

ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
Учебное пособие

Во вводной части пособия определены наиболее важные понятия курса, дано описание испытательных машин, изложены требования по оформлению отчётов к лабораторным работам. В основной части рассмотрено содержание 7 работ, соответствующих учебному плану специальностей «Технология машиностроения», «Оборудование и технология сварочного производства», «Котло- и реакторостроение», «Промышленное и гражданское строительство» (51 час лекций, 34 часа практических и 17 часов лабораторных). Практикум предназначен для студентов 2 – 3 курсов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Инженеры-механики, конструирующие и эксплуатирующие производственные машины и оборудование, должны иметь определённый уровень знаний, умений и навыков в области сопротивления материалов, призванный обеспечить техническую надёжность работы деталей и элементов из различных материалов и в любых условиях эксплуатации. Относясь критически к достижениям современной науки о прочности, обосновавшей материализацию научно-технического прогресса, необходимо сделать вывод, основываясь на статистических данных, что число мелких, средних, крупных и глобальных катастроф на Земле в абсолютном исчислении возрастает. Таким образом, необходимость дальнейшего улучшения проектирования и повышения надёжности эксплуатации машин и сооружений обоснованно вытекает из сложившейся инженерной практики.

Современные учебные планы многих технических вузов, в том числе ВИ ЮРГТУ, предусматривают изучение курса сопротивления материалов в сильно урезанном объёме, не позволяющем последовательно и всесторонне осветить многие важные аспекты вопросов прочности. Теоретическая часть курса (17 часов лекций в первом семестре и 34 часа во втором), имеющая значительный по объёму понятийный аппарат, даёт практически стопроцентное отставание от тем и содержания домашних заданий, практических и лабораторных занятий. Этот факт создаёт трудности методического характера как преподавателям, втиснутым в жёсткие рамки учебного плана, так и студентам, которым нелегко получить целостное представление о проблемах прочности на основе отрывочных фрагментов, взятых из контекста науки. Положительным примером решения указанной проблемы является исторический факт, когда в технических вузах дореволюционной России к лабораторным работам допускались студенты, прошедшие весь теоретический и практический курс и сдавшие 3 экзамена!

Из сложившейся ситуации возникла настоятельная необходимость вынести часть теоретического материала на его изучение в процессе лабораторных занятий и в домашних условиях. Методическую обеспеченность выполнения расчётно-проектировочных работ призван решить «Практикум по сопротивлению материалов» [1]. Предлагающийся вниманию студентов-механиков

«Лабораторный практикум по сопротивлению материалов» содержит порядок выполнения 7 лабораторных работ, которым предшествует краткое изложение основ понятийного аппарата, теоретического базиса и предпосылок. В каждой работе приводится описание используемого оборудования и объекта исследования, рассмотрен ход проведения опыта и порядок обработки результатов наблюдений. В конце каждой работы приведен список контрольных вопросов, которые наряду с вопросами из практикума [1] предполагается использовать при подготовке студентов к зачёту в форме теста по первой части курса сопротивления материалов.

Учитывая, что лабораторный практикум [2] был опубликован почти 15 лет назад и тираж его полностью исчерпался, издание настоящего практикума повысит методическую обеспеченность учебного процесса и, по мнению автора, в определённой степени будет способствовать улучшению качества подготовки специалистов в области расчётов на прочность, жёсткость и устойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление материалов как наука о прочности, жёсткости и устойчивости деталей машин и отдельных элементов инженерных сооружений исторически развивалось в тесном переплетении двух глобальных методов исследования: теоретического и экспериментального. Первые интуитивные знания о законах сопротивляемости материалов воздействию внешних нагрузок учёные получили из наблюдений и опыта эксплуатации орудий труда, жилых и общественных зданий, кораблей, боевых машин и т.п. В течение 1 млн. лет люди использовали орудия труда из дерева и камня, последние 10 тыс. лет явились этапом постепенного перехода к металлам (бронзе, железу, стали), пока не настал век индустриализации, характеризующийся значительным многообразием искусственных материалов, работающих в самых различных условиях эксплуатации.

Задачей теоретического курса исследования является получение физико-математической модели, т.е. расчётных формул, которые адекватно отражают реальное поведение твёрдых тел под воздействием нагрузок. Экспериментальный метод ставит перед собой две основные задачи. Первая заключается в получении упруго-механических характеристик материалов путём испытания образцов в различных режимах нагружения. Один и тот же материал можно испытывать на растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб. Нагрузки могут прикладываться статически или динамически, на короткое или длительное время, при постоянном или переменном направлении действия, положительной или отрицательной температуре и т.д. При проведении опытов необходимо обеспечить как можно большую точность определения размеров образца, величин прикладываемых нагрузок и возникающих деформаций. Второй основной задачей является проверка теоретических формул для определения напряжений, перемещений и критических нагрузок, полученных с использованием гипотез, допущений и упрощающих предположений. Напряжения предопределяют прочность элементов, перемещения – их жёсткость, а критические нагрузки – устойчивость. Проведение тщательно спланированных опытов позволяет установить точность формул и границы их применимости, что обеспечивает правильность назначения коэффициентов запаса по механической надёжности.

ВАЖНЕЙШИЕ ПОНЯТИЯ И КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ

Основные понятия

Внешние нагрузки – различные по виду и физическому происхождению силы, приложенные к твёрдому телу и определяющие его механическое состояние. Нагрузки бывают активными и реактивными. Активные силы пытаются изменить исходное состояние тела, а реактивные препятствуют этому изменению.

Внутренние силы – это силы взаимодействия атомов твёрдого тела, обеспечивающие его целостность до и после нагружения. Внутренние силы подразделяются на два вида: силы сцепления и силы упругости.

Металлы и большинство других материалов имеют кристаллическое строение: положительно заряженная кристаллическая решётка, в узлах которой находятся катионы атомов, погружена в отрицательно заряженный электронный газ, который из-за огромной скорости электронов (порядка 20000 км/с) представляет собой, по сути, объёмное электростатическое поле. При отсутствии внешних нагрузок каждый из пары ближайших друг к другу ионов уравновешен двумя противоположно направленными силами: гравитационной силой притяжения двух масс атомов и электростатической силой отталкивания двух зарядов ионов. Эти внутренние силы, называемые силами сцепления, изучаются в физике твёрдого тела, а в сопротивлении материалов они полагаются равными нулю и как бы не влияющими на прочность.

При воздействии на твёрдые тела внешних нагрузок изменяется естественно установившееся расстояние между атомами, и они начинают взаимодействовать дополнительными силами, которые называются внутренними силами упругости. Эти силы носят в основном электростатический характер и подробно изучаются в сопротивлении материалов.

Чтобы оценить количество внутренних сил упругости, пропорциональное числу атомов, необходимо учесть среднее расстояние между узлами кристаллической решётки, которое составляет приблизительно 10°A или 10^{-6} мм. В сопротивлении материалов плотность внутренних сил оценивают приходящимися на единицу

площади силами. Легко посчитать, что среднее число внутренних сил упругости составит 10^{12} сил/мм².

Внутренние усилия – это статические интегральные эквиваленты всех сил упругости, возникающих в каком-либо сечении твёрдого тела. Необходимость их введения в понятийный аппарат вызвана двумя основными причинами. Первая заключается в том, что строение кристаллической решётки материалов до конца не изучено и характеризуется непостоянством по объёму. Следовательно, для каждого материала необходимо было бы вести особый расчёт на прочность, что весьма нецелесообразно. Вторая причина ещё более весома: учсть в расчётах огромное число внутренних сил упругости не представляется возможным.

Необходимо отчётливо различать близкие по написанию понятия: а) внутренние силы упругости; б) внутренние усилия.

Укажем три отличительные особенности введённых понятий:

1) внутренние силы упругости носят объективный характер, так как они существуют независимо от воли и сознания людей, в то время как внутренние усилия – субъективное понятие, введённое для облегчения расчётов. В твёрдых телах внутренних усилий реально не существует;

2) внутренние силы упругости возникают между каждой парой взаимодействующих атомов, а внутренние усилия отражают суммарное действие на отсечённую (рассматриваемую) часть твёрдого тела всех сил упругости со стороны отброшенной части тела;

3) число внутренних сил упругости огромно и составляет приблизительно 10^{12} сил/мм², в то время как внутренних усилий в общем случае нагружения всего лишь 6.

