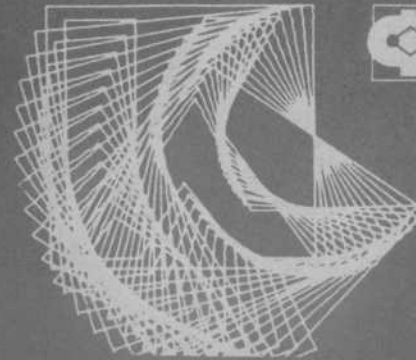


15 коп.



МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Н. Д. Соболев



ФАКУЛЬТЕТ
ТЕХНИЧЕСКОЙ
ФИЗИКИ

Лабораторный практикум
по курсу
„ОСНОВЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
И ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ“

Москва 1989

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Н.Д. Соболев

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по курсу
"ОСНОВЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
И ФИЗИКИ ПРОЧНОСТИ"

*Утверждено
редсоветом института
в качестве учебного пособия*

Москва 1989

С о б о л е в Н. Д. Лабораторный практикум по курсу "Основы сопротивления материалов и физики прочности". М.: МИФИ, 1989. – 36 с.

Пособие содержит описание пяти лабораторных работ, которому предшествует изложение основных подходов механики сплошной среды при рассмотрении напряженно-деформированного состояния, а по каждой работе приводятся в сжатой форме теоретические сведения и методические указания, необходимые для понимания их сути и содержания, и контрольные вопросы.

Пособие предназначено для студентов 2-го курса факультетов "Ф", "Т", "А", а также для ряда групп ВФ и СФФ.

Рецензенты:

В.В. Ткачев, А.А. Тутнов

© Московский
инженерно-физический
институт, 1989 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Задача курса "Основы сопротивления материалов и физики прочности" состоит в изучении основных закономерностей деформации и разрушения твердых тел, на базе которых строится наука о прочности материалов и конструкций с использованием как макроскопических подходов описания их поведения под действием внешних сил, так и современных физических представлений о механизме деформирования и процесса разрушения.

Для решения указанной задачи очевидным является необходимость анализа результатов соответствующих теоретических и экспериментальных исследований.

Поэтому при изучении курса предусматривается ознакомление с принципами инженерных методов расчета на прочность и жесткость, используя механику сплошной среды, и рассмотрение теоретических основ физики прочности (на лекциях и семинарах), а также выполнение лабораторных работ, посвященных знакомству с экспериментальными подходами оценки механических свойств материалов и напряженности конструкций.

Лабораторный практикум курса включает работы по определению механических характеристик конструкционных материалов в пластичном и хрупком состояниях при растяжении, сжатии и кручении, по проверке теоретических выводов для плоского изгиба с использованием метода тензометрии и при анализе потери устойчивости продольно сжатого стержня.

Перечисленные работы важны прежде всего для понимания инженерных аспектов прочности, подходов в оценке механических свойств и возможностей тех или иных упрощений, принимаемых в расчетных схемах.

ВВЕДЕНИЕ

Характеристика напряженно-деформированного состояния твердого тела

Прежде чем приступить к выполнению лабораторных работ, необходимо сформулировать основные подходы при изучении закономерностей деформирования и разрушения твердого тела, рассматриваемые с позиций сплошной среды.

При внешнем силовом нагружении в результате взаимодействия его частей возникают внутренние силы, которые определяются методом сечений. Последний рассмотрим на примере прямолинейного бруса постоянного поперечного сечения (плоского сечения, нормального к оси бруса). Пусть к такому брусу (рис. В.1,а) приложена система внешних сил, удовлетворяющая условиям равновесия. Внутренние силы, возникающие в брусе, выявляются, если мысленно рассечь брус на две части, например поперечным сечением А. Рассматривая одну из частей, необходимо заменить действие другой части внутренними силами, определяемыми из условий равновесия отсеченной части (правой или левой).

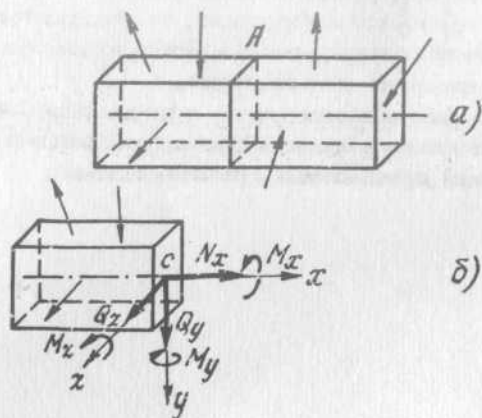


Рис. В.1

Так, внутренние усилия, возникающие в сечении левой части бруса (рис. В.1,б), отнесем к системе координат x, y, z с началом в центре тяжести сечения c . Причем ось x направим вдоль оси бруса от сечения. В общем случае система внутренних сил может быть представлена в виде совокупности трех сил N_x, Q_y, Q_z и трех моментов (пар сил) M_x, M_y, M_z . Сила N_x , называемая нормальной силой, связана с деформацией растяжения-сжатия бруса; наличие сил Q_y и Q_z , называемых поперечными силами, оп-

ределяется сдвигом одной части бруса относительно другой в разных плоскостях. Возникновение крутящего момента M_x связано с деформацией кручения. Изгибающие моменты M_y и M_z связаны с изгибом бруса в соответствующих плоскостях.

Внутренние силы распределяются тем или иным образом по поверхности сечения. Мерой интенсивности их действия в различных точках сечения являются напряжения. В окрестности такой точки K (рис. В.2,а) выделим элементарную площадку ΔF , в пределах которой выявлена внутренняя сила ΔP . За среднее напряжение на площадке ΔF принимается отношение $\Delta P/\Delta F = p_{cp}$. Уменьшая площадку ΔF и стягивая ее в точку K , в пределе получаем истинное полное напряжение $\lim_{\Delta F \rightarrow 0} \Delta P/\Delta F = p$. Целесообразно полное напряжение разложить на две составляющие: по нормали к плоскости сечения — нормальное напряжение σ и по плоскости сечения — касательное напряжение τ (рис. В.2,б).

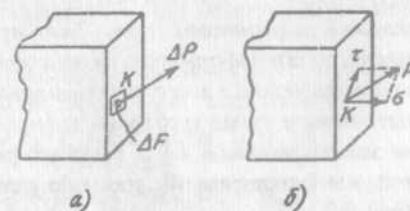


Рис. В.2

Если через точку K в теле провести другую секущую площадку, напряжение p в той же точке будет в общем случае другим. Напряженное состояние в точке, которое выражается через напряжения по граням элементарного прямоугольного параллелепипеда, выделенного вокруг точки K , характеризуется совокупностью напряжений для множества площадок, проходящих через точку.

На рис. В.3 показан такой параллелепипед в выбранной системе координат с указанием составляющих напряжений — нормальных напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и касательных напряжений $\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}$, направленных параллельно координатным осям.

При повороте системы координат, естественно, будут меняться составляющие напряжений. Есть такое положение параллелепипеда, при котором по граням его будут действовать только нормальные напряжения, называемые главными; грани (площадки), свободные от касательных напряжений, называются главными (рис. В.4). Обозначение главных напряжений — $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ принимается из условия, что $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Тело при внешнем нагружении и возникновении в нем напряжений деформируется, изменяется взаимное положение его точек. Фиксируя изменения каждого элементарного параллелепипеда после силового воздействия, можно

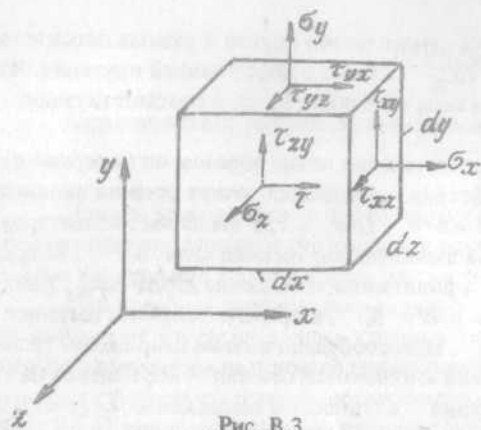


Рис. В.3

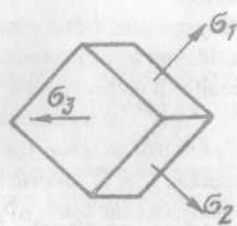


Рис. В.4

количественно охарактеризовать деформацию тела. Если пренебречь искривлением ребер параллелепипеда, то его деформацию можно описать изменением длин ребер и искажением прямых углов, т.е. его деформированное состояние характеризуется тремя линейными и тремя угловыми деформациями. Например, линейная деформация элемента объема ϵ_x при его растяжении в направлении оси x определяется как отношение абсолютного удлинения $\Delta(dx)$ к начальной длине dx (рис. В.5,а):

$$\epsilon_x = \frac{\Delta(dx)}{dx},$$

а угловая деформация в плоскости $x-y$ — как угол сдвига γ_{xy} (рис. В.5,б).

