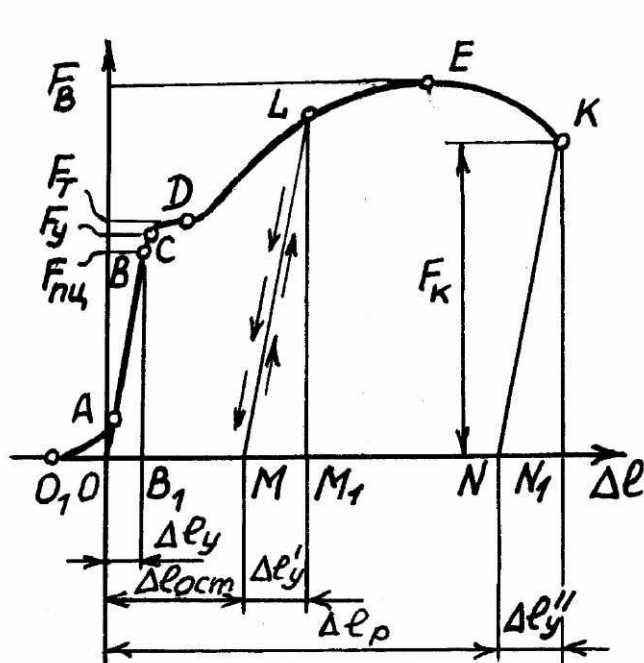


Рис. 2.1. Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

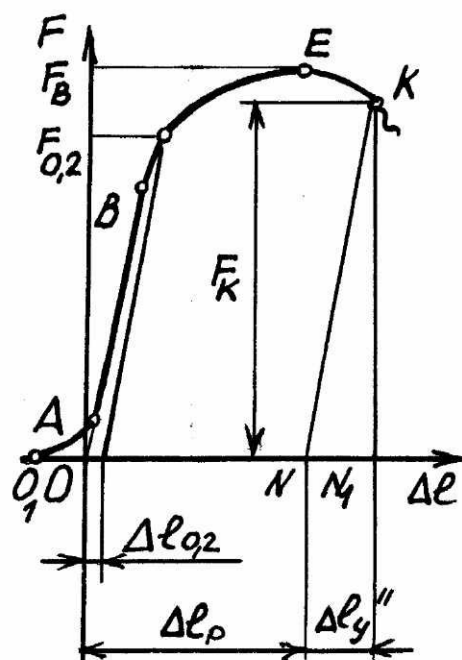


Рис. 2.2. Диаграмма растяжения высокоуглеродистой стали

Основные механические характеристики материала. Диаграмма, показанная на рис. 2.1., 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 эти диаграммы затем перестраивают в координатах $\sigma - \epsilon$, поделив соответственно, нагрузки F на площадь поперечного сечения образца до нагружения A_0 , а удлинение Δl на

длину его расчетной части до нагружения l_0 . В итоге все машинные диаграммы $F - \Delta l$ для различных образцов «лягут» одна на другую при их построении в одинаковом масштабе в координатах $\sigma - \varepsilon$. Такая зависимость получила название - *условная диаграмма растяжения материала*. По этой диаграмме определяют следующие механические характеристики материала:

а) характеристики прочности:

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

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{A_0}; \quad (2.1)$$

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

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}; \quad (2.2)$$

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

$$\sigma_T = \frac{F_T}{A_0}. \quad (2.3)$$

У высокоуглеродистых сталей, цветных металлов, пластмасс и ряда других материалов диаграмма растяжения не имеет площадки текучести. В этом случае, например, для высокоуглеродистой стали (рис. 2.2) определяют *условный* предел текучести при нагрузке $F_{0,2}$, соответствующей остаточному удлинению образца $\varepsilon = 0,2\%$:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}; \quad (2.4)$$

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

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_0}. \quad (2.5)$$

Кроме того, можно получить *истинное* сопротивление разрыву

$$\sigma_{\text{ви}} = \frac{F_K}{A_{\text{ш}}}. \quad (2.6)$$

где $A_{\text{ш}}$ - площадь поперечного сечения образца в зоне разрыва шейки;

б) характеристики пластичности:

относительное остаточное удлинение после разрыва

$$\delta = \frac{\Delta l_p}{l_0} 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100\%; \quad (2.7)$$

относительное остаточное сужение после разрыва

$$\Psi = \frac{\Delta A}{A_0} 100\% = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0} 100\%; \quad (2.8)$$

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

$$a = \frac{W}{V_0} \left[\text{Н} \cdot \text{м} / \text{м}^3 \right] \quad (2.9)$$

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:

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

$$V_0 = A_0 l_0 - \text{объем расчетной части образца до испытания.}$$

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 $\Delta l_y^I = MM_1$ исчезнет, а останется пластическая (остаточная) - $\Delta l_{ост} = OM$.

При повторном нагружении перо самописца прочертит линию, практически совпадающую с линией разгрузки, т.е. получат диаграмму $MLEK$. Из её рассмотрения видно, что площадка текучести исчезла, а предел пропорциональности материала вырос до уровня напряжений, при которых была произведена разгрузка образца. Часть диаграммы, расположенная левее линии ML , окажется отсеченной, т.е. начало координат фактически переместится в точку M . Остаточное удлинение после разрыва будет меньше, чем в образце, не подвергнутому предварительной пластической деформации, т.е. $MN < ON$.

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

Описание испытательной машины и образцов. Работа выполняется, например, на универсальной гидравлической испытательной машине марки МУП-50, развивающей максимальное усилие 50 т. Машина предназначена для испытаний образцов материалов и элементов конструкций статическими и динамическими нагрузками. Частота динамического нагружения может изменяться от 315 до 930 циклов в минуту, допускаемая погрешность показаний при статических нагрузках $\pm 1\%$ от измеряемой нагрузки, начиная с 4% от предельной нагрузки машины.

Машина (рис. 2.3) состоит из основания 1, на котором установлена на двух колоннах 2 траверса цилиндра 3. В траверсе 3 установлена гидравлическая пара – рабочий цилиндр 4 и поршень 5. На подушку поршня через шар 6 и конус 7 опирается подвижная рама, которая состоит из подвижной поперечной 8 и стола 10 с верхним захватом 24, соединенных двумя тягами 9. Электромеханический привод 26 нижнего захвата 25 служит только для регулировки последнего по высоте при настройке машины на испытание, т.е. при установке образца в захваты машины 24 и 25. Маслопровод 11 предназначен для слива утечки масла из верхней части рабочего цилиндра 4 в бак 28 насосной установки. Маслопровод 21 соединяет рабочий цилиндр 4 с цилиндром 17 маятникового силоизмерителя 20. Маслопровод 12 соединяет рабочий цилиндр 4 с насосом 27. Машина снабжена самопишущим диаграммным аппаратом 22, для записи диаграммы в координатах: нагрузка – перемещение. Привод барабана диаграммного аппарата осуществляется канатиком 23 от подвижной рамы (стола 10). Под воздействием давления масла плунжер 18 силоизмерителя сместится и через тягу 19 вызовет пропорциональное усилию отклонение маятника 20 и связанной с ним посредством зубчатой рейки 16 и зубчатого колеса 15 стрелки 13. Одновременно пером 14, закрепленным на рейке 16, усилие будет записано на диаграмме.

Образцы для испытаний. Для определения механических характеристик материалов используют стандартные цилиндрические и плоские образцы согласно ГОСТ 1497-73 (рис. 2.4): а) длинный (деся-

* - студенту предлагается самостоятельно подобрать примеры полезного и вредного действия наклепа.

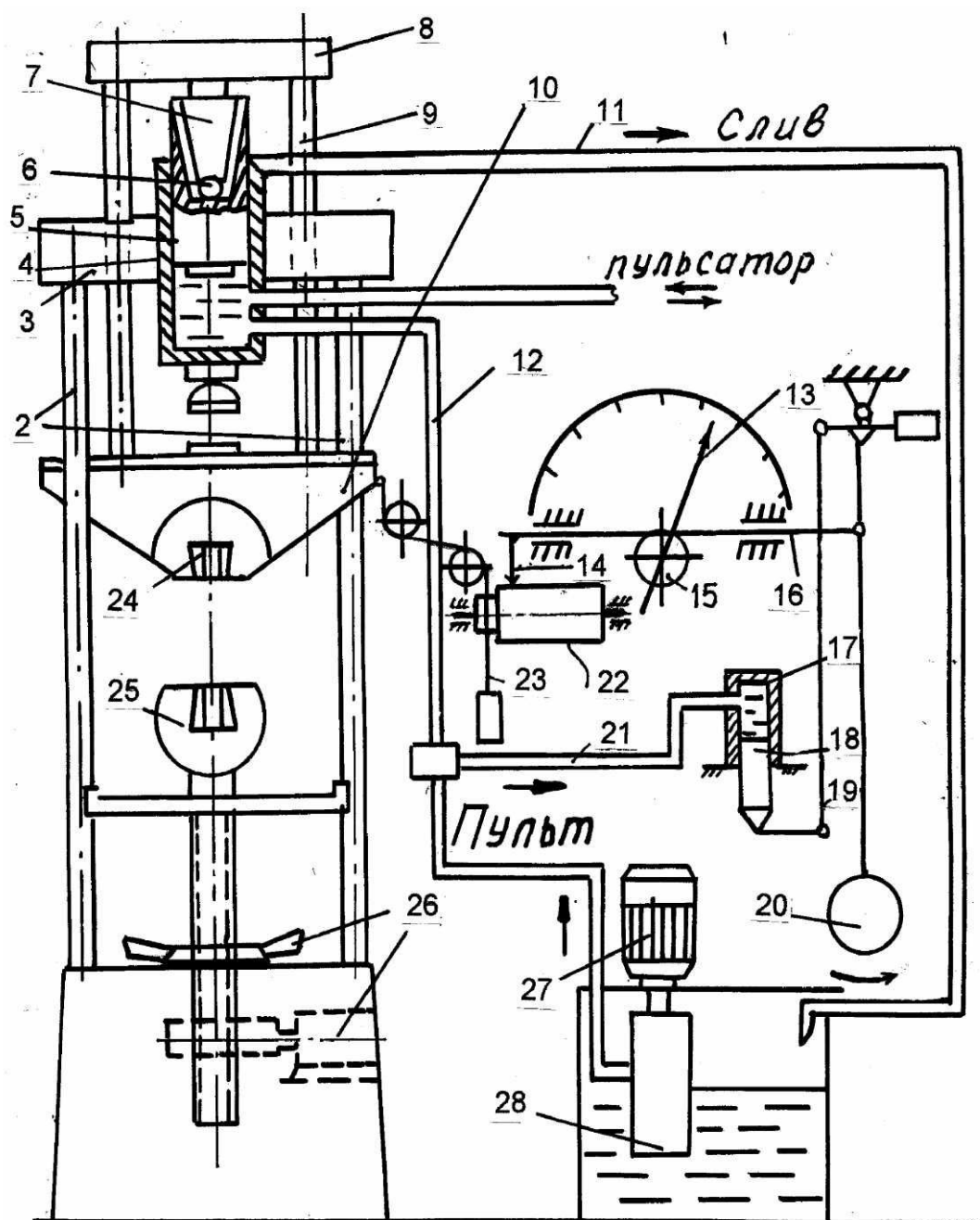


Рис. 2.3. Схема гидравлической испытательной машины МУП-50

тикратный) 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

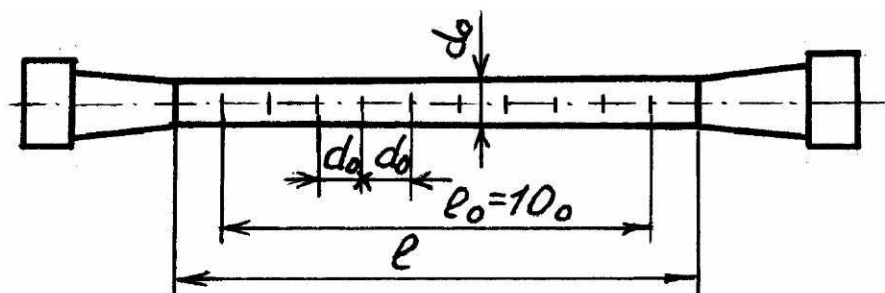


Рис. 2.4. Эскиз цилиндрического длинного образца $l_0 = 10 \cdot d_0$

разрушения образца у головок. Поверхность образца тщательно обрабатывают.

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 24 и 25 машины. Слегка натянув образец, проверяют диаграммный аппарат и наносят ось абсцисс диаграммы, проворачивая барабан 22 вручную.

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.

3. Вынимают разрушенный образец из захватов машины, измеряют диаметр его в месте разрыва d_{III} и длину после разрыва l_1 , сложив обе его части. Если при испытании образец разрушится около одной из его головок, то длину его после разрыва определяют по схеме, приведенной на рис. 2.5. Длина отрезков l_a и l_b выбирается

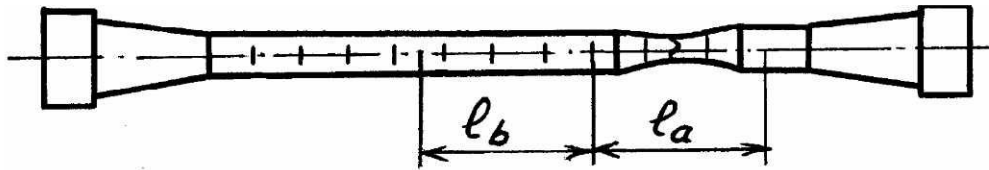


Рис. 2.5. Схема приведения места разрыва образца

так, чтобы сумма $l_1 = l_a + 2l_b$ охватила необходимое число размеченных отрезков (для длинного образца – 10).

5. Зная масштаб полученной диаграммы, определяют значения F_T, F_B, F_K и вычисляют характеристики прочности σ_T и σ_B по формулам (2.3) и (2.5), а истинное значение сопротивления разрыву $\sigma_{ВИ}$ – по формуле (2.6).

6. Определяют характеристики пластичности δ и Ψ по формулам (2.7) и (2.8).

7. Вычисляют удельную работу a , затраченную на разрыв образца, по формуле (2.9).

8. На основании справочных данных (см. Приложения – Таблица П.1) определяется марка стали для образцов по полученным σ_T , σ_B и δ . Остальные показатели характеризуют, но не определяют марку материала.

Обработка результатов опыта производится согласно требованиям раздела 4.

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_{III} .
 - 5.4. Площадь поперечного сечения в месте шейки A_{III} .
 - 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 $\sigma_{ВИ}$.
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 и 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 различных материалов

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.

а) сжатие образца из малоуглеродистой стали (рис. 2.6, кривая 1).

Из диаграммы видно, что при сжатии вначале наблюдается линейная зависимость между нагрузками и деформациями (подчинение закону Гука). Затем появляется площадка текучести, выраженная не столь ярко, как при растяжении.

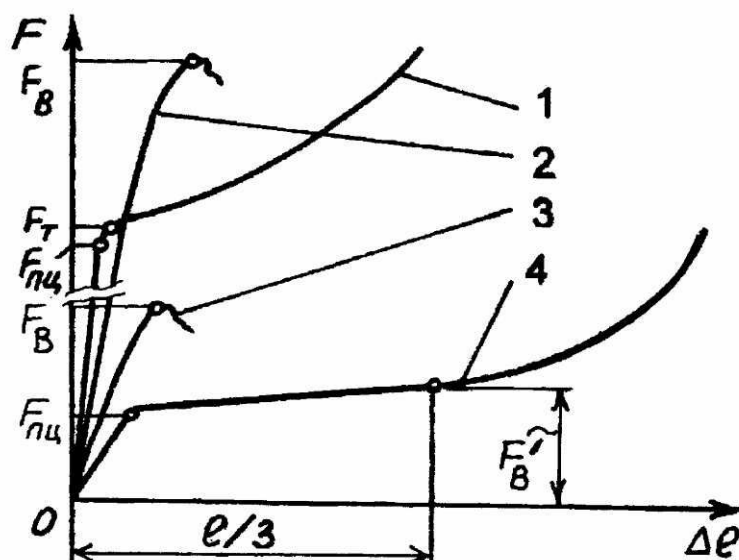


Рис. 2.6. Диаграммы сжатия образцов из различных материалов: 1 – малоуглеродистая сталь; 2 – чугун; 3 – дерево вдоль волокон; 4 – дерево поперек волокон

Стальной цилиндрический образец при сжатии укорачивается и принимает бочкообразную форму вследствие трения между его торцами и нажимными плитами машины (рис. 2.7, а). Влияние трения можно уменьшить путем смазки опорных поверхностей образца или применением образцов специальной формы. Это дает возможность повысить достоверность результатов испытаний.

При дальнейшем деформировании сопротивление образца резко увеличивается, образец расплющивается, иногда с образованием трещин вдоль образующих. Предел прочности для пластичных сталей на сжатие *не существует*. Можно лишь определить *предел текучести* на сжатие по формуле:

$$\sigma_T^{сж} = \frac{F_T}{A_0} \quad (2.10)$$

Здесь также как и при растяжении в расчетах используется *первоначальная* площадь поперечного сечения образца A_0 .

б) сжатие чугунного образца (рис. 2.6, 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 выра-

жена только разрушающая нагрузка F_{σ} . Отношение F_{σ} к первоначальной площади A_0 поперечного сечения образца называют *пределом прочности (временным сопротивлением)* чугуна на сжатие

$$\sigma_{\sigma}^{сж} = \frac{F_{\sigma}}{A_0}. \quad (2.11)$$

Образец укорачивается при этом незначительно, принимая бочкообразную форму, и разрушается внезапно с образованием трещин, наклонённых к оси образца под углом $\alpha = (45 - 50)^\circ$ (рис. 2.7, б, в), т.е. он разрушается под действием *максимальных касательных напряжений*, возникающих на площадках при $\alpha = 45^\circ$. Нагрузочная способность чугуна при разрушении падает практически мгновенно, что характерно для *хрупких* материалов. Следует отметить, что величина $\sigma_{\sigma}^{сж}$ для хрупких материалов значительно зависит от скорости нагружения образца и от соотношения его высоты h и диаметра d . На рис. 2.7,б показано разрушение образца при $h/d = 2$, а на рис. 2.7, в – при $h/d = 1$.

в) сжатие деревянных образцов вдоль и поперек волокон. Вследствие волокнистого строения древесина является *анизотропным* материалом, механические свойства которого *не одинаковы* по разным направлениям. При сжатии вдоль волокон (рис. 2.6, 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_{σ} 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 (2.11).

При сжатии образца поперек волокон (горизонтальное направление расположения волокон) диаграмма $F - \Delta l$ имеет другой вид (рис. 2.6, кривая 4). На начальном участке материал следует закону Гука, т.е. наблюдается прямолинейный участок при возрастании нагрузки до F_{III} . Это позволяет определить *предел пропорциональности*

$$\sigma_{III}^{сж} = \frac{F_{III}}{A_0}. \quad (2.12)$$

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

Условный *предел прочности (временное сопротивление)* дерева поперек волокон вычисляют по известной формуле (2.11). 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 МУП-50, описанной в лабораторной работе 2.1.

Для испытания на сжатие пластичных материалов (малоуглеродистые стали, медь, алюминий) и хрупких (чугун, латунь) применяют цилиндрические образцы диаметром d_0 и высотой $h_0 = (1,5 \div 2,0)d_0$ (рис. 2.7, 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 на сжатие природных строительных материалов, например камня, образцы обычно вырезают в виде кубиков с размерами $50 \times 50 \times 50$ мм. При испытании на сжатие искусственных материалов изготавливают, например, образцы из цементного теста в виде кубиков со стороной 70,7 мм. При испытании анизотропных материалов кубики изготавливают со стороной 20 мм (например, сосна).

Коэффициент анизотропии, характеризующий различные механических свойств материала вдоль и поперек волокон, равен отношению предела прочности материала при сжатии вдоль волокон $\sigma_v^{сж^I}$ к пределу прочности при сжатии поперек волокон $\sigma_v^{сж^{II}}$, т.е.

$$K = \frac{\sigma_v^{сж^I}}{\sigma_v^{сж^{II}}} . \quad (2.13)$$

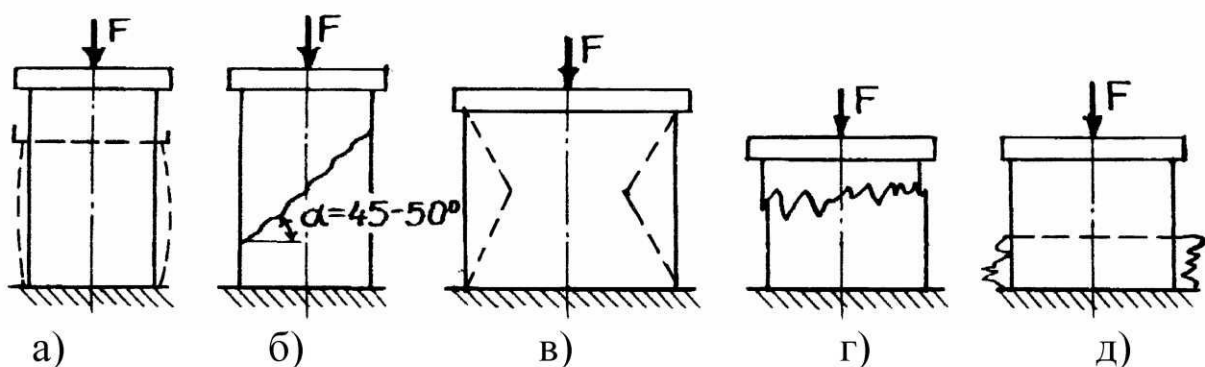


Рис. 2.7. Особенности разрушения образцов из различных материалов: а) сталь; б) чугун; в) цемент; г) дерево вдоль волокон; д) дерево поперек волокон

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 меньшее значение из трех измерений для каждого размера, выполненное в трех сечениях образца.

2. Каждый образец помещают на специальное центрирующее приспособление, установленное на испытательной машине в центре стола 10 (рис. 2.3). Опустив перо самописца на диаграммный барабан и проворачивая последний вручную, 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 $\sigma_T^{СЖ}$ по формуле (2.10).

4. При испытании чугунного образца деформирование продолжают до его разрушения. По показанию контрольной стрелки силоизмерителя и по полученной диаграмме определяют разрушающую нагрузку F_B и вычисляют предел прочности на сжатие $\sigma_B^{СЖ}$ по формуле (2.11).

5. При сжатии дерева вдоль волокон нагрузка после достижения разрушающей F_B начнет уменьшаться. По этой максимальной нагрузке вычисляют предел прочности на сжатие $\sigma_B^{СЖ}$ по формуле (2.11).

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 $\sigma_{\sigma}^{сж}$ по формуле (2.11), а проведя касательную к начальному участку диаграммы и определив нагрузку $F_{пл}$, вычисляют предел пропорциональности $\sigma_{пл}$ на сжатие по формуле (2.12).

7. По формуле (2.13) 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. При этом обработку результатов опыта производят согласно требованиям раздела 4.

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.
Масштаб нагрузок. Масштаб удлинений.
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	$F_{пл}$					
Нагрузка, соответствующая пределу прочности	F_b					
Предел пропорциональности	$\sigma_{пл}$					
Предел прочности	σ_b					
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 от испытания его 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 образца из малоуглеродистой стали

Цель работы: определение модуля упругости второго рода (модуля сдвига), изучение процесса разрушения и определение механических характеристик стали и чугуна при кручении.

Теоретическая часть работы. В инженерной практике на кручение работают валы машин, витые пружины и др. При кручении круглого и кольцевого стержня 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. 2.10.).

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

При испытании *стального образца* (рис. 2.8, а) при увеличении крутящего момента от нуля до некоторой величины $M_{пл}$ сохраняется прямая пропорциональная зависимость между величиной угла за-

кручения 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

$$\varphi = \frac{M_K l_0}{GJ_P}. \quad (2.14)$$

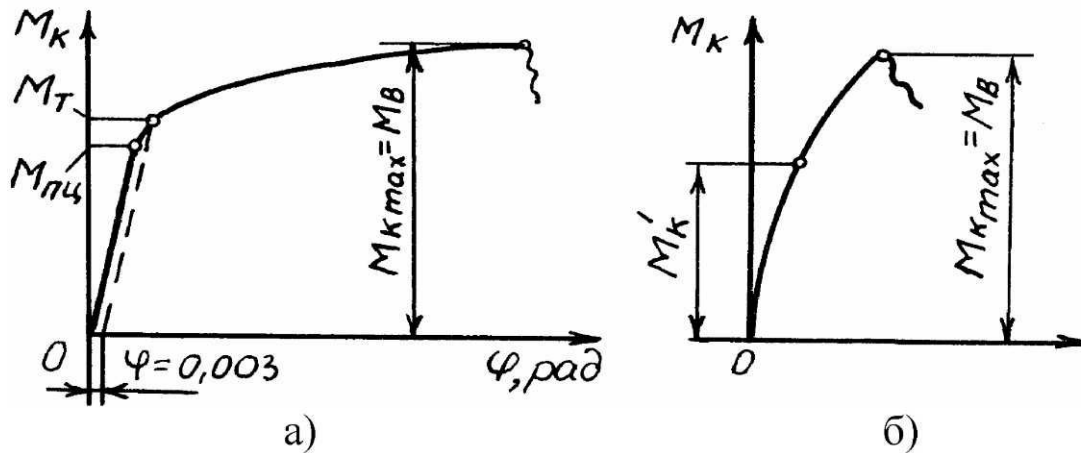


Рис. 2.8. Диаграммы кручения образцов: а) малоуглеродистая сталь; б) чугун

Из этой формулы получают опытное значение модуля сдвига

$$G^0 = \frac{M_K l_0}{\varphi \cdot J_P} \quad (2.15)$$

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

$$G^T = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (2.16)$$

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

Предел пропорциональности при кручении

$$\tau_{шц} = \frac{M_{шц}}{W_P} \quad (2.17)$$

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.2.9, а). Дальнейшее нагружение образца приводит к нарушению прямой пропорциональности (рис. 2.8, 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. 2.9, б).