Главный вектор внутренних сил упругости \bar{R} раскладывают на три компоненты по осям координат: продольную силу N по оси Z , совпадающей с геометрической осью стержня, и две поперечные силы Q_X и Q_Y по осям X и Y , расположенным в плоскости сечения. Аналогично главный момент внутренних сил упругости \bar{M}_0 раскладывают на три компоненты относительно тех же осей координат: крутящий момент M_k относительно оси Z и два изгибающих момента M_X и M_Y относительно осей X и Y .

В зависимости от расположения внешних нагрузок и возникающих при этом внутренних усилий различают следующие простые случаи нагружения:

- растяжение или сжатие (N);
- кручение (M_k);
- сдвиг (Q_Y);
- чистый изгиб (M_X).

Напряжения. Напряжением называют числовую меру интенсивности внутренних сил упругости. Математически его определяют как предельное отношение

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta A},$$

где ΔR – главный вектор сил упругости, действующих на малой площадке ΔA , выделенной в окрестности точки, принадлежащей сечению твёрдого тела.

Из формулы устанавливаем единицу напряжения

$[p] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Па}$. Так как эта величина мала, в практических расчё-

тах напряжения измеряют в МПа: $1 \text{ МПа} = 1 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$. Упрощённо напряжение можно трактовать как отношение единицы силы к единице площади. Напряжение наряду с деформацией (см. ниже) является фундаментальным понятием, так как оно определяет

прочность твёрдого тела, т.е. его способность не разрушаться под воздействием внешних нагрузок. В сопротивлении материалов считается, что напряжения возникают в каждой точке твёрдого тела, а не только в узлах кристаллической решётки, где появляются внутренние силы упругости. Такой подход стал возможным благодаря принятию гипотезы об однородности материала, трактуемой как независимость свойств от размеров выделенного объёма. Из этой гипотезы неминуемо вытекает физическое понятие континуума, т.е. сплошной среды, непрерывно заполняющей весь объём. На первый взгляд произошло усложнение задачи, так как вместо 10^{12} сил/мм² появилось несчётное множество удельных сил, т.е. напряжений. На самом деле решение значительно упростилось, поскольку к непрерывным функциям напряжений стало возможным применение дифференциального и интегрального исчислений.

Поскольку в общем случае нагружения твёрдого тела направление полного напряжения p заведомо неизвестно, это напряжение, как вектор, раскладывают на три компоненты по осям координат XYZ . Составляющую, направленную вдоль геометрической оси

Z стержня, называют нормальным напряжением σ , а две другие составляющие по осям X и Y называют касательными напряжениями τ_x и τ_y . Свои названия они получили в связи с расположением по отношению к плоскости сечения Π_A : нормальные напряжения перпендикулярны плоскости и действуют *по нормали*, а касательные напряжения расположены в плоскости, действуя *по касательной*, т.е. $\sigma \perp \Pi_A$; $\tau_x \cap \tau_y \in \Pi_A$.

Перемещения. Перемещением называют изменение положения в пространстве точки или отрезка прямой твёрдого тела, вызванное его нагружением. Для точки вводится понятие линейного перемещения, а для отрезка – понятие углового перемещения. Для кристаллического твёрдого тела каждый узел получает своё линейное перемещение, а каждое ребро – своё угловое перемещение. Ввиду различия перемещений каждого из геометрических объектов происходит изменение длин отрезков и искажение прямых углов, зафиксированных в объёме твёрдого тела.

Деформации. Деформацией называют числовую меру перемещений. Она характеризует степень изменения взаимного расположения точек твёрдого тела при его нагружении. Деформации бывают линейными и угловыми. Математически линейная деформация ε определяется как предельное отношение

$$\varepsilon = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{S},$$

где S – длина отрезка; ΔS – изменение длины отрезка.

Угловая деформация определяется как предельное изменение прямого угла

$$\gamma = \lim_{\substack{C \rightarrow D \\ E \rightarrow D}} (\varphi_{CD} - \varphi_{ED}),$$

где φ_{CD} и φ_{ED} – угловые перемещения сторон прямого угла; D – вершина прямого угла.

Машины и образцы для испытания материалов

Чтобы определить упругие и механические характеристики материала, необходимо изготовить образцы и подвергнуть их нагружению на испытательной машине. Существует два принципиально различных типа машин: рычажные и гидравлические. Если в некоторый момент времени приостановить процесс нагружения, то в рычажной машине будет поддерживаться процесс постоянства

напряжения при увеличивающейся деформации, т.е. $\sigma = \text{const}$, $\epsilon = \text{var}$. В гидравлической машине, наоборот, будет наблюдаться постоянство деформации при уменьшающемся напряжении, т.е. $\epsilon = \text{const}$, $\sigma = \text{var}$. Каждая из машин имеет свои достоинства и недостатки. Так как большинство деталей механизмов и элементов сооружений работают в режиме, близком к первому из рассмотренных, то рычажные испытательные машины дают возможность получить результаты, более адекватно отражающие реальные условия эксплуатации по сравнению с гидравлическими машинами. С другой стороны, гидравлические машины мощнее, компактнее и удобнее в эксплуатации, что весьма важно при проведении испытаний.

На рис. 1 показана принципиальная схема универсальной гидравлической машины Р-10. На ней можно проводить испытания образцов при растяжении, сжатии и изгибе. Максимальное усилие, развиваемое машиной, составляет 10 тс или 100 кН.

Испытательная разрывная машина Р-10 состоит из нескольких механизмов: двигательного, передаточного, исполнительного, регулирующего, управляющего. Каждый из механизмов скомпонован из нескольких узлов, в которые входят подвижные и неподвижные детали, называемые звеньями. Рассмотрим кратко состав механизмов и их функциональное предназначение.

I. Двигательный механизм. Он состоит из основного электродвигателя 1, предназначенного для работы масляного насоса 2, и вспомогательного электродвигателя, приводящего в движение червячно-винтовой механизм 7.

II. Передаточный механизм. Сюда входит система трубопроводов 3, соединяющих масляный насос 2 с цилиндром 10, в котором перемещается плунжер 12, передающий давление на поперечину 13, связанную с верхним захватом 8а.

III. Исполнительный механизм. Он состоит из верхнего 8а и нижнего 8б захватов, позволяющих приложить к образцу 9 растягивающее усилие. Для замыкания силовой цепи нижний захват 8б соединён червячно-винтовым механизмом 7 со станиной 6, связанной колоннами 5 с верхней траверсой 11, в которую жёстко вмонтирован рабочий цилиндр 10.