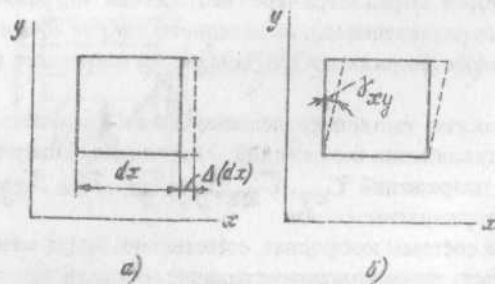


Рис. В.5

Тогда деформация элементарного параллелепипеда описывается девятью компонентами деформаций: линейными деформациями $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ и угловыми деформациями $\gamma_{xy}, \gamma_{yx}, \gamma_{xz}, \gamma_{zx}, \gamma_{yz}, \gamma_{zy}$.

Если два из трех главных напряжений равны нулю, то напряженное состояние называется одноосным. Пусть вдоль оси x действует главное напряжение σ_x , и тогда линейная деформация в упругой области нагружения (действует закон Гука)

$$\epsilon_x = \sigma_x / E,$$

где E — модуль упругости первого рода (модуль Юнга). В этом случае поперечная деформация

$$\epsilon_y = -\mu \epsilon_x,$$

где μ — коэффициент Пуассона, равный $0,25 \div 0,35$.

Если по граням элемента объема действуют только касательные напряжения τ_{xy} и τ_{yx} ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$), то такое напряженное состояние называется чистым сдвигом и закон Гука записывается в следующей форме:

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} / G,$$

где γ_{xy} — угол сдвига; G — модуль упругости второго рода (модуль сдвига).

В случае трехосного напряженного состояния (все три главных напряжения не равны нулю) закон Гука выражается так:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu (\sigma_2 + \sigma_3)],$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu (\sigma_3 + \sigma_1)],$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu (\sigma_1 + \sigma_2)],$$

где $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ — линейные деформации по главным направлениям.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается метод сечений? Как определяются внутренние силы?
2. Что является мерой интенсивности действия внутренних сил? Дайте характеристику полных, нормальных и касательных напряжений.
3. Чем характеризуется напряженное состояние в точке деформируемого тела?
4. Как определяются линейные и угловые деформации?
5. Чем характеризуется деформированное состояние в точке тела?
6. Как записывается закон Гука для одноосного напряженного состояния, чистого сдвига и трехосного напряженного состояния?

Работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Испытания на растяжение проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-73. При нагружении образца цилиндрической формы растягиваю-

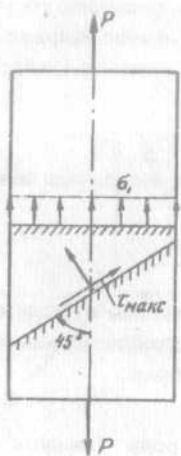


Рис. 1.1

щей силой (рис. 1.1) в поперечных сечениях, удаленных от места приложенных внешних сил, возникают равномерно распределенные наибольшие растягивающие напряжения

σ_1 , а в сечениях, параллельных оси растяжения, отсутствуют какие-либо напряжения ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), т.е. реализуется так называемое одноосное растяжение. В этом случае в площадках, наклоненных к оси растяжения под углом 45° (наряду с растягивающими напряжениями), возникают наибольшие касательные напряжения $\tau_{\max} = \sigma_1/2$. Осевое удлинение образца сопровождается уменьшением поперечных размеров.

В настоящей работе проводятся испытания малоуглеродистой стали и серого чугуна.

1.1. Форма и размеры образцов, испытательная машина

При испытании малоуглеродистой стали используется образец, показанный на рис. 1.2,а. Образец имеет цилиндрическую форму с головками на концах для закрепления его в захватах машины. На рис. 1.2,б показаны форма и размеры образца, используемого при испытании серого чугуна; в нем имеется переходный цилиндрический участок между участком наименьшего диаметра и головкой. Естественно, что при растяжении практически деформируется часть образца с наименьшим диаметром и длина этой части принимается за расчетную длину l_0 .

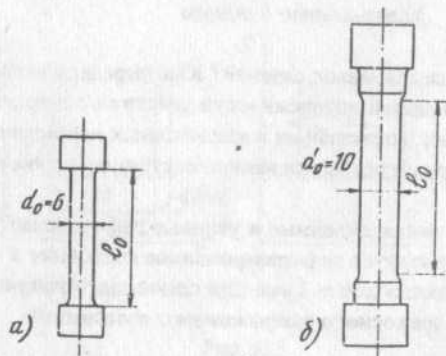


Рис. 1.2

Испытания проводятся на машине Р-5, позволяющей развивать максимальную растягивающую нагрузку 5 т. В процессе нагружения образца автоматически регистрируется диаграмма растяжения в координатах растягивающая сила Р — абсолютное удлинение образца Δl .

Принципиальная схема машины показана на рис. 1.3. Образец 6 закрепляется в захватах 5. При растяжении образца нижний захват перемещается вниз с помощью нагружающей системы 7, состоящей из совокупности передач и электродвигателя. Верхний захват связан с силоизмерительной системой 4. Диаграммная бумага 1 закрепляется с помощью перфорации на барабане 2. Этот барабан получает вращение через передачу, соединенную с нагружающей системой 7; число оборотов барабана будет пропорционально перемещению нижнего захвата, а следовательно, практически деформации образца. Перо 3 силоизмерительной системы, перемещаясь вдоль образующей барабана, регистрирует развиваемое усилие. Таким образом автоматически записывается диаграмма растяжения.

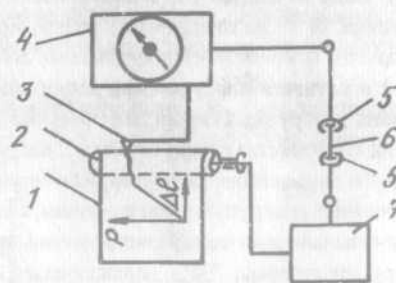


Рис. 1.3

1.2. Указания по испытанию стального образца

1.2.1. Диаграмма растяжения, характер деформации и разрушения

На рис. 1.4,а показана диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали.

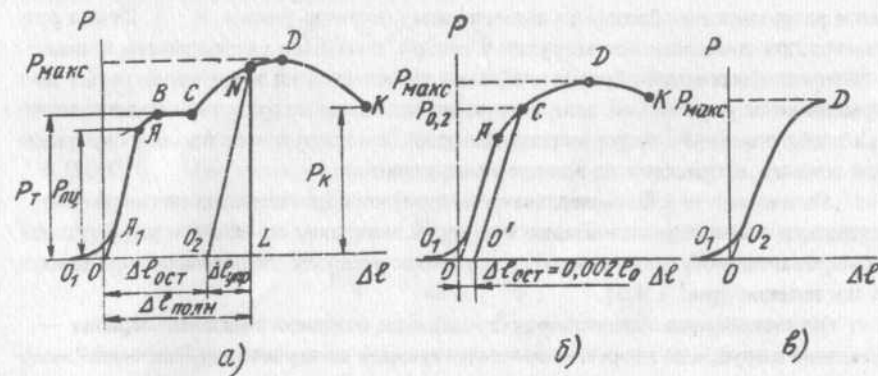


Рис. 1.4

Начальный криволинейный участок диаграммы $O_1 A_1$ не отражает действительную картину деформации образца в силу наличия зазоров и контактного деформирования в местах сочленения элементов цепи нагружения. Прямой линейный отрезок диаграммы $A_1 A$ соответствует упругой (обратимой) деформации по закону Гука. В связи с этим отрезок $O_1 A_1$ исключается из рассмотрения и за начало координат следует считать точку O , как точку пересечения продолжения прямой $A_1 A$ с осью абсцисс.

При дальнейшем нагружении наблюдается отклонение от закона Гука, наряду с упругими появляются пластические (остаточные) деформации, что на диаграмме отражается криволинейным участком $ABCDK$ до момента разрушения образца (точка K). Если на стадии упругопластического деформирования в какой-то момент (точка N на диаграмме) разгрузить образец, то снимается по закону Гука упругая (обратимая) деформация $\Delta \ell_{упр}$ (прямая NO_2 параллельна линии AO) и остается пластическая деформация $\Delta \ell_{ост}$. Естественно, что в момент начала разгрузки полная деформация $\Delta \ell_{полн} = \Delta \ell_{упр} + \Delta \ell_{ост}$. При повторном нагружении соответствующий отрезок диаграммы практически совпадает с прямой $O_2 N$ и дальнейшее деформирование происходит так, как если бы не было промежуточной разгрузки и нагружения.