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

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_P} \quad (2.18)$$

В пределе пластическая зона заполнит все сечение (рис. 2.9, в), несущая способность материала будет исчерпана и напряжения во всех точках сечения будут равны пределу текучести τ_T .

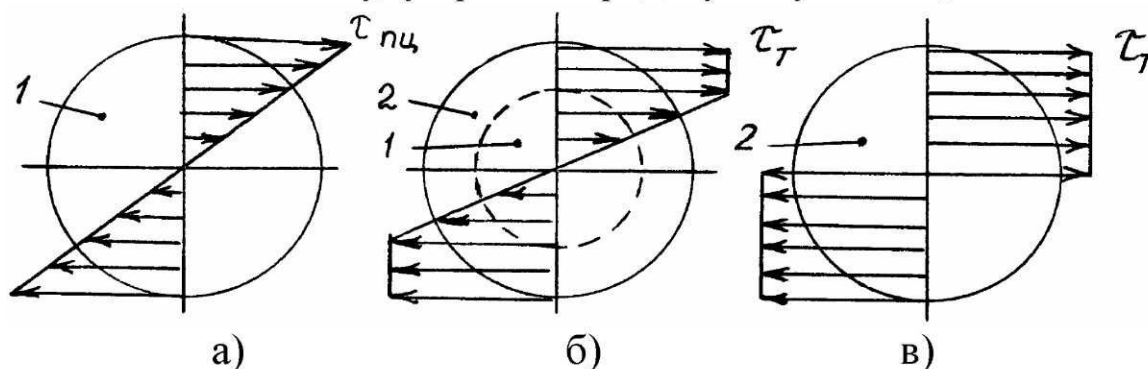


Рис. 2.9. Эпюры касательных напряжений при кручении
 а) упругая стадия; б) стадия пластического деформирования;
 в) стадия разрушения; 1 – упругая зона; 2 – пластическая зона

В момент разрушения сопротивление деформированного образца вследствие упрочнения материала возрастает, и условная величина предела прочности τ_B материала может быть определена по формуле:

$$\tau_B = \frac{M_{\max}}{W_{пл}} \quad (2.19)$$

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

Разрушение стального образца происходит по плоскости, перпендикулярной к оси образца, вследствие *сдвига (среза)* от максимальных касательных напряжений. Так разрушаются при кручении все пластичные материалы (рис.2.10, а).

При испытании чугунного образца с увеличением крутящего момента обнаруживается по диаграмме, что он не совсем строго следует закону Гука, т. е. диаграмма $M_K - \varphi$ вплоть до разрушения несколько криволинейна (рис. 2.8, б). Разрушение образца происходит при незначительных упругих угловых деформациях вследствие *отрыва* по наклонным винтовым сечениям, расположенным под углом $\alpha \approx 45^\circ$ к его образующим (рис. 2.10, б), под действием главных растягивающих напряжений $\sigma_1 = \tau_{\max}$. Зернистый характер излома является следствием разрушения материала от *отрыва*. При этом получают условный *предел прочности*

$$\tau_B = \tau_{\max} = \frac{M_{K \max}}{W_P} \quad (2.20)$$

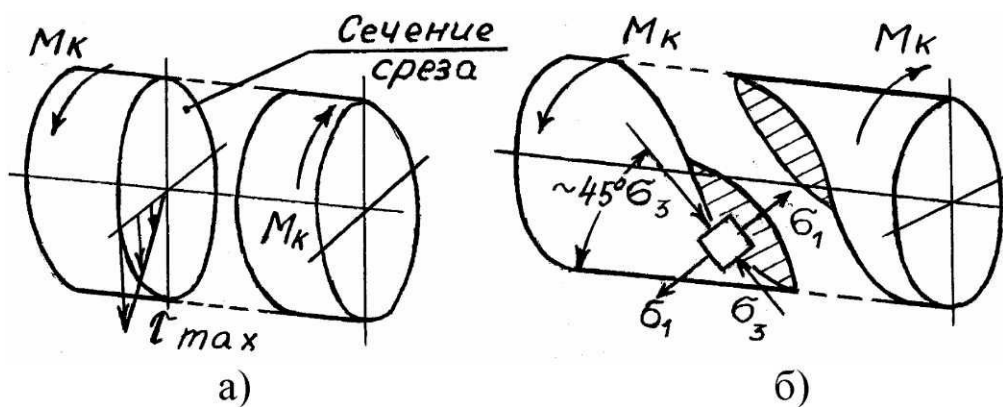


Рис. 2.10. Разрушение образцов при кручении
а) малоуглеродистая сталь; б) чугун

При практических расчетах считают, что на участке диаграммы кручения от нуля до рабочего крутящего момента M_K' (рис. 2.8, б) материал следует закону Гука и опытное значение модуля упругости G^0 определяют по формуле (2.15), а его теоретическое значение G^T - по формуле (2.16).

Описание испытательной машины и образцов. Работа выполняется на машине КМ-50 (рис. 2.11)*. Машина

* - Схема испытательной машины взята из работы [4]

имеет станину, на которой смонтированы механизмы нагружения и силоизмерения. КМ-50 относится к испытательным машинам с механическим нагружением образца и рычажно-мятниковым силоизмерителем.

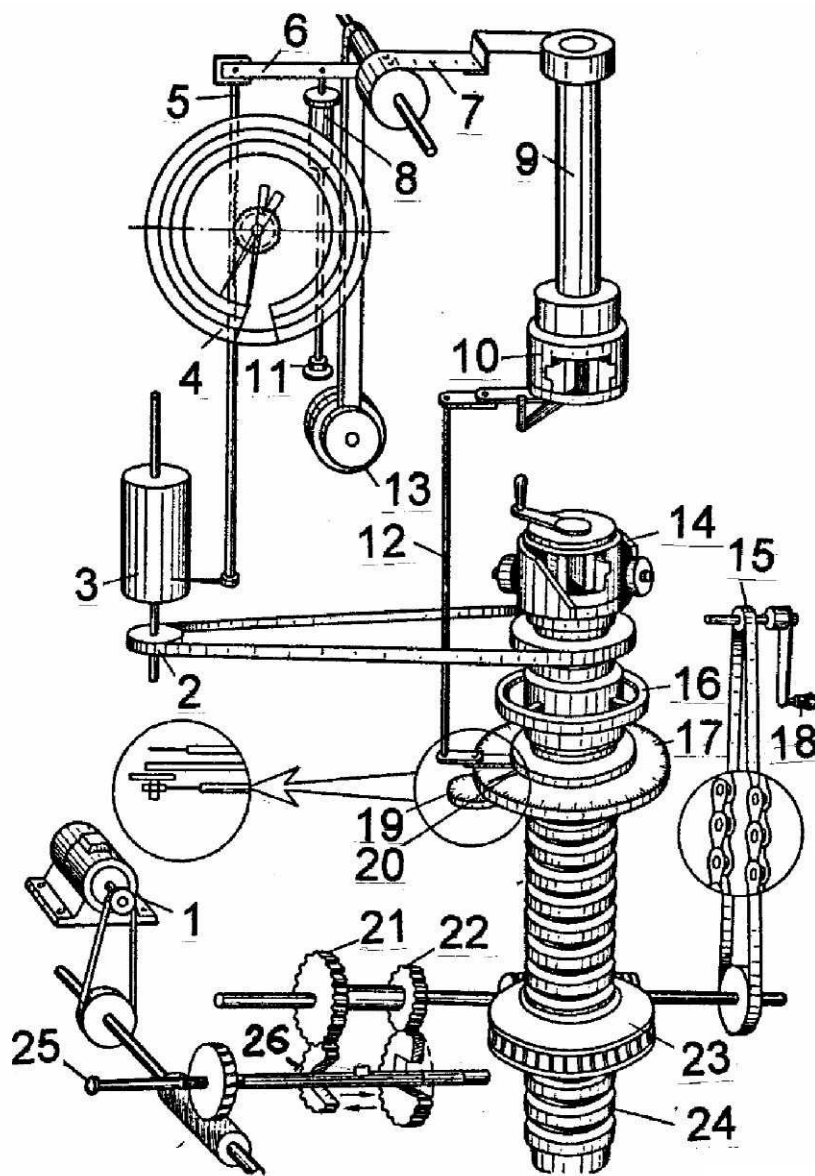


Рис.2.11. Кинематическая схема испытательной машины КМ-50

Механизм нагружения. Для нагружения образца, установленного в нижнем 14 и в верхнем 10 захватах, крутящий момент от 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 (перемещая 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 амортизатор снабжен вентилем 11.

Образцы для испытания на кручение (рис. 2.12). Длина рабочей цилиндрической части стандартного образца обычно составляет $l_0 = 10d_0$. Для закрепления в захватах машины образцы имеют голов-

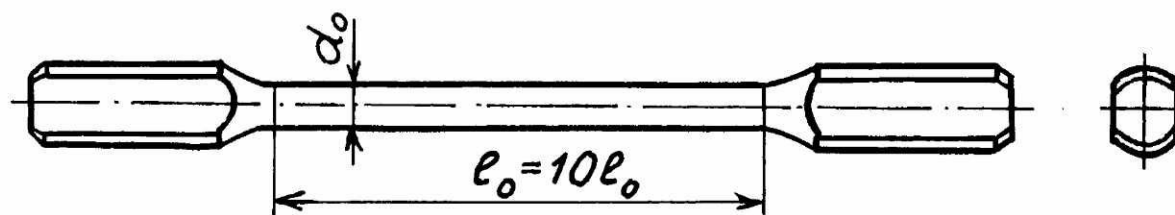


Рис. 2.12. Образец для испытания на кручение

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

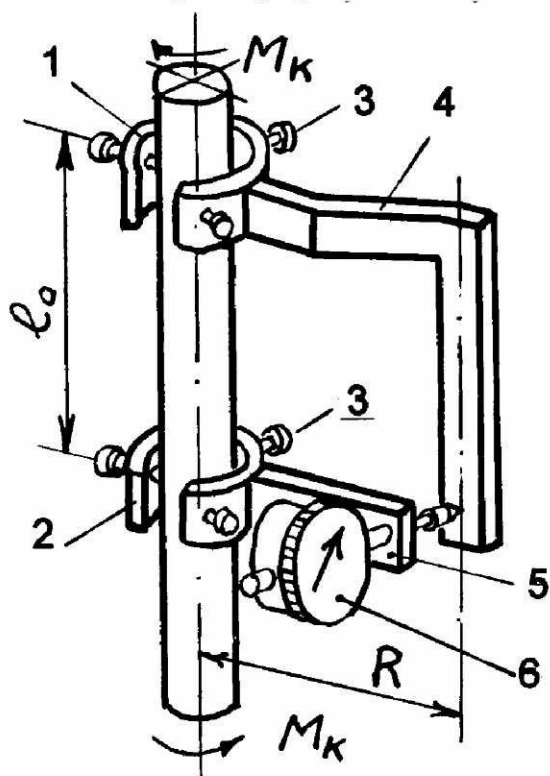


Рис. 2.13. Угломер Бояршинова

Для точного измерения малых углов закручивания в работе используется угломер Бояршинова (рис. 2.13), который состоит из двух разрезанных для удобства установки колец 1 и 2, закрепленных винтами 3 на образце на расстоянии l_0 (l_0 - база измерений), Г-образной планки 4, жестко соединенной с кольцом 1 и индикатора 6 типа ИЧ-10 (устройство – см. работу 3.5), установленного в кронштейне 5 кольца 2 и опирающегося своим штоком в планку 4 на расстоянии R от продольной оси образца. Перемещение стрелки индикатора 6 пропорционально углу закручивания φ образца. Для вычисления цены деления

K индикатора в радианах следует его цену деления в мм разделить на расстояние R в мм. В данной работе при цене деления индикатора $C=0,01$ мм, $R=100$ мм получают

$$K = \frac{C}{R} = 10^{-4} \text{ рад/дел.} \quad (2.21)$$

Методика проведения опыта и обработка результатов. 1. Замеряют штангенциркулем диаметр образца d_0 в трех сечениях с точностью 0,1 мм и, вычислив среднее значение, записывают в журнал наблюдений. На образце закрепляют угломер Бояршинова, обеспечив при помощи специального шаблона базу измерения l_0 и устанавливают образец в захватах машины.

После этого настраивают диаграммный аппарат, нагружают образец предварительно для выбора зазоров и записывают показания индикатора угломера в журнал наблюдений, а счетчик оборотов 19 машины выводят на нуль.

2. Вращая рукоятку 18 ручного привода машины, нагружают образец равными ступенями ΔM_K , считывают показания индикатора угломера и записывают их в журнал наблюдений.

Величина ступени нагружения ΔM_K зависит от материала образца и его диаметра d_0 . Ее следует выбирать таким образом, чтобы наибольший крутящий момент при испытании не вызвал остаточных деформаций, т. е. чтобы напряжения были меньше предела пропорциональности τ_{III} . Тогда

$$M_{K \max} \leq W_P \cdot \tau_{III}. \quad (2.22)$$

При этом используют несколько заниженное значение $M_{K \max}$. Тогда можно быть уверенным, что испытание будет проведено в области применимости закона Гука. Например, для малоуглеродистых сталей можно принять $\tau_{III} = 70 \div 80 \text{ Н/мм}^2$. Тогда при числе испытаний $m = 4$ с учетом формулы (2.22) при $d_0 = 10 \text{ мм}$ получают для ступени нагружения

$$\Delta M_K = \frac{M_{K \max}}{m} = \frac{\pi d_0^3}{16} \frac{\tau_{III}}{m} = \frac{3,14 \cdot 10^3}{16 \cdot 4} (70 \div 80) = 34,3 \div 39,0 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

В единицах шкалы испытательной машины ступень нагружения таким образом должна быть выбрана в пределах:

$$\Delta M_K = 34 \div 39 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Для хрупких материалов (чугуна) величину ΔM_K также принимают в выше указанных пределах.

3. Вычисляют среднее значение приращений углов закручивания $\Delta \varphi$ (в радианах) на ступень нагружения ΔM_K , для каждого из образцов, т.е.

$$\Delta \varphi_{cp} = \frac{\sum \Delta \varphi}{m} K, \quad (2.23)$$

где m - число ступеней нагружения;

K - цена деления индикатора угломера (см. формулу (2.21)).

4. Вычисляют опытное значение модуля сдвига по формуле (2.15).

5. Для сравнения подсчитывается теоретическое значение модуля сдвига для каждого образца по формуле (2.16).

6. В процессе испытаний будет получена также диаграмма $\Delta M_K - \varphi$. Так как на ней по всей оси абсцисс фиксируются углы поворота лишь активного нижнего захвата, то для получения истинного относительного угла закручивания образца необходимо учитывать и поворот верхнего захвата.

Для этого систему координат диаграммы $\Delta M_K - \varphi$ поворачивают на угол φ_0 , определяемый с помощью специального шаблона, и по ней рассчитывают τ_{III} и τ_B по формулам (2.17) и (2.19), получив значения M_{III} и M_B согласно рис. 2.14.

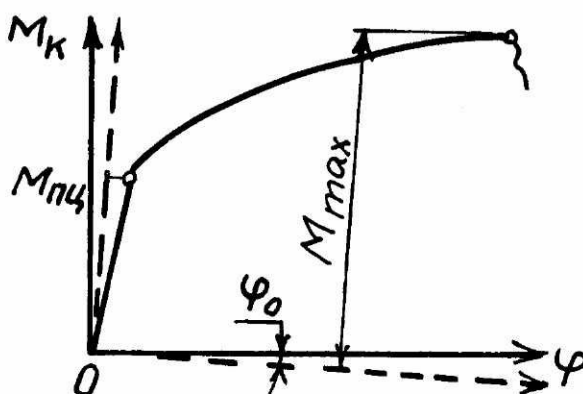


Рис. 2.14. Схема обработки машинной диаграммы

7. Затем необходимо дать анализ поведения образцов и установить причину их разрушения. Обработку результатов производят согласно требованиям раздела 4.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель лабораторной работы.
3. Испытательная машина.
4. Эскиз образца до испытания и после испытания.
5. Исходные данные:
 - 5.1. Расчетная длина l_0 .
 - 5.2. Расчетный диаметр d_0 .
 - 5.3. Модуль упругости E .
 - 5.4. Коэффициент Пуассона μ .
 - 5.5. Расстояние от оси образца до оси индикатора R .
 - 5.6. Полярный момент инерции сечения J_P .
 - 5.7. Цена деления индикатора часового типа в радианах C .

6. Результаты испытаний

№	Нагрузка M	Приращение нагрузки ΔM	Отсчет по прибору, n , дел.	Приращения отсчета Δn , дел.
1				
2				
3				
4				
	Средние значения приращений	ΔM_{cp}		Δn_{cp}

7. Диаграмма кручения образца.

8. Определение расчетных величин:

8.1. Расчетные значения модуля сдвига G^T .

8.2. Среднее значение приращений углов закручивания $\Delta\varphi_{cp}$

8.3. Опытное значение модуля сдвига G^0 .

8.4. Опытные значения предела пропорциональности и предела прочности.

9. Анализ результатов. 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. Как опытным путем определяют угол закручивания на расчетной длине l_0 образца?
7. Что называют базой измерения угла закручивания?
8. Как устроен угломер Бояршинова?
9. Что называют жесткостью поперечного сечения стержня при кручении?
10. Что называют полярным моментом сопротивления?
11. Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?

12. Какая зависимость существует между величинами E , G и μ ?
13. Как опытным путем определить модуль сдвига?
14. Во сколько раз изменится величина угла закручивания, если диаметр образца уменьшится вдвое?
15. Каковы отличительные особенности диаграмм кручения стержней из пластичных и хрупких материалов?
16. С какой целью перед началом испытаний производят предварительное нагружение образца?
17. Каким деформациям образца соответствует начальный участок диаграммы кручения?
18. Как выбирают степень нагружения образца при кручении?
19. Почему диаграмма кручения стального образца не имеет нисходящего участка?
20. Почему при испытании образцов крутящий момент наращивают равными ступенями?
21. 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. На основании закона Гука абсолютная продольная деформация бруса Δl прямо пропорциональна внутренней продольной силе N , вызвавшей эту деформацию:

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA}. \quad (2.24)$$

Измерив опытным путем величину осевой нагрузки F и вызванную ею продольную деформацию Δl и зная размеры испытуемого бруса, вычисляют модуль продольной упругости по формуле, полученной из (2.24)

$$E = \frac{Fl}{\Delta l A}, \quad (N = F). \quad (2.25)$$

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

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

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|, \quad (2.26)$$

$$\text{где } \varepsilon' = \frac{\Delta b}{b}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}; \quad (2.27)$$

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

Коэффициент Пуассона можно вычислить, если измерить линейные деформации бруса в поперечном Δb и продольном Δl направлениях при действии осевой нагрузки.

Для повышения точности определения искомым 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:

$$F_{\max} = \sigma_{\text{пл}} A \approx 0,83 \sigma_T A \quad (2.28)$$

Тогда при числе ступеней нагружений m величина ступени нагружения

$$\Delta F = \frac{F_{\max}}{m}. \quad (2.29)$$

Описание лабораторной установки. На стальном образце 1 прямоугольного поперечного сечения (рис. 2.15), закрепленном в захватах 2 машины для испытаний на растяжение-сжатие, устройство которой описано в работе 2.1., установлены попарно (для увеличения точности измерений) рычажные тензометры Гуггенбергера: 3 – для измерения продольных деформаций, 4 – для измерения поперечных деформаций.

Рычажный тензометр (рис. 2.16) устанавливается на образец 1 с помощью специальной трубки и опирается на него двумя ножами – неподвижным 2 и подвижным 3, выполненными в виде призмы.

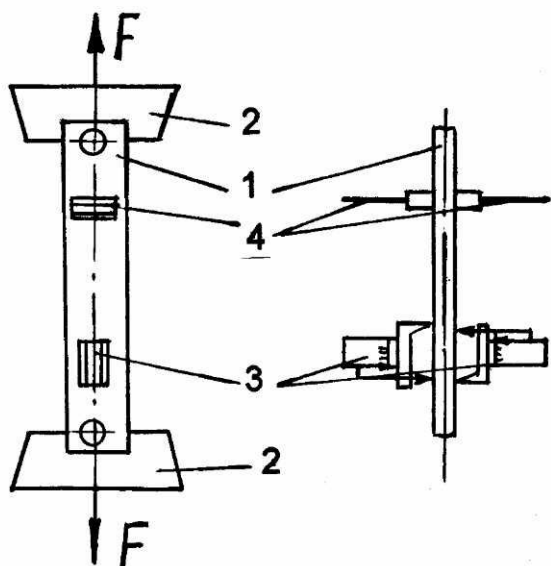


Рис. 2.15. Схема закрепления тензометров на образце

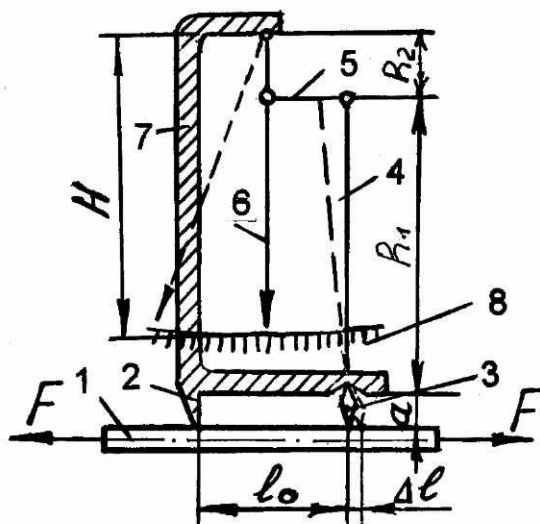


Рис. 2.16. Схема рычажного тензометра

Расстояние l_0 между ножами называется базой тензометра (минимальная - 20 мм, но с помощью удлинителей база может быть увеличена до 100 мм). При деформации образца расстояние между ножами изменяется. Подвижный нож 3 повернется и отклонит рычаг 4. Отклонение рычага 4 через тягу 5 передается на стрелку 6, которая повернется вокруг оси, закрепленной на рамке 7. Перемещение стрелки по шкале 8 пропорционально изменению расстояния между ножами.

Шкала 8 тензометра проградуирована в миллиметрах. Отношение отсчета по шкале к изменению расстояния между ножами называют коэффициентом увеличения тензометра K , величина которого определяется соотношением

$$K = \frac{h_1 H}{a h_2}$$

где a, h_1, h_2, H - размеры плеч рычагов тензометра (рис. 2.16).

Значение его для каждого тензометра указывается в паспорте.

Методика проведения опыта и обработка результатов. 1. Штангенциркулем измеряют поперечные размеры образца b и h с точностью 0,1 мм. По формулам (2.28) и (2.29) определяют величину ступени нагружения ΔF и число опытов m и записывают эти данные в журнал наблюдений.

2. Нагружают образец предварительной нагрузкой и устанавливают стрелки 6 (рис. 2.15) всех четырех тензометров в исходное по-

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

$$\Delta\lambda_{cp} = \frac{\Sigma\Delta\lambda_i}{m} \quad \text{и} \quad \Delta\lambda'_{cp} = \frac{\Sigma\Delta\lambda'_i}{m}, \quad (2.30)$$

где m - число ступеней нагружения.

После этого вычисляют опытные значения абсолютных продольных Δl^0 и поперечных Δb^0 деформаций

$$\Delta l^0 = \frac{\Delta\lambda_{cp}}{K}, \quad \Delta b^0 = \frac{\Delta\lambda'_{cp}}{K}, \quad (2.31)$$

где K - коэффициент увеличения тензометра.

4. Подставив значение Δl^0 в формулу (2.25), определяют опытное значение модуля продольной упругости E^0 . Затем, подставив значения Δb^0 и Δl^0 в формулу (2.26) с учетом формул (2.27), получают опытное значение коэффициента Пуассона μ^0 .

5. Обработку опытных данных выполняют согласно требований раздела 4.

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 h , площадь поперечного сечения A .

4.2. База тензометров:

для измерения продольных деформаций l_0 ;

для измерения поперечных деформаций b_0 .

4.3. Коэффициент увеличения тензометра K .

4.4. Табличные значения:

- модуль продольной упругости для стали E ;
- коэффициент Пуассона для стали μ .

№ п/п	На- грузка F	Прира- щение нагрузки ΔF	Продольная деформация				Поперечная деформация			
			I тензом.		II тензом.		I тензом.		II тензом.	
			λ_1	$\Delta\lambda_1$	λ_2	$\Delta\lambda_2$	λ_3	$\Delta\lambda_3'$	λ_4	$\Delta\lambda_4'$
Средние значения прираще- ний	ΔF	$\Delta\lambda_{cp}$	$\Delta\lambda_{cp}'$							

5. Обработка результатов опыта.

- 5.1. Расчёт опытных значений абсолютной продольной Δl и абсолютной поперечной Δb деформаций.
- 5.2. Расчёт опытных значений относительной продольной ε и относительной поперечной ε' деформаций.
- 5.3. Расчёт опытных значений модуля продольной упругости E^0 и коэффициента Пуассона μ^0 .

6. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. На какой машине выполняется лабораторная работа? Какой используется образец?
3. Как формулируется и записывается закон Гука при растяжении?
4. Что называют модулем продольной упругости материала? Каков его физический смысл.
5. Как записывается формула абсолютного удлинения бруса при растяжении? Что такое жесткость сечения бруса при растяжении?

6. Что происходит с поперечными размерами бруса при его растяжении в продольном направлении?
7. Что такое относительная продольная и относительная поперечная деформации бруса? Как их рассчитывают? Что такое коэффициент Пуассона? Каковы пределы его изменения?
8. Как устроен рычажный тензометр? Что им измеряют? Что такое коэффициент увеличения тензометра?
9. Что называют базой рычажного тензометра?
10. С какой целью к образцу прикладывают начальную нагрузку?
11. Что такое степень нагружения?
12. Как вычисляют коэффициент увеличения тензометра?
13. Как определяется наибольшая нагрузка, прикладываемая к образцу?