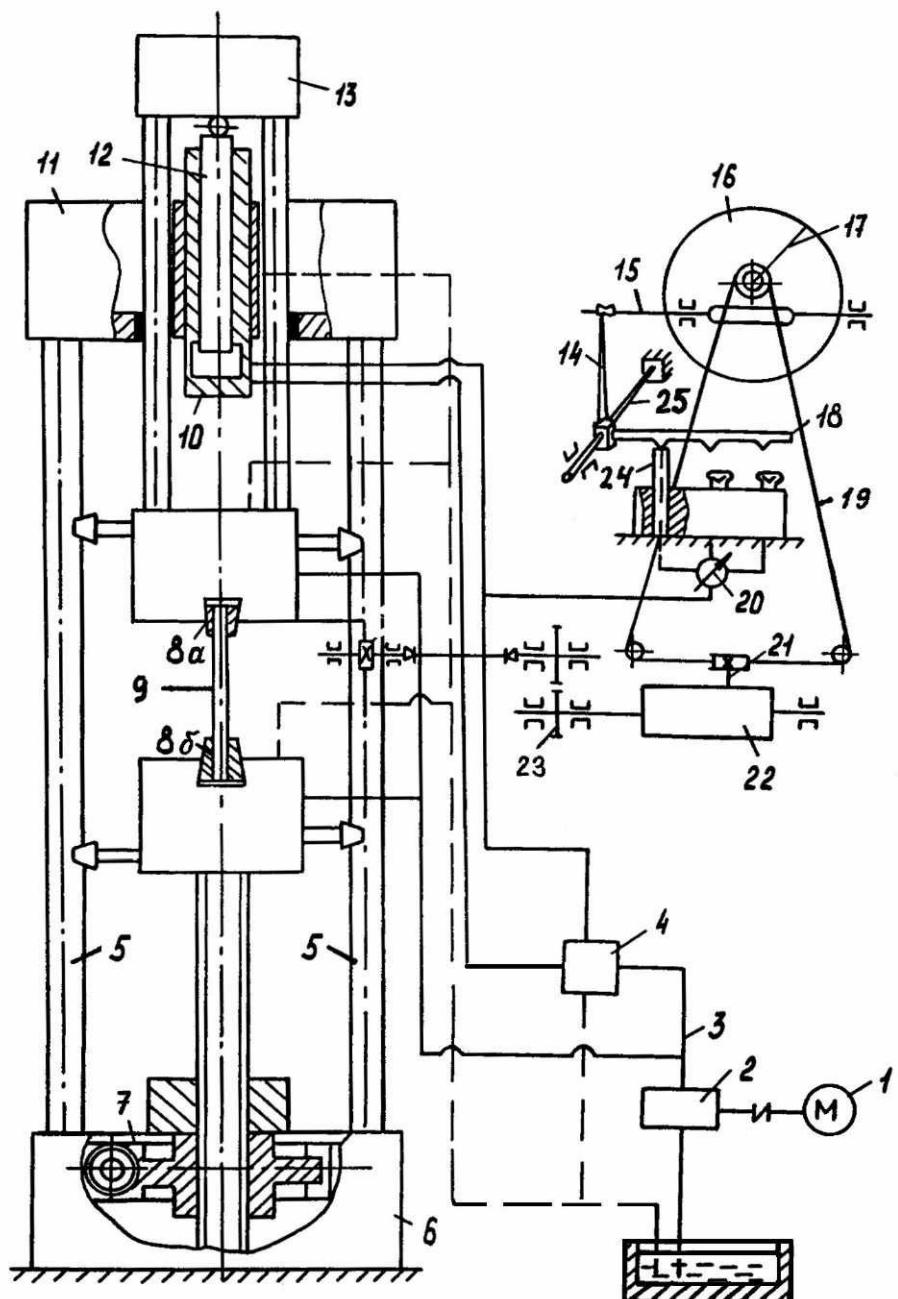


Рис. 1. Принципиальная схема разрывной машины Р-10:

- 1 – электродвигатель; 2 – масляный насос; 3 – трубопровод;
- 4 – регулятор давления; 5 – колонны; 6 – станина; 7 – червячно-винтовой механизм;
- 8_а – верхний захват; 8_б – нижний захват; 9 – образец; 10 – рабочий цилиндр;
- 11 – верхняя траверса; 12 – плунжер; 13 – поперечина;
- 14 – вторичный рычаг; 15 – зубчатая рейка; 16 – шкала; 17 – стрелка;
- 18 – первичный рычаг; 19 – трос; 20 – переключатель; 21 – перо;
- 22 – барабан; 23 – передача; 24 – плунжер силоизмерительного устройства; 25 – торсион

IV. Регистрирующий механизм. Он предназначен для визуального снятия приложенного в данный момент времени усилия на образец и фиксирования всего процесса нагружения. Силоизмерительное устройство состоит из трёх цилиндров с плунжерами 24, передающих давление на рычаги 18, 14, жёстко соединённые с торсионом 25. Рычаг 14 двигает зубчатую рейку 15, которая вращает стрелку 17 по шкале 16. Процесс нагружения образца непрерывно фиксируется с помощью диагностического аппарата, состоящего из барабана 22 с закреплённой бумагой и пера 21. Угловая скорость вращения барабана и, следовательно, перемещение пера по окружности пропорциональны удлинению образца. Перемещение пера вдоль образующей барабана пропорционально развиваемому усилию.

V. Управляющий механизм. Сюда входит электрическая схема (на рис. 1 не показана) с кнопками включения основного и вспомогательного двигателей, штурвал управления регулятором давления масла 4 в гидравлической системе и переключатель шкалы 16 силоизмерительного устройства.

Упругие и особенно механические характеристики материалов зависят от вида нагружения, а также от формы и размеров испытываемых образцов. Методика проведения испытаний предполагает выполнение принципа сравнимости результатов, получаемых в различных лабораториях. С этой целью ГОСТом регламентированы формы и размеры образцов для испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и кручение как при статическом, так и при динамическом нагружении.

Например, в соответствии с ГОСТ 1497-73 для испытаний на растяжение основным считается цилиндрический образец диаметром $d_0 = 20$ мм и расчётной длиной, равной 10 диаметрам, т.е. $l_0 = 200$ мм. Допускается также изготавливать пропорциональные образцы, когда $l_0 = 10d_0$, но $d_0 \neq 20$ мм, и укороченные образцы при $l_0 = 5d_0$. Для определения характеристик листовых материалов разрешается испытывать плоские образцы с прямоугольным поперечным сечением и расчётной длиной $l_0 = 11,3\sqrt{A_0}$, что эквивалентно соотношению $l_0 = 10d_0$ для образца круглого сечения.

При испытании на сжатие цилиндрические образцы изготавливают с соотношением габаритов $l_0 = 1,5d_0$. При испытаниях на кручение и изгиб ГОСТом также установлены формы и характер-

ные размеры образцов.

Скорость нагружения образцов существенно влияет на значения механических характеристик. В различных условиях эксплуатации реальные элементы конструкций и машин подвержены деформациям, скорость которых может изменяться от 10^{-10} до 10^6 с^{-1} . При статических испытаниях нормальной считается скорость нагружения, соответствующая скорости деформации порядка $0,01 \text{ мин}^{-1}$. При испытании на удар скорость деформации достигает 100 с^{-1} (10^4 мин^{-1}), что в миллион раз превышает скорость при статическом нагружении.

Измерение деформаций и перемещений

Напряжения как мера внутренних сил упругости, возникающих между взаимодействующими атомами, не могут быть измерены непосредственно. Напротив, деформации как мера взаимного перемещения точек твёрдого тела могут быть сравнительно легко измерены различными методами. Так как между напряжениями и деформациями установлена физическая зависимость, которая носит название закона Гука, то по измеренным деформациям можно вычислить напряжения. В этом смысле трактуется высказывание о первичности деформаций и вторичности напряжений. Обычно используется закон Гука при растяжении или сжатии в дифференциальной форме $\sigma = E\varepsilon$, где σ – нормальное напряжение; E – модуль упругости I рода; ε – относительная продольная деформация.

Так как деформации весьма малы, экспериментаторами разработаны чуткие приборы, позволяющие измерять деформации с точностью до 10^{-5} и выше. Одним из самых простых, но вместе с тем достаточно точных методов является метод электрического тензометрирования. В основе этого метода лежит принцип изменения активного сопротивления проводника R при его деформировании:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A}, \text{ или } \varepsilon_R = \varepsilon_\rho + \varepsilon_l - \varepsilon_A \cong \varepsilon_\rho + \varepsilon_l(1 + 2\mu),$$

где ρ – удельное сопротивление, зависящее от материала; Δl – изменение длины проводника; ΔA – изменение площади сечения проводника; μ – коэффициент Пуассона (упругая постоянная материала).

При растяжении проводника его длина увеличивается, а раз-

меры сечения уменьшаются, в результате чего его сопротивление увеличивается. Отношение относительного изменения сопротивления ε_R к относительной продольной деформации ε , называют коэффициентом тензочувствительности K . Для большинства применяемых материалов он приблизительно равен 2:

$$K = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon} \approx 2.$$

Тензодатчики изготавливают в основном двух видов: проволочные и фольговые. Схема проволочного датчика показана на рис. 2.

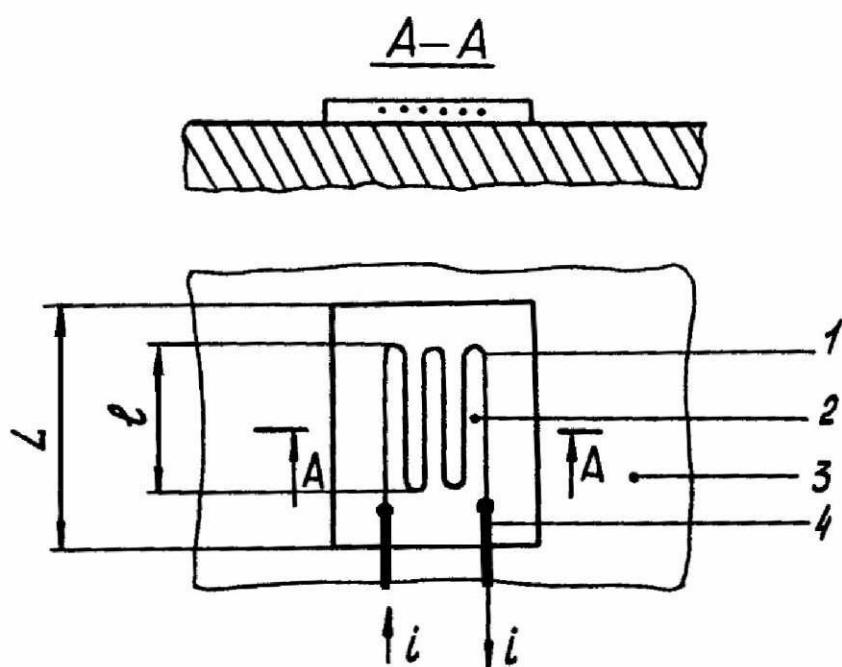


Рис. 2. Схема тензодатчика:

1 – проволочная решётка; 2 – бумажная подложка; 3 – исследуемый объект;
4 – выводы; L – длина датчика; l – база датчика

Проволочная решётка 1, состоящая из нескольких петель, закреплена с помощью клея на подложке 2, которая приклеивается к исследуемому объекту 3. К концам решёток припаяны выводы 4, с помощью которых тензодатчик подключается в измерительную схему, состоящую из моста Уинстона, усилителя и регистрирующего прибора (миллиамперметра или осциллографа).