На начальном этапе пластического деформирования при испытании малоуглеродистой стали отрезок диаграммы BC практически параллелен оси $\Delta \ell$, т.е. деформация растет без увеличения нагрузки; этот отрезок диаграммы называют площадкой текучести. В дальнейшем увеличение деформации происходит при возрастающей нагрузке до ее наибольшего значения, соответствующего точке D . Этот процесс называется деформационным упрочнением. До достижения максимальной нагрузки (точка D диаграммы) деформация распределяется равномерно по рабочей (расчетной) длине образца, а затем наблюдается ее локализация в форме шейки, развитие которой заканчивается разрушением образца по наименьшему сечению (точка K). Шейка развивается при снижающейся нагрузке в связи с заметным уменьшением площади поперечного сечения образца в области шейки (хотя и здесь проявляется деформационное упрочнение, если учесть, что истинные напряжения, подсчитанные для каждого момента деформирования делением нагрузки на площадь наименьшего сечения, возрастают до момента разрушения).

Отметим, что у большинства конструктивных металлов на диаграмме растяжения отсутствует площадка текучести, и переход из области упругого деформирования в область развитых упругопластических деформаций происходит постепенно (рис. 1.4б).

Излом образца имеет характерный вид: на одной половине образца — усеченный конус, а на второй — соответствующая этому конусу "чашечка". Здесь оказывают влияние как небольшие растягивающие, так и небольшие касательные напряжения (рис. 1.5). Превалирующая роль последних сказывается в образовании конической поверхности разрушения на последнем его этапе.

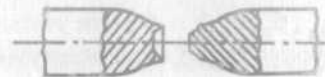


Рис. 1.5

1.2.2. Определение механических свойств

По результатам испытания определяются характеристики прочности и характеристики пластичности.

К числу характеристик прочности, определяемых в настоящей работе, относятся предел пропорциональности, предел текучести, временное сопротивление и истинное сопротивление разрыву. Эти величины оценивают сопротивление материала деформированию на различных этапах нагружения и сопротивление разрушению.

Предел пропорциональности $\sigma_{пз}$ — наибольшее напряжение, до которого соблюдается закон Гука, приближенно определяется по формуле

$$\sigma_{пз} = P_{пз} / F_0,$$

где $P_{пз}$ — нагрузка, соответствующая точке A на диаграмме растяжения (рис. 1.4а); F_0 — начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца.

Предел текучести (физический) σ_T — напряжение, соответствующее площадке текучести, определяется по формуле

$$\sigma_T = P_T / F_0,$$

где P_T — наименьшая нагрузка на отрезке BC диаграммы растяжения.

Если на диаграмме растяжения отсутствует площадка текучести, то определяется условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ — напряжение, при котором остаточная деформация составляет 0,2%:

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2} / F_0,$$

где $P_{0,2}$ — нагрузка, соответствующая точке C диаграммы (рис. 1.4б); положение этой точки находится проведением прямой $O'C$, параллельной прямой упругого деформирования OA , из конца отрезка OO' , равного $\Delta \ell_{ост} = 0,002 \ell_0$ (по закону промежуточной упругой разгрузки).

Временное сопротивление (предел прочности) σ_b — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке $P_{макс}$ (точка D на диаграмме), определяется по формуле

$$\sigma_b = P_{макс} / F_0.$$

Истинное сопротивление разрыву σ_K — истинное напряжение при разрыве образца определяется по формуле

$$\sigma_K = P_K / F_K,$$

где P_K — нагрузка в момент разрушения, соответствующая точке K на диаграмме; F_K — площадь поперечного сечения образца в месте разрыва. 11

Укажем, что при подсчете $\sigma_{пл}$, $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ и σ_B не учитывалось уменьшение площади поперечного сечения образца в силу его незначительности на соответствующих этапах нагружения.

Деформационная способность материала оценивается определением характеристик пластичности — относительного удлинения и относительного сужения образца при разрыве.

Относительное удлинение δ подсчитывают по формуле

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% ,$$

где l_k — длина рабочей части образца после разрыва.

Относительное сужение ψ подсчитывается по формуле

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% .$$

1.2.3. Порядок проведения испытаний и обработка экспериментальных данных

До испытания с помощью штангенциркуля измеряется диаметр d_0 и длина расчетной части l_0 образца. В лабораторном журнале отражаются необходимые данные.

Образец закрепляется в захватах испытательной машины, подвергается растяжению и автоматически регистрируется машинная диаграмма растяжения. Во время испытания анализируется характер диаграммы и ведется наблюдение за образованием и развитием шейки в образце.

После разрушения обе части образца извлекаются из машины, складываются по месту разрыва и зажимаются в струбине для замера длины l_k и диаметра d_k в месте разрыва. Анализируется вид излома и фиксируются в журнале соответствующие данные.

Далее обрабатывается машинная диаграмма. Отмечается начало координат O и характерные точки A, B, C, D, K ; с учетом масштаба диаграммы в журнале фиксируются координаты этих точек, а затем по этим точкам в выбранном масштабе строится диаграмма растяжения в журнале.

По ранее приведенным формулам подсчитываются характеристики прочности и пластичности.

1.3. Указания по испытанию чугунного образца

1.3.1. Диаграмма растяжения, характер деформации и разрушения

Машинная диаграмма растяжения образца из серого чугуна в координатах $P - \Delta l$ показана на рис. 1.4, в. Серый чугун является хрупким материалом, он разрушается практически без пластических деформаций. Для таких матери-

алов характерно отклонение от закона Гука уже на ранних стадиях нагружения, что видно из диаграммы. Разрушение происходит по поперечному сечению образца, где действуют наибольшие растягивающие напряжения.

1.3.2. Определение механических свойств

При испытании хрупких и малопластичных материалов определяется одна характеристика — предел прочности σ_B , как характеристика сопротивления разрушению:

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0 .$$

1.3.3. Порядок проведения испытаний и обработка экспериментальных данных

Порядок испытания и обработка опытных данных принимаются такими же, что и при испытании стального образца, с определением σ_B и анализом характера разрушения.

Контрольные вопросы

1. Опишите напряженно-деформированное состояние при одноосном растяжении.
2. Каков вид диаграммы растяжения малоуглеродистой стали? Дать определение упругой и пластической деформаций.
3. Как деформируется и разрушается образец из малоуглеродистой стали при растяжении?
4. Что такое предел пропорциональности и как он определяется?
5. Что такое физический и условный пределы текучести и как они определяются?
6. Что такое временное сопротивление (предел прочности) и как оно определяется?
7. Как определяется относительное удлинение и относительное сужение образца после разрыва?
8. Какие величины относятся к характеристикам прочности и какие к характеристикам пластичности?
9. Каков вид диаграммы растяжения серого чугуна?
10. Как разрушается образец из серого чугуна и какая механическая характеристика определяется в этом случае?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СЖАТИЕ

Испытания на сжатие с определением стандартных механических характеристик проводятся в соответствии с ГОСТ 25.503-80.

При нагружении цилиндрического или призматического образца сжимающей силой (рис. 2.1) в поперечных сечениях, достаточно удаленных от мест контакта образца с нагружающими плитами, возникают равномерно распределенные наибольшие сжимающие напряжения σ_3 , а в сечениях, параллельных оси сжатия, отсутствуют какие-либо напряжения ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$), т.е. реализуется так называемое одноосное сжатие. При этом в площадках, наклоненных к оси сжатия под углом 45° (наряду со сжимающими напряжениями), появляются наибольшие касательные напряжения $\tau_{\max} = \sigma_3/2$ (рис. 2.1). Осевое укорочение образца сопровождается увеличением поперечных размеров.

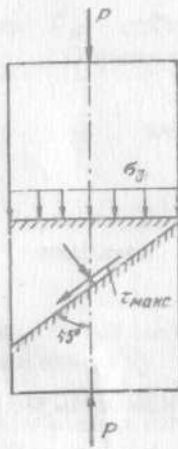


Рис. 2.1

В настоящей работе испытываются малоуглеродистая сталь и серый чугун.

2.1. Форма и размеры образцов, испытательная машина

Образцы имеют форму цилиндра. Стальной образец имеет диаметр $d_0 = 6$ мм и высоту $h_0 = 9$ мм, а чугунный — $d_0 = 8$ мм и $h_0 = 12$ мм.

Работа проводится на испытательной разрывной машине Р-5 (см. описание на с. 9), снабженной реверсивным устройством, позволяющим осуществить сжатие образца. С помощью диаграммного аппарата автоматически получается машинную диаграмму деформации. По шкале силоизмерителя фиксируют величину нагрузки на различных этапах нагружения образца.

2.2. Указания по испытанию стального образца

2.2.1. Диаграмма сжатия

Результаты испытаний могут быть зафиксированы в виде диаграммы деформирования в координатах сжимающее усилие P^c — абсолютная величина укорочения высоты образца $|\Delta h|$, показанной на рис. 2.2, а для малоуглеродистой стали при комнатной температуре (пластическое состояние).