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

2.5. Испытание материалов на выносливость

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. 2.17):

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). По виду циклов их подразделяют на испытания при симметричном и при пульсирующем циклах напряжений.

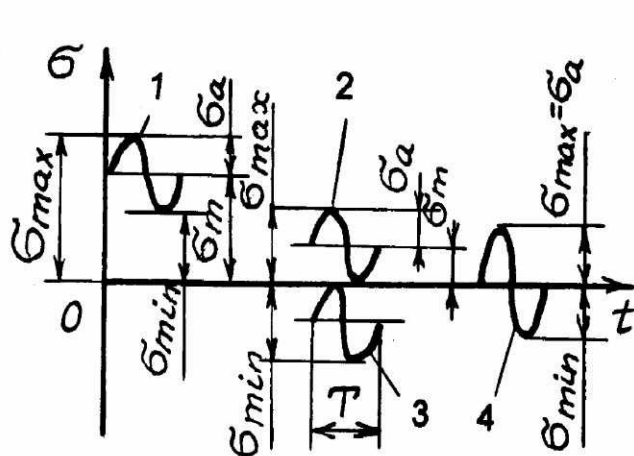


Рис.2.17. Виды циклов и их характеристики

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

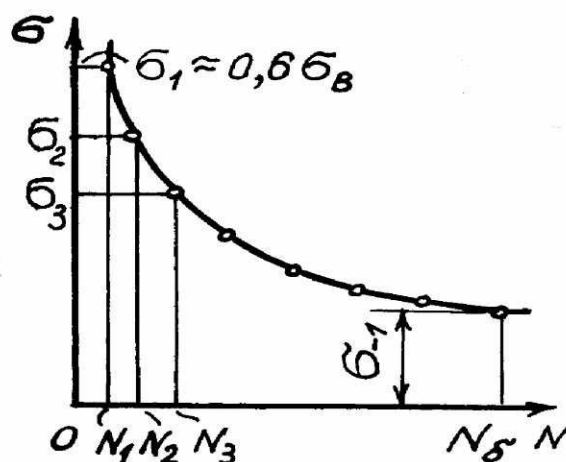


Рис. 2.18. Диаграмма испытаний стали на выносливость (диаграмма Велера)

Опытами установлен для каждого материала *предел выносливости* – 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} , при пульсирующем - σ_0 .

Предел выносливости σ_R определяют при построении 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 обработки. Диаграмму испытаний на выносливость называют диаграммой Велера (рис. 2.18).

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 н/мм²). Очевидно, что необходимое число циклов N_2 для его разрушения будет больше, т. е. $N_2 > N_1$. От образца к образцу, снижают напряжения до тех пор, пока очередной образец не выдержит N_σ циклов (N_σ - заданное техническими условиями число циклов, называемое *базой* испытаний при определении предела выносливости). Обычно *база* испытаний 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 теорети-

ческих коэффициентов концентрации напряжений $\alpha_{K\sigma}$ и $\alpha_{K\tau}$ по формулам

$$K_{\sigma} = 1 + q(\alpha_{K\sigma} - 1); \quad K_{\tau} = 1 + q(\alpha_{K\tau} - 1) \quad (2.32)$$

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 зернами 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).

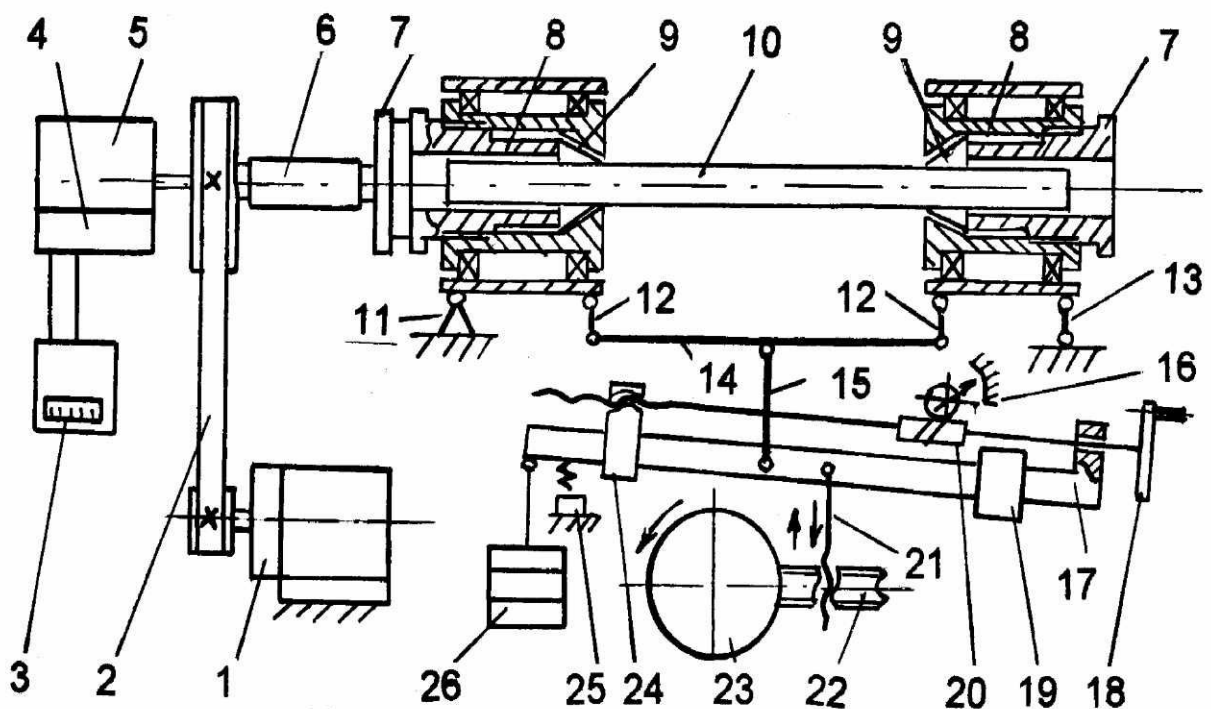


Рис. 2.19. Кинематическая схема машины МУИ-6000

Кинематическая схема машины представлена на рис. 2.19. От электродвигателя 1 через клиноременную передачу 2 и гибкий валик 6 вращение передается на шпиндель 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. 2.20. Средняя рабочая часть образца подвергается чистому изгибу, что следует из эпюр Q_y и M_x .

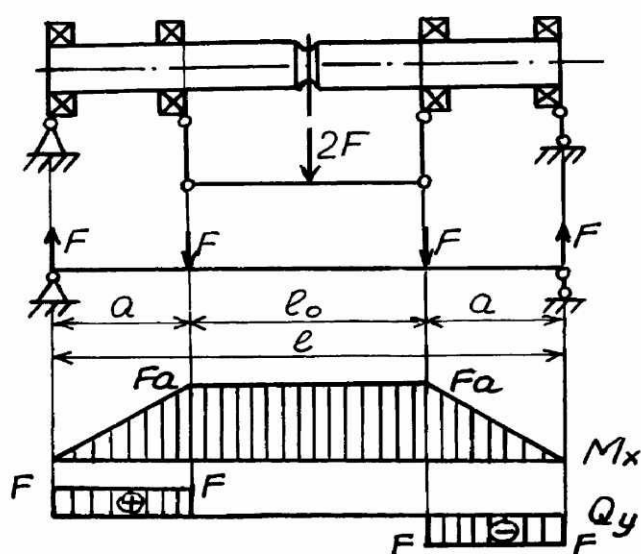
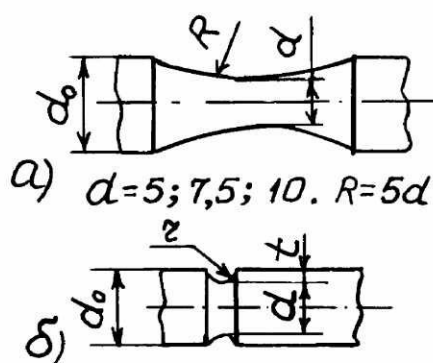


Рис.2.20. Схема нагружения образца



a) $d=5; 7,5; 10. R=5d$

d_0	d	z	t
6,00	5,00	0,50	0,50
9,00	7,50	0,75	0,75
12,00	10,00	1,00	1,00

Рис. 2.21. Форма и размеры рабочей части образцов (взяты из работы [4]).

Образцы для испытаний на усталость выполняют в виде стержневой 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. 2.20).

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. 2.20). 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. 2.20) при получении *первой* точки кривой Велера должны быть

$$\sigma_{\max} = 0,6\sigma_B \quad \text{или} \\ \sigma_{\max} = \frac{M_{X\max}}{W_X} = \frac{F(a/2)}{(\pi d^3)/32} \quad (2.33)$$

где d - диаметр выточки на образце (рис. 2.23).

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. Обработку результатов работы ведут в соответствии с требованиями раздела 4.

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?
22. 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.

2.6 Испытание различных материалов на ударную вязкость

Ц е л ь р а б о т ы: Изучение методики определения ударной вязкости пластических масс и других неметаллических материалов при испытании стандартных образцов на маятниковом копре.

Т е о р е т и ч е с к а я ч а с т ь р а б о т ы. 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.

$$a = \frac{\Delta W_F}{A} \left[\frac{H \cdot m}{m^2} \right] \quad (2.35)$$

Испытание проводится на специальном маятниковом копре (рис. 2.22). Работа ΔW_F , затраченная маятником на разрушение определяется по зависимости

$$\Delta W_F = Gh_1 - Gh_2 - W_{\text{ПОТЕРЬ}}$$

где G - вес маятника;

Gh_1 - потенциальная энергия, запасенная маятником в самом верхнем его положении;

Gh_2 - потенциальная энергия, сохраненная маятником после разрушения образца.

$W_{\text{ПОТЕРЬ}}$ - энергия потерь, затраченная маятником на преодоление вредных сопротивлений (трение в узлах копра, сопротивление воздуха). Потери для каждого экземпляра копра известны.

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*. Все материалы, из которых изготавливают детали, воспринимающие динамические нагрузки, обязательно испытывают на удар.

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.

Изменение формы образца также сказывается на величине ударной вязкости. Переход к более широким образцам и к образцам с более острым надрезом (рис. 2.23, б) смещает температурный интервал в сторону более высоких температур. На образцах из металлов всегда создается надрез - концентратор напряжений.

Охрупчиванию 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 - согласно 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, например, ХР-05, схема которого показана на рис. 2.22. Копер состоит из массивного основания

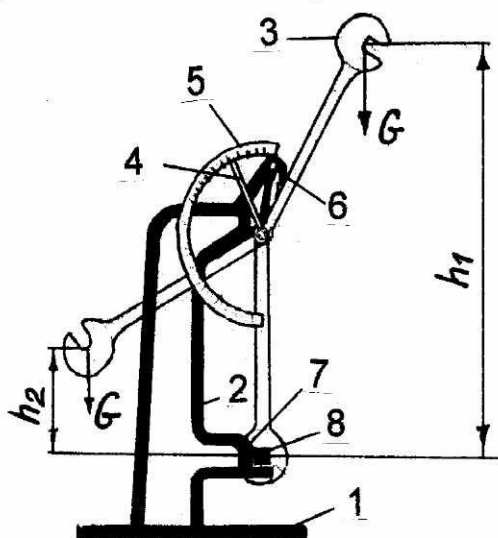


Рис. 2.22. Схема маятникового копра

1 с двумя вертикальными стойками 2. К верхней части этих стоек на горизонтальной оси подвешен маятник 3, представляющий собой плоский стальной диск с вырезом. Кроме того, на оси маятника установлена стрелка 4, напротив которой к стойке 2 прикреплена шкала 5 для отсчета затрат энергии на разрушение образца. Для фиксации маятника в исходном верхнем положении предусмотрена защелка 6.

На стойках 2 предусмотрены опоры 7 для установки образцов 8 из испытуемого материала. Расстояние между опорами 7 регулируется в пределах от 40 до 70 мм (см. рис. 2.23, а). Для образцов толщиной 5 мм и менее, расстояние между опорами 7 принимают $40 \pm 0,2$ мм, а для образцов толщиной более 5 мм – $70 \pm 0,2$ мм.

При проведении испытаний маятник 3 поднимают вверх и фиксируют защелкой 6. Стрелку 4 устанавливают на нуль, а на опоры 7 помещают испытуемый образец 8. Затем, повернув защелку 6, отпускают маятник 3, который при своем падении разрушит образец и двигаясь далее, переместит стрелку 4 по шкале 5, на которой считают величину энергии, сохраненной маятником после разрушения образца.

Форма и размеры образцов. Образцы для испытаний на ударную вязкость изготавливают механической обработкой из листов, плит или стержней; а также прессованием; или литьем под давлением. При испытании листовых и слоистых материалов толщиной менее 10 мм ширину поперечного сечения образцов принимают равной толщине этих листов. На образцах следует указать направление, соответствующее длине листа или плиты, из которых изготовлены эти образцы, так как механические свойства пластмасс в различных направлениях неодинаковы.

Образцы, изготовленные литьем под давлением, в соответствии с ГОСТ 4647 – 84 имеют размеры поперечного сечения $(6 \pm 0,2) \times (4 \pm 0,2)$ мм и длину - 55 ± 1 мм.

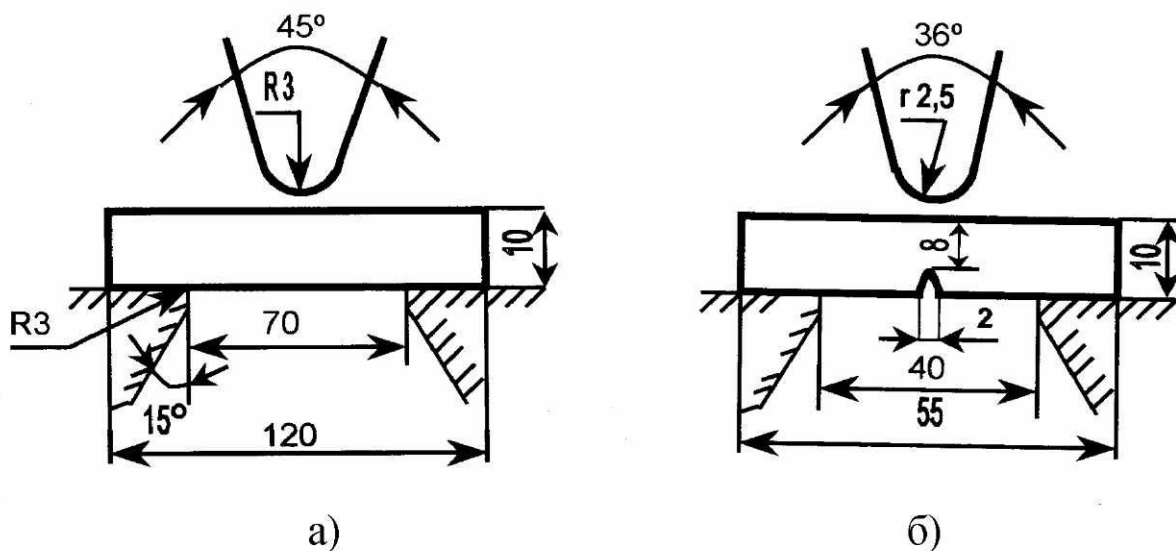


Рис. 2.23. Схема установки образцов

а) образцы из пластмасс; б) образцы из металлов

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

Порядок проведения опыта и обработка результатов. 1. Замеряют ширину и толщину образца, изготовленных из одного материала, штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Устанавливают образец 8 на опоры 7 так, чтобы удар пришелся по его широкой стороне (рис. 2.23, а). Поднимают маятник в верхнее исходное положение и закрепляют защелкой 6. Устанавливают стрелку 4 шкалы на ноль.

2. Освобождают маятник от защелки 6, который, падая вниз, разрушит образец 8. Рассчитывают величину работы, затраченной на разрушение образца.

3. Вычисляют удельную ударную вязкость по формуле (2.35). Опыт повторяют еще для двух - трех образцов.
4. Проводят обработку результатов опыта в соответствии с требованиями раздела 4.

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.					

Энергия потерь $W_{\text{потерь}}$.

6. Определение работы разрушения для образцов W_{F_1} и W_{F_2} по шкале копра.
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. Определение нормальных напряжений в балке при прямом изгибе

Цель работы: Ознакомление с методом электротензометрирования. Опытное изучение закона распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки и сравнение с напряжениями, вычисленными теоретически.

Теоретическая часть работы. Прямым изгибом называют такой изгиб, при котором силовая плоскость совпадает с одной из главных плоскостей балки. При этом нормальные напряжения в любой точке поперечного сечения по высоте балки определяют по формуле:

$$\sigma = \frac{M_x}{J_x} y \quad (3.1)$$

где M_x - изгибающий момент в сечении, в котором определяют напряжения;

J_x - главный центральный момент инерции поперечного сечения;

y - ордината слоя поперечного сечения, в котором определяют напряжения.

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*.

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, возмож-

ность 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 электротензомерирования: 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

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (3.2)$$

где ρ - удельное сопротивление проводника.

Чем длиннее проводник датчика, тем больше изменение омического сопротивления ΔR при деформации, а следовательно, 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.

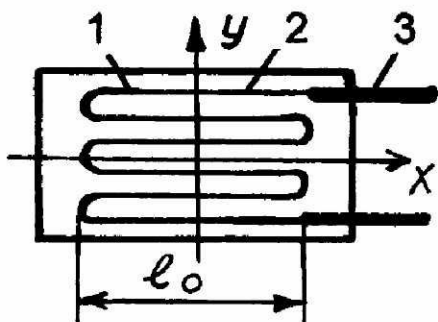


Рис. 3.1. Схема тензодатчика

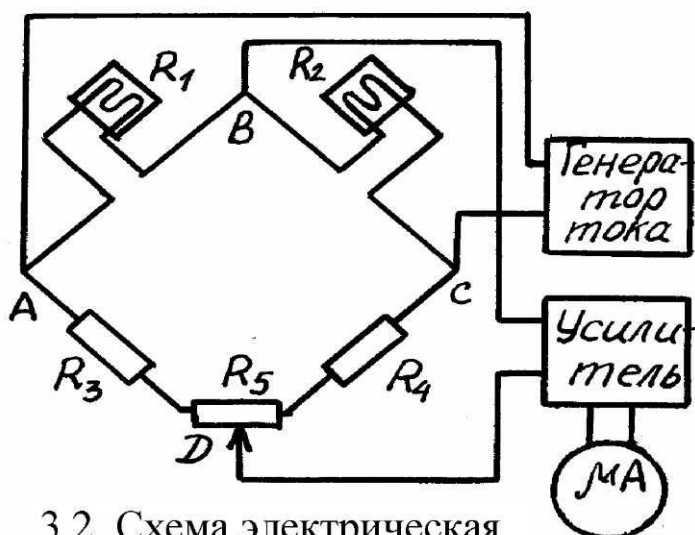
Тензодатчик представляет собой плоский элемент (рис. 3.1), состоящий из тонкой (0,015 – 0,03 мм) проволоки (или фольги) 1, материал которой обладает высоким омическим сопротивлением (константан, нихром), уложенной зигзагообразно между двумя полосками специальной тонкой (0,002 – 0,005 мм) бумаги или полимерной пленки 2. К концам проволоки сваркой либо пайкой, что менее

предпочтительно, присоединены латунные выводы 3, служащие для соединения тензодатчика с регистрирующей аппаратурой. Применение константановой проволоки обусловлено двумя существенными факторами: а) высоким омическим сопротив-

лением проводника; б) постоянством удельного сопротивления при повышении температуры до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Например, у железа в этом же диапазоне температур удельное сопротивление увеличивается почти в восемь раз. Датчик вследствие зигзагообразной укладки проволоки реагирует только в направлении оси X и не чувствителен в направлении оси Y .

Базой тензодатчика называют длину l_0 прямолинейных участков проводника, из которого он изготовлен. Промышленность выпускает проволочные, а также фольговые датчики с базой $l_0 = 5, 10, 20, 30$ мм и сопротивлением $R = 50, 100, 200, 300$ Ом. Следует однако 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 зачищается и обезжиривается спиртом или ацетоном. Тензодатчик наклеивают на поверхность балки при помощи специальных клеев (БФ-2 и др.) так, чтобы направление его базы l_0 совпадало с направлением измеряемой деформации. При нагружении балки деформируется вместе с ней и тензодатчик, сопротивление которого изменится и его величина будет зарегистрирована специальной аппаратурой, основой которой является мостовая схема – мостик Уитстона (рис. 3.2). В качестве одного из



3.2. Схема электрическая мостовая

сопротивлений моста R_1 , в мостовую схему включают тензодатчик, наклеенный на испытываемую балку. Остальные сопротивления R_2, R_3 и R_4 подбираются так, чтобы в недеформированном состоянии образца выполнялось условие:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (3.3)$$

Такое состояние называют балансом моста. Это означает, что при подаче постоянного тока на диагональ AC моста, ток в измерительной диагонали BD будет отсутствовать. Сопротивление R_5 предназначено для балансировки моста. Если балку

деформировать, то сопротивление тензодатчика R_1 изменится, и через измерительную диагональ BD пойдет ток, который после усиления будет зарегистрирован чувствительным измерительным прибором. Зная тарировочный коэффициент, определяют искомые деформации или напряжения. Для исключения температурных погрешностей в качестве сопротивления в схему измерений включают еще такой же тензодатчик, который называют компенсационным, и наклеивают его на испытываемую балку в месте, не подвергающемся деформации, или на пластину, вырезанную из материала, из которого изготовлена балка, и помещенную рядом с ней. Тогда при колебаниях температуры сопротивления датчиков R'_1, R'_2 останутся равными, баланс моста (3.3) не нарушится и погрешность измерений от изменения температуры будет исключена.

Тарировочный коэффициент определяют следующим образом. Из партии одинаковых тензодатчиков отбирают необходимое количество рабочих и компенсационных тензодатчиков и приклеивают их, как описано выше, на исследуемую балку. К тарировочной балке приклеивают точно такой же тензодатчик. В данной работе используют типовую тарировочную балку типа СМ 25Б – консольную балку равного сопротивления (балку, по длине которой напряжения остаются постоянными). Расчетные напряжения в ней в любом сечении по длине равны

$$\sigma_p = \frac{M_x(Z)}{W_x(Z)} = 13,3\Delta Q \quad (3.4)$$

где ΔQ - ступень нагружения тарировочной балки поперечной нагрузкой (≈ 50 Н).

При тарировке вместо рабочего тензодатчика в схему подключают тарировочный тензодатчик, вместе с которым тарируется и электрическая часть измерительной аппаратуры. Обычно – это многоканальный *тензоусилитель*, составленный конструктивно из нескольких одинаковых блоков, к каждому из которых подключен соответствующий рабочий тензодатчик. После измерения и усиления результаты считывают со стрелочного прибора, подключаемого последовательно к каждому блоку.

Тарировочный коэффициент, т.е. цена деления шкалы регистрирующего прибора в единицах напряжения, с учетом формулы (3.4) будет равен:

$$K_{\sigma_i} = \frac{\sigma_p}{\Delta T_{CP_i}}, \quad (3.5)$$

где ΔT_{CP_i} - среднее значение приращений показаний регистрирующего прибора на ступень нагружения ΔQ для i -го датчика.

Описание лабораторной установки. Схема лабораторной установки показана на рис. 3.3. Установка представляет собой стальную, консольно закрепленную двутавровую балку 1, на которую в сечении, отстоящем от ее свободного конца на расстоянии a , наклеены пять проволочных тензодатчиков 2. Сигнал от тензодатчиков усиливается усилителем 3 и через коммутатор 4 подается на измерительный прибор 5.

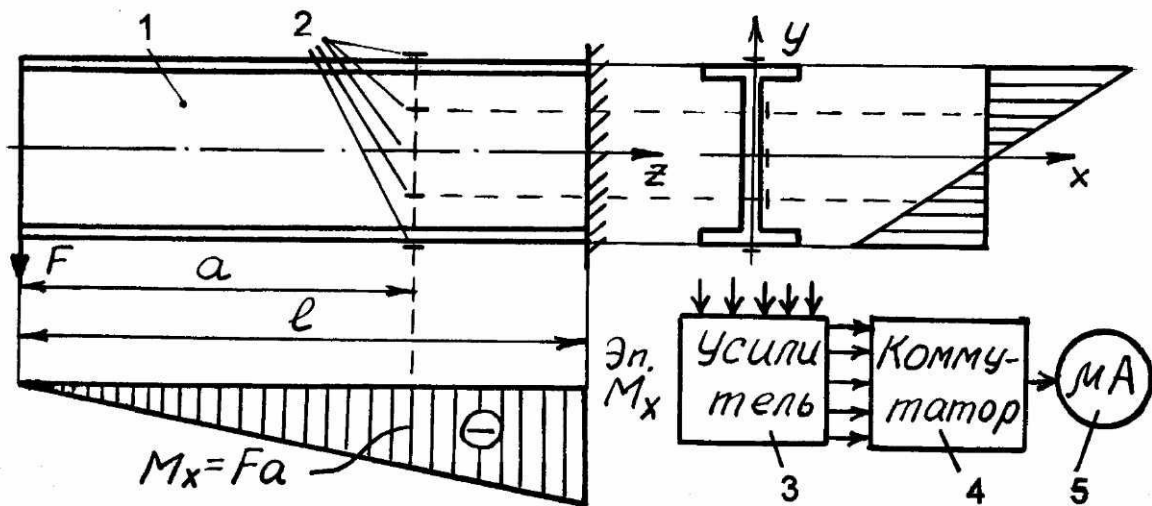


Рис. 3.3. Схема лабораторной установки

Методика проведения опыта и обработка результатов. 1. Задают исходные данные: расстояние от тензодатчиков до нейтрального слоя: y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 , расстояние a от места приложения силы F до сечения, в котором определяют напряжения (до места наклейки тензодатчиков); выбирают ступень нагружения ΔF так, чтобы после 3-4 ступеней нагружения деформации балки были в пределах упругости. Все данные заносят в журнал наблюдений.