На рис. 3 показана принципиальная упрощённая схема тензостанции ЦТМ-3 (цифровой тензометрический мост).

Четыре сопротивления соединены последовательно, образуя

мост Уинстона. Пассивное плечо моста, состоящее из двух регулируемых балансировочных сопротивлений R_B и R'_B , находится внутри прибора. Активное плечо моста образуется двумя тензодатчиками равного сопротивления. Активный датчик R_A наклеен на исследуемый объект, компенсационный датчик R_K наклеен на ненагруженную пластинку из того же материала, что и объект. Он служит для компенсации тех изменений сопротивления активного датчика, которые вызваны температурными деформациями.

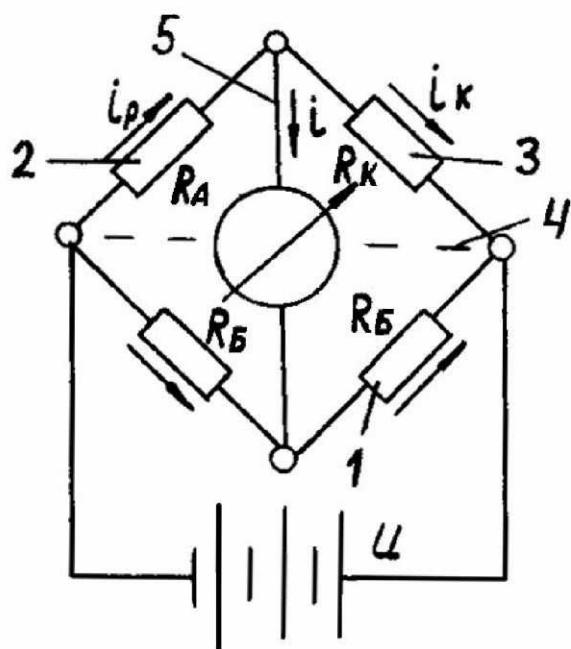


Рис. 3. Схема тензостанции:
 1 – балансировочные сопротивления; 2 – активный датчик;
 3 – компенсационный датчик; 4 – рабочая диагональ моста;
 5 – измерительная диагональ моста

При подаче напряжения U на рабочую диагональ моста в измерительной диагонали появляется ток i , который усиливается и регистрируется на цифровом табло тензостанции. Ток будет равен нулю только в том случае, если

$$\frac{R_A}{R_K} = \frac{R_B}{R'_B}.$$

Выполнив предварительную тарировку, устанавливают цену единицы младшего разряда цифрового табло Π_ε . Относительную деформацию, вызванную нагружением объекта исследования, находят по формуле

$$\varepsilon = \Pi_e \Delta T,$$

где ΔT – разность показаний цифрового табло после и до нагружения.

Перемещения отдельных точек деформируемого объекта измеряют индикаторами часового типа с точностью от 0,01 до 0,001 мм. Принцип их действия заключается в преобразовании поступательного движения штока, находящегося в соприкосновении с исследуемым объектом, во вращательное движение стрелки с помощью системы зубчатых колёс.

4. Правила оформления лабораторных работ

Каждую лабораторную работу оформляют отдельно на листах формата А-4 (210 x 297 мм) с соблюдением правил ЕСКД. Первая страница имеет вид, показанный на рис. 4, а. Промежуточные страницы оформляют согласно рис. 4, б. Последняя страница должна содержать данные об авторе работы и преподавателе (рис. 4, в). После выполнения и оформления лабораторных работ их подшивают в общий отчёт вместе с титульным листом (рис. 4, г).

Общий план оформления лабораторных работ:

1. Указывают цель данной лабораторной работы.
2. Приводят список используемого оборудования, приборов и измерительных инструментов.
3. Излагают кратко общие сведения о свойствах материалов, подлежащих определению, или приводят теоретические формулы и положения, подвергаемые экспериментальной проверке.
4. Показывают наиболее важные для понимания сущности работы рисунки и расчётные схемы.
5. Подготавливают протокол испытаний.
6. Проводят под руководством учебного мастера или преподавателя испытание материала или лабораторной установки и заносят необходимые данные в протокол испытаний.
7. Выполняют обработку экспериментальных данных.
8. Проводят необходимые теоретические расчёты.
9. При решении первой основной задачи определяют марку стали или сравнивают полученные характеристики со среднестатистическими данными. При решении второй основной задачи сравнивают между собой опытные и теоретические значения определяемых величин.

10. Делят выводы по работе, ориентируясь на поставленную цель.

Вычисление значений физических величин необходимо выполнять по следующей схеме, используя Международную систему единиц (СИ) :

вычисляем нормальное напряжение у поверхности балки

$$\sigma_r = \frac{M}{W_x} = \frac{2400}{400} = 6 \text{ МПа.}$$

Подстановка данных
в СИ

Обозначение единицы
физической величины

Сравнение результатов производят следующим образом. Сначала вычисляют расхождение двух значений в процентах по формуле

$$\delta(X) = \frac{X_{\text{оп}} - X_{\text{т}}}{X_{\text{оп}}} \cdot 100,$$

где $X_{\text{оп}}$ – опытное значение величины X ; $X_{\text{т}}$ – теоретическое или среднестатистическое значение величины X .

Затем в зависимости от полученного расхождения $\delta(X)$ делают вывод о степени согласования между собой среднестатистических данных или теории с экспериментом, придерживаясь следующей градации:

- $0 \leq \delta(X) \leq 5 \%$ – очень хорошее;
- $5 \% < \delta(X) \leq 10 \%$ – хорошее;
- $10 \% < \delta(X) \leq 30 \%$ – удовлетворительное;
- $30 \% < \delta(X) \leq 100 \%$ – неудовлетворительное.

Необходимо отметить, что указанная градация условна и связана как с неточностью теоретических формул, так и с ошибками экспериментов. Неточность теоретических выводов обусловлена введением целого ряда упрощающих гипотез и предположений. Ошибки экспериментов вызваны влиянием различных факторов, не

учитываемых при проведении опытов: погрешностями измерительных приборов и другими причинами.

Контрольные вопросы

1. Что изучает наука о сопротивлении материалов?
2. Какие глобальные методы использует наука о сопротивлении материалов?
3. Какие задачи решают теоретическим методом исследования?
4. Какие задачи решают экспериментальным методом исследования?
5. Что обозначает понятие «внешние нагрузки»?
6. Что обозначает понятие «внутренние силы»?
7. На какие виды подразделяют внутренние силы?
8. Что представляет собой кристаллическое строение металлов?
9. Какие силы не влияют на прочность материалов?
10. Когда возникают внутренние силы упругости?
11. Какой физический характер имеют внутренние силы упругости?
12. Чему равно среднее расстояние между узлами кристаллической решётки?
13. Чему равно среднее число внутренних сил упругости?
14. Что обозначает понятие «внутренние усилия»?
15. В чём состоят различия между понятиями «внутренние силы упругости» и «внутренние усилия»?
16. Как называют компоненты главного вектора сил упругости?
17. Как называют компоненты главного момента сил упругости?
18. Какие известны простые случаи нагружения?
19. Что обозначает понятие «напряжение»?
20. Как математически определяют понятие «напряжение»?
21. Какую единицу в СИ имеет напряжение?
22. На какие компоненты раскладывают полное напряжение в точке?
23. Как трактуют гипотезу об однородности материалов?
24. Что обозначает физическое понятие «континуум»?