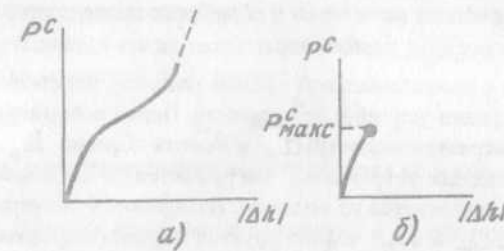


Рис. 2.2

Вначале образец деформируется упруго в соответствии с законом Гука и на диаграмме имеется начальный прямолинейный участок, затем наряду с упругой (обратимой) деформацией возникает значительная пластическая (остаточная) деформация, что на диаграмме отражается в виде криволинейного участка. В дальнейшем рост пластической деформации замедляется или совсем прекращается (пунктирная линия на диаграмме), что связано с влиянием сил трения в месте контакта нагружающих плит и торцевых поверхностей образца, сдерживающих поперечные деформации и определяющих возникновение неоднородно распределенных поперечных сжимающих напряжений. Это приводит к тому, что образец получает бочкообразную форму и затем превращается в диск, разрушаясь (рис. 2.3).

2.2.2. Определение сопротивления деформированию и величины деформации

В этом испытании фиксируется достигнутая нагрузка сжатия P^c и определяется соответствующее ей условное напряжение:

$$\sigma^c = P^c / F_0,$$

где F_0 — начальная площадь поперечного сечения.

Для достигнутого состояния подсчитываются условные осевая и поперечные деформации: осевая деформация $\epsilon_{ос} = (h - h_0) / h_0$, где h_0 и h — соответственно высота образца до и после испытания; поперечная деформация $\epsilon_{поп} = (d - d_0) / d_0$, где d_0 и d — соответственно диаметр образца до испытания и максимальный диаметр после испытания.

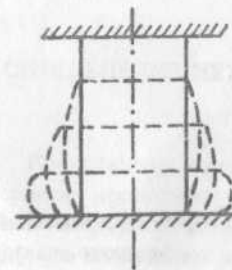


Рис. 2.3

2.2.3. Порядок проведения испытаний и обработка экспериментальных данных

Ознакомление с принципиальной схемой машины, реверсивным устройством, системой регистрации усилий и деформаций. Перед испытанием с помощью штангенциркуля измеряется диаметр d_0 и высота образца h_0 . Образец устанавливается в нагружающее устройство, нагружается до заданной нагрузки (например, до 45 кН) и извлекается из машины. Измеряются размеры h и d , подсчитываются σ^c , ϵ_{oc} и $\epsilon_{п}$ и фиксируется картина деформации с регистрацией всех необходимых данных в журнале.

2.3. Указания по испытанию чугунного образца

2.3.1. Диаграмма сжатия, характер деформации и разрушения

На рис. 2.2,б показана диаграмма сжатия образца из серого чугуна. Наблюдается отклонение от закона Гука уже при относительно малых нагрузках и разрушение происходит при малых остаточных деформациях, что характерно для малоупругих материалов. Образец приобретает бочкообразную форму и начальные трещины разрушения располагаются примерно под углом 45° к оси сжатия, как результат разрушения срезом от действия τ_{max} (рис. 2.4,а).

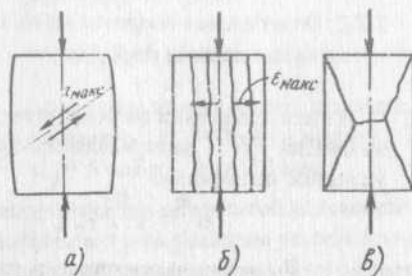


Рис. 2.4

Отметим, что хрупкие материалы (типа мрамора) имеют столбчатый характер разрушения отрывом как результат достижения предельного значения поперечной растягивающей деформации ϵ_{max} (рис. 2.4,б). Для указанных материалов в случае, когда велико влияние трения на торцевых поверхностях, разрушение происходит по схеме двух встречных конусов (рис. 2.4,в).

2.3.2. Определение механических свойств при разрушении

При испытании чугунного образца определяют предел прочности:

$$\sigma_{\sigma}^c = R_{max}^c / F_0,$$

где R_{max}^c – максимальная (разрушающая) нагрузка; F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца.

Подсчитывается также наибольшая осевая деформация как характеристика пластичности материала при сжатии:

$$\epsilon_{oc} = \frac{h - h_0}{h_0},$$

где h_0 и h – соответственно высота образца до и после испытания.

2.3.3. Порядок проведения испытаний и обработка экспериментальных данных

Порядок испытания и обработка опытных данных принимаются такими же, что и при испытании стального образца, с определением σ_{σ}^c , ϵ_{oc} и анализом характера разрушения.

Контрольные вопросы

1. Опишите напряженно-деформированное состояние при одноосном сжатии.
2. Каков вид диаграмм сжатия малоуглеродистой стали и серого чугуна?
3. Укажите особенности деформирования образца из высокопластичного материала при сжатии. Можно ли разрушить такой материал при сжатии?
4. Каков характер разрушения образцов из малоупругих и хрупких материалов при сжатии?
5. Какими величинами характеризуются прочность и пластичность материалов при испытании на сжатие?

Работа 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА КРУЧЕНИЕ

Испытания на кручение с определением стандартных механических характеристик проводятся в соответствии с ГОСТ 3565-80.

При кручении цилиндрического образца, нагруженного двумя моментами M , в поперечных сечениях возникает постоянный крутящий момент $M_{\tau} = M$, определяемый методом сечений (рис. 3.1).

Поперечные сечения, оставаясь плоскими, поворачиваются относительно друг друга как жесткие диски; расстояние между ними не изменяется.

Выделим из образца элементарное кольцо двумя поперечными сечениями и двумя цилиндрическими поверхностями с размерами, указанными на рис. 3.2,а. Правое торцевое сечение этого кольца поворачивается относительно левого на

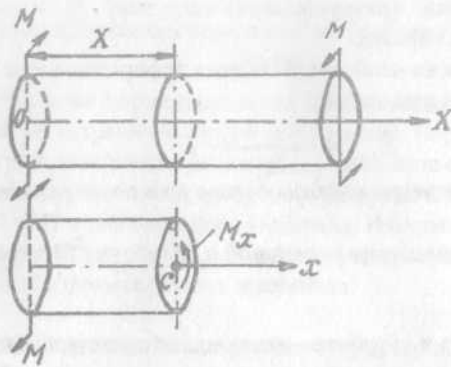


Рис. 3.1

угол $d\varphi$; образующая цилиндра AB занимает положение AB' , поворачиваясь на угол γ . Отрезок дуги BB' равен, с одной стороны, $r d\varphi$, а с другой — γdx . Тогда

$$\gamma = r \frac{d\varphi}{dx}.$$

Угол γ — угол сдвига цилиндрической поверхности; $\frac{d\varphi}{dx} = \theta$ — относительный угол закручивания.

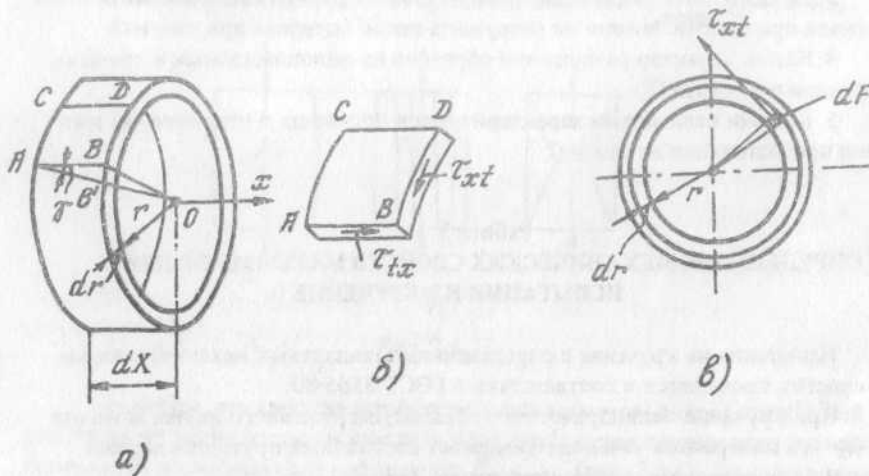


Рис. 3.2

Сдвиг возникает за счет действия касательных напряжений τ_{xt} (рис. 3.2, б), возникающих в поперечном сечении (первый индекс показывает, что напряжение действует в сечении с нормалью x , а второй — что напряжение параллельно тангенциальной оси t). В осевых сечениях возникают парные им напряжения τ_{tx} .

Для сдвига по закону Гука напряжения

$$\tau_{xt} = G\gamma = Gz\theta,$$

где G — модуль сдвига, модуль упругости второго рода.