2. Балансируют мостовые схемы тензоусилителя, предварительно включенного в сеть для прогрева в течение не менее 20 мин.

3. Балку 1 нагружают нагрузкой F , снимают показания на измерительном приборе 5 тензоусилителя по каждому тензодатчику. Затем

опыт повторяют еще 2-3 раза, увеличивая нагрузку равными ступенями, и записывают для каждого датчика результаты испытаний $\Delta\lambda_i$ в журнал наблюдений.

4. Рассчитывают для каждого слоя теоретические напряжения по формуле (3.1).

5. Согласно требованиям раздела 4 обрабатывают результаты испытаний и вычисляют опытные значения напряжений для каждого слоя по формуле

$$\sigma_i^0 = K_{\sigma_i} \cdot \Delta\lambda_{CP_i} \quad (3.6)$$

где K_{σ_i} - тарировочные коэффициенты для каждого канала, полученные по формулам (3.5).

6. Проводят анализ и сопоставление полученных результатов с теоретическими. Строят эпюры распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки по расчетным и опытным данным.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Электрическая схема мостика Уитстона.
5. Исходные данные.
 - 5.1. Величина ступени нагружения ΔF .
 - 5.2. Длина консольной балки l .
 - 5.3. Расстояния до слоев, в которых определяются напряжения y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 .
 - 5.4. Расстояние до сечения, в котором определяется напряжение a .
 - 5.5. Осевой момент инерции сечения I_x .
 - 5.6. Тарировочные коэффициенты для каналов:
 $K_{\sigma_1}, K_{\sigma_2}, K_{\sigma_3}, K_{\sigma_4}, K_{\sigma_5}$.

6. Результаты эксперимента.

№ п/п	Нагрузка, F	Приращение нагрузки ΔF	Показания тензодатчиков					Приращения показаний тензодатчиков				
			λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	$\Delta\lambda_1$	$\Delta\lambda_2$	$\Delta\lambda_3$	$\Delta\lambda_4$	$\Delta\lambda_5$
Средние значения приращений		ΔF_{CP}						$\Delta\lambda_{CP1}$	$\Delta\lambda_{CP2}$	$\Delta\lambda_{CP3}$	$\Delta\lambda_{CP4}$	$\Delta\lambda_{CP5}$

7. Опытные значения напряжений в заданных слоях поперечного сечения балки $\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_3^0, \sigma_4^0, \sigma_5^0$.

8. Теоретический расчет напряжений в заданных слоях сечения балки $\sigma_1^T, \sigma_2^T, \sigma_3^T, \sigma_4^T, \sigma_5^T$.

9. Сравнение опытных и теоретических значений. Выводы.

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?

9. Какие преимущества и недостатки электротензометрирования Вы знаете?
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. Определение главных напряжений при совместном изгибе и кручении тонкостенной трубы

Цель работы: Определение опытным путем величины и направления главных напряжений в поверхностном слое тонкостенной трубы при кручении, а также при одновременном изгибе и кручении, и сравнение их с данными, полученными теоретическим расчетом.

Теоретическая часть работы. В практике машиностроения часто возникает необходимость расчета тонкостенных стержней замкнутого профиля, например, труб, работающих при кручении, а также при совместном действии изгиба и кручения.

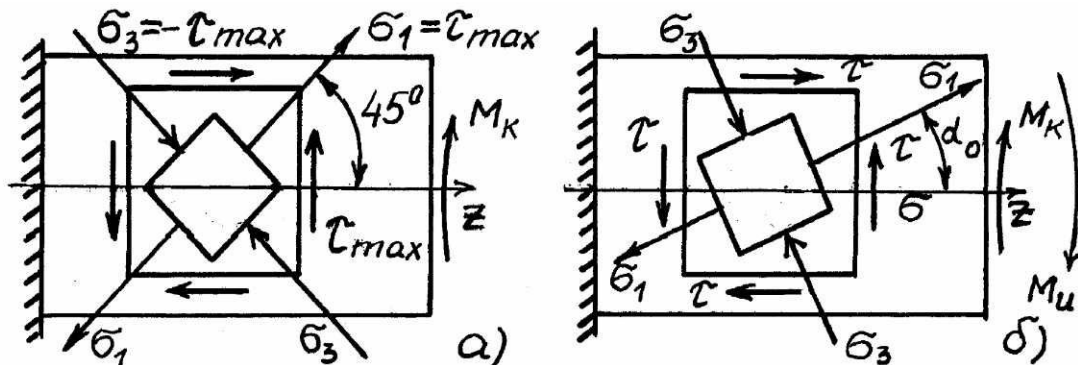


Рис. 3.4. Напряженное состояние в произвольной точке тонкостенной трубы:

а) при кручении; б) при кручении с изгибом.

В этом случае в любой точке на поверхности трубы возникает *плоское напряженное состояние*.

При плоском напряженном состоянии величину и направления главных деформаций (совпадающие с направлениями главных напряжений) можно определить, если измерить линейные деформации на поверхности трубы по трем произвольно выбранным направлениям, используя для этого *роzetку тензодатчиков*, т. е. три тензодатчика 1, 2 и 3 (рис. 3.5), наклеенные на трубу в исследуемом сечении К (на расстоянии l от конца трубы) так, чтобы, например, датчик 2 был параллелен образующей трубы (оси Z), а два других расположены к ней под углом 45° .

При *изгибе с кручением* (рис. 3.4, б) по деформациям $\varepsilon_Z, \varepsilon_V$ и ε_U , измеренным в направлении трех тензодатчиков, вычисляют главные деформации по формулам:

$$\varepsilon_{1,3} = \frac{\varepsilon_U + \varepsilon_V}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_U - \varepsilon_Z)^2 + (\varepsilon_V - \varepsilon_Z)^2}. \quad (3.7)$$

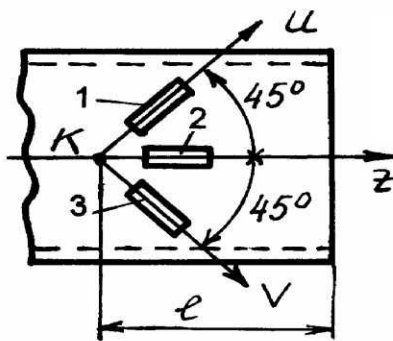


Рис. 3.5. Розетка тензодатчиков

Затем, используя обобщенный закон Гука, по найденным значениям ε_1 и ε_3 вычисляют величину *главных напряжений*

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_3), \quad (3.8)$$

$$\sigma_3 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_3 + \mu\varepsilon_1)$$

где μ - коэффициент Пуассона;

E - модуль продольной упругости материала трубы.

Угол α_0 между осью трубы Z и главным напряжением σ_1 определяют по формуле:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{\varepsilon_U + \varepsilon_V - 2\varepsilon_Z}{\varepsilon_U - \varepsilon_V}. \quad (3.9)$$

Теоретическим расчетом величину главных напряжений при изгибе с кручением определяют по формуле

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}. \quad (3.10)$$

При этом для вычисления нормальных напряжений σ от изгиба и касательных напряжений τ от кручения используют известные формулы

$$\sigma = \frac{M_{из}}{W_X}, \quad \tau = \frac{T_Z}{W_P}, \quad (3.11)$$

где $W_X = \pi D^3(1 - C^4)/32$ - осевой момент сопротивления сечения ($C = d/D$, где D и d - наружный и внутренний диаметры трубы, соответственно);

$W_P = 2W_X$ - полярный момент сопротивления сечения.

Положение главных площадок теоретически определяют по углу α_0 между направлением σ (осью Z) и направлением σ_1 (рис. 3.4, б) по формуле

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = -\frac{2\tau}{\sigma}. \quad (3.12)$$

При кручении во всех точках на поверхности тонкостенной трубы возникает плоское напряженное состояние – чистый сдвиг (рис. 3.4, а). В этом случае известно, что главные напряжения направлены под углом $\alpha_0 = \pm 45^\circ$ к продольной оси Z трубы.

Так как тензодатчики 1 и 3 (рис. 3.5) наклеены на трубу под углом 45° к ее продольной оси Z , (по направлениям главных напряжений), то для определения последних достаточно измерить значения главных деформаций ε_1 и ε_3 по этим же направлениям. Тогда, учитывая, что главные напряжения при чистом сдвиге равны по величине, но противоположны по знаку, формулы (3.8) упрощаются

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 + \mu} \varepsilon_1, \quad (3.13)$$

$$\sigma_3 = \frac{E}{1 + \mu} \varepsilon_3 \quad (3.14)$$

где $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3$ - главные деформации, измеренные датчиками 1 и 3, соответственно.

Теоретическим расчетом определяют величину главных напряжений из выражения

$$\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{\max} = \frac{T_Z}{W_P}. \quad (3.15)$$

Описание лабораторной установки. Для выполнения работы используется установка типа СМ-18 А (рис. 3.6). На литой станине 1 закреплена консольно тонкостенная труба 2 из дюраля марки Д16Т с наружным диаметром D и внутренним – d . На свободном конце трубы горизонтально установлен равноплечий нагрузочный рычаг 3. К правому плечу рычага 3 на расстоянии a подвешен грузовой подвес 4, а к его левому плечу также на расстоянии a прикреплен тросик 5, перекинутый через блок 7, к концу которого подвешен грузовой подвес 6. Блок 7 установлен на кронштейне 8, прикрепленном к станине 1.

На расстоянии l от свободного конца трубы 2 наклеена розетка тензодатчиков 9 (в сечении K) согласно схемы их расположения, показанной на рис. 3.5. Компенсационные тензодатчики 10 наклеены на трубе 2 перпендикулярно ее продольной оси.

Для подсоединения выводов рабочих и компенсационных тензодатчиков предусмотрена клеммная колодка 11.

Методика проведения опыта и обработка результатов. 1. Штангенциркулем измеряют наружный D и внутренний d диаметры трубы с точностью 0,1 мм. Линейкой измеряют с точностью 1 мм плечи a рычага 3 и расстояние l от свободного конца трубы 2 до сечения, в котором определяют главные напряжения (до точки K).

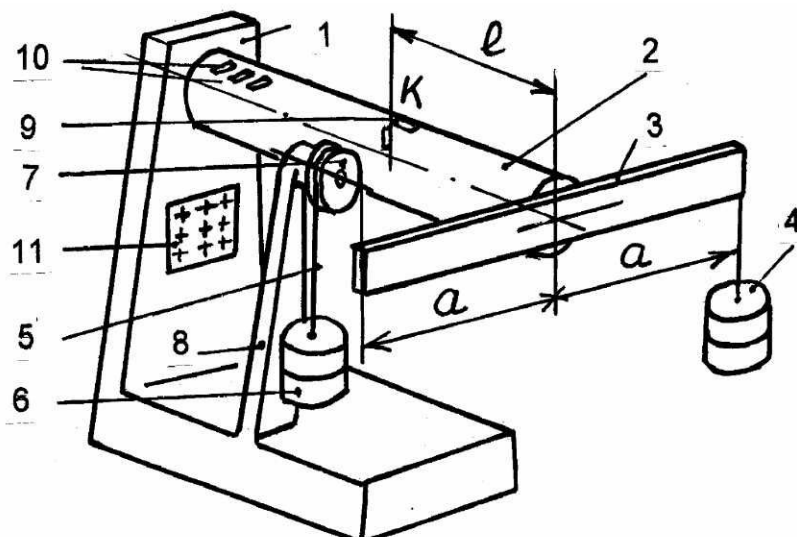


Рис. 3.6. Схема лабораторной установки СМ 18 А

2. Определяют степень нагружения ΔF , руководствуясь тем, чтобы после опытов (число нагружений $m = 3 - 4$) величина эквива-

лентных напряжений в поверхностном слое трубы была несколько меньше предела пропорциональности материала трубы, т. е. $\sigma_{\partial} < \sigma_{III}$.

Если нагрузку F приложить только на подвес 4, то после приведения ее к центру трубы, получают совместное действие *изгиба и кручения*. Тогда, например, по третьей гипотезе прочности получают

$$\sigma_{\partial III} = \frac{\sqrt{M_x^2 + T_z^2}}{W_x} = \frac{\sqrt{(Fl)^2 + (Fa)^2}}{\pi D^3 (1-C^4)/32} < \sigma_{III}$$

где $M_x = Fl$ - наибольший изгибающий момент в сечении К ;

$T_z = Fa$ - наибольший крутящий момент; $C = d/D$.

Отсюда наибольшая нагрузка, которая может быть приложена к трубе

$$F < \frac{\pi D^3 (1-C^4)}{32 \sqrt{l^2 + a^2}} \sigma_{III} \quad (3.15)$$

Тогда степень нагружения при числе опытов m будет равна

$$\Delta F = F/m. \quad (3.16)$$

Если значение σ_{III} неизвестно, то его определяют по приближенной формуле $\sigma_{III} \approx \sigma_T / 1,2$ (для материала трубы: дюралюминия марки Д 16Т, предел текучести $\sigma_{0,2} = 270$ МПа).

При *кручении* степень нагружения определяют по методике, изложенной в работе 2.3, учитывая, что крутящий момент $T = 2Fa$ получают приложением к подвесам 4 и 6 одинаковых грузов.

3. Из справочника выписывают значения модуля продольной упругости материала трубы E и коэффициент Пуассона μ . Все эти данные заносят в журнал наблюдений.

4. Балансируют мостовые схемы тензоусилителя, предварительно включенного в сеть для прогрева в течение не менее 20 минут.

5. При *изгибе с кручением* трубу нагружают, последовательно прибавляя к грузовому подвесу 4 m раз внешнюю нагрузку ΔF , и заносят после каждого опыта в журнал наблюдений показания тензодатчиков λ_U, λ_Z и λ_V . Затем вычисляют приращения показаний каждого тензодатчика и среднее значение этих показаний $\Delta\lambda_U^{CP}, \Delta\lambda_Z^{CP}, \Delta\lambda_V^{CP}$. Определяют линейные деформации

$$\varepsilon_U^0 = K_U \Delta\lambda_U^{CP}; \varepsilon_Z^{CP} = K_Z \Delta\lambda_Z^{CP}; \varepsilon_V^0 = K_V \Delta\lambda_V^{CP} \quad (3.17)$$

где K_U, K_Z и K_V - тарировочные коэффициенты измерительных каналов тензоусилителя.

Вычисляют *опытные* значения: по формуле (3.7) главные деформации ε_1^0 и ε_3^0 ; по формуле (3.8) главные напряжения σ_1^0 и σ_3^0 , а по формуле (3.9) положение главных площадок – угол α_0^0 .

Рассчитывают *теоретические* значения: с учетом формулы (3.11) по формуле (3.10) – главные напряжения σ_1^T и σ_3^T , а по формуле (3.12) – положение главных площадок (угол α_0^T).

6. При *кручении* трубы прикладывают равными ступенями (3-4 раза) нагрузку ΔF к подвесам 4 и 5 и снимают показания тензодатчиков 1 и 3 – λ_U и λ_V . Определив средние значения приращений показаний $\Delta\lambda_U^{CP}$ и $\Delta\lambda_V^{CP}$, вычисляют *опытные* значения главных деформаций

$$\varepsilon_1^0 = \varepsilon_U^0 = K_U \Delta\lambda_U^{CP}; \varepsilon_3^0 = \varepsilon_V^0 = -K_V \Delta\lambda_V^{CP}. \quad (3.18)$$

Вычисляют *опытные* значения главных напряжений σ_1^0 и σ_3^0 по формулам (3.13) и (3.14) по найденным выше ε_1^0 и ε_3^0 . Положение главных площадок известно - $\alpha_0 = \pm 45^\circ$.

Рассчитывают *теоретические* значения главных напряжений σ_1^T и σ_3^T по формуле (3.15).

Обработку всех опытных данных проводят, руководствуясь разделом 4. В заключение выполняют анализ и сравнение полученных данных.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Основные расчетные данные:
 - 4.1. Расстояние от свободного конца трубы до сечения l .
 - 4.2. Диаметры трубы: внутренний d и наружный D .
 - 4.3. Плечо внешней нагрузки a .
 - 4.4. Модуль продольной упругости материала E .
 - 4.5. Коэффициент Пуассона μ .

- 4.6. Тарировочные коэффициенты тензометров K_U, K_Z, K_V .
- 4.7. Осевой момент сопротивления сечения W_X .
- 4.8. Полярный момент сопротивления сечения W_P .
- 4.9. Изгибающий момент в заданном сечении M_X .
- 4.10. Крутящий момент в заданном сечении T_Z .

5. Результаты эксперимента.

№/№ п/п	Нагруз- ка F	Прираще- ние на- грузки ΔF	Показания тен- зометров			Приращение показаний тензометров		
			λ_Z	λ_U	λ_V	$\Delta\lambda_Z$	$\Delta\lambda_U$	$\Delta\lambda_V$
Средние значе- ния прираще- ний		ΔF_{CP}				$\Delta\lambda_{ZCP}$	$\Delta\lambda_{UCP}$	$\Delta\lambda_{VCP}$

6. Теоретическое определение главных напряжений при кручении с изгибом.

- 6.1. Нормальные напряжения σ^T .
- 6.2. Касательные напряжения τ^T .
- 6.3. Главные напряжения σ_1^T и σ_3^T , положение главных площадок - α_0^T .

7. Экспериментальное определение главных напряжений.

- 7.1. Деформации, измеренные в направлениях трех тензодатчиков $\varepsilon_Z, \varepsilon_U, \varepsilon_V$.

- 7.2. Главные деформации ε_1^0 и ε_3^0 .

- 7.3. Главные напряжения σ_1^0 и σ_3^0 .

8. Определение угла наклона между осью трубы и направлением главного напряжения α_0^0 .

9. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Как устроена лабораторная установка СМ 18 А?
3. Как устроен проволочный тензодатчик? Объясните принцип его работы?
4. Что называют «розеткой» тензодатчиков?
5. Какие напряжения возникают в поперечном сечении трубы при изгибе с кручением? – при кручении?
6. По каким формулам определяют теоретические напряжения на поверхности трубы при изгибе и при кручении?
7. Какие виды напряженных состояний Вы знаете? Какое напряженное состояние называют плоским?
8. Какое напряженное состояние называют чистым сдвигом?
9. Какие линейные деформации называют главными деформациями?
10. Как записывается обобщенный закон Гука?
11. Почему линейные деформации при кручении определяют с помощью датчиков наклеенных под углом 45° к оси трубы?
12. Какие напряжения называют главными?
13. Какая зависимость существует между касательными напряжениями в поперечном сечении бруса при кручении и главными напряжениями?
14. Как нагрузить установку, чтобы труба испытывала изгиб и кручение? – только кручение?
15. Как теоретически определить главные напряжения при изгибе с кручением?
16. По каким формулам определяют опытным путем величину главных напряжений при изгибе с кручением?
17. Какова размерность крутящего и изгибающего моментов?
18. Как находят опасное сечение круглого бруса при изгибе с кручением?

Литература: [6] - §13.10; [7] - §§ 125, 126.

3.3. Определение напряжений при внецентренном растяжении бруса

Ц е л ь р а б о т ы: Определить опытным путем нормальные напряжения в крайних волокнах поперечного сечения бруса при вне-

центренном 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. 3.7).

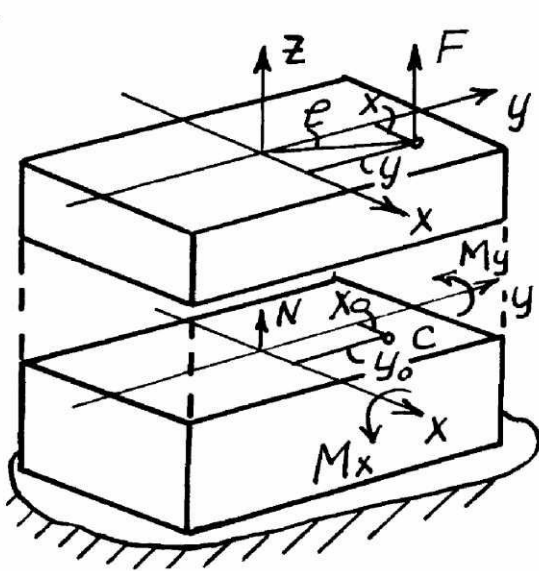


Рис. 3.7. Схема для определения внутренних силовых факторов

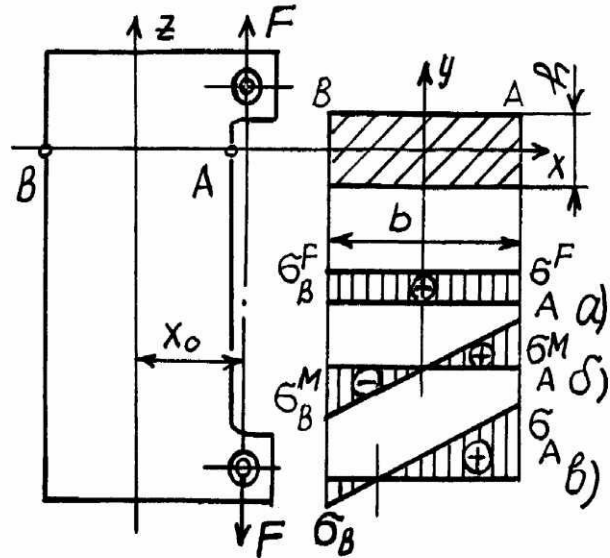


Рис. 3.8. Схема плоского внецентренного растяжения

На основании принципа независимости действия сил нормальные напряжения в любой произвольной точке C поперечного сечения бруса (рис. 3.7), имеющей координаты X и Y будут складываться из напряжений от продольной силы N и напряжений от чистого изгиба моментами M_X и M_Y :

$$\sigma_C = \sigma_C^N + \sigma_C^{M_X} + \sigma_C^{M_Y}$$

или

$$\sigma_C = \frac{N}{F} \pm \frac{M_X}{J_X} Y \pm \frac{M_Y}{J_Y} X. \quad (3.19)$$

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

$$\sigma = \frac{N}{F} \pm \frac{M_X}{W_X} \pm \frac{M_Y}{W_Y}. \quad (3.20)$$

При этом знаки в формуле выбирают на основании анализа расчетной схемы. Если в бруске прямоугольного поперечного сечения (рис. 3.8) 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 A и B) на основании (3.20) от продольной силы $N = F$ будут одинаковы, т. е.

$$\sigma_A^F = \sigma_B^F = \frac{N}{A} = \frac{F}{bh}. \quad (3.21)$$

От изгибающего момента в точке A возникают растягивающие напряжения, а в точке B - сжимающие. Тогда получают

$$\sigma_{\frac{A}{B}}^M = \pm \frac{M_y}{W_y} = \pm \frac{6FX_0}{b^2h} \quad (3.22)$$

где $M_y = FX_0; W_y = b^2h/6$.

Суммарные напряжения в точках A и B с учетом формул (3.21) и (3.22) будут равны

$$\sigma_{\frac{A}{B}} = \frac{F}{bh} \pm \frac{6FX_0}{b^2h}. \quad (3.23)$$

В итоге получают: наибольшие напряжения возникают, как и при изгибе, в наиболее удаленных от нейтральной оси точках. На рис. 3.8, а, показана эпюра напряжений от растяжения, на рис. 3.8, б – от изгиба, а на рис. 3.8, в – суммарная эпюра напряжений.

Наибольшую нагрузку F_{\max} , которую можно приложить к образцу, определяют из (3.24), учитывая, что максимальные напряжения не должны вызывать пластических деформаций, т. е. $\sigma_{\max} < \sigma_{\text{пл}}$. Тогда с учетом формулы (3.23) получают

$$\sigma_{\max} = \sigma_A = \frac{F_{\max}}{bh} + \frac{6F_{\max}X_0}{b^2h} < \sigma_{\text{пл}}. \quad (3.24)$$

Описание лабораторной установки. Работа выполняется на машине ДМ-30 М. Схема машины с установленным на ней образцом показана на рис. 3.9.

Рама машины состоит из основания 1, двух колонн 2 и поперечины 3. На поперечине смонтирован установочный узел, включающий маховик 4 и винтовую пару 5, 6, с помощью которого можно менять по высоте расстояние между захватами машины 9 и 12. Силоизмерительное устройство состоит из динамометрического кольца 7 и индикатора часового типа 8 с ценой деления $K = 0,002$ мм, принцип действия которого описан в работе 3.5.

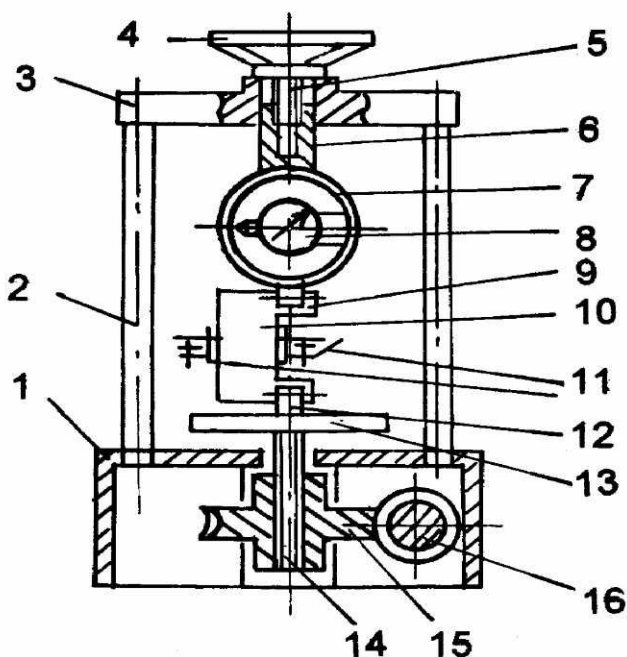


Рис. 3.9. Схема испытательной машины ДМ-30 М

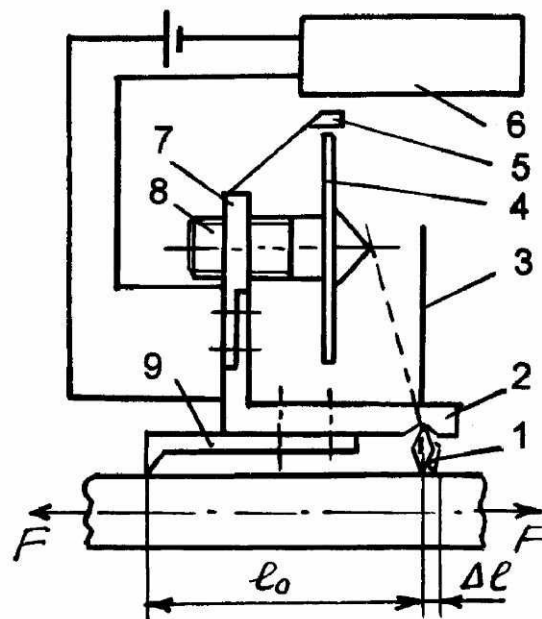


Рис. 3.10. Схема тензомера ТА-2 конструкции Н.Н. Аристова

Индикатор 8 установлен по горизонтальной оси симметрии кольца 7. Кольцо прикреплено к винтовой паре 5, 6, а снизу к нему присоединен захват 9. При приложении нагрузки к захвату 9 кольцо 7 деформируется. Зная величину этой деформации, зафиксированную индикатором 8, по тарировочному графику (рис. 3.11) определяют приложенную нагрузку.