25. Как называют компоненты полного напряжения?
26. Что обозначает понятие «перемещение»?
27. На какие виды подразделяют перемещения?
28. Что обозначает понятие «деформация»?
29. На какие виды подразделяют деформации?
30. Как математически определяют понятие «линейная деформация»?
 31. Как математически определяют понятие «угловая деформация»?
 32. На какие принципиальные типы подразделяют испытательные машины?
 33. Какой режим работы обеспечивает рычажная машина?
 34. Какой режим работы обеспечивает гидравлическая машина?
 35. Какие испытательные машины дают более адекватные результаты?
 36. Почему используют в основном гидравлические машины?
 37. Из каких основных механизмов состоит разрывная машина Р-10?
 38. Какие требования предъявляет ГОСТ к образцам для испытаний?
 39. Какую скорость нагружения обеспечивают при статическом испытании?
 40. Как трактуют высказывание о первичности деформаций и вторичности напряжений?
 41. Как записывают закон Гука в дифференциальной форме?
 42. В чём состоит сущность метода электрического тензометрирования?
 43. Как определяют коэффициент тензочувствительности?
 44. Что представляет собой мост Уинстона?
 45. Для чего служит компенсационный датчик?
 46. При каком условии будет равен нулю ток в измерительной диагонали моста Уинстона?
 47. Как измеряют перемещения точек деформируемого объекта?

Лабораторная работа № 1

ИСПЫТАНИЕ СТАЛИ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы: определение механических характеристик стали при растяжении и расшифровка её марки по результатам испытаний.

Оборудование и инструменты: универсальная гидравлическая машина Р-10, штангенциркуль.

Пояснения к работе

Механические характеристики материалов зависят от многих факторов: вида нагружения, времени воздействия нагрузки, скорости нагружения, температуры, радиации и др. Наиболее простыми являются испытания материалов при комнатной температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ и статическом нагружении, когда $d\varepsilon/dt \approx 0,01 \text{ мин}^{-1}$.

Механические характеристики делятся на три группы:

- характеристики прочности;
- характеристики пластичности;
- характеристики вязкости.

Характеристиками прочности измеряют силовую реакцию твёрдых тел на действие внешних нагрузок. Эта реакция непостоянна в процессе нагружения и в ней явно прослеживаются несколько характерных зон (см. диаграмму нагружения). К характеристикам прочности относятся: предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности, разрушающее напряжение. Дадим определение этих понятий в порядке возрастания значений их величин.

Предел пропорциональности – это наибольший уровень условного напряжения, при котором не наблюдается существенного нарушения закона Гука (каково удлинение, такова сила). Это напряжение определяют по формуле

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_0},$$

где F_{pr} – нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности; A_0 – первоначальная площадь поперечного сечения образца.

Предел упругости – это наибольший уровень условного напряжения, при котором материал проявляет упругие свойства, заключающиеся в том, что образец практически полностью восстанавливает свои первоначальные размеры после снятия внешней нагрузки. Его определяют по формуле

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0},$$

где F_e – нагрузка, соответствующая пределу упругости.

Предел текучести – это наименьший уровень условного напряжения, при котором наблюдается значительный рост деформаций образца при постоянной (или слегка уменьшающейся) нагрузке. Этот предел определяют по формуле

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_0},$$

где F_y – нагрузка, соответствующая пределу текучести.

Если в поведении материала не прослеживается площадка текучести (см. диаграмму нагружения) и стрелка силоизмерителя не останавливается на некоторый промежуток времени, то определяют условный предел текучести, соответствующий относительной деформации образца $\epsilon = 0,002$ или $0,2\%$:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}.$$

Предел прочности, чаще называемый временным сопротивлением, – это условное напряжение, соответствующее наибольшему уровню нагрузки, воспринимаемому образцом. Находят эту величину по формуле

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0},$$

где F_u – наибольшая нагрузка на образец.

Разрушающее напряжение – это напряжение, при котором происходит разрыв образца. Этот предел не имеет особого практического значения и используется только при изучении процесса образования трещин. Разрушающие напряжения делятся на условные и истинные:

$$\sigma_{fr}^c = \frac{F_{fr}}{A_0} - \text{условное}; \quad \sigma_{fr}^{tr} = \frac{F_{fr}}{A_1} - \text{истинное},$$

где F_{fr} – разрушающая нагрузка; A_1 – площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Так как первоначальная площадь A_0 приблизительно в два раза превышает площадь разрыва A_1 , а разрушающая нагрузка F_{fr} составляет приблизительно 80 % от наибольшей нагрузки F_u , то

$$\sigma_{fr}^c < \sigma_u; \quad \sigma_{fr}^{tr} > \sigma_u.$$

Характеристиками пластичности измеряют деформативную реакцию твёрдых тел, т.е. их способность изменять свои размеры под воздействием нагрузок. Пластичность материала характеризуют две величины:

относительное остаточное удлинение образца (в процентах)

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} 100;$$

относительное остаточное сужение поперечного сечения (в процентах)

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} 100.$$

В этих формулах l_0 , A_0 – длина расчётной части и площадь сечения до нагружения; l_1 , A_1 – то же после разрыва образца.

Характеристикой вязкости измеряют способность твёрдых тел сопротивляться импульсному и ударному воздействию нагрузок. Количественным показателем этой характеристики является удельная работа внешних сил, затрачиваемая на деформирование и разрушение единицы объёма материала:

$$w = \frac{W}{V_0},$$

где W – работа, совершаемая машиной на растяжение образца вплоть до его разрыва; $V_0 = A_0 l_0$ – объём расчётной части образца.

На рис. 1.1 показан эскиз пропорционального цилиндрического образца до нагружения и после его разрыва. Для захвата образца в разрывной машине служат цилиндрические головки, переход к

которым от рабочей части происходит плавно по конической поверхности.

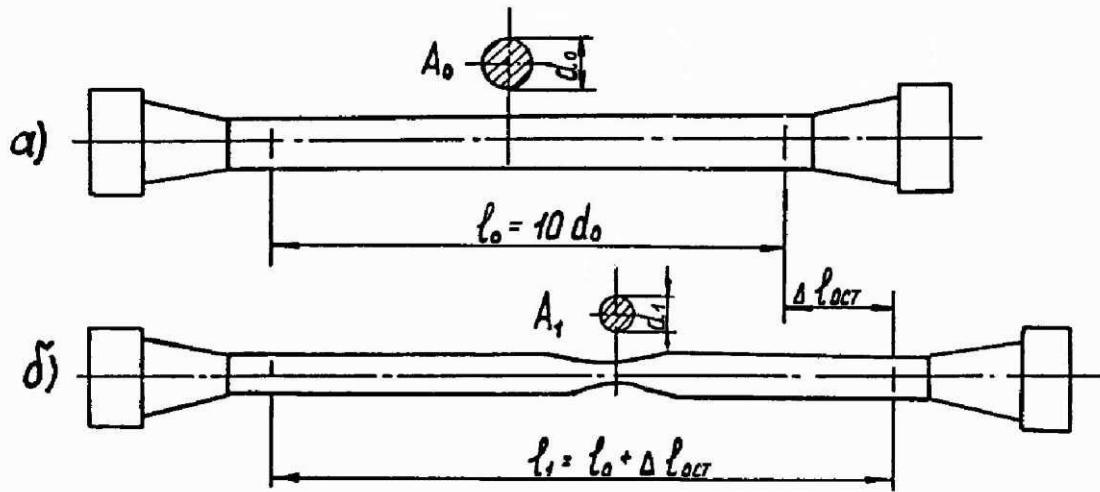


Рис. 1.1. Образец для испытания на растяжение:

а – до нагружения; *б* – после разрыва

На рис. 1.2 показан примерный вид параметрической диаграммы растяжения малоуглеродистой стали в координатах: абсолютное удлинение $\Delta l(t)$ – нагрузка $F(t)$. В качестве параметра здесь выступает время нагружения, которое для простоты обычно не показывают.