Элементарные силы $\tau_{xt} dF$ (рис. 3.2, в) создают крутящий момент

$$M_x = \int_F \tau_{xt} dF z.$$

Интегрирование проводится по площади поперечного сечения F . Преобразовав, получим:

$$M_x = G\theta \int_F dF z^2 = G\theta J_p,$$

где $J_p = \int_F dF z^2 = \pi d_0^4 / 32$ — величина, называемая полярным моментом инерции сечения.

Принимая во внимание, что $\theta = M_x / GJ_p$, получаем:

$$\tau_{xt} = \frac{M_x}{J_p} z.$$

Наибольшие напряжения действуют в периферийных точках сечения при

$z = z_{\max}$:

$$\tau_{xt \max} = \frac{M_x}{W_p},$$

где $W_p = J_p / z_{\max}$ — полярный момент сопротивления поперечного сечения.

При кручении возникает напряженное состояние чистого сдвига (рис. 3.3).

По граням любого элемента, выделенного поперечными, осевыми и цилиндрическими сечениями, действуют только указанные выше касательные напряжения, которые являются наибольшими среди касательных напряжений в совокупности всех площадок. Если элемент выделить так, чтобы его грани по отношению к граням, совпадающим с поперечными и осевыми сечениями, были повернуты под углом 45° , то эти грани будут свободны от касательных напряжений и в них будут действовать соответственно главные наибольшие растягивающие σ_{\max} и наибольшие сжимающие σ_{\min} напряжения. Площадка, совпадающая с цилиндрической поверхностью, свободна от касательных и от нормальных напряжений. Рассматриваемое напряженное состояние чистого сдвига характеризуется тем, что $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min} = \tau_{\max}$ ($\sigma_1 = \sigma_{\max}$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = \sigma_{\min}$).

Относительный угол закручивания при равномерной деформации

$$\theta = \varphi / l_0,$$

где φ — угол закручивания в радианах на длине l_0 .

При кручении образца диаметром d_0 возникает деформация сдвига по цилиндрической поверхности. Эта деформация оценивается углом сдвига: $\gamma = \theta d_0 / 2$ — при малых деформациях до 0,1 радиана; $\gamma = \alpha \operatorname{arctg}(\theta d_0 / 2)$ — при больших деформациях.

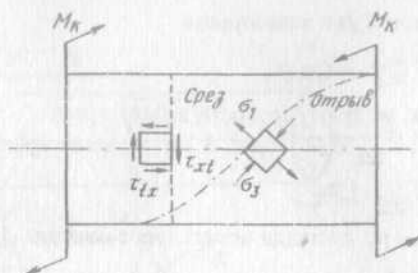


Рис. 3.3

В настоящей работе проводятся испытания малоуглеродистой стали и серого чугуна.

3.1. Форма и размеры образцов, испытательная машина

Формы и размеры испытываемых образцов показаны на рис. 3.4. Образец имеет цилиндрическую форму с головками квадратного сечения по концам для закрепления его в захватах испытательной машины. При кручении образца практически деформируется часть образца с наименьшим диаметром и длина этой части принимается за расчетную длину l_0 .

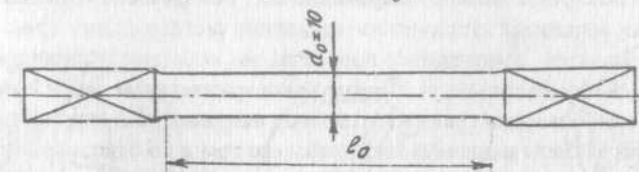


Рис. 3.4

Испытания проводятся на машинах КМ-50 или КМ-50-1 с вертикальным расположением образца. Крутящий момент передается на образец через систему передач от электродвигателя; в процессе деформирования образца регистрируется величина крутящего момента и угол закручивания образца на всех этапах нагружения. На указанных машинах максимальный крутящий момент равен 50 кгс·м.

3.2. Указания по испытанию стального образца

3.2.1. Диаграмма кручения, характер разрушения и деформации

Результаты испытаний могут быть зафиксированы в виде диаграммы деформирования в координатах крутящий момент M_k – угол закручивания образца φ . Диаграмма регистрируется автоматически либо строится по точ-

кам, соответствующим различным стадиям нагружения. На рис. 3.5 а показана типичная диаграмма кручения для материалов в пластичном состоянии (например, для малоуглеродистой стали при комнатной температуре). Начальный прямой участок соответствует упругому деформированию (соблюдается закон Гука), а последующий криволинейный – упругопластическому деформированию, когда наряду с упругими деформациями возникают значительные остаточные деформации – образец перед разрушением скручивается на несколько оборотов.

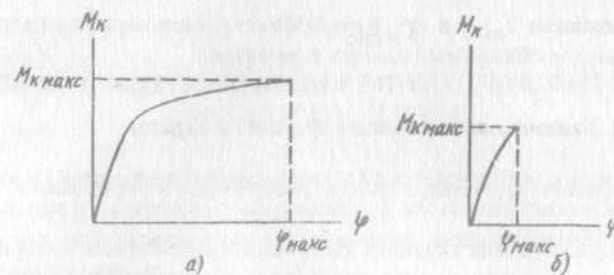


Рис. 3.5

В рассматриваемом случае разрушение происходит срезом по поперечному сечению от действия τ_{max} (см. рис. 3.3).

3.2.2. Определение механических свойств при разрушении

В работе определяются характеристики материала, соответствующие моменту разрушения (конечная точка диаграммы кручения на рис. 3.5 а).

Сопротивление разрушению характеризуется условным пределом прочности $\tau_{пч}$, вычисляемым по формуле упругого кручения как максимальное касательное напряжение при достижении $M_{k \max}$:

$$\tau_{пч} = M_{k \max} / W_p.$$

Пластичность (деформационная способность) материала оценивается предельным углом сдвига γ_{max} , соответствующим φ_{max} (θ_{max}):

$$\gamma_{max} = \arctg(\theta_{max} d_0 / 2).$$

3.2.3. Порядок проведения испытаний и обработка экспериментальных данных

Проводится ознакомление с принципиальной схемой машины, системой регистрации крутящих моментов и углов закручивания.

Перед испытанием измеряется диаметр d_0 и расчетная длина l_0 с помощью штангенциркуля.

Затем образец закрепляется в захватах испытательной машины. По образующей образца наносится меловая линия для визуального наблюдения за деформацией и подсчета числа оборотов подвижного захвата относительно неподвижного.

Далее включается машина, нагружается образец до его разрушения, фиксируются разрушающий момент $M_{к макс}$ и максимальный угол закручивания $\varphi_{макс}$. Подсчитываются $\tau_{пч}$ и $\gamma_{макс}$ и фиксируется характер разрушения с регистрацией всех необходимых данных в журнале.

3.3. Указания по испытанию чугунного образца

3.3.1. Диаграмма кручения, характер разрушения и деформации

На рис. 3.5,б показана типичная диаграмма кручения для материалов в хрупком или малопластичном состоянии (например, серого чугуна при комнатной температуре). Отмечается отклонение от закона Гука уже при относительно малых нагрузках и разрушение происходит при малых остаточных деформациях.

Серый чугун разрушается отрывом по винтообразной поверхности, касательная к которой образует с осью образца угол 45° , в результате действия наибольших растягивающих напряжений $\sigma_{макс}$ (см. рис. 3.3).

3.3.2. Определение механических свойств при разрушении

Определяется предел прочности $\tau_{пч}$ так же, как и при испытании стального образца, и предельная деформация $\gamma_{макс}$:

$$\gamma_{макс} = \vartheta_{макс} d_0 / 2.$$

3.3.3. Порядок проведения испытаний и обработка экспериментальных данных

Порядок испытаний и обработка результатов те же, что и при испытании стального образца. Отпадает лишь необходимость нанесения меловой линии в силу малости деформаций.

Контрольные вопросы

1. Какие положения являются исходными при решении задачи кручения?
2. Какие напряжения возникают в поперечных сечениях при кручении цилиндрического образца и как они определяются?

3. Какое напряженное состояние возникает при кручении?

4. Как деформируется образец при кручении, какие величины характеризуют эту деформацию?

5. Каков вид диаграмм кручения для малоуглеродистой стали и серого чугуна?

6. Назовите характеристики разрушения и пластичности при кручении.

7. Как происходит разрушение срезом и отрывом образца при кручении?

Работа 4

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

При плоском изгибе бруса (балки) в его поперечных сечениях возникают нормальные и касательные напряжения. В настоящей работе проводится теоретическое и экспериментальное определение этих напряжений и сопоставление полученных данных.

4.1. Схема нагружения балки и испытательная машина

Испытывается балка двутаврового сечения специального профиля (рис. 4.1). Балка лежит на двух опорах и нагружается двумя равными симметрично расположенными силами $P/2$.