Нагружающее устройство смонтировано на станине 1 и состоит из стола 13, установленного на вертикально перемещающемся грузовом винте 14, который входит в резьбовую втулку червячного колеса 15, приводимого во вращение червяком 16 вручную (маховик привода червяка условно не показан).

Образец для испытания 10, установленный в захватах 9 и 12, представляет собой брус прямоугольного поперечного сечения $b \times h$ (рис. 3.8). Растягивающая нагрузка прикладывается с эксцентриситетом X_0 , взятым вне ядра сечения, чтобы получить в крайних волокнах напряжения разных знаков.

Для измерения деформаций в крайних волокнах на образце установлены два рычажных тензомера 11, например, типа ТА-2 конструкции Н.Н. Аристова, схема которого показана на рис. 3.10.

Тензомер имеет основание, состоящее из планки 2 и опорного ножа 9. В вырезе планки 2 установлена призма 1 с пластиной 3,

снабженной на верхнем конце контактной площадкой. В стойке 7, изолированной от планки 2, установлен микрометрический винт 8, снабженный лимбом 4 с делениями и оканчивающийся острием. Напротив лимба закреплена визирка 5 для отсчета деформации. К планке 2 и стойке 7 подсоединен звуковой индикатор 6, включающийся при замыкании острия винта 8 и контакта пластины 3, которая получает перемещение при повороте призмы 1 вследствие деформации образца Δl .

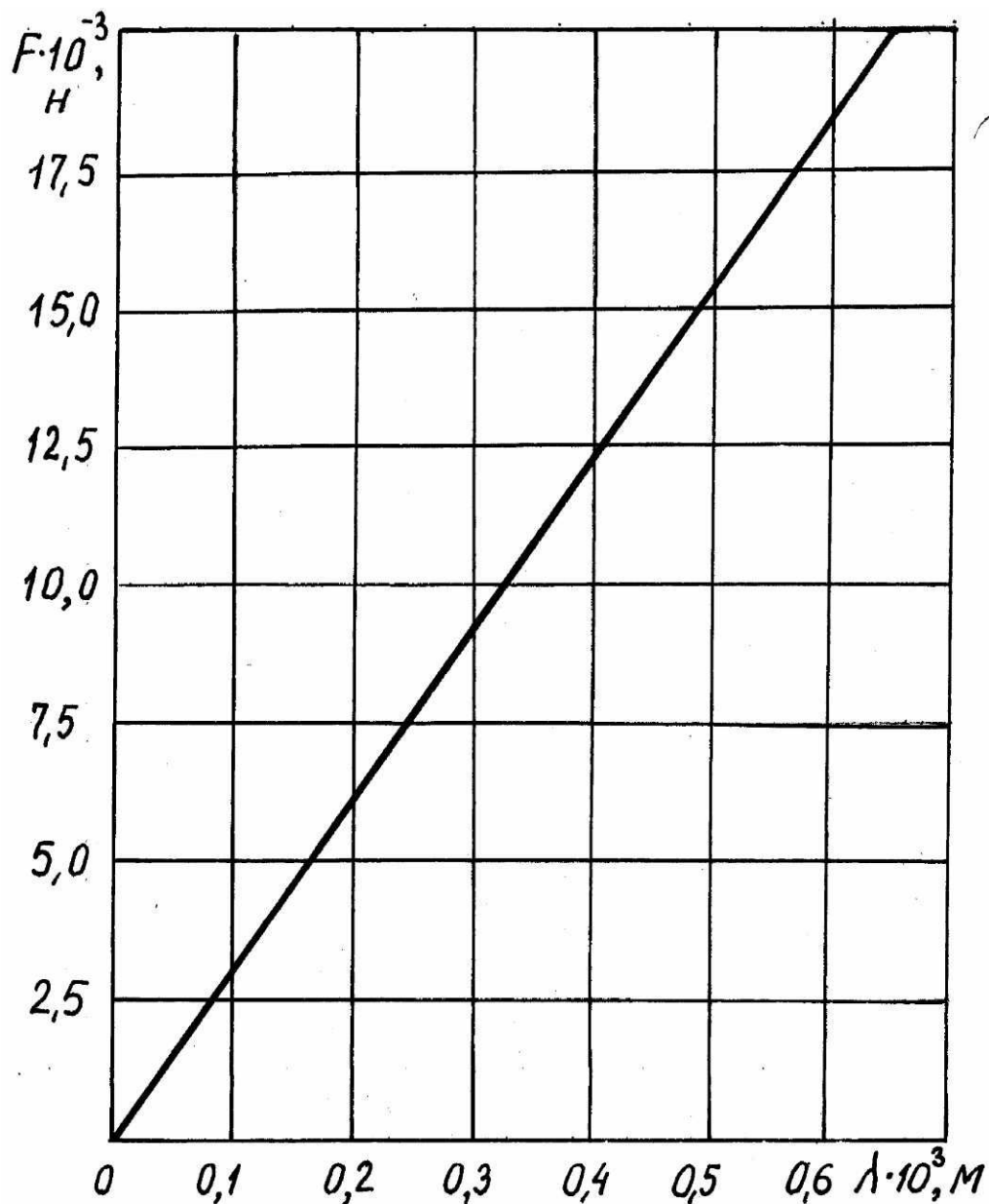


Рис. 3.11. Тарировочный график динамометрического кольца силоизмерителя

Соотношение элементов рычажной системы таково, что цена одного деления шкалы лимба 4 равна $C = 0,001\text{мм}$. Расстояние l_0 между ножом 9 и призмой 1 называют *базой* тензометра.

Методика выполнения опыта и обработка результатов. 1. Штангенциркулем с точностью 0,1 мм измеряют размеры поперечного сечения образца b и h , а также эксцентриситет X_0 приложения нагрузки. Эти величины, а также значения модуля продольной упругости E и базы тензометров l_{0A} и l_{0B} заносят в журнал наблюдений.

2. Из формулы (3.24) для материала образца 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, вращая маховик червячного винта 16 (рис. 3.9) нагружающего устройства, прикладывают начальную нагрузку F_0 для выбора всех зазоров. Снимают показания тензометров 11. Для этого вращают лимб 4 до момента появления сигнала звукового индикатора при замыкании острия винта 4 с пластиной 3 и делают отсчет напротив визирки 5 на лимбе 4 (рис. 3.10). Затем прерывают контакт, отводя винт 4 обратно. При этом лимб правого тензометра, установленного на растянутых волокнах, необходимо отвести на 15-20 делений, т. к. при растяжении образца пластина 3 приближается к винту 4 и необходимо исключить преждевременное включение звукового индикатора 6. Винт левого тензометра, установленного на сжатых волокнах, достаточно отвести на 2 – 3 деления.

Величину начальной нагрузки и показания обоих тензометров принимают за исходные и записывают в таблицу журнала наблюдений.

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

4. Согласно требованиям раздела 4 обрабатывают результаты исследований и вычисляют опытные значения напряжений, используя закон Гука:

$$\sigma_A^0 = \frac{E\Delta\lambda_A K}{l_{0A}}; \sigma_B^0 = \frac{E\Delta\lambda_B K}{l_{0B}}. \quad (3.25)$$

5. Вычисляют теоретические значения напряжений в точках A и B (σ_A^T и σ_B^T) по формулам (3.23) при ступени нагружения ΔF , строят совмещенные эпюры нормальных напряжений по опытным и

теоретическим данным (см. рис. 3.8, в) 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_A, l_B .
 - 6.4. Цена деления шкалы тензометров C .
 - 6.5. Координаты приложения силы x_0, y_0 .
 - 6.6. Площадь поперечного сечения образца A .
 - 6.7. Осевой момент сопротивления сечения W_y .
7. Результаты эксперимента.

№ п/п	На- грузка F	Прираще- ние на- грузки, ΔF	Показания тензо- метров		Приращение пока- заний тензометров	
			λ_A	λ_B	$\Delta\lambda_A$	$\Delta\lambda_B$
Средние зна- чения при- ращений		ΔF_{cp}			$\Delta\lambda_{Acp}$	$\Delta\lambda_{Bcp}$

8. Опытное определение напряжений σ_A^0 и σ_B^0 .
9. Теоретическое определение напряжений σ_A^T и σ_B^T .
10. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. На какой машине выполняется работа? Каково её устройство?
3. Как устроено силоизмерительное устройство? Как пользоваться тарировочным графиком?
4. Какой образец применяют в работе?
5. Какой случай сложного сопротивления называют внецентренным растяжением (сжатием)? Чем отличается частный случай внецентренного растяжения (сжатия) от общего? Приведите примеры.
6. Какие внутренние силовые факторы возникают в поперечном сечении бруса при внецентренном растяжении (сжатии)?
7. По какой формуле можно теоретически определить напряжения в любой точке сечения при внецентренном растяжении (сжатии)?
8. По какой формуле можно вычислить наибольшие напряжения при внецентренном растяжении для сечений, имеющих выступающие углы?
9. Какая линия называется нейтральной и как она располагается?
10. Какое напряженное состояние возникает в любой точке бруса при внецентренном растяжении?
11. Как определить опытным путем напряжения в крайних волокнах сечения бруса?
12. Как устроен рычажный тензомер Аристова типа ТА-2?
13. Почему брус нагружают равными ступенями? С какой целью прикладывается начальная нагрузка?
14. В каких точках поперечного сечения бруса возникают наибольшие напряжения при внецентренном растяжении (сжатии)?

Литература: [5] - § 36; [7] - § 80.

3.4. Определение напряжений в стенке тонкостенного сосуда

Ц е л ь р а б о т ы: определение напряжений в стенке тонкостенного осесимметричного сосуда, находящегося под действием внутреннего давления, и сравнение с напряжениями, полученными расчетным путем.

Т е о р е т и ч е с к а я ч а с т ь р а б о т ы. Тонкостенным осесимметричным сосудом называют оболочку, срединная поверхность которой представляет собой поверхность вращения, а соотношение

толщины её стенки t и наименьшего главного радиуса кривизны срединной поверхности ρ составляет $t \leq 0,05\rho$.

Срединная поверхность - геометрическое место точек, равноотстоящих от обеих поверхностей оболочки.

В стенке тонкостенного осесимметричного сосуда толщиной t , находящегося под внутренним давлением, напряжения определяют по известной формуле Лапласа (рис. 3.12):

$$\frac{\sigma_t}{\rho_t} + \frac{\sigma_m}{\rho_m} = \frac{P}{t}. \quad (3.26)$$

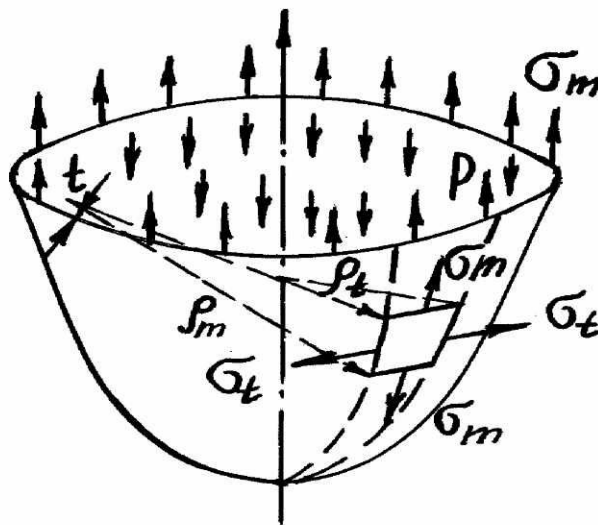


Рис. 3.12. Тонкостенный осесимметричный сосуд

В настоящей работе используют тонкостенный *цилиндрический* сосуд (рис. 3.13,а).

В этом случае принимают $\rho_t = r$, а $\rho_m = \infty$ (радиус кривизны образующей цилиндра). Из уравнения Лапласа (3.23) получают для окружного напряжения

$$\frac{\sigma_t}{r} = \frac{P}{t}.$$

Откуда

$$\sigma_t = \frac{Pr}{t}. \quad (3.27)$$

Меридиональное напряжение определяют из условия равновесия отсеченной части сосуда (рис. 3.13,б) по формуле

$$\sigma_m = \frac{Pr}{2t}. \quad (3.28)$$

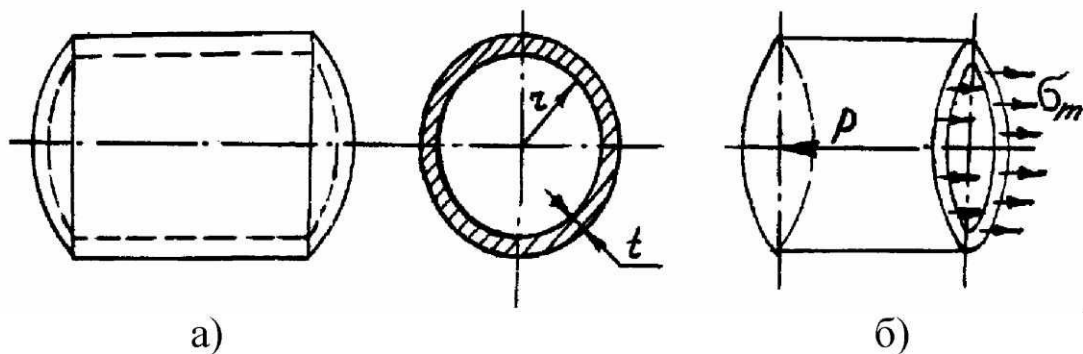


Рис. 3.13. Тонкостенный цилиндрический сосуд

Сравнивая σ_t и σ_m в цилиндрическом сосуде, видим что

$$\sigma_t = 2\sigma_m. \quad (3.29)$$

Описание лабораторной установки. Схема установки показана на рис. 3.14 и представляет собой тонкостенный цилиндрический сосуд 1, в который из источника давления 2 подается газ.

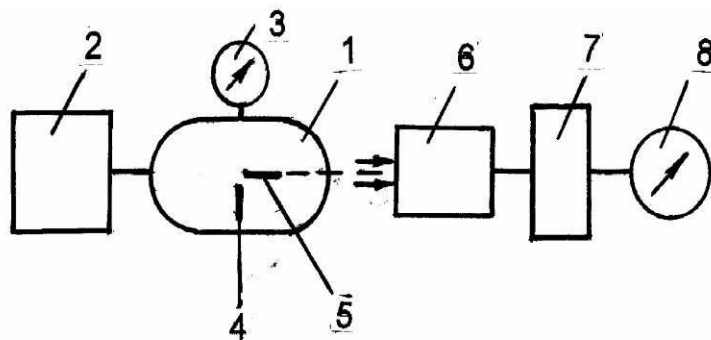


Рис. 3.14. Схема лабораторной установки

Контроль за величиной давления осуществляется по манометру 3. На поверхности сосуда в средней его части наклеены тензодатчики в окружном 4 и меридиональном 5 направлениях, которые подключены к тензоусилителю 6. Через коммутатор 7 сигнал с тензодатчиков после усиления подается на измерительный прибор 8 (методику тензоизмерений см. в работе 3.1).

Методика проведения опыта и обработка результатов. 1. Задают исходные данные: окружной радиус кривизны ρ_t меридиональный радиус кривизны ρ_m толщину стенки осесимметричной оболочки t ; степень внутреннего давления Δp .

2. Балансируют мостовые схемы тензоусилителя, предварительно включенного в сеть для прогрева в течение не менее 20 минут.

3. Подают внутреннее давление P , снимают показания λ_t и λ_m на измерительном приборе 8 тензоусилителя каждого тензодатчика и записывают в журнал наблюдений. Опыт повторяют 2 – 3 раза, увеличивая давление равными ступенями ΔP и записывая для каждого опыта результаты испытаний в журнал наблюдений. По результатам измерений вычисляют приращения показаний тензодатчиков $\Delta\lambda_t$ и $\Delta\lambda_m$ на заданную ступень давления ΔP , а затем определяют среднее значение этих приращений $\Delta\lambda_{t\text{CP}}$ и $\Delta\lambda_{m\text{CP}}$.

4. Вычисляют опытные значения окружного σ_t^0 и меридионального напряжения σ_m^0 при заданной ступени давления по формулам:

$$\sigma_t = K_t \Delta\lambda_{t\text{CP}}; \quad \sigma_m = K_m \Delta\lambda_{m\text{CP}} \quad (3.30)$$

где K_t и K_m - тарировочные коэффициенты тензодатчиков.

5. Вычисляют теоретические значения напряжений σ_t^T и σ_m^T при той же ступени давления ΔP по формулам (3.27) и (3.28) и проводят сопоставление полученных результатов. При этом обрабатывают результаты опытов согласно требованиям раздела 4.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Схема лабораторной установки.
4. Исходные данные.
 - 4.1. Окружной радиус кривизны ρ_t .
 - 4.2. Меридиональный радиус кривизны ρ_m .
 - 4.3. Толщина стенки сосуда t .
5. Теоретические расчеты.
 - 5.1. Окружное напряжение σ_t^T .
 - 5.2. Меридиональное напряжение σ_m^T .
6. Результаты опыта.

№ п/ п	Давление P	Степень внутренне- го давления ΔP	Показания тен- зодатчиков		Приращения пока- заний тензодатчи- ков	
			λ_t	λ_m	$\Delta\lambda_t$	$\Delta\lambda_m$
Средние значе- ния приращений		ΔP_{CP}			$\Delta\lambda_{t_{CP}}$	$\Delta\lambda_{m_{CP}}$

7. Обработка результатов опыта.

7.1. Значение окружного напряжения σ_t^0 .

7.2. Значение меридионального напряжения σ_m^0 .

8. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Как устроена лабораторная установка?
3. Какие тензодатчики применяют в работе? Опишите их устройство.
4. Что называют тонкостенной осесимметричной оболочкой?
5. Что называют срединной поверхностью оболочки (сосуда)?
6. Как записывают уравнение Лапласа?
7. Какое соотношение существует между меридиональным и окружным напряжениями в цилиндрической тонкостенной оболочке?
8. Что означают символы: $\sigma_t, \sigma_m, \rho_t, \rho_m, t, P$?
9. Как теоретически вычислить меридиональные и окружные напряжения в стенке цилиндрического сосуда?
10. Какова методика опытного определения этих напряжений?

Литература: [5] - §§ 64, 65; [7] - §§ 82.

3.5. Определение деформаций при прямом поперечном изгибе балки

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

Теоретическая часть работы: Прямым изгибом называют такой изгиб, при котором плоскость действия изгибающих нагрузок проходит через одну из главных осей инерции поперечного сечения балки. Изгиб называют поперечным, если в поперечных сечениях балки наряду с изгибающим моментом возникают и поперечные силы. При прямом изгибе ось балки и после деформации остается в плоскости внешних сил.

Деформации при изгибе характеризуются прогибом и углом поворота поперечных сечений. *Прогибом балки* Y называют перемещение центра тяжести ее поперечного сечения по направлению, перпендикулярному к оси балки. *Углом поворота сечения* θ называют угол, на который сечение поворачивается по отношению к своему первоначальному положению. В работе рассматривается балка, схема которой представлена на рис. 3.15.

В основе расчета малых деформаций лежит дифференциальное уравнение изогнутой оси балки:

$$EJ_x Y_z'' = M_x. \quad (3.31)$$

В данной работе для определения перемещений используется метод начальных параметров. Уравнения этого метода получены на основе уравнения (3.31). При нагружении балки только поперечными сосредоточенными силами прогиб Y_z и угол поворота θ_z в произвольном сечении балки, находящемся на расстоянии Z от выбранного на левой опоре начала координат, определяется по формулам:

$$EJ_x \theta_z = EJ_x \theta_0 + \sum F_i \frac{(Z - a_{Fi})^2}{2}; \quad (3.32)$$

$$EJ_x Y_z = EJ_x Y_0 + EJ_x \theta_0 Z + \sum F_i \frac{(Z - a_{Fi})^3}{6} \quad (3.33)$$

где a_{Fi} - расстояния от начала координат до сечений, в которых приложены сосредоточенные силы F ;

Y_0 и θ_0 - прогиб и угол поворота, соответственно, в сечении, где выбрано начало координат.

Начало координат выбрано в центре тяжести левого концевого поперечного сечения. Тогда начальный параметр – прогиб на левой опоре - $Y_0 = 0$. Вторым начальным параметром θ_0 определяют из уравнения (3.33): при условии $Z = l$ прогиб на правой опоре равен нулю.

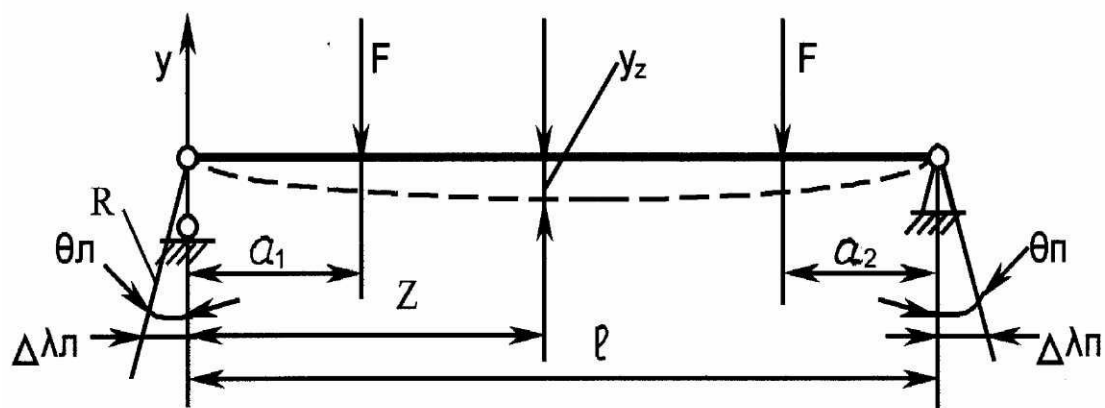


Рис. 3.15. Расчетная схема двухопорной балки

В уравнения (3.32) и (3.33) включают все внешние силы, в том числе и опорные реакции, расположенные между началом координат и сечением с абсциссой Z , в котором определяют перемещения, со знаком, соответствующим правилу знаков для внутреннего изгибающего момента.

Описание лабораторной установки. Лабораторная установка типа СМ 4А (рис. 3.16) представляет собой балку 5 прямоугольного поперечного сечения $b \times h$, опирающуюся на шарнирно-подвижную 4 и шарнирно-неподвижную 8 опоры, которые закреплены на основании 1. На опорах к балке жестко и перпендикулярно ей прикреплены рычаги 3 и 9, которые вместе с индикаторами 2 и 10 предназначены для измерения углов поворота опорных сечений, возникающих при приложении к балке через гиревые подвесы 6

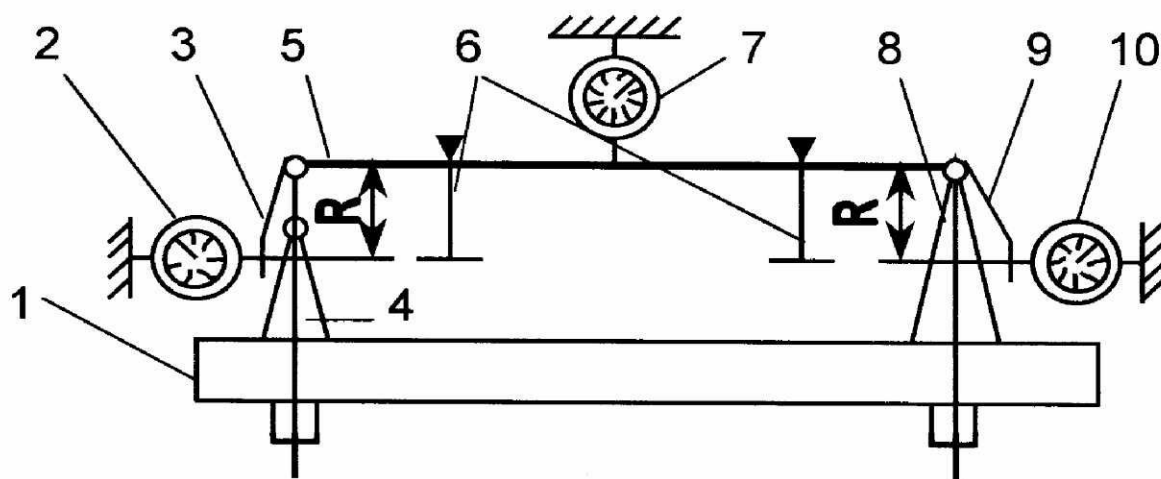


Рис. 3.16. Общий вид лабораторной установки типа СМ 4А

внешних нагрузок. Прогиб при этом измеряется индикатором 7. В работе применены индикаторы часового типа ИЧ-10 (рис. 3.17). Инди-

катор состоит из корпуса 9, внутри которого помещается шток 1, связанный системой зубчатых передач 3, 4, 5, 7 со стрелками 6 и 8.