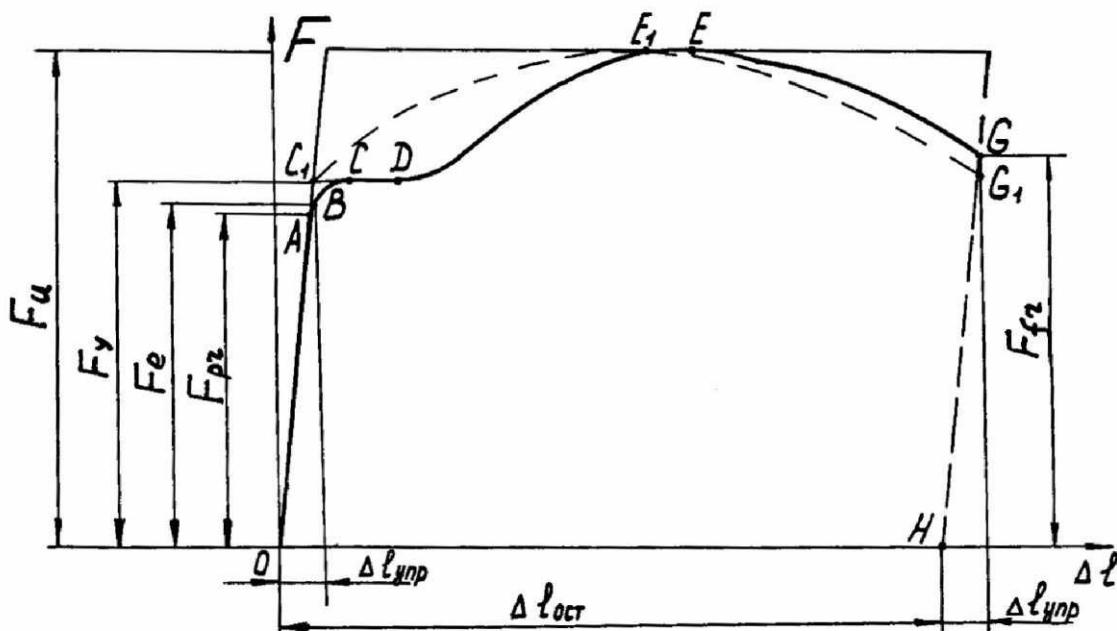


Рис. 1.2. Диаграмма растяжения образца

Так как испытание проводят на гидравлической машине, в которой деформация является первичной ($\frac{d\Delta l}{dt} = \text{const}$), а нагрузка вторичной ($\frac{dF}{dt} = \text{var}$), то осью абсцисс (аргументом) является абсолютное удлинение Δl , а осью ординат (функцией) – нагрузка F , т.е. фактически мы имеем зависимость $F = f(\Delta l)$, интерпретированную Гуком, проводившим опыты в упруго-пропорциональной зоне нагружения: «каково удлинение, такова сила». Однако в современной трактовке, с учётом того что в реальных условиях эксплуатации машин и сооружений первичной является нагрузка, функциональную зависимость обращают, полагая, что $\Delta l = f(F)$, и обсуждают, как изменяется деформация образца в зависимости от нагрузки (какова сила, таково удлинение).

На диаграмме растяжения $OABCDEG$ показаны 7 характерных точек, соответствующих определённому уровню нагрузки и ограничивающих 6 различных зон деформирования:

OA – зона пропорциональности (линейной упругости);

AB – зона нелинейной упругости;

BC – зона упругопластических деформаций;

CD – зона текучести (пластических деформаций);

DE – зона упрочнения;

EG – зона закритических деформаций.

На участке OA смещение атомов монокристаллов пропорционально приложенной нагрузке. Дефекты кристаллической решётки практически не проявляются.

На участке OB материал ведёт себя упруго. Поведение кристаллической решётки на участке AB характеризуется небольшой нелинейностью. Нужно заметить, что на участке пропорциональности OA материал ведёт себя одновременно и как абсолютно упругий (т. B всегда выше т. A).

На участке BC наблюдается нарастающая нелинейность в деформировании кристаллической решётки. Для выхода новых дислокаций (нарушений строения кристаллов) на поверхность монокристаллов требуется всё меньшее приращение внешней нагрузки ΔF .

На участке CD , называемом площадкой текучести, происходит лавинообразный выход дислокаций на поверхность, что приво-

дит к значительному удлинению образца при почти постоянном уровне нагрузки, когда $\Delta F \approx 0$.

На участке DE после выхода на поверхность большей части дефектов кристаллической решётки материал самоупрочняется, и образец всё ещё способен воспринимать некоторое приращение нагрузки. Однако расстояние между атомами постепенно достигает критического значения (приблизительно в два раза больше первоначального), за которым происходит «разрыв» внутренних связей. При подходе к т. E деформации начинают локализоваться в области наиболее слабого сечения, где зарождается шейка образца.

На участке EG заканчивается формирование шейки. Происходит лавинообразное разрушение связей, когда процесс деформирования уже необратим и временное равновесие между внутренними силами и внешней нагрузкой возможно только при уменьшении последней. В т. G происходит разрыв образца. Его размеры восстанавливаются на величину упругой деформации, которая на 2 – 3 порядка меньше остаточных пластических деформаций.

Проведение испытаний и обработка опытных данных

Испытание образца на растяжение проводят в следующем порядке:

- измеряют штангенциркулем диаметр d_0 образца в 3 – 5 местах по длине и записывают его наименьшее значение в протокол испытания (табл. 1);
- намечают на поверхности образца начало и конец расчётной длины $l_0 = 10d_0$ и записывают её значение в протокол испытания;
- устанавливают образец в захваты испытательной машины Р-10, создают незначительное натяжение путём опускания нижнего захвата и настраивают силоизмерительное устройство на нулевую нагрузку;
- закрепляют бумагу на барабан диаграммного устройства и опускают на неё перо;
- включают основной электродвигатель и регулируют первоначальную скорость нагружения приблизительно 20 кгс/с, наблюдая за движением стрелки;

- фиксируют показание стрелки силоизмерителя во время её остановки и записывают в протокол испытания значение нагрузки F_y , соответствующей пределу текучести;
- фиксируют наибольшее отклонение стрелки и записывают в протокол испытания значение нагрузки F_u , соответствующей пределу прочности;
- фиксируют показание стрелки в момент разрыва образца и записывают в протокол испытания значение нагрузки F_{fr} , соответствующей разрушающему напряжению;
- вынимают части образца из захватов машины и, плотно приложив их друг к другу, измеряют наименьший диаметр d_1 шейки образца и расчётную длину l_1 и записывают их значения в протокол испытания;
- снимают бумагу с диаграммного аппарата и проводят координатные оси Δl и F ;
- измеряют ординаты диаграммы h_{pr} и h_u , соответствующие нагрузкам F_{pr} и F_u ;
- вычисляют приблизительное значение нагрузки F_{pr} , соответствующей пределу пропорциональности:

$$F_{pr} \cong \frac{h_{pr}}{h_u} F_u;$$

- находят приблизительное значение нагрузки F_e , соответствующей пределу упругости:

$$F_e \cong 1,02 F_{pr};$$

- вычисляют площади сечения до испытания и после разрыва:

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}; \quad A_1 = \frac{\pi d_1^2}{4};$$

- вычисляют все характеристики прочности:
 - предел пропорциональности σ_{pr} ;
 - предел упругости σ_e ;
 - предел текучести σ_y ;
 - предел прочности σ_u ;
 - разрушающее напряжение условное σ_{fr}^c ;

разрушающее напряжение истинное σ_{fr}^r ;

- определяют характеристики пластиичности: относительное остаточное удлинение δ ; относительное остаточное сужение ψ ;
- находят полную работу деформации, численно равную площади диаграммы растяжения:

$$W = (l_1 - l_0)(F_y + 2F_u)/3;$$

- вычисляют характеристику вязкости:

$$\text{удельная работа деформации } w = \frac{W}{A_0 l_0};$$

- устанавливают марку стали, используя таблицу приложения (с. 67). При выборе марки принимают ту строку, которая наиболее точно подходит по трём характеристикам: пределу текучести, пределу прочности и относительному удлинению (относительному сужению);
- делают вывод в форме, соответствующей поставленной цели лабораторной работы.

Таблица 1

Протокол испытания образца на растяжение

Диаметр образца, мм		Расчётная длина, мм		Нагрузка, соответствующая					
				текучести F_y		прочности F_u		разрушению F_{fr}	
d_0	d_1	l_0	l_1	кгс	Н	кгс	Н	кгс	Н

Контрольные вопросы

1. Какова цель данной лабораторной работы?
2. Какое оборудование используют при выполнении работы?
3. От каких факторов зависят механические характеристики материалов?
4. На какие группы делят механические характеристики?
5. Какую реакцию твёрдых тел измеряют механическими характеристиками прочности?
6. Что относят к характеристикам прочности?
7. Как определяют понятия: предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности (временное сопротивление), разрушающее напряжение?