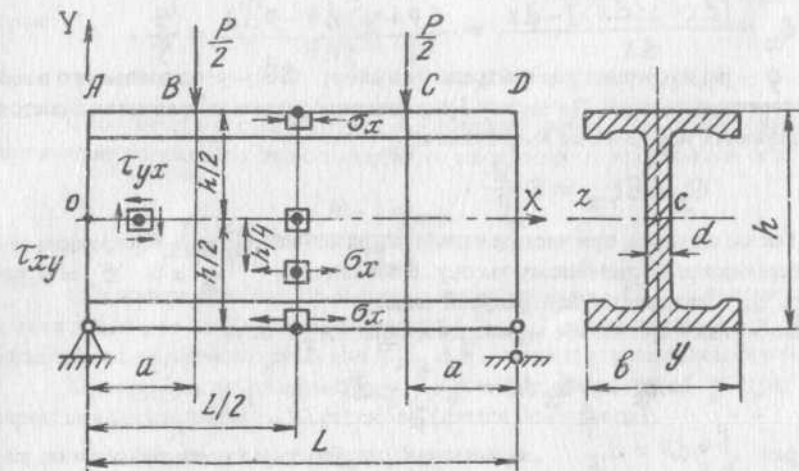


Рис. 4.1

Нагружение балки осуществляется на прессе с механическим приводом и манометрическим силоизмерителем; предельная нагрузка, развиваемая прессом

4.2. Теоретическое определение напряжений

Плоский изгиб бруса симметричного поперечного сечения реализуется при его нагружении системой сил, нормальных к оси бруса и лежащих в плоскости симметрии. При принятой схеме нагружения балки опорные реакции будут равны $P/2$ и все внешние силы (активные и реактивные) действуют в одной плоскости симметрии $X-Y$ и в этой плоскости происходит плоский изгиб.

Используя метод сечений (см. с. 4), легко установить, что в поперечных сечениях возникает изгибающий момент M_z и поперечная сила Q_y (связанных с системой осей x, y, z , проведенной в сечении, причем ось y является осью симметрии сечения). Построив эпюры Q_y и M_z , устанавливаем, что на участках АВ и CD действуют одновременно Q_y и M_z , т.е. реализуется так называемый поперечный изгиб, а на участке BC $Q_y = 0$ и $M_z = \text{const}$, т.е. реализуется чистый изгиб.

Выясним, какие напряжения возникают при чистом изгибе. В основе последующего анализа лежит гипотеза плоских сечений, согласно которой поперечные сечения, оставаясь плоскими, поворачиваются относительно друг друга. Выделенный до нагружения (рис. 4.2а) из балки элемент длиной dx под действием M_z изгибается так, что торцевые сечения остаются плоскими и часть волокон, параллельных оси бруса, растягивается, а часть сжимается и имеется нейтральный слой волокон, который искривляется, не испытывая ни растяжения, ни сжатия (рис. 4.2б). Тогда волокно, расположенное на расстоянии y от нейтрального слоя, удлинится на величину $\Delta(dx)$. Соответствующее относительное удлинение

$$\epsilon_x = \frac{[dx + \Delta(dx)] - dx}{dx} = \frac{(\rho + y)d\theta - \rho d\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho},$$

где ρ — радиус кривизны нейтрального слоя; $d\theta$ — угол взаимного поворота поперечных сечений. По закону Гука для одноосного напряженного состояния появляются нормальные напряжения:

$$\sigma_x = E\epsilon_x = E \frac{y}{\rho}.$$

Таким образом, при чистом изгибе напряжения σ_x в поперечном сечении изменяются по линейному закону. В точках при $y = 0$ $\sigma_x = 0$, потому ось x называется нейтральной осью.

Поскольку при изгибе нормальная сила $N_x = 0$, то

$$N_x = \int_F \sigma_x dF = \frac{E}{\rho} \int_F y dF = 0.$$

и интеграл $\int_F y dF = S_x$, называемый статическим моментом сечения, равен нулю. Легко показать, что в соответствии с этим нейтральная ось x проходит через центр тяжести сечения (как ранее и предполагалось).

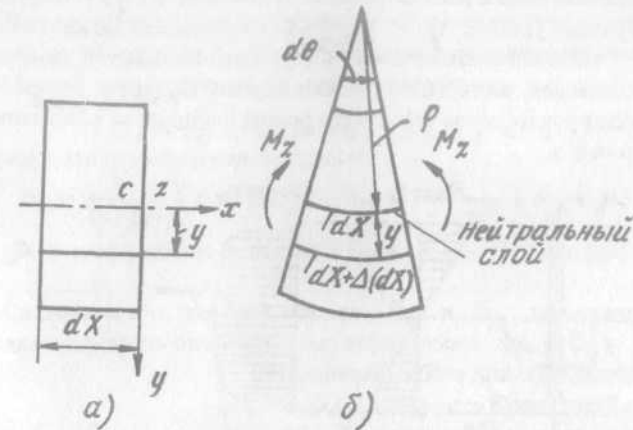


Рис. 4.2

Из условия, что момент элементарных сил $\sigma_x dF$ относительно оси x равен изгибающему моменту M_x , получаем:

$$\int_F \sigma_x dF y = \int_F E \frac{y}{\rho} dF y = \frac{E}{\rho} \int_F y^2 dF = M_x,$$

здесь $\int_F y^2 dF = J_x$ — момент инерции сечения относительно нейтральной оси x . Тогда $\frac{1}{\rho} = \frac{M_x}{EJ_x}$ и выражение для напряжений σ_x запишется в форме:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{J_x} y.$$

В соответствии с этим на рис. 4.3 показана эпюра σ_x . Максимальное напряжение возникает в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси:

$$|\sigma_x|_{\text{макс}} = \frac{|M_x| y_{\text{макс}}}{J_x}.$$

При поперечном изгибе наряду с напряжениями σ_x в поперечных сечениях действуют касательные напряжения τ_{xy} , параллельные оси y . Равнодействующая элементарных сил $\tau_{xy} dF$ является поперечной силой Q_y .

Касательные напряжения τ_{xy} в точках с координатой y (рис. 4.3) определяются по формуле Журавского (дается без вывода):

$$\tau_{xy} = \frac{Q_y S_x(y)}{J_x b(y)},$$

где Q_y – поперечная сила в рассматриваемом сечении; $b(y)$ – ширина сечения, соответствующая уровню y ; $S_x(y)$ – статический момент относительно оси x части площади сечения $F(y)$, расположенной ниже уровня y (заштрихованная часть). Статический момент $S_x(y) = \int_{F(y)} y dF$ подсчитывается как произведение соответствующей площади на расстояние от центра тяжести до оси x .

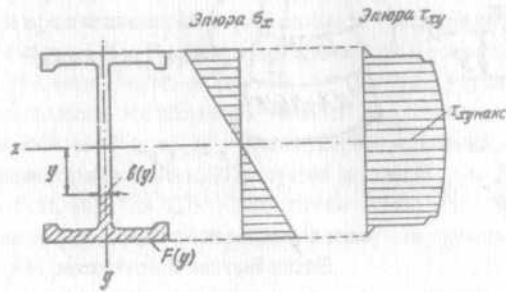


Рис. 4.3

Эпюра τ_{xy} показана на рис. 4.3. Наибольшие напряжения $\tau_{xy, \max}$ действуют на уровне нейтральной оси x , поскольку при $y=0$ $S_x(y)$ достигает наибольшей величины при наименьшей ширине сечения $b(y)$. В наиболее удаленных от оси x точках $\tau_{xy} = 0$.

На участке чистого изгиба действуют только напряжения σ_x , и поэтому в исследуемых точках среднего сечения балки при $y = \pm h/2, \pm h/4$ (см. рис. 4.1) возникает одноосное напряженное состояние, а в точке на уровне нейтральной оси ($y=0$) $\sigma_x = 0$.

На участке поперечного изгиба АВ исследуется точка на уровне $y=0$, где $\sigma_x = 0$, а $\tau_{xy} = \tau_{xy, \max}$ (рис. 4.1). Таким образом, в этой точке возникает двухосное напряженное состояние чистого сдвига (рис. 4.4); в площадках, наклоненных под углом 45° к площадкам, где действует τ_{xy} и τ_{yx} , возникают главные напряжения σ_1 и σ_3 , причем $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{\max}$ ($\sigma_2 = 0$).

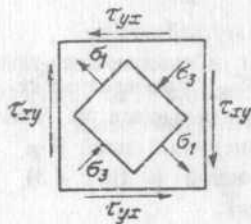


Рис. 4.4

4.3. Экспериментальное определение напряжений

Поскольку в исследуемых точках среднего сечения создается одноосное напряженное состояние, то напряжения σ_x могут быть определены по закону Гука: $\sigma_x = E \epsilon_x$, где E – модуль упругости первого рода, а ϵ_x – относительная деформация в направлении оси x .