Один оборот стрелки 6 соответствует линейному перемещению штока 1, равному 1 мм. Шкала 9 – поворотная, цена деления 0,01 мм. Количество полных оборотов стрелки 6 показывает стрелка 8. Для поддержания постоянного контакта штока 1 с элементом, перемещение которого определяется, служит пружина 2.

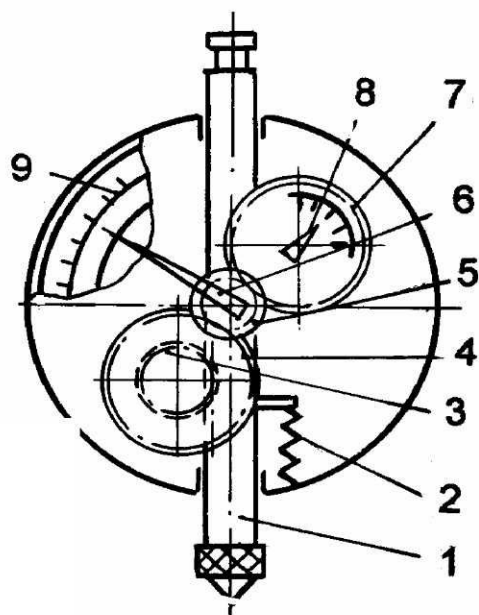


Рис. 3.17. Схема индикатора часового типа ИЧ-10

Угол поворота опорных сечений балки определяют по углу поворота рычагов 3 и 9 длиной R (рис. 3.16), пропорциональному линейному перемещению, по формуле:

$$\theta = \frac{\Delta\lambda}{R} \quad (3.34)$$

Методика проведения опыта и обработка результатов. 1. Задают исходные данные опыта: координаты приложения внешних нагрузок a_1 и a_2 , длину пролета l , степень нагружения ΔF . Штангенциркулем измеряют размеры поперечного сечения балки b и h с точностью 0,1 мм.

Устанавливают стрелки индикаторов 2, 7 и 10 на нуль, а исходные данные

вносят в журнал наблюдений.

2. Прикладывают к каждому гиревому подвесу 6 нагрузку ΔF , снимают отсчеты: по индикатору 7 – прогиб Y_Z^0 , по индикаторам 2 и 10 – перемещения λ_{II} и λ_{I} , пропорциональные углам поворота опорных сечений. Увеличивая нагрузку равными степенями ΔF , повторяют опыт 2–3 раза. Все данные опыта вносят в журнал наблюдений и после этого балку разгружают.

3. Согласно требованиям раздела 4 обрабатывают результаты измерений и определяют опытные значения прогиба Y_Z^0 путем прямого отсчета по индикатору 7, а также углов поворота опорных сечений балки θ_{II}^0 и θ_{I}^0 по формуле (3.34).

4. Используя формулы (3.32, 3.33), вычисляют теоретическое значение прогиба Y_Z^T в заданном сечении балки и углы поворота на левой θ_L^T и на правой θ_{II}^T опорах и сопоставляют с результатами, полученными опытным путем.

Содержание отчёта

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Расчётная схема лабораторной установки СМ 4А.
4. Исходные данные.
 - 4.1. Пролёт балки l .
 - 4.2. Удаление сил от опор a_1, a_2 .
 - 4.3. Высота поперечного сечения h .
 - 4.4. Ширина поперечного сечения b .
 - 4.5. Осевой момент инерции сечения J_X .
 - 4.6. Модуль упругости материала балки E .
 - 4.7. Жёсткость поперечного сечения балки EJ_X .
 - 4.8. Длина рычага R .
 - 4.9. Цена деления индикатора C .
5. Результаты эксперимента.

№ п/п	На- груз- ка F	При- раще- ние на- грузки ΔF	Прогиб		Угол поворота			
			От- счёт λ_y	При- раще- ние от- счета $\Delta\lambda_y$	Левой опоры		Правой опоры	
					От- счёт λ_L	При- ращени е- отсчета $\Delta\lambda_L$	От- счёт λ_{II}	Прира- щение отсчета $\Delta\lambda_{II}$
1								
2								
3								
4								
5								
Средние значения приращений		ΔF_{cp}		$\Delta\lambda_{уср}$		$\Delta\lambda_{Lcp}$		$\Delta\lambda_{IIcp}$

6. Обработка результатов эксперимента.
 - 6.1. Прогиб балки в середине пролёта Y^0 .

- 6.2. Углы поворота сечений на левой опоре $\theta_{Л}^0$ и на правой опоре $\theta_{П}^0$.
7. Расчёт деформаций по теоретическим формулам.
- 7.1. Прогиб балки в середине пролёта U^T .
- 7.2. Углы поворота сечений на левой опоре $\theta_{Л}^T$ и на правой опоре $\theta_{П}^T$.
8. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Опишите устройство лабораторной установки.
3. Каково устройство и принцип работы индикатора часового типа? Что им измеряют?
4. Какой изгиб называют плоским?
5. Какая ось называется центральной?
6. Что называется жесткостью сечения при изгибе?
7. Как увеличить жесткость сечения на изгиб при неизменной его площади?
8. Какими параметрами характеризуются деформации при изгибе?
9. Какая зависимость лежит в основе расчета малых угловых деформаций?
10. Из каких условий находят начальный параметр - θ_0 ?
11. Почему дифференциальное уравнение изогнутой оси балки является приближенным?
12. Почему индикатором линейных перемещений ИЧ – 10 удастся определить углы поворота опорных сечений балки?
13. Запишите уравнения метода начальных параметров для определения углов поворота и прогибов балки.
14. Где располагают начало координат при расчете перемещений при изгибе по методу начальных параметров?
15. Когда перед слагаемыми уравнения метода начальных параметров ставится знак (+), а когда (-)?
16. Если при расчете угол поворота сечения θ получится отрицательный, что это значит?
17. Если при расчете прогиб U получился отрицательный, что это значит?

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

3.6. Определение деформаций при косом изгибе балки

Ц е л ь р а б о т ы: определить опытным путем величину и направление прогиба свободного конца консоли при косом изгибе и сравнить полученные результаты с величинами, вычисленными теоретически.

Т е о р е т и ч е с к а я ч а с т ь р а б о т ы. 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. 3.18). При этом сила F раскладывается на две составляющие:

$$F_x = F \sin \alpha ; \quad F_y = F \cos \alpha . \quad (3.35)$$

Эти силы вызывают соответствующие прогибы свободного конца балки f_x и f_y , которые определяют по формулам:

$$f_x = \frac{Fl^3}{3EJ_y} \sin \alpha ; \quad f_y = \frac{Fl^3}{3EJ_x} \cos \alpha . \quad (3.36)$$

Результирующий прогиб f определяют геометрическим суммированием прогибов по формуле:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} . \quad (3.37)$$

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

Угол φ между направлением прогиба f и осью Y определяется также, как и угол β (угол наклона нулевой линии $n-n$ к оси X) из формулы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \beta = \frac{f_x}{f_y} = \frac{J_x}{J_y} \operatorname{tg} \alpha ; \quad \varphi = \beta . \quad (3.38)$$

Таким образом, перемещение центра тяжести любого поперечного сечения при косом изгибе происходит в плоскости, перпендикулярной к нулевой линии $n-n$ и не совпадающей с силовой плоскостью (рис. 3.18).

О п и с а н и е л а б о р а т о р н о й у с т а н о в к и. Установка состоит из основания 1 (рис. 3.19), в котором зашпелен одним концом стальной брус 2 прямоугольного поперечного сечения, повернутый так, что главная ось инерции Y образует с плоскостью действия

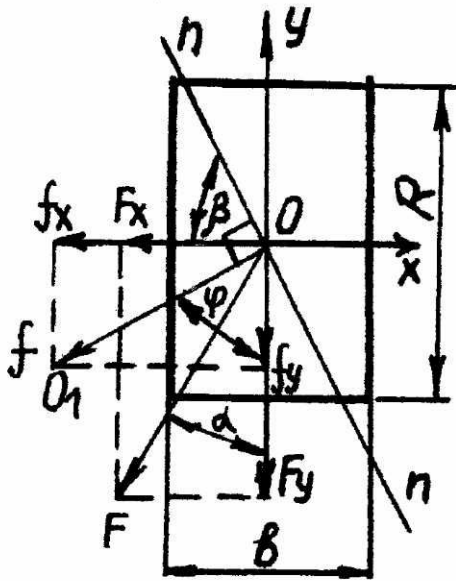


Рис. 3.18. Расчетная схема косоуго изгиба

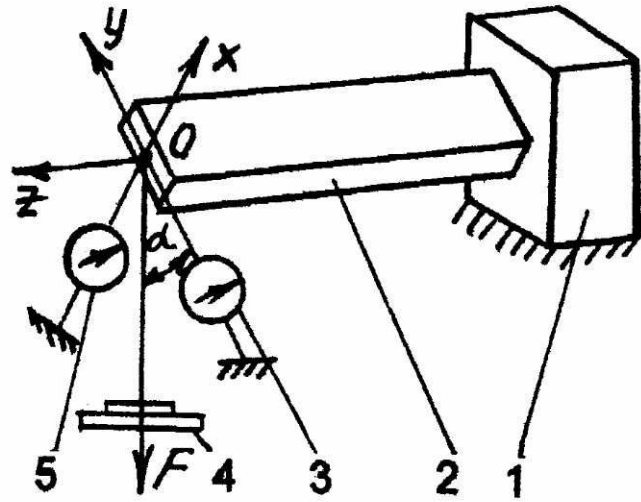


Рис. 3.19. Схема лабораторной установки

внешней нагрузки угол α . Конструкция защемления бруса позволяет произвольно менять угол α . Нагрузка прикладывается в центре тяжести свободного конца балки через гиревой подвес 4. Измерение перемещений в направлении главных осей инерции X и Y осуществляется, соответственно, индикаторами 3 и 5 часового типа ИЧ-10, устройство которых описано в работе 3.5.

Методика выполнения опыта и обработка результатов. 1. Штангенциркулем измеряют размеры поперечного сечения бруса b и h с точностью 0,1 мм, определяют угол наклона силовой плоскости α , расчетную длину балки l .

2. К грузовому подвесу 4 прикладывают начальную нагрузку $F_0 = 10 \div 20$ Н. Величину этой нагрузки и показания обоих индикаторов 4 и 5 принимают за исходные и записывают в таблицу опытных данных. Затем прикладывают ступень нагружения ΔF и фиксируют в таблице показания индикаторов 3 и 5. Опыт повторяют не менее трех раз. Обработав данные опыта, согласно требованиям раздела 4 и зная цену деления индикатора C , вычисляют опытные значения составляющих полного прогиба в направлении осей X и Y по формулам:

$$f_x^0 = C\Delta\lambda_x^{CP}; f_y^0 = C\Delta\lambda_y^{CP} \quad (3.39)$$

После этого по формуле (3.37) вычисляют опытное значение полного прогиба f^0 . Опытное значение угла наклона плоскости пол-

ного прогиба φ^0 рассчитывают по полученным выше значениям прогибов f_x^0 и f_y^0 по формуле:

$$\varphi^0 = \operatorname{arctg} \frac{f_x^0}{f_y^0}. \quad (3.40)$$

3. С учетом принятой величины ступени нагружения ΔF по формулам (3.36) вычисляют теоретические величины составляющих полного прогиба f_x^T и f_y^T , а по формуле (3.37) – полный прогиб f^T . Теоретическое значение угла наклона плоскости полного прогиба φ^T вычисляют по формуле (3.40). При этом обработку данных проводят в соответствии с требованиями раздела 4.

В заключение проводят сравнение теоретических и опытных значений.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Схема установки.
4. Исходные данные.
 - 4.1. Ширина поперечного сечения балки b .
 - 4.2. Высота поперечного сечения балки h .
 - 4.3. Длина балки l .
 - 4.4. Модуль упругости материала E .
 - 4.5. Осевые моменты инерции сечения J_x и J_y .
 - 4.6. Угол наклона силовой плоскости α .
 - 4.7. Цена деления индикатора C .
5. Результаты эксперимента.

№ п/п	Нагрузка F	Приращение нагрузки ΔF	Показания индикаторов		Приращения показаний индикаторов	
			λ_x	λ_y	$\Delta\lambda_x$	$\Delta\lambda_y$
Среднее значение приращений		ΔF_{CP}			$\Delta\lambda_x^{CP}$	$\Delta\lambda_y^{CP}$

6. Обработка результатов опыта.
 - 6.1. Прогиб в направлении главных осей инерции поперечного сечения f_x^0 и f_y^0 .

- 6.2. Полный прогиб f^0 .
- 6.3. Угол наклона плоскости прогиба к вертикальной оси φ^0 .
7. Теоретический расчет.
- 7.1. Значения внешних нагрузок в направлении главных осей инерции поперечного сечения F_x^T и F_y^T , приходящихся на ступень нагружения ΔF .
- 7.2. Прогибы в направлении главных осей инерции поперечного сечения f_x^T и f_y^T .
- 7.3. Полный прогиб f^T .
- 7.4. Угол наклона плоскости прогиба к вертикальной оси φ^T .
8. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Как устроена лабораторная установка?
3. Какой изгиб называют косым? Какие виды изгибов Вы еще знаете?
4. Что называют плоскостью изгиба? Силовой плоскостью?
5. Что называют нейтральной (нулевой) линией при косом изгибе балки и как она расположена относительно плоскости действия изгибающего момента (силовой плоскости)?
6. Как расположена линия полного прогиба по отношению к плоскости действия изгибающего момента? По отношению к нулевой линии сечения?
7. Как вычислить теоретически составляющие и суммарный прогиб конца консольной балки при косом изгибе?
8. Как будет изменяться суммарный прогиб конца консоли от действия постоянной нагрузки при увеличении угла α ? При его уменьшении?
9. Как определяют положение нулевой линии?
10. Как определяют угол между суммарным прогибом и силовой плоскостью?
11. Какие силовые факторы действуют в поперечных сечениях балки при косом изгибе?
12. Как определить суммарный прогиб опытным путем?

13. Как изменится соотношение величин прогибов, если прямоугольное сечение балки заменить круглым, квадратным?
14. Назовите формы поперечных сечений балок, для которых невозможен кривой изгиб.

Литература: [5] - §§ 34; [7] - §§ 75.

3.7. Определение момента в заземлении статически неопределимой балки

Цель работы: экспериментальное определение момента в заземлении статически неопределимой балки и сравнение его с моментом в заземлении, полученным теоретическим путем.

Теоретическая часть работы. Балки, для которых определение опорных реакций не может быть произведено лишь при помощи уравнений статического равновесия, называют статически неопределимыми. Кроме уравнений равновесия для раскрытия статической неопределимости составляют дополнительные уравнения – условия совместности перемещений.

На рис. 3.20 а, изображена статически неопределимая балка, для которой можно составить только два независимых уравнения статического равновесия:

$$\sum Y = 0; \quad \sum M_A = 0. \quad (3.41)$$

Число же опорных реакций три: M_3, R_A, R_B . Балка по условиям статического равновесия имеет одну “лишнюю” реактивную составляющую, т. е. один раз статически неопределима. Согласно цели работы принимают в качестве “лишней” реакции - M_3 .

Путем удаления внешних нагрузок F и “лишнего” момента M_3 заданная балка заменяется статически определимой геометрически неизменяемой балкой (рис. 3.20,б), которая называется *основной*. Затем составляют систему, эквивалентную заданной, путем нагружения основной системы внешними силами F и неизвестным моментом M_3 (рис. 3.20,в). Для обеспечения эквивалентности, используя принцип независимости действия сил, составляют условие совместности перемещений на левой опоре А:

$$\theta_A = \theta_A^F + \theta_A^{M_3} = 0. \quad (3.42)$$

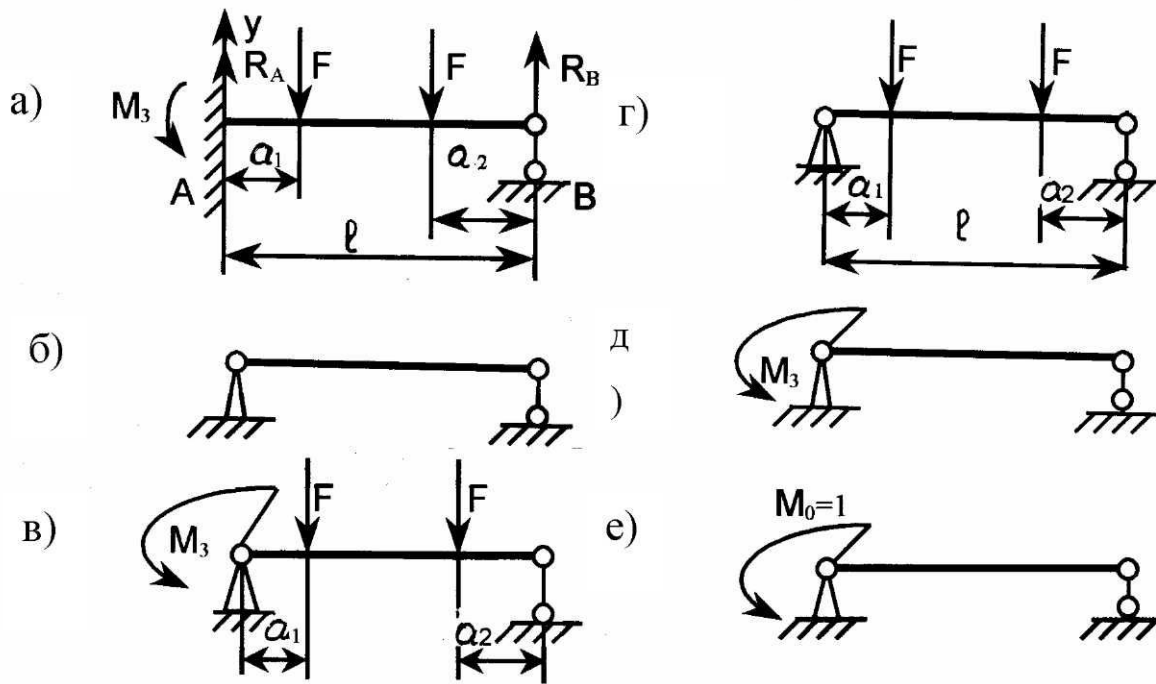


Рис. 3.20. Расчетные схемы для расуртия статической неопределимости балки

Геометрический смысл этого уравнения заключается в том, что суммарный угол поворота θ_A на левой опоре от приложенных сил θ_A^F и от неизвестного момента $\theta_A^{M_3}$ для заданной балки равен нулю, что соответствует схеме рис. 3.20, а. Такой метод определения “лишней” неизвестной называют *методом сравнения перемещений*.

Вычисление углов θ_A^F и $\theta_A^{M_3}$ производят способом Верещагина. Для вычисления θ_A^F используют расчетную схему балки, нагруженной только силами F , (рис. 3.20,г), а для $\theta_A^{M_3}$ - только моментом M_3 (рис. 3.20,д). Фиктивная балка, нагруженная единичным моментом $M_0=1$, расчетная схема которой представлена на рис. 3.20,е, является общей при вычислениях величин θ_A^F и $\theta_A^{M_3}$.

Описание лабораторной установки. Лабораторная установка типа СМ 11А (рис. 3.21) представляет собой балку 2 прямоугольного поперечного сечения, опирающуюся на две опоры: шарнирно-подвижную 1 и шарнирно-неподвижную 5, которые закреплены на основании 4. На опоре 5 к балке жестко прикреплены два рычага 6 и 9. Рычаг 6 вместе с индикатором 7 часового типа ИЧ-10

предназначен для измерения угла поворота балки, возникающего при приложении к ней через гиревые подвесы 3 внешней нагрузки. Описание индикатора ИЧ-10 дано в работе 3.5. Рычаг 9 с подвижным противовесом 8 предназначен для создания момента на опоре, имитирующего момент в защемлении M_3 , путем перемещения противовеса 8 до восстановления балкой ее исходного положения. При этом, зная плечо R и вес Q противовеса 8, опытное значение момента в защемлении определяют по формуле:

$$M_3^0 = Q \cdot R. \quad (3.43)$$

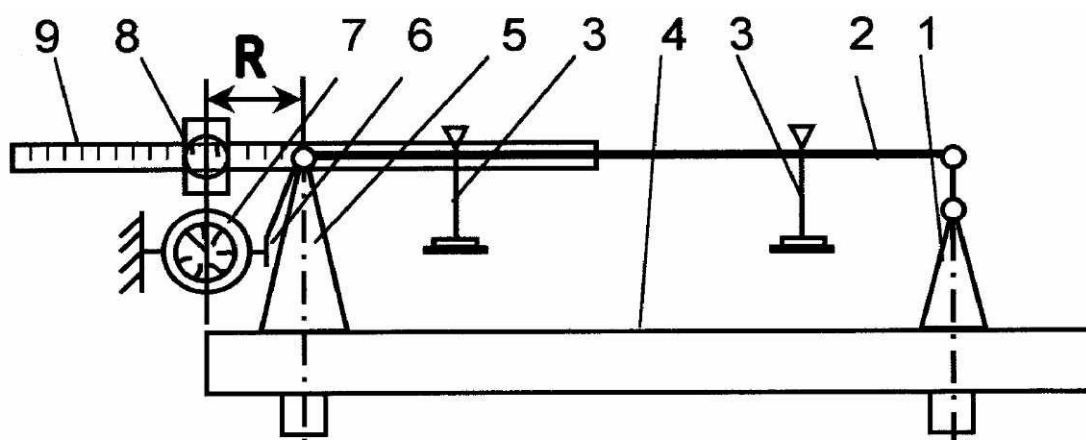


Рис. 3.21. Схема лабораторной установки типа СМ 11А

Методика проведения опыта и обработка результатов: 1. Задают исходные данные опыта: длину балки l , координаты приложения внешних нагрузок a_1 и a_2 , степень нагружения ΔF . Штангенциркулем измеряют размеры поперечного сечения b и h балки 2 с точностью 0,1 мм. Устанавливают противовес 8 у опоры балки, а стрелку индикатора 7 – на нуль. Исходные данные и отсчет по шкале рычага 9 записывают в журнал наблюдений.

2. Прикладывают к каждому гиревому подвесу 3 нагрузку ΔF и фиксируют показания индикатора 7. Затем перемещением противовеса 8 по рычагу 9 добиваются возвращения стрелки индикатора 7 к нулевой отметке и фиксируют длину уравнивающего плеча R рычага 9.

Увеличивая нагрузку равными ступенями ΔF , повторяют опыт два – три раза. Все данные заносят в журнал наблюдений и после этого балку разгружают.

Согласно требованиям раздела 4 обрабатывают результаты опыта и по формуле (3.43) определяют опытные значения момента в защемлении M_3^0 .

3. Используя способ Верещагина, определяют углы поворота сечения A балки от силы $\Delta F(\theta_A^F)$, от момента $M_3(\theta_A^{M_3})$, и по формуле (3.42) вычисляют теоретическое значение момента в защемлении M_3^T .

Проводят сравнение полученных результатов.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Измерительные приборы.
4. Расчетные схемы для раскрытия статической неопределимости балки.
5. Исходные данные.
 - 5.1. Пролет балки l .
 - 5.2. Удаление сил от опор a .
 - 5.3. Высота поперечного сечения балки h .
 - 5.4. Ширина поперечного сечения балки b .
 - 5.5. Вес противовеса на уравновешивающем рычаге G .
 - 5.6. Осевой момент инерции J_x .
 - 5.7. Модуль упругости E .
 - 5.7. Цена деления индикатора C .
6. Результаты наблюдений.

№ п/п	Нагрузка F	Приращение нагрузки ΔF	Показания индикатора λ	Данные по уравновешивающему рычагу	
				Отсчет плеча R	Приращение отсчета плеча ΔR
Средние значения показаний		ΔF_{CP}			ΔR_{CP}

7. Определение опытного значения момента в защемлении M_3^0 .
8. Теоретическое определение момента в защемлении M_3^T .
9. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Каково устройство лабораторной установки?
3. Какие балки называют статически неопределимыми?
4. Как определяют степень статической неопределимости балки?
5. В каком порядке производят расчет статически неопределимых балок?
6. Какими методами решаются статически неопределимые балки?
7. Что представляет собой метод сравнения перемещений, и почему его так называют? Каков его геометрический смысл?
8. Как вычисляют изгибающие моменты и поперечные силы в произвольном сечении статически неопределимой балки?
9. Как обеспечивается условие защемления балки в лабораторной установке?
10. Для чего применяют в лабораторной работе индикатор часового типа?
11. Как определяют опытным путем момент в защемлении статически неопределимой балки?
12. Как изменится величина неизвестного момента в защемлении, если балку повернуть на 90° вокруг продольной оси?
13. Что такое основная система?
14. Что такое эквивалентная система?
15. Как изменится величина неизвестного момента в защемлении, если увеличить (уменьшить) размеры поперечного сечения балки?

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

3.8. Проверка интеграла Мора на примере плоской статически неопределимой рамы

Ц е л ь р а б о т ы: Опытное определение величины горизонтального перемещения подвижной опоры статически определимой рамы и распорного усилия статически неопределимой рамы. Сравнение этих величин с данными, полученными по теоретическим формулам.

Т е о р е т и ч е с к а я ч а с т ь р а б о т ы. Интеграл Мора для определения перемещений в системах, работающих на изгиб, имеет вид:

$$\Delta \sum_{i=1}^n \int \frac{M_{X_F} M_{X_1}}{EJ_x} dZ \quad (3.44)$$

где M_{X_F} - закон изменения момента на участке длиной Z от внешних нагрузок;

M_{X_1} - закон изменения момента на этом же участке от единичного силового фактора, приложенного в сечении, в котором определяют перемещение.

При этом, если определяют линейное перемещение, то прикладывают $\bar{F} = 1$, если угловое - $m = 1$.