8. Как отличают истинное разрушающее напряжение от условного?
9. Какую реакцию твёрдых тел измеряют характеристиками пластичности?
10. Что относят к характеристикам пластичности?
11. Как вычисляют характеристики пластичности?
12. Какую способность твёрдых тел измеряют характеристикой вязкости?
13. Что является количественным показателем вязкости материала?
14. Какими размерами характеризуют пропорциональный образец?
15. В каких координатах строят диаграмму растяжения?
16. Почему диаграмму растяжения следует называть параметрической?
17. Почему за ось абсцисс при построении диаграммы растяжения принимают абсолютное удлинение?
18. С какой целью обращают функциональную зависимость нагрузки от удлинения?
19. Какой вид имеет диаграмма растяжения малоуглеродистой стали?
20. Сколько характерных зон деформирования имеет диаграмма растяжения?
21. Как называют зоны деформирования диаграммы растяжения?
22. Как проходит процесс деформирования на различных участках диаграммы?
23. Какой точке диаграммы растяжения соответствует момент зарождения шейки образца?
24. На какую величину восстанавливаются размеры образца после его разрыва?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ СТАЛИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Цель работы: экспериментальное определение модуля Юнга и коэффициента Пуассона, а также косвенное определение модуля сдвига при растяжении стального образца.

Оборудование и инструменты: универсальная гидравлическая машина Р-10, тензостанция ЦТМ-3, штангенциркуль.

Пояснения к работе

Упругие постоянные материалов используются при решении большого числа задач прочности и всех задач жёсткости и устойчивости. Они характеризуют способность материала сопротивляться различным видам деформаций при воздействии на них внешних нагрузок. Значения упругих характеристик, равно как и всех известных физических постоянных, не могут быть постулированы или найдены на основе логических и математических рассуждений, а могут быть получены только экспериментальным путём при испытании образцов на растяжение (сжатие), изгиб и кручение.

Различают материалы изотропные и анизотропные. Изотропия означает независимость свойств материала от направления воздействия нагрузки. Изотропные материалы характеризуются тремя упругими постоянными: модулем Юнга, коэффициентом Пуассона и модулем сдвига. При этом, как показывает теория, только две из них являются линейно независимыми. Анизотропные материалы могут иметь до 18 различных характеристик.

Монокристаллы и отдельные зёрна сталей анизотропны. Однако, благодаря их малости и хаотическому расположению в пространстве сталь приобретает статистически обоснованную изотропность и нуждается в экспериментальном определении, как минимум, двух упругих постоянных (например, модуля Юнга и коэффициента Пуассона).

Модуль Юнга или модуль упругости первого рода E характеризует сопротивляемость материала деформированию в направлении воздействия растягивающих или сжимающих нагрузок. Чем больше модуль Юнга, тем меньше удлинение или укорочение

стержня при прочих равных условиях (длине, площади, нагрузке). Модуль Юнга является коэффициентом пропорциональности между нормальным напряжением σ и относительной линейной деформацией ϵ в законе Гука, записанном в дифференциальной форме: $\sigma = E\epsilon$. На основе этой формулы находят опытным путём значение модуля упругости

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon},$$

где $\sigma = F / A$ – формула для напряжения при растяжении, подтверждённая теорией упругости (эталоном точности для сопротивления материалов) и опытными данными; F – сила, растягивающая образец и определяемая по силоизмерительному устройству; A – площадь поперечного сечения, определяемая путём измерения размеров; ϵ – относительная продольная деформация, определяемая методом электрического тензометрирования.

Коэффициент Пуассона μ характеризует способность материала сопротивляться поперечному деформированию, т.е. изменению размеров в направлении, перпендикулярном действию силы. Это сопротивление французский академик Пуассон предложил характеризовать в безразмерной форме как модуль отношения поперечной ϵ' и продольной ϵ относительных деформаций, определяемых опытным путём:

$$\mu = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right|.$$

Модуль сдвига или модуль упругости второго рода G характеризует сопротивляемость материала угловым деформациям при воздействии пары сил. Он является коэффициентом пропорциональности между касательным напряжением τ и углом сдвига γ в законе Гука при сдвиге, записанном в дифференциальной форме: $\tau = G\gamma$. На основе этой формулы можно экспериментально определить модуль сдвига, например, при кручении образца круглого сечения. В данной работе модуль сдвига определяют косвенным путём, исходя из теоретической зависимости между тремя упругими постоянными:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

Упругие постоянные материала имеют более стабильные значения по сравнению с механическими характеристиками. Напри-

мер, для различных марок сталей временное сопротивление может отличаться в несколько раз (от 400 до 4000 МПа и выше), в то время как среднестатистические значения упругих постоянных для всех марок сталей изменяются в узких пределах:

$$E = (1,9 - 2,1) \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \mu = 0,25 - 0,30; \quad G = (0,75 - 0,85) \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

В лабораторной работе необходимо произвести сравнение полученных значений постоянных со средними справочными данными для стали:

$$\bar{E} = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \bar{\mu} = 0,284; \quad \bar{G} = 0,8 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

На рис. 2.1 показан эскиз образца с наклеенными активными тензодатчиками.

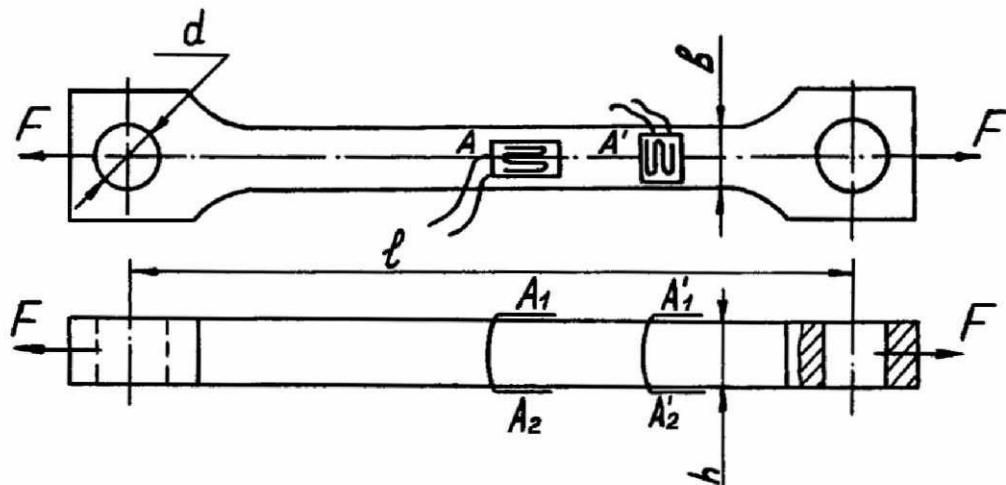


Рис. 2.1. Образец для определения упругих постоянных

Этот образец подвергают нагрузжению, близкому к осевому растяжению, в пределах пропорциональности на гидравлической машине Р-10. Для измерения продольной относительной деформации ε служат активные датчики A_1 и A_2 , а для измерения поперечной относительной деформации ε' – активные датчики A'_1 и A'_2 . Тензодатчики наклеены попарно на противоположных гранях плоского образца и соединены последовательно с той целью, чтобы исключить влияние изгибных деформаций, которые возникают вследствие нестрогого осевого растяжения образца на испытательной машине. При последовательном соединении каждой пары активных датчиков положительная изгибная деформация одной грани (растяжение) компенсируется такой же по величине, но отрицательной деформацией другой грани (сжатием) с автоматическим выделени-

ем «чистой» деформации растяжения от идеально осевой нагрузки (рис. 2.2).

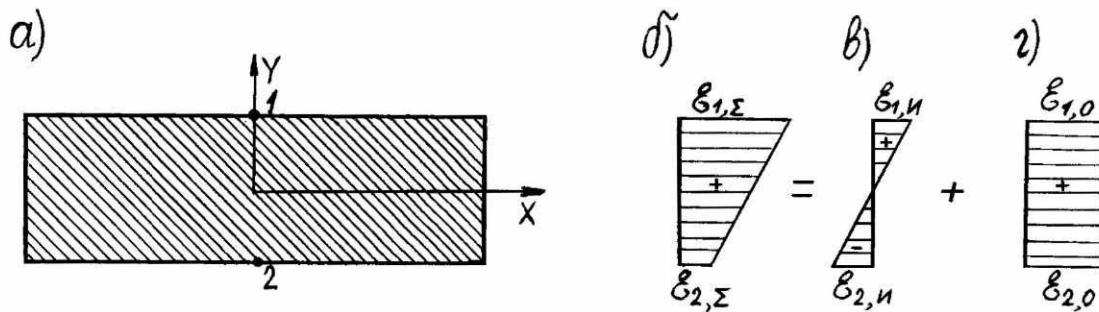


Рис. 2.2. Схема выделения осевой деформации образца:
 а – сечение образца; б – эпюра суммарных деформаций;
 в – эпюра «паразитических» изгибных деформаций;
 г – эпюра «чистых» осевых деформаций