При исследовании напряженного состояния чистого сдвига на участке поперечного изгиба следует принять во внимание соотношения, вытекающие из закона Гука для трехосного напряженного состояния:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} (\sigma_1 - \mu \sigma_3), \quad \epsilon_3 = \frac{1}{E} (\sigma_3 - \mu \sigma_1).$$

Преобразуя эти соотношения, получаем:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_1 + \mu \epsilon_3), \quad \sigma_3 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_3 + \mu \epsilon_1),$$

где μ – коэффициент Пуассона, ϵ_1 и ϵ_3 – главные линейные деформации.

Следовательно, для определения σ_1 и σ_3 и соответственно τ_{\max} необходимо измерить относительные деформации ϵ_1 и ϵ_3 .

В настоящей работе для определения линейных деформаций используются проволочные тензорезисторы (рис. 4.5). Тензорезистор состоит из константановой (сплав меди с никелем) проволоки 1 диаметром 0,02–0,05 мм, уложенной в виде ряда петель и приклеенной к подложке 2 (папиросная бумага, пленки типа БФ или ВЛ, стеклоткань). Тензорезистор наклеивается на поверхность испытываемого изделия в исследуемых местах. Через проводники 3 тензорезистор подключается к измерительному устройству и к источнику электрического тока. При деформации изделия деформируется проволока тензорезистора и в силу этого

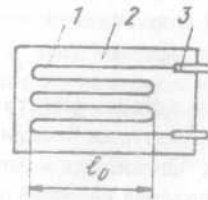


Рис. 4.5

меняется электрическое сопротивление; при растяжении за счет увеличения длины и уменьшения поперечного сечения проволоки ее сопротивление увеличивается, а при сжатии – соответственно уменьшается. База тензорезистора – длина, на которой измеряется деформация, равна длине петли l_0 ; обычно $l_0 = 3-100$ мм.

Относительное изменение омического сопротивления $\Delta R/R$ датчика пропорционально линейной деформации:

$$\epsilon = \frac{\Delta R/R}{K},$$

где K – коэффициент тензочувствительности.

Таким образом, по изменению электросопротивления можно определять величину деформации.

Изменение омического сопротивления датчика (тензорезистора) измеряется с помощью прибора, собираемого по схеме равноплечного моста (рис. 4.6), в одну диагональ которого включается источник тока \mathcal{H} , а в другую – высокочувствительный гальванометр Γ . Мост состоит из сопротивлений R_1 и R_2 и двух других сопротивлений, одно из которых является сопротивлением рабочего датчика D , другое K – компенсационного датчика, наклеенного на ненагруженную часть балки. При нагружении балки изменение электросопротивления рабочего датчика (а следовательно, изменение соответствующей

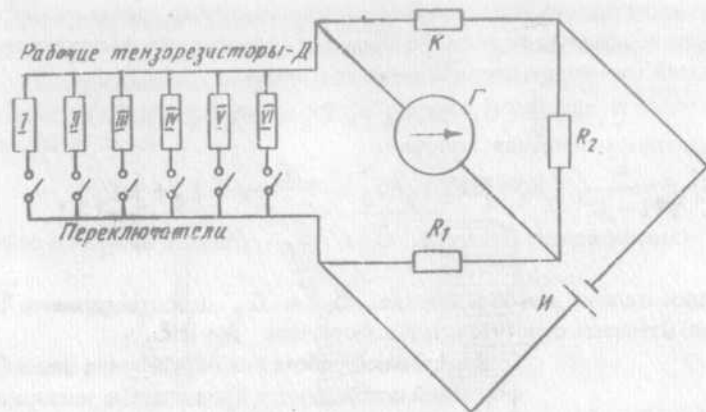


Рис. 4.6

деформации) вызывает изменение тока в диагонали моста, которое регистрируется по шкале гальванометра Г (в настоящей работе используется вольтметр универсальной цифровой В7-23). Отметим, что датчик К служит для компенсации влияния температуры на изменение сопротивления рабочего датчика.

Рабочие тензорезисторы поочередно подключаются в измерительную схему. Места размещения шести тензорезисторов I - VI соответствуют исследуемым точкам и они наклеены в направлении действия главных напряжений (рис. 4.7).

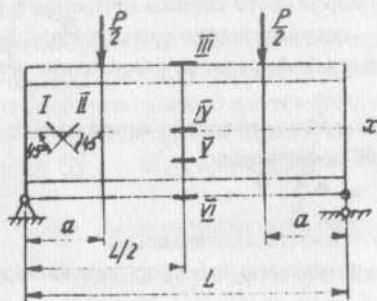


Рис. 4.7

4.4. Указания по выполнению работы

4.4.1. Исходные данные

Перед проведением работы в лабораторном журнале указываются материал балки, значения упругих постоянных E и μ , размеры балки и геометрические характеристики ее поперечного сечения J_x и $S_x (y=0)$, координаты приложения нагрузки и исследуемых точек, цена деления измерителя деформаций, задаваемые значения ступеней нагружения при испытании. Отметим, что величины J_x и $S_x (y=0)$ для стандартных профилей приводятся в таблицах сортамента.

4.4.2. Расчет напряжений

Для исследуемых точек проводится расчет напряжений $\sigma_x^{теор}$ и $\tau_{xy}^{теор}$ по соответствующим формулам. Предварительно строятся эпюры поперечных сил Q_y и изгибающих моментов M_z для заданной степени нагружения, фиксируется M_z на участке чистого изгиба и Q_y на участке поперечного изгиба, значения которых необходимы для подсчета напряжений. Строятся эпюры σ_x и τ_{xy} .

4.4.3. Опытное определение напряжений и сопоставление результатов расчета и эксперимента

Балка с наклеенными на нее датчиками, подключаемыми к прибору измерения деформаций, нагружается степенями нагрузки P , соответствующей расчетной величине. Нагружение на первой ступени принимается за начало отсчета и этим исключается влияние зазоров и местных деформаций в системе нагружения на начальной стадии деформирования балки. Затем производится четыре последовательных нагружения в упругой области с регистрацией показаний прибора.

На основе показаний находят соответствующие деформации по формуле

$$\varepsilon = \Delta n_{ср} \alpha,$$

где α - цена деления прибора; $\Delta n_{ср}$ - среднее значение приращения показаний прибора на ступень нагружения.

По показаниям датчиков III, IV, V, и VI определяются соответствующие деформации и нормальные напряжения $\sigma_x^{опыт}$ на участке чистого изгиба и оценивается расхождение между расчетными и опытными значениями:

$$\delta = \frac{|\sigma_x^{опыт}| - |\sigma_x^{теор}|}{|\sigma_x^{теор}|} \cdot 100\%.$$

По показаниям I и II датчиков определяются главные деформации $\varepsilon_1(\varepsilon_I)$ и $\varepsilon_3(\varepsilon_{II})$ и по соответствующим формулам экспериментальные значения главных напряжений $\sigma_1^{опыт}$ и $\sigma_3^{опыт}$ для чистого сдвига в точках нейтральной оси на участке поперечного изгиба. Опытное значение $\tau_{xy}^{опыт}$ определяется как среднее абсолютных величин $\sigma_1^{опыт}$ и $\sigma_3^{опыт}$:

$$\tau_{xy}^{\text{опыт}} = \frac{\tilde{\sigma}_1^{\text{опыт}} + |\tilde{\sigma}_3^{\text{опыт}}|}{2}$$

Затем оценивается расхождение между расчетными и опытными данными:

$$\delta = \frac{\tau_{xy}^{\text{опыт}} - \tau_{xy}^{\text{теор}}}{\tau_{xy}^{\text{теор}}} \cdot 100\%$$

Контрольные вопросы

1. Что такое чистый и поперечный изгибы?
2. Какие исходные положения принимаются при решении задачи чистого изгиба?
3. По какой формуле определяются напряжения $\tilde{\sigma}_x$ при изгибе?
4. По какой формуле определяются напряжения τ_{xy} при изгибе?
5. Какое напряженное состояние возникает в точках поперечного сечения при чистом изгибе?
6. Какое напряженное состояние возникает на уровне нейтральной оси при поперечном изгибе?
7. В чем состоит принцип опытного определения напряжений с использованием проволочных тензорезисторов?
8. Как определяется напряжение при одноосном напряженном состоянии и при чистом сдвиге по главным деформациям?
9. Опишите схему прибора — измерителя деформаций.

Работа 5

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНО СЖАТОГО СТЕРЖНЯ

Свойство устойчивости деформируемой системы состоит в способности системы восстанавливать первоначальное состояние после того, как ей было сообщено некоторое отклонение от положения равновесия. Если система не обладает таким свойством, то ее состояние будет неустойчивым.