Наряду с использованием интеграла Мора, в конструкциях, состоящих из прямолинейных стержней с постоянной в пределах участка жесткостью, применяют графо-аналитический прием его решения – перемножение эпюр по способу Верещагина:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{\Omega_i \cdot M_{oi}}{EJ_x} \quad (3.45)$$

где Ω_i - площадь эпюры изгибающих моментов на участке длиной l от внешних нагрузок (площадь грузовой эпюры);

M_{oi} - ордината единичной эпюры, взятая на этом участке, напротив центра тяжести грузовой эпюры.

При раскрытии статической неопределимости рамы методом сил в качестве неизвестных принимают усилия, заменяющие действие отброшенных “лишних” связей. Для их определения составляют условия совместности перемещений – канонические уравнения метода сил. Для один раз статически неопределимой системы каноническое уравнение принимает вид:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1F} = 0 \quad (3.46)$$

где δ_{11} - перемещение точки приложения “лишнего” неизвестного X_1 по его направлению от единичного значения этого неизвестного;

Δ_{1F} - перемещение точки приложения “лишнего” неизвестного X_1 по его направлению от заданной нагрузки.

Расчетная схема статически неопределимой рамы представлена на рис. 3.21,а. На рис. 3.21,б,в показаны для выбранной в работе основной системы перемещения, отражающие геометрический смысл членов канонического уравнения (3.46): $\delta_{11} X_1$ и Δ_{1F} , соответственно.

Описание лабораторной установки. Лабораторная установка типа СМ 34 М (рис. 3.23) представляет собой порталную раму 1, выполненную из стальной полосы прямоугольного сечения и закрепленную при помощи шарнирно-неподвижной 2 и шар-

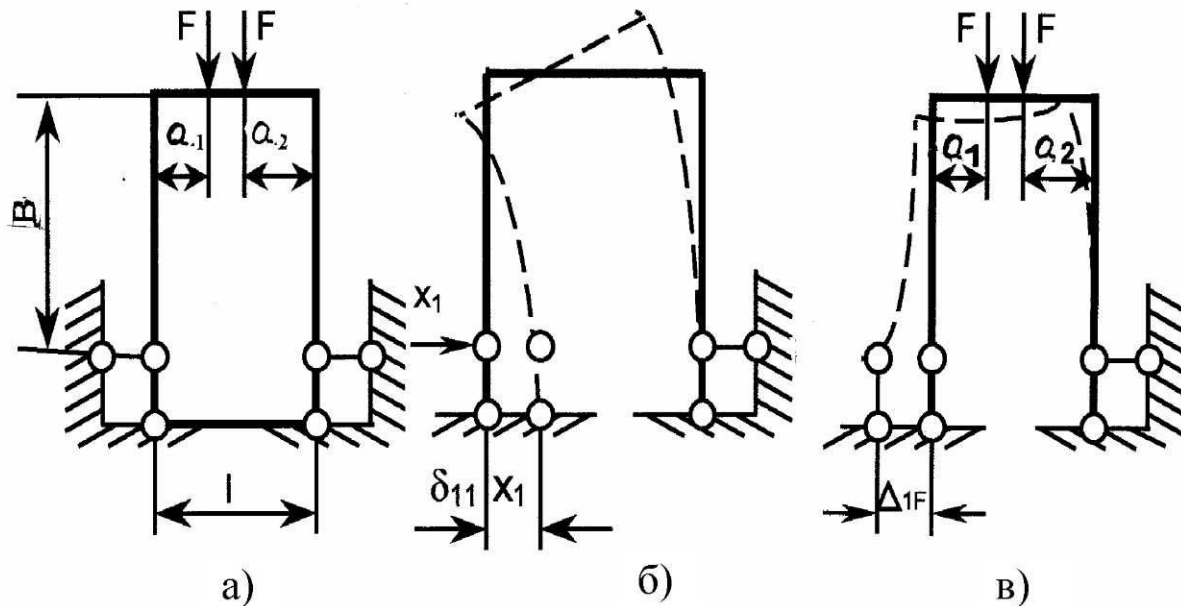


Рис. 3.22. Схемы нагружения и перемещений в порталной раме

нирно-подвижной 6 опор на станине 8. Для нагружения рамы 1 предусмотрены гиревые подвесы 4. Распорное усилие в опоре 6 определяют динамометром 5, а ее горизонтальное перемещение – индикатором 7 часового типа ИЧ-10, описание которого представлено в работе 3.5. Для фиксации динамометра 5 на станине 8 установлен кронштейн с резьбовым стопором 3.

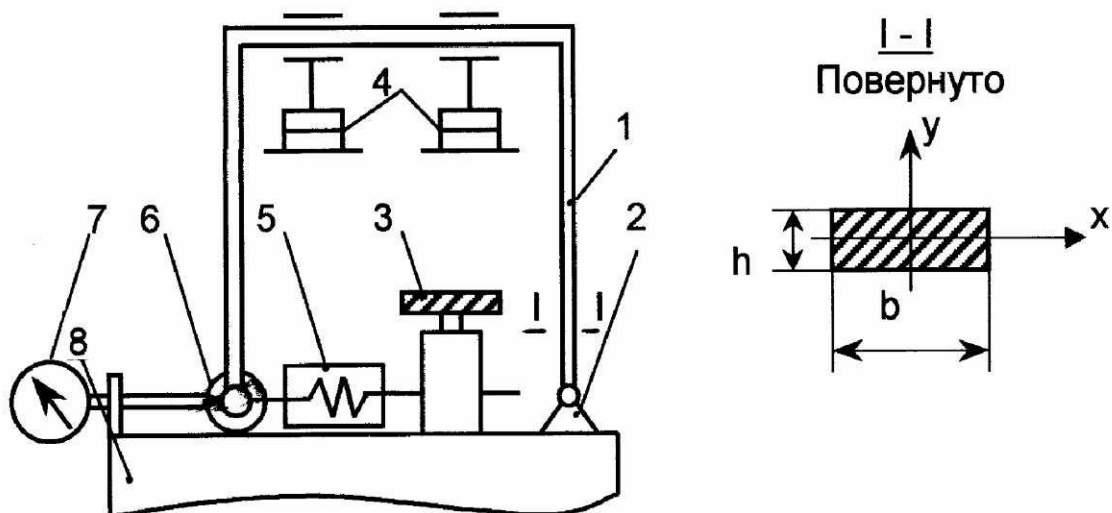


Рис. 3.23. Общий вид лабораторной установки СМ 34 М

Методика проведения опыта и обработка результатов: 1. Задают исходные данные опыта: координаты приложения внешних нагрузок a_1 и a_2 , штангенциркулем измеряют размеры поперечного сечения b, h рамы 1 с точностью 0,1 мм. Определяют степень нагружения из условия упругой деформации системы:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{X_{\max}}}{W_X} = \frac{F_{\max} a_i}{W_X} \leq \sigma_{\text{пл}}. \quad (3.47)$$

Максимальный изгибающий момент $M_{X_{\max}}$ определяют, построив эпюру изгибающего момента в основной системе, от заданных нагрузок согласно схеме (рис. 3.22, в). Тогда приняв число опытов m , величину степени нагружения принимают:

$$\Delta F \leq \frac{F_{\max}}{m}. \quad (3.48)$$

Исходные данные заносят в журнал наблюдений.

2. Устанавливают стрелку индикатора 7 на нуль. Прикладывают к каждому гиревому подвесу 4 нагрузку ΔF и записывают в журнал наблюдений показания индикатора. При помощи динамометра 5 возвращают опору 6 в начальное положение, т. е. раму нагружают динамометром до тех пор, пока стрелка индикатора 7 не вернется в исходное положение. Динамометр фиксируется стопором 3, а его показания также записываются в журнал наблюдений. Затем, увеличивая нагрузку равными ступенями ΔF , повторяют опыт не менее двух-трех раз. Все данные заносят в журнал наблюдений. Разгружают раму.

3. Согласно требованиям раздела 4 обрабатывают результаты опыта и определяют среднее значение приращений $\Delta \lambda_{\text{ср}}$ показаний индикатора 7, приходящихся на степень нагружения ΔF , а затем вычисляют опытное значение перемещения подвижной опоры статически определимой рамы (основной системы) по формуле:

$$\Delta_{1F}^0 = C \Delta \lambda, \quad (3.49)$$

где C – цена деления индикатора.

4. Опытное значение усилия распора X_1^0 (“лишнюю связь”) определяют непосредственно по приращениям ΔM показаний динамометра 5, т.е. $X_1^0 = \Delta H_{\text{ср}}$.

5. Загрузив согласно рис. 3.22, в раму нагрузками ΔF , строят грузовую эпюру $M_{\Delta F}$, а затем, приложив согласно рис. 3.22, б в направлении X_1 единичную силу $F = 1$, строят единичную эпюру M_{X_1} .

- 7.2. Распорное усилие статически неопределимой рамы X_1^0 .
8. Расчетные схемы для раскрытия статической неопределимости рамы.
9. Теоретическое определение величин.
 - 9.1. Горизонтальное перемещение подвижной опоры статически определимой рамы Δ_{1F}^T .
 - 9.2. Распорное усилие статически неопределимой рамы X_1^T .
10. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Как записывается выражение для определения перемещений по методу Мора?
3. В каком порядке производится определение перемещений по формуле Мора?
4. В чем достоинства и недостатки метода Мора?
5. В чем заключается способ Верещагина для вычисления интеграла Мора?
6. Какие системы называются статически неопределимыми?
7. Что называется степенью статической неопределимости и как она вычисляется?
8. В чем сущность “метода сил”?
9. Что такое основная система? Как она выбирается? Возможен ли в данной лабораторной работе другой вариант основной системы?
10. Как записывается система канонических уравнений метода сил? Чему равно число этих уравнений?
11. Каков геометрический смысл канонического уравнения метода сил?
12. Что означает коэффициент канонического уравнения δ_{11} ? Каков смысл произведения $\delta_{11}X_1$?
13. Что означает свободный член канонического уравнения Δ_{1F} ?
14. Как убедиться, что система работает в упругой области?
15. Как опытным путем определяют распор в раме?
16. Как опытным путем определяют горизонтальное перемещение шарнирно-подвижной опоры рамы?

17. Какие внутренние усилия возникают в сечениях горизонтального участка нагруженной рамы при свободном перемещении подвижной опоры? При ее закреплении?

Литература: [5] - §§ 39, 40, 43–46; [6] - § 9.1-9.3; [7] - §§ 62, 65.

3.9. Проверка теории изгибающего удара

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

Теоретическая часть работы. Явление удара возникает в том случае, когда скорость рассматриваемой части конструкции или соприкасающихся с ней тел изменяется в очень короткий период времени. При ударе груза F , падающего на балку с высоты H , балка прогнется. Изогнутая ось балки (эюра динамического прогиба) будет иметь вид, показанный на рис. 3.24,а. Изогнутая ось балки от статически приложенной силы F (эюра статических прогибов) – вид, изображенный на рис. 3.24,б.

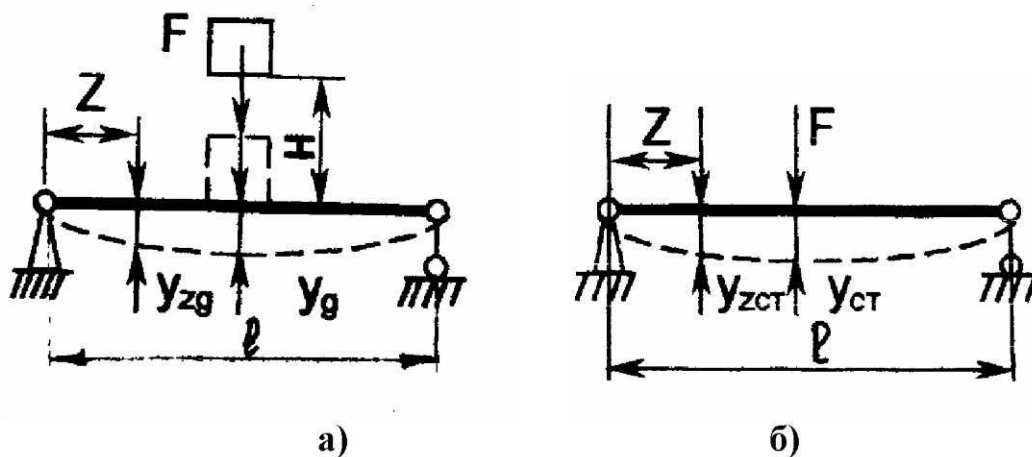


Рис. 3.24. Эюры динамического и статического прогибов

В основе приближенной теории удара, рассматриваемой в курсе сопротивления материалов, лежит гипотеза о том, что эюра перемещений системы от груза F при ударе (в любой момент времени) подобна эюре перемещений, возникающей от этого груза, но действующего статически. На основании указанной гипотезы и рис. 3.24,а для динамического коэффициента получают зависимость

$$K_D = \frac{Y_{ZD}}{Y_{ZCT}} = \frac{Y_D}{Y_{CT}}.$$

где Y_{ZD} (Y_{ZCT}) и Y_D (Y_{CT}) - динамический (статический) прогибы в продольном 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:

$$K_D = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{Y_{CT}}}. \quad (3.50)$$

Если высота падения груза H во много раз больше статического перемещения Y_{CT} , то в формуле (3.50) можно пренебречь единицами и принять:

$$K_D = \sqrt{\frac{2H}{Y_{CT}}}. \quad (3.51)$$

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

$$K_D = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{Y_{CT} \cdot (1 + \beta Q/F)}}. \quad (3.52)$$

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. 3.25).

Установка состоит из следующих основных частей: основания 1, на котором установлен исследуемый образец – балка 8 прямоугольного поперечного сечения, опирающаяся 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 (описание индикатора представлено в работе 3.5), штанги 9 с электромагнитом 11 и микрометрическим винтом 5 с ценой деления 0,01 мм, установленной по середине пролета балки 8; пульта управления 6. Электромагнит 11 предназначен для удержания падающего шарика 10 на требуемой

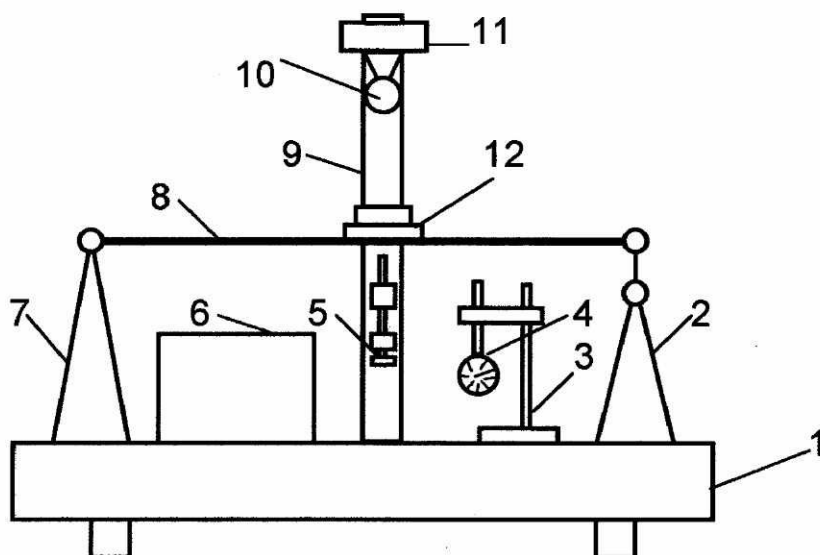


Рис. 3.25. Схема лабораторной установки типа СМ 21 М

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 измеряют прогиб балки Y_{CT} от груза массой 1 кг после его установки на ловитель 12. Затем индикатор 4 снимают и вычисляют

$$Y_{CT} = (F + \beta \cdot Q + Q_1) \cdot \bar{Y}_{CT}, \quad (3.53)$$

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_{Dmax} . 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. Согласно требованиям раздела 4 обрабатывают результаты опыта, по формуле (3.52) 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 $y_{ст}$.
 - 6.2. Определение динамического коэффициента $K_{д1}$.
 - 6.3. Определение динамического коэффициента $K_{д2}$, 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{Y}_{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_{D_1} , Y_{D_2} , Y_{D_3} .
- 7.4. Среднее значение прогиба для трех величин Y_D .
- 7.5. Динамический коэффициент $K_D = Y_{\Delta CP} / Y_{CT}$.
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.

3.10. Определение критической силы при продольном изгибе

Цель работы: изучение явления потери устойчивости при осевом сжатии прямого стержня и сравнение критической силы, определенной опытным путем и вычисленной по формуле Эйлера при различных способах закрепления стержня.

Теоретическая часть работы. Деформированное состояние стержня, представляющее собой равновесие между внешними и внутренними силами, может быть не только устойчивым, но и неустойчивым.

Если при любом возможном отклонении от состояния равновесия внутренние силы в деформированном стержне изменяются так, что он имеет стремление возвратиться к первоначальному прямолинейному состоянию и в итоге к нему возвращается, то упругое равновесие будет *устойчивым*.

Если стержень приобретает стремление продолжать деформироваться в направлении данного ему отклонения, то упругое равновесие будет *неустойчивым*.

Между устойчивым и неустойчивым состояниями равновесия стержня находится переходное критическое состояние, при котором стержень может сохранить первоначально приданную ему форму, но может и потерять ее от самой незначительной, казалось бы, причины. Такое равновесие называют *безразличным*.

Нагрузку, соответствующую критическому состоянию, называют *критической*.

Очевидно, что в деталях машин и сооружений ни в коем случае не должны допускаться нагрузки, равные или близкие к критическим, так как в случае потери устойчивости деформации растут, вследствие чего напряжения быстро увеличиваются и конструкция в конечном итоге разрушается.

Таким образом, критическая нагрузка при расчете на устойчивость аналогична разрушающей нагрузке при расчете на прочность.

Задача по определению критической нагрузки для случая шарнирно опертого стержня впервые была решена Л. Эйлером в виде:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{l^2}. \quad (3.54)$$

Для учета других способов закрепления концов стержня (см. рис. 3.26) в формулу (3.54) вводится коэффициент μ , называемый коэф-

коэффициентом приведения длины. Он учитывает способ закрепления концов стержня. В этом случае формула Эйлера принимает вид:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2}. \quad (3.55)$$

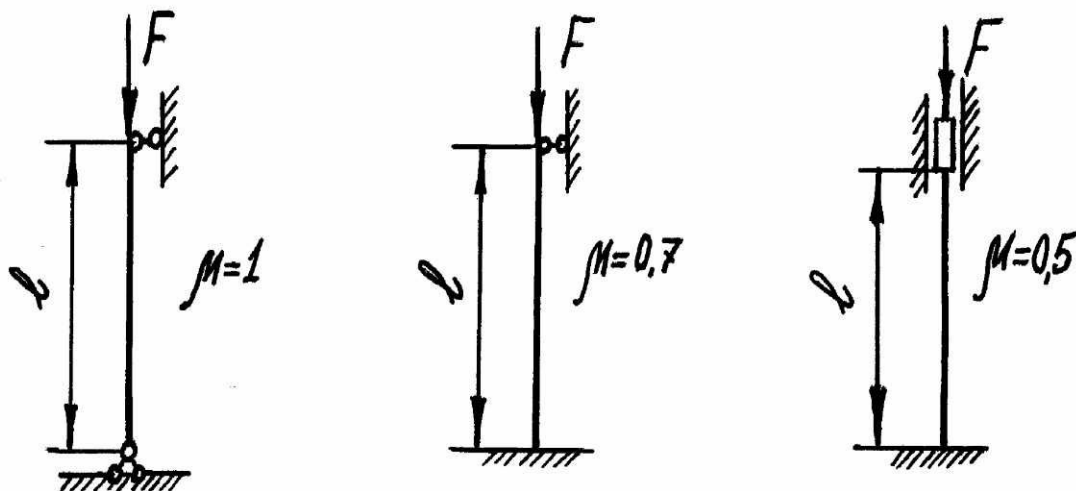


Рис. 3.26. Способы закрепления образцов и значения коэффициента приведения длины

Формула Эйлера применима в том случае, когда напряжения в стержне не превышают предела пропорциональности $\sigma_{пл}$ или когда гибкость стержня $\lambda = \mu l / i_{\min}$ (где $i_{\min} = \sqrt{J_{\min} / A}$ - минимальный радиус инерции) больше предельной гибкости, определяемой по формуле

$$\lambda_{пред} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{пл}}}. \quad (3.56)$$

Описание лабораторной установки и образцов. Испытания проводят на установке МИП-100 (рис. 3.27), на станине 1 которой смонтированы механизм деформирования и механизм силоизмерения. Механизм деформирования включает в себя двигатель 2, нагружающий винт 3 и каретку 4 с нагружающим верхним захватом 5. Ручной привод осуществляется вращением рукоятки 6 через цепную передачу. Механизм силоизмерения состоит из нижнего захвата 7, передаточного механизма рычажного типа 8, размещенного внутри станины 1, и циферблатного прибора 9.

Захваты 5 и 7 установки позволяют осуществлять шарнирное закрепление, а также защемление одного или обоих концов образца 10, при помощи винтов 11.

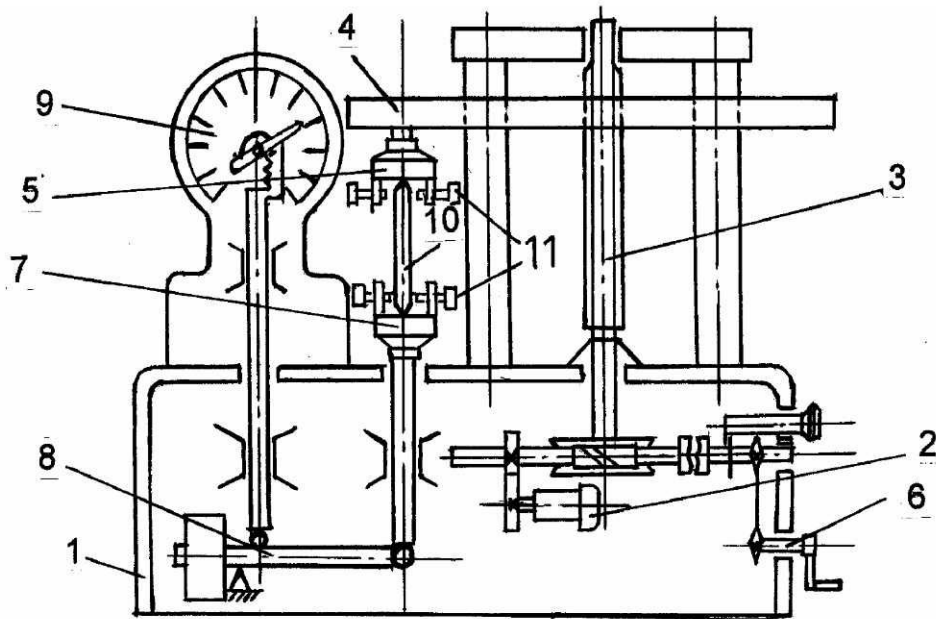


Рис. 3.27. Схема испытательной машины МПП - 100

Для испытаний применяют образцы, прямоугольного поперечного сечения, изготовленные из разных пород дерева.

Методика проведения опыта и обработка результатов. 1. Измеряют штангенциркулем размеры поперечного сечения образцов b, h с точностью 0,1 мм в трех сечениях по их длине и выбирают из них наименьшие, а также длину образцов линейкой с точностью 1 мм. Все данные заносят в журнал наблюдений.

2. Определяют для каждого образца модуль продольной упругости E ввиду того, что он для дерева зависит в каждом конкретном случае от ряда факторов (породы древесины, расположения волокон, влажности и др.) Определение модуля продольной упругости проводят на установке, показанной на рис. 3.28.

Установка имеет основание 1, на котором на расстоянии l закреплены две опоры 2. Испытуемый образец 3 устанавливают на опоры 2, закрепляют на нем посередине пролета $l/2$ грузовой подвес 5 и нагружают внешней нагрузкой F . По индикатору часового типа 4 определяют прогиб U посередине пролета, а затем образец разгружают.

Эту операцию повторяют еще два раза. Образец поворачивают вокруг продольной оси на 180° и проводят повторно цикл нагружений по выше описанной методике. Обработав согласно требованиям

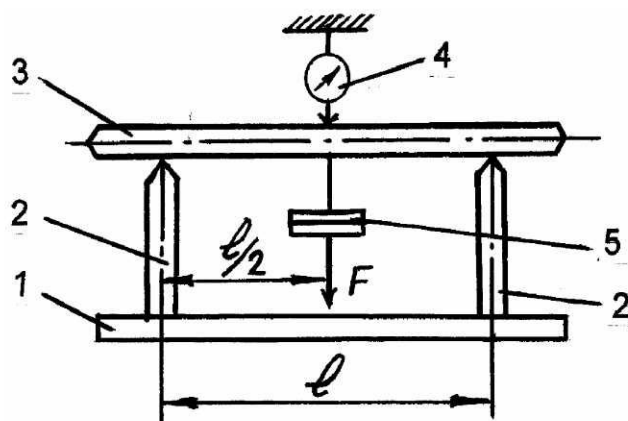


Рис. 3.28. Схема установки для определения модуля упругости материала образца

раздела 4 полученные шесть значений прогиба, и зная, что прогиб $Y = Fl^3 / 48EJ_{\min}$, определяют модуль продольной упругости для каждого образца:

$$E = \frac{Fl^3}{48J_{\min} Y}, \quad (3.57)$$

где $J_{\min} = \frac{b^3 h}{12}$ - минимальный осевой момент инерции поперечного сечения образца.

3. Устанавливают образец в захваты машины, обеспечивая тип закрепления образцов для каждого из них согласно задания и, вращая маховик 6, нагружают образец сжимающей силой F до момента потери образцом прямолинейной формы, при которой он большую нагрузку воспринимать не может. Эта нагрузка $F_{кр}^0$ - критическая. Для каждого образца опыт повторяют не менее трех раз и записывают результаты в журнал наблюдений.