Проведение испытаний и обработка опытных данных

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- измеряют штангенциркулем размеры b и h поперечного сечения образца в месте наклейки тензодатчиков;
- устанавливают образец в захватах испытательной машины и создают небольшое натяжение;
- включают тензостанцию для прогрева в течение 10 мин;
- нагружают образец условно нулевой силой $F_0 = 200$ кгс, берут первоначальные отсчеты T_0 , T'_0 по каждому из датчиков и записывают их в протокол испытания (табл. 2);
- дают приращение нагрузки $\Delta F = 2000$ кгс, берут соответствующие отсчеты T_F , T'_F и записывают их в протокол испытания;
- разгружают образец до нулевой нагрузки;
- находят разность показаний тензодатчиков:

$$\Delta T = T_F - T_0; \quad \Delta T' = T'_F - T'_0;$$

- находят относительные продольную и поперечную деформации, соответствующие приращению нагрузки $\Delta F = 2000$ кгс:

$$\varepsilon = \Delta T_{cp} \cdot 10^{-5}; \quad \varepsilon' = \Delta T'_{cp} \cdot 10^{-5};$$

- вычисляют площадь сечения и нормальное напряжение, возникающее от приращения нагрузки $\Delta F = 19600$ Н:

$$A = bh; \quad \sigma = \frac{\Delta F}{A};$$

- определяют опытное значение модуля Юнга $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$;
 - определяют опытное значение коэффициента Пуассона $\mu = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right|$;
 - вычисляют косвенное значение модуля сдвига $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$;
 - производят сравнение полученных значений упругих постоянных со средними справочными значениями для стали:
- $$\delta(E) = \frac{E - E'}{E} \cdot 100; \quad \delta(\mu) = \frac{\mu - \mu'}{\mu} \cdot 100; \quad \delta(G) = \frac{G - G'}{G} \cdot 100;$$
- делают выводы по работе.

Таблица 2

Протокол испытания образца на растяжение

Нагрузка F , кгс	Показания тензодатчиков		Приращение нагрузки ΔF		Разность показаний тензодатчиков	
	T_F	T'_F	кгс	Н	ΔT_i	$\Delta T'_i$
200						
2200			2000	19600		

Контрольные вопросы

1. Какова цель данной лабораторной работы?
2. Что такое изотропия материалов?
3. Какие упругие постоянные характеризуют изотропные материалы?
4. Сколько линейно независимых упругих постоянных имеют изотропные материалы?
5. Как можно характеризовать сталь по её монокристаллическому и поликристаллическому строению?
6. Какие свойства материала характеризует модуль Юнга?
7. Как записывают закон Гука при растяжении или сжатии в дифференциальной форме?
8. Как находят модуль Юнга?
9. Как вычисляют напряжение при растяжении?
10. Как определяют относительную продольную деформацию опытным путём?

11. Какие свойства материала характеризует коэффициент Пуассона?
12. Как вычисляют коэффициент Пуассона?
13. Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?
14. Как записывают закон Гука при сдвиге в дифференциальной форме?
15. Какая зависимость существует между упругими постоянными изотропного материала?
16. Какие средние значения имеют упругие постоянные стали?
17. С какой целью соединяют последовательно датчики, на克莱енные на противоположных гранях образца?
18. Какие деформации могут внести существенные погрешности в результате опыта?

Лабораторная работа № 3

КРУЧЕНИЕ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЫ

Цель работы: экспериментальное определение модуля сдвига и проверка теоретической формулы для касательного напряжения при кручении.

Оборудование и инструменты: экспериментальная установка СМ-14М, тензостанция ЦТМ-3, индикатор часового типа, штангенциркуль.

Пояснения к работе

В теории кручения цилиндрических стержней получены формулы для определения угла закручивания φ и касательного напряжения τ в поперечном сечении:

$$\varphi = \frac{M_k l}{G J_p}; \quad (3.1)$$

$$\tau = \frac{M_k}{J_p} \rho, \quad (3.2)$$

где M_k – крутящий момент; l – длина стержня; G – модуль сдвига; J_p – полярный момент инерции сечения; ρ – расстояние от геометрической оси до точки, в которой определяется напряжение.

Модуль сдвига можно определить из формулы (3.1), если опытным путём найти угол закручивания и крутящий момент, а также измерить характерные размеры стержня:

$$G = \frac{M_k l}{\varphi J_p}.$$

Зная модуль сдвига, касательное напряжение можно определить по закону Гука:

$$\tau = G \gamma,$$

если опытным путём найти угол сдвига γ . Однако до настоящего времени ещё не разработан метод непосредственного экспериментального определения этого угла в силу его малости ($\gamma \approx 0,0001 \text{ рад} \approx 0,005^\circ$). Поэтому угол сдвига определяют косвен-

ным путём, используя метод электрического тензометрирования, в котором регистрируют относительные продольные деформации.

Опыт проводят на установке, схема которой изображена на рис. 3.1.

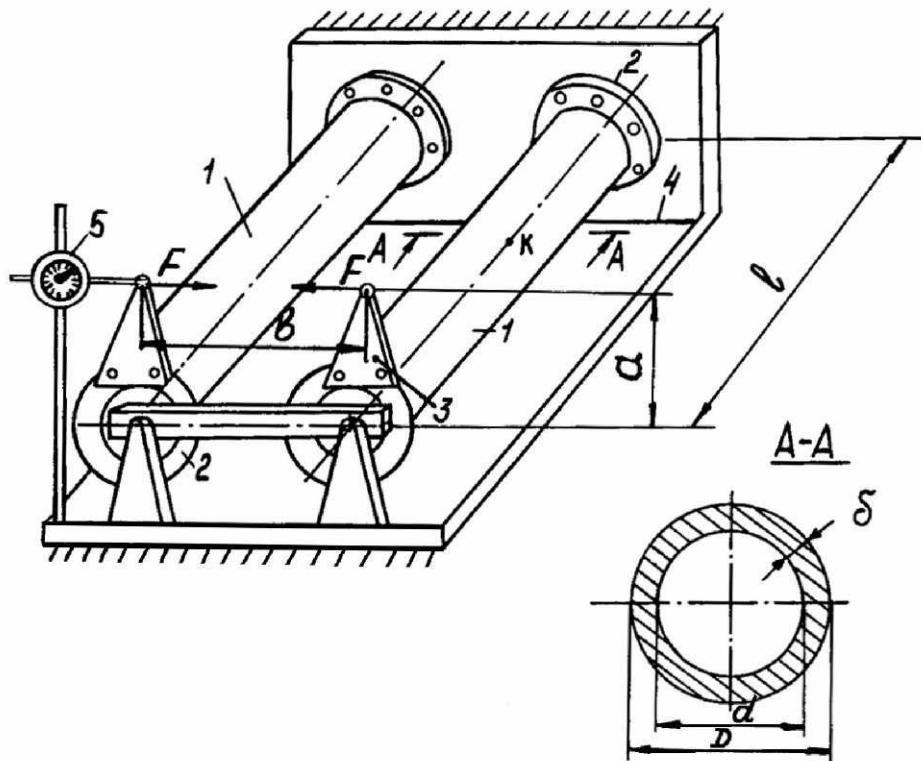


Рис. 3.1. Принципиальная схема экспериментальной установки СМ-14М:
1 – тонкостенная труба; 2 – фланец; 3 – рычаг; 4 – плита;
5 – индикатор часового типа

Две одинаковые тонкостенные трубы 1 с помощью фланцев 2 жёстко закреплены на плите 4. К свободным концам труб с помощью рычагов 3 прикладывают силу F , создающую скручивающие моменты. В окрестности т. K на поверхности трубы наклеены 2 тензодатчика под углом 90° друг к другу и 45° к образующей цилиндрической поверхности, параллельной продольной оси трубы (рис. 3.2).

Если мысленно выделить из трубы двумя поперечными и двумя меридиональными сечениями элемент $abcd$, то он будет находиться в условиях чистого сдвига, когда на его боковых гранях (площадках чистого сдвига) действуют только касательные напряжения τ (рис. 3.3).

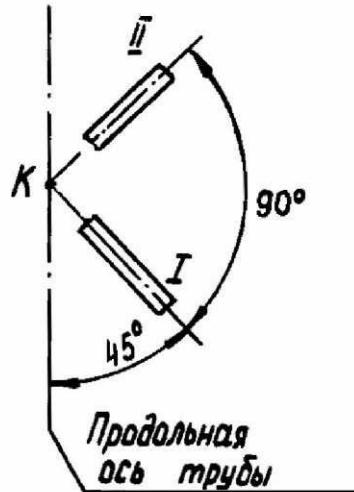


Рис. 3.2. Схема наклейки тензодатчиков на поверхности трубы