Наиболее простым случаем потери устойчивости является потеря устойчивости продольно сжатого стержня (рис. 5.1): при достаточно большой силе стержень не может сохранить прямолинейную форму и изогнется, произойдет потеря устойчивости. Другой пример возможности потери устойчивости — случай нагружения тонкостенной трубы внешним давлением; при достижении критической величины давления круговая форма сечения переходит в эллиптическую. И в том и другом случаях напряжения в момент потери устойчивости могут быть существенно меньше предела про-



5.1. Обоснование расчета на устойчивость продольно сжатого стержня

Задача о равновесии продольно сжатого стержня впервые была поставлена и решена Л. Эйлером. На рис. 5.2 показан стержень, закрепленный по концам с помощью шарнирно-неподвижной и шарнирно-подвижной опор. Стержень нагружен сжимающей силой P .

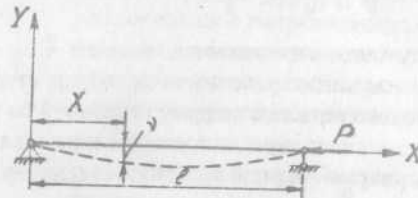


Рис. 5.2

Предположим, что по какой-то причине сжатый стержень изогнулся и произвольное сечение с координатой X получило прогиб v . Рассмотрим условия, при которых сила P будет удерживать стержень в изогнутом состоянии. Уравнение изогнутой оси запишем в следующей форме (напомним, что при плоском изгибе кривизна

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_x}{EJ_x} \quad \text{и} \quad \frac{1}{\rho} \approx \frac{d^2 v}{dx^2} = v''; \quad (\text{см. с. 25}),$$

$$EJ_x v'' = M_x,$$

где E — модуль упругости первого рода; J_x — момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси; M_x — изгибающий момент.

Поскольку изгиб происходит в плоскости наименьшей жесткости, то $J_x = J_{\text{мин}}$. Изгибающий момент $M_x = -Pv$; знак минус учитывает, что при положительном M_x величина v отрицательна. Тогда

$$EJ_{\text{мин}} v'' = -Pv.$$

Обозначив $P/EJ_{\text{мин}} = k^2$, получим уравнение

$$v'' + k^2 v = 0.$$

Решение этого уравнения есть

$$v = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx.$$

Из условия $v_{x=0} = 0$ следует, что $C_2 = 0$; из условия $v_{x=l} = 0$ — что $C_1 \sin kl = 0$.

Случай, когда $C_1 = 0$, нас не интересует (изгиба нет). Можно положить, что $kl = \pi n$, где n — произвольное целое число. Тогда

$$P = \frac{\pi^2 n^2 EJ_{\text{мин}}}{l^2}$$

При $n = 1$ наименьшая сила

$$P_{\text{мин}} = P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 E J_{\text{мин}}}{\ell^2}$$

Эта сила носит название первой критической или эйлеровой силы $P_{\text{кр}}$. В соответствии с этим уравнение изогнутой оси запишется так:

$$y = C_1 \sin \frac{\pi x}{\ell},$$

т.е. одна полуволна синусоиды располагается на длине ℓ .

Величина $P_{\text{кр}}$ зависит от условий закрепления стержня (рис. 5.3). Так, например, при закреплении стержня по схеме, указанной на рис. 5.3,б, при потере устойчивости он изогнется по двум полуволнам и каждая его половина теряет устойчивость как шарнирно-опертый по концам стержень, имеющий длину $\ell/2$. Поэтому

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 E J_{\text{мин}}}{(\ell/2)^2}$$

Общее выражение для $P_{\text{кр}}$ записывается так:

$$P_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 E J_{\text{мин}}}{(\mu \ell)^2},$$

где μ — коэффициент приведения длины (рис. 5.3).

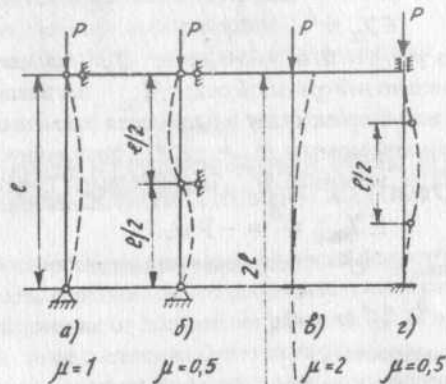


Рис. 5.3

Полученные формулы применимы, если потеря устойчивости происходит в упругой области, т.е. при напряжениях меньше предела пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$ ($\sigma_{\text{кр}} = P_{\text{кр}}/F \leq \sigma_{\text{пл}}$, где F — площадь сечения стержня и $\sigma_{\text{кр}}$ — критическое напряжение).

5.2. Опытное определение критической силы

На специальной установке осуществляется сжатие стержня прямоугольного сечения с двумя схемами закрепления (рис. 5.3,а и б).

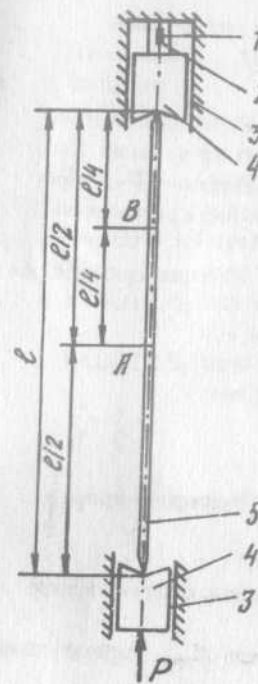


Рис. 5.4

На рис. 5.4 приводится схема установки. Вертикально расположенный стержень 5 прямоугольного сечения шарнирно опирается по концам (см. рис. 5.3,а) с помощью опор 4, свободно (без зазора и трения) перемещающихся в направляющих 3. Верхняя опора 4 упирается в динамометрический стержень 2 с жестким закреплением по верхней торцевой поверхности. С помощью нагружающего механизма через нижнюю опору 4 осуществляется сжатие стержня P , величина которой определяется с помощью полупроводниковых тензодатчиков 1, наклеенных на стержень 2 и подключенных в мостовую измерительную систему.

В процессе нагружения по первой схеме (рис. 5.3,а) фиксируется прогиб среднего сечения А стержня с помощью индикатора отсчетного микроскопа МПБ-2 с 24-кратным увеличением.

При нагружении по второй схеме (рис. 5.3,б) при помощи специальных опорных винтов шарнирно закрепляется среднее сечение А и фиксируется прогиб сечения В по показаниям микроскопа.

И в том и в другом случае фиксируется момент потери устойчивости, когда существенно уменьшается рост нагрузки P при заметном увеличении прогиба 1 (рис. 5.5); определяется опытное значение критической силы $P_{\text{кр}}^{\text{опыт}}$.

5.3. Указания по выполнению работы

5.3.1. Исходные данные

Перед проведением работы в лабораторном журнале указываются материал стержня и величина модуля упругости E , размеры стержня, отражаются две схемы нагружения стержня, указывается цена деления измерителя усилия.

5.3.2. Расчет критической силы

В журнале приводится обоснование расчета на устойчивость с кратким изложением решения задачи Эйлера.

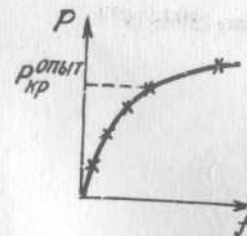


Рис. 5.5

Расчет критической силы $P_{кр}^{теор}$ для указанных случаев закрепления стержня осуществляется по вышеприведенным формулам с предварительным определением $J_{мин}$ по размерам сечения стержня b и h ($J_{мин} = hb^3/12$).

5.3.3. Проведение эксперимента по определению критической силы и сопоставление расчетных и опытных данных

Для указанных схем закрепления стержня проводится постепенное его нагружение с фиксацией прогибов на определенных ступенях нагружения. По этим данным строится диаграмма в координатах сжимающая сила P – прогиб f , фиксируется момент потери устойчивости и величина критической силы $P_{кр}^{опыт}$.

В заключение сопоставляются расчетные и опытные значения критических сил:

$$\delta = \frac{P_{кр}^{опыт} - P_{кр}^{теор}}{P_{кр}^{теор}} \cdot 100\%$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление потери устойчивости? Приведите примеры.
2. Как решается задача Эйлера?
3. Каковы пределы применимости формулы Эйлера?
4. Как зависит критическая сила от схемы закрепления стержня? Приведите примеры.
5. Как подсчитывается минимальный момент инерции $J_{мин}$ прямоугольного сечения?
6. Как осуществляется опытное определение критической силы?

Литература

Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1974, 1979.

Содержание

Предисловие	3
Введение	4
РАБОТА 1. Определение механических свойств материалов при испытании на растяжение	7
РАБОТА 2. Определение механических свойств материалов при испытании на сжатие	14
РАБОТА 3. Определение механических свойств материалов при испытании на кручение	17
РАБОТА 4. Расчетно-экспериментальное определение напряжений при плоском изгибе	23
РАБОТА 5. Расчетно-экспериментальное определение условий потери устойчивости продольно сжатого стержня	30