4. По формуле (3.55) для каждого образца при заданном типе закрепления его концов вычисляют теоретические значения критической нагрузки $F_{кр}^T$.

5. Согласно требованиям раздела 4 проводят обработку опытных данных и сравнивают их с теоретическими.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.

3. Испытательная машина.
4. Схемы закрепления образцов.
5. Эскиз испытуемого образца.
6. Исходные данные.
 - 6.1. Ширина сечения b .
 - 6.2. Высота сечения h .
 - 6.3. Длина образца l .
 - 6.4. Минимальный осевой момент инерции сечения образцов J_{\min} .
 - 6.5. Цена деления индикатора часового типа C .
7. Схема установки для определения модуля продольной упругости E .
8. Результаты определения модуля продольной упругости образцов.

№ образцов	Нагрузка F	Показания индикатора λ	Среднее значение $\lambda_{\text{ср}}$	Среднее значение прогиба V	Модуль упругости E

- 8.1. Прогиб образца: $V = C \lambda_{\text{ср}}$.
- 8.2. Вычисление модуля продольной упругости E для материала образцов по формуле (3.57). Результаты вычислений внести в таблицу.
9. Теоретическое определение критической силы для трех образцов $F_{\text{кр}}^T$ по формуле (3.55).
10. Опытные значения критической силы для исследованных образцов $F_{\text{кр}}^0$.
11. Сравнение опытных и теоретических значений.

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. На какой машине выполняется работа?
3. Какие виды равновесия стержней Вы знаете?
4. Что называют критической силой?
5. Какой вид имеет формула Эйлера для определения величины критической силы?

6. Почему в формулу Эйлера входит минимальный момент инерции поперечного сечения стержня?
7. От чего зависит значение коэффициента приведения длины μ ?
8. Что такое гибкость стержня λ ? Как ее определяют?
9. Что называют предельной гибкостью?
10. Какова методика определения опытного значения критической силы?
11. Почему необходимо определять модуль продольной упругости материала образцов перед проведением испытаний?

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

4. ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ (краткие сведения)

4.1. Основные понятия и определения

Физической величиной называют свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта. При этом индивидуальность в количественном отношении следует понимать в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого.

Оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц определяет значение физической величины. Отвлеченное число, входящее в значение физической величины, называют *числовым значением*. За единицу физической величины принимают физическую величину, которой по определению присвоено числовое значение, равное 1. Значение физической величины находят путем измерения.

Любая физическая величина обладает истинным значением (для статических по своей природе величин это будет истинное среднее значение). *Истинным значением* физической величины называют значение, идеальным образом отражающее в качественном и количественном отношениях соответствующие свойства объекта.

Под *измерением* понимают нахождение значения физической величины экспериментальным путем при помощи специальных средств.

4.2. Виды измерений и погрешностей

Измерения могут быть как *прямыми*, когда искомую величину находят непосредственно из опытных данных, так и *косвенными*, когда искомую величину определяют на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными прямыми измерениями.

Значение величины, найденное измерением, называют *результатом* измерения.

Несовершенство измерительных приборов, органов чувств человека, а часто и природа самой измеряемой величины приводят к тому, что при любых измерениях результаты получают с определенной точностью, т.е. эксперимент дает не истинное значение измеряемой величины, а лишь ее приближенное значение. Под *действительным* значением физической величины понимают ее значение, найденное экспериментально и максимально приближающееся по своей величине к его истинному значению.

Точность измерения определяется близостью его значения к истинному значению измеряемой величины. Отсюда – *погрешность* измерения характеризуется отклонением результатов измерений от истинного значения измеряемой величины и подразделяется на следующие виды:

абсолютная погрешность – это алгебраическая разность между измеренным x_i и истинным U значениями измеряемой величины, выраженная в единицах измерения

$$\Delta x = x_i - U ; \quad (4.1.)$$

относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности Δx к истинному значению U искомой величины, выраженное обычно в процентах

$$\delta = \frac{\Delta x}{U} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{\Delta x}{U} \cdot 100\% ; \quad (4.2.)$$

приведенная относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности к максимально возможному значению измеряемой величины или к максимальному значению шкалы прибора:

$$\delta_{пр} = \frac{\Delta x}{U_{\max}} ; \quad (4.3.)$$

систематическая погрешность – это составляющая погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины.

По источнику происхождения систематические погрешности подразделяются на следующие виды:

а) *инструментальные погрешности* – вносятся средствами измерения, вследствие недостатков в их конструкции, в неточностях градуировки шкал, использование в опыте неточных гирь, неточная установка начального положения стрелки рычажного тензометра или индикатора часового типа и др.;

б) *установочные погрешности* – возникают из-за расположения средств измерения. Например, показания стрелочных весов чувстви-

тельны к отклонению от вертикали. Поэтому приборы высокой точности снабжаются уровнем;

в) *методические погрешности* – связаны с упрощением расчетной формулы для измеряемой величины или с ограниченной точностью физических констант, входящих в формулу. Например, если мы используем значение плотности железа $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$, которое является округленным значением более точного – $7,83 \text{ г/см}^3$, то при определении массы тела по плотности и его объему в результате войдет систематическая погрешность метода;

г) *погрешность вычислений* – возникает вследствие приближенных вычислений; при округлении результатов вычислений; замене элементарных функций, входящих в расчетную формулу, их приближенными значениями; при интерполяции данных;

д) *внешние погрешности* – возникают под влиянием внешних условий и среды (вибрация, тряска, магнитные и электрические помехи, влажность и давление воздуха, температура). Например, при изменении влажности изменяется модуль упругости дерева.

е) *личные или субъективные погрешности* – вносятся наблюдателем и связаны с чувствительностью его органов чувств, утомлением.

Способы устранения систематических погрешностей:

а) путем тщательной регулировки средств измерения и устранения внешних влияний с помощью термостатирования и т.д.;

б) путем расчета систематической погрешности и введения *поправки*, т.е. величины, численно равной абсолютной погрешности, взятой с обратным знаком. Поправку следует алгебраически добавить к неверному значению, чтобы исключить систематическую погрешность.

Следует помнить, что погрешность измерительного прибора равна обычно 0,5 наименьшего деления шкалы, поэтому не имеет смысла стараться на глаз оценивать десятые доли этого деления. Если же известен класс точности прибора, например, 1,5, то измеряемая величина λ равна $\lambda \pm 1,5\%$, и пытаться измерить ее с большей точностью бессмысленно. Для уменьшения погрешности измерений в этом случае следует взять прибор более высокого класса точности.

Для перевода систематической погрешности в случайную, необходимо измерение организовать так, чтобы постоянный фактор, влияющий на результат измерения, в каждом из измерений действовал по-разному. Этот способ называют *рандомизацией*. Например:

использовать для измерения одной и той же величины несколько одинаковых приборов.

Случайная погрешность – составляющая погрешности, которая изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. В отличие от систематических случайные погрешности исключить нельзя, т.к. их причины, в большинстве случаев, неизвестны. Их значения оценивают по законам теории ошибок, основанной на теории вероятностей.

Грубые погрешности (промахи) – это погрешности, существенно превышающие по модулю ожидаемую для данных измерений погрешность. Они возникают при неверной записи показаний, при неисправностях приборов и др. и должны быть исключены.

4.3. Операции с приближенными числами

При записи любого числа значащими цифрами являются 1, 2, ..., 9. Нуль является значащей цифрой если он стоит в середине или конце числа, и – не значащей, если он стоит в десятичной дроби с левой стороны и указывает лишь разряд остальных чисел (цифр).

Цифра верна, если абсолютная погрешность числа меньше одной единицы разряда этой цифры. Сомнительной называют цифру справа от верной, а все последующие за ней – неверные цифры, которые отбрасываются не только в результате, но и в исходных данных без округления числа. Например, в числе $A = 0,0070350$, ошибка которого равна $\Delta = \pm 0,0003$; цифра 7 – верная, 0 – сомнительная, обе они являются значащими цифрами, а остальные – незначащие. Тогда $A = (7,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-3}$.

Погрешность конечного результата – находят по выражениям, рассматриваемым ниже, а для результатов промежуточных вычислений пользуются следующими правилами вычислений с приближенными числами:

а) сложение и вычитание понимают как алгебраическое сложение (с учетом знаков). Слагаемые записывают как без множителя 10, так и с ним. В последнем случае показатель степени должен быть одинаков для всех слагаемых.

Разряд сомнительной цифры суммы при этом совпадает со старшим разрядом сомнительных цифр слагаемых. Например, сложить числа: $3,141 \cdot 10^4$; $2,6 \cdot 10^2$; $-1,26 \cdot 10^3$, последние цифры в которых сомнительные; получают: $(314,1 + 2,6 - 12,6) \cdot 10^2 = 304,1 \cdot 10^2$.

б) умножение и деление удобно выполнять, когда числа записаны с множителем 10. Результат содержит столько значащих цифр, сколько их в том исходном числе, которое содержит *наименьшее* их количество. Например, умножить числа 4311 и 0,056; получают: $4,31 \cdot 10^3 \cdot 5,6 \cdot 10^{-2} = 2,4 \cdot 10^2$; разделить 92 на 0,354; получают: $9,2 \cdot 10^1 / 3,54 \cdot 10^{-1} = 2,6 \cdot 10^2$.

в) возведение в степень является умножением одинаковых сомножителей. В результирующем числе количество значащих цифр оставляют такое же, как и в *основании* степени. Например, $(3,92 \cdot 10^2)^3 = 6,02 \cdot 10^6$. Извлечение корня из приближенного числа проводят до тех пор, пока не сравняется число значащих цифр в результате и в подкоренном выражении. Например, $\sqrt{4,25} = 2,06$.

г) при логарифмировании приближенного числа мантисса логарифма должна содержать то же количество значащих цифр, что и само число. Потенцирование, т.е. нахождение числа по его логарифму, подчиняется тем же правилам.

Основные правила округления чисел. При необходимости числа можно брать с различной точностью, т.е. оставлять в них различное количество десятичных знаков. Но при этом всегда полезно производить необходимые округления, чтобы не было впечатления о большей, чем это есть на самом деле, точности результата. Чтобы не допустить дополнительной погрешности при округлении, отбрасывают только неверные цифры.

При округлении отбрасывают все цифры, стоящие справа от разряда, до которого производится округление; последнюю оставшуюся цифру увеличивают на единицу, если отбрасываемая цифра равна или больше 5, или не изменяют, если эта цифра меньше 5. Если отбрасывают лишь цифру 5 (или за ней стоят нули), то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу, если она нечетная, и оставляют без изменения, если она четная.

Для уменьшения погрешности округления при выполнении всех операций вычислений необходимо в исходных данных, если это возможно, оставлять на одну единицу больше, чем это требуют правила округления.

В экспериментальных данных последняя цифра всегда *сомнительная*. В числах, взятых из таблиц, содержатся всегда только *верные* цифры, и их погрешности не превышают половины единицы разряда последней цифры. Отсюда, при вычислениях с использованием тех и других чисел можно не сохранять сомнительную цифру.

Абсолютную погрешность результата следует округлять до *одной* значащей цифры (или до двух, если первая из них меньше или равна 3) ($\pm 0,05$; $\pm 0,37$). Относительную погрешность принято округлять до *двух* значащих цифр ($0,12$; $2,8\%$).

Результат прямого или косвенного измерения принято округлять до числовых разрядов абсолютной погрешности измерения так, чтобы значения измеряемой величины и ее погрешности оканчивались одинаковыми десятичными разрядами. Например, неверная запись: $0,00526 \pm 0,000121$; $4003,314 \pm 50,82$; верная запись: $(5,26 \pm 0,12) \cdot 10^3$; $(4,00 \pm 0,05) \cdot 10^3$.

4.4. Числовые характеристики случайных величин

Как показано в теории ошибок, из полученных при измерении величины x в m опытах ряда значений x_1, x_2, \dots, x_m , наиболее близким к истинному значению U является *среднее арифметическое* значение

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \quad (4.4)$$

Отклонения случайной величины x от ее среднего значения \bar{x} рассматриваются как ошибки. Для их оценки используют понятие *среднего квадратичного отклонения* (СКО) случайной величины:

а) СКО отдельного измерения

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{(m-1)}}; \quad (4.5)$$

б) СКО среднего арифметического (результата измерения)

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{m(m-1)}} \quad (4.6)$$

Предельная ошибка Δ - это максимальное по абсолютной величине отклонений случайной величины x_i от ее среднего значения \bar{x} .

Доверительной вероятностью предельного отклонения называют вероятность $\eta(|x_i - \bar{x}| < \Delta)$, с которой ошибки отдельных измерений по абсолютной величине будут меньше предельной ошибки Δ .

При этом, как известно, вероятность случайного события находится в интервале $0 \leq \eta \leq 1$. Для экспериментальных задач в боль-

шинстве случаев, доверительная вероятность составляет $\eta=0,9 \div 0,95$ и большая надежность не требуется. Интервал $(\bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta)$, в котором с заданной вероятностью η находится истинное значение ν , называют доверительным интервалом.

В экспериментальных исследованиях, как и в настоящем лабораторном практикуме, нередко используют результаты ограниченного числа измерений (обычно 3-х или 4-х измерений), называемых *выборкой*.

Тогда предельную ошибку Δ определяют, используя корректный метод, основанный на распределении Стьюдента, по формуле

$$\Delta = t \cdot \bar{\sigma} / \sqrt{m}. \quad (4.7)$$

где t - параметр Стьюдента, определяемый при заданной вероятности η и числе опытов m по таблице П.2 приложения; $\bar{\sigma}$ - СКО отдельного измерения, вычисленное по формуле (4.5).

4.5. Вероятностный критерий грубых погрешностей (промахов)

Пусть имеется $(m+1)$ результатов наблюдений x_1, x_2, \dots, x_m , где значение x_{m+1} резко выделяется. Задача заключается в том, чтобы выяснить, является ли это измерение промахом или оно может быть объяснено статистическим разбросом.

Сначала вычисляют для результатов m (выделяющееся наблюдение x_{m+1} исключают) среднее арифметическое значение \bar{x} по формуле (4.4), СКО $\bar{\sigma}$ по формуле (4.5) и рассчитывают отклонение $(m+1)$ наблюдения

$$\Delta_{m+1} = |x_{m+1} - \bar{x}|. \quad (4.8)$$

Затем находят предельное отклонение m наблюдений

$$\Delta_{\max} = t_T \cdot \bar{\sigma}. \quad (4.9)$$

где t_T - параметр Стьюдента, взятый из таблицы П.3 приложения, для числа наблюдений m и заданной доверительной вероятности η .

Если $\Delta_{m+1} > \Delta_{\max}$, то с вероятностью η наблюдение x_{m+1} считают промахом и отбрасывают. Если имеется несколько выделяющихся наблюдений, то вычисляют \bar{x} и $\bar{\sigma}$ без них, а затем по каждому из них проводят оценку по изложенной выше схеме.

Пример 1: Результаты пяти наблюдений прогиба балки V_i , мм: 1,42; 1,63; 1,51; 1,68; 2,12. Проверить, является ли наблюдение

$Y_5 = 2,12$ мм промахом при доверительной вероятности $\eta = 0,90$.

Решение: а) по формулам (4.4) и (4.5) учитывая, что $(m+1) = 5$, вычисляют среднее арифметическое значение прогиба \bar{Y} и СКО $\bar{\sigma}$:

$$\bar{Y} = \frac{1}{4}(1,42+1,63+1,51+1,68) = 1,56 \text{ мм} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{(1,42-1,56)^2 + (1,63-1,56)^2 + (1,51-1,56)^2 + (1,68-1,56)^2}{4-1}} = 0,12 \text{ мм} = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

б) по таблице П.3 приложения для четырех наблюдений $m = 4$ при доверительной вероятности $\eta = 0,90$ находят параметр Стьюдента $t_T = 1,689$. Затем по формуле (4.8) вычисляют отклонение наблюдения $(m+1) = 5$, т.е. «выскакивающего» наблюдения $Y_5 = 2,12$ мм:

$$\Delta_{m+1} = |Y_{m+1} - \bar{Y}| = |2,12 - 1,56| = 0,56 \text{ мм} = 0,56 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

в) по формуле (4.9) находят величину предельного отклонения ($m = 4$) наблюдений:

$$\Delta_{\max} = t_T \cdot \bar{\sigma} = 1,689 \cdot 0,12 = 0,20 \text{ мм} = 0,20 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Т.к. $\Delta_{m+1} > \Delta_{\max}$, то наблюдение $Y_5 = 2,12$ мм = $2,12 \cdot 10^{-3}$ м является *промахом* и его отбрасывают.

4.6. Обработка результатов наблюдений для прямых измерений

Цель обработки – получить подходящее значение измеряемой величины и определить точность этой оценки, если результаты измерений равны x_1, x_2, \dots, x_m , а не исключенные систематические погрешности определяются систематическими погрешностями средств измерений.

Вычисляют: а) по формуле (4.4) среднее арифметическое значение

$$\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i.$$

Если среди результатов есть «выскакивающие», то выполняют проверку по критерию грубых погрешностей (см. раздел 4.5);

б) предел суммарной погрешности (предельную ошибку) при вероятности η по формуле

$$\Delta x = \sqrt{\frac{t^2 \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{m(m-1)}} + \Delta_C \quad (4.10)$$

где t - параметр Стьюдента, при вероятности η и числе опытов m ;

Δ_C - систематическая погрешность средств измерения.

Пример 2: Результаты наблюдений в лабораторной работе № 3.5 прогиба балки Y , мм: 1,42; 1,63; 1,51; 1,68; 2,12. Требуется определить прогиб балки Y^0 , полученный в опыте, и границы интервала, которые с вероятностью $\eta = 0,90$ накрывают суммарную погрешность измерений.

Систематическая погрешность Δ_C индикатора часового типа ИЧ-10, используемого при измерении прогиба, равна половине наименьшего деления шкалы, т.е.

$$\Delta_C = \pm 0,5(0,01) = \pm 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ мм} = \pm 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Решение: а) «выскакивающее» наблюдение $Y_5 = 2,12$ мм проверяют по критерию грубых ошибок и отбрасывают, т.к. оно является промахом (см. **Пример 1** в разделе 4.5.);

б) вычисляют по формуле (4.4) среднее арифметическое значение прогиба:

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i = \frac{1}{4} (1,42 + 1,63 + 1,51 + 1,68) = 1,56 \text{ мм} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

в) при числе опытов $m = 4$ и доверительной вероятности $\eta = 0,90$ по таблице П.2 приложения находят значение параметра Стьюдента $t = 2,35$;

г) по формуле (4.10) вычисляют предельную погрешность измерений

$$\Delta Y = \sqrt{2,35^2 \frac{(196 + 49 + 25 + 144) \cdot 10^{-4}}{4(4-1)} + (0,5 \cdot 10^{-2})^2} = 0,14 \text{ мм} = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

В итоге получают результат измерения прогиба балки:

$$Y^0 = \bar{Y} = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \Delta Y \text{ от } -0,14 \cdot 10^{-3} \text{ м до } 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \eta = 0,90.$$

При выполнении лабораторной работы сравнивают значение прогиба Y^0 , найденное в опыте, с величиной прогиба Y^T , вычисленного по теоретической формуле, и вычисляют относительную погрешность опыта по формуле:

$$\delta = \frac{Y^0 - Y^T}{Y^T} \cdot 100\%. \quad (4.11)$$

Полученные результаты анализируют и делают выводы, которые записывают в отчет по лабораторной работе.

4.7. Математическая обработка результатов наблюдений при косвенных измерениях

При косвенных измерениях основная задача – нахождение искомой величины Z , которая является функцией одного или нескольких аргументов: $Z = f(a, b, c, \dots)$. Непосредственно в опыте измеряются величины (a_1, a_2, \dots, a_m) , (b_1, b_2, \dots, b_m) , (c_1, c_2, \dots, c_m) . При наличии случайных погрешностей результаты измерений этих величин становятся случайными и Z при этом будет функцией случайных аргументов.

Цель обработки – определить подходящее значение искомой функции Z и интервал, в который с вероятностью η попадает суммарная погрешность измерений Δ .

Вычисляют по формуле (4.4) среднее арифметическое значение каждого аргумента

$$\bar{a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i; \quad \bar{b} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m b_i; \quad \bar{c} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_i; \dots \quad (4.12)$$

и среднее значение функции

$$\bar{Z} = f(\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \dots). \quad (4.13)$$

Существуют строгие методы оценки погрешности Δ искомой функции Z , которые целесообразно применять для ответственных измерений. В настоящей работе применяют приближенную оценку погрешности.

Оценка абсолютной погрешности ΔZ и относительной δ_Z погрешностей для различных частных случаев уравнений имеет вид:

$$Z = a \pm b; \quad \Delta Z = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}; \quad \delta_Z = \sqrt{(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} / \bar{a} \pm \bar{b}; \quad (4.14)$$

$$Z = ab; \quad \Delta Z = \sqrt{\bar{b}^2 (\Delta a)^2 + \bar{a}^2 (\Delta b)^2}; \quad \delta_Z = \sqrt{\delta_a^2 + \delta_b^2}; \quad (4.15)$$

$$Z = a/b; \quad \Delta Z = \sqrt{\frac{1}{\bar{b}^2} (\Delta a)^2 + \frac{1}{\bar{a}^2} (\Delta b)^2}; \quad \delta_Z = \sqrt{\delta_a^2 + \delta_b^2}; \quad (4.16)$$

$$Z = a^\alpha; \quad \Delta Z = \alpha \bar{a}^{\alpha-1} \Delta a; \quad \delta_Z = \alpha (\Delta a / \bar{a}); \quad (4.17)$$

$$Z = \sqrt[\beta]{a}; \quad \Delta Z = \left(\frac{1}{\beta}\right) \bar{a}^{\frac{1}{\beta}-1} \Delta a; \quad \delta_Z = \left(\frac{1}{\beta}\right) \frac{\Delta a}{\bar{a}}; \quad (4.18)$$

$$Z = \alpha^\alpha b^\beta c^\gamma; \quad \Delta Z = \bar{Z} \delta_Z; \quad \delta_Z = \sqrt{\alpha \delta_a^2 + \beta \delta_b^2 + \gamma \delta_c^2}. \quad (4.19)$$

где $\Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots$ - абсолютные предельные погрешности измерения величин a, b, c, \dots ; $\delta_a, \delta_b, \delta_c, \dots$ - относительные погрешности измерения этих же величин.

Когда число измерений величин a, b, c, \dots в опытах не велико (2 – 4 измерения), то погрешности аргументов ($\Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots$) вычисляют в соответствии с правилами обработки прямых измерений, изложенными в разделе 4.6. При этом значение доверительной вероятности η должно быть одним и тем же для всех аргументов.

Для *приближенной* оценки погрешности *косвенного* измерения при малом числе наблюдений допустимо применять для оценки точности измерений среднюю арифметическую погрешность, которую вычисляют по формуле:

$$\Delta Z = \frac{\Delta a + \Delta b + \Delta c + \dots}{k} \quad (4.20)$$

где $\Delta a, \Delta b, \Delta c, \dots$ - абсолютные предельные погрешности измерения величин a, b, c, \dots , вычисленные по методике, изложенной в разделе 4.6; k - число абсолютных погрешностей, определяемых в опыте.

Пример 3: При выполнении лабораторной работы 2.4 прямыми измерениями рычажным тензомером получены с учетом формулы (2.18) значения относительной поперечной ε' и относительной продольной ε деформаций, величины и погрешности которых, вычисленные при доверительной вероятности $\eta = 0,90$ составили соответственно $\varepsilon' = (3,5 \pm 0,02) \cdot 10^{-5}$ и $\varepsilon = (12 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$. Определить значение коэффициента Пуассона μ и суммарную погрешность изменения $\Delta \mu$.

Решение: а) находят значение коэффициента Пуассона с учетом формулы (2.17):

$$\bar{\mu} = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| = \frac{3,5 \cdot 10^{-5}}{12 \cdot 10^{-5}} = 0,29.$$

б) вычисляют суммарную погрешность измерения $\Delta \mu$ по формуле (4.16):

$$\Delta \mu = \sqrt{\frac{1}{(\bar{\varepsilon})^2} (\Delta \varepsilon')^2 + \frac{1}{(\varepsilon')^2} (\Delta \varepsilon)^2} = \sqrt{\frac{1}{(12 \cdot 10^{-5})^2} (0,02 \cdot 10^{-5})^2 + \frac{1}{(3,5 \cdot 10^{-5})^2} (0,06 \cdot 10^{-5})^2} = 1,7 \cdot 10^{-2}$$

Результаты измерения коэффициента Пуассона:

$$\mu = 0,29; \Delta\mu \text{ от } -0,017 \text{ до } 0,017; \eta = 0,90.$$

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., Гутиков В.П. Лабораторный практикум по курсу сопротивление материалов. Учебное пособие. – Кемерово: КузПИ, 1988. – 94 с.
9. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.- 624 с.
10. Кондрашов А. П., Шестопалов Е. В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. – М.: Атомиздат, 1977. – 200 с.
11. Зажигаев Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ
(справочное)

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 - Значения t - параметра Стьюдента

Число наблюдений ($m - 1$)	Вероятность событий, η					
	0,80	0,90	0,96	0,98	0,99	0,999
1	3,080	6,31	12,71	31,80	63,70	636,60
2	1,886	2,92	4,30	6,96	9,92	31,60
3	1,638	2,35	3,18	4,54	5,84	12,94
4	1,533	2,13	2,77	3,75	4,60	8,61
5	1,476	2,02	2,57	3,36	4,03	6,86
.

Таблица П. 3 - Значения t_T - параметра

Число наблюдений m	Вероятность событий, η					
	0,80	0,90	0,96	0,98	0,99	0,999
3	1,406	1,412	1,414	1,414	1,414	1,414
4	1,645	1,689	1,710	1,723	1,728	1,732
5	1,791	1,869	1,917	1,955	1,972	1,994
6	1,894	1,996	2,067	2,130	2,161	2,212
.

Таблица П.4. - 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.4.

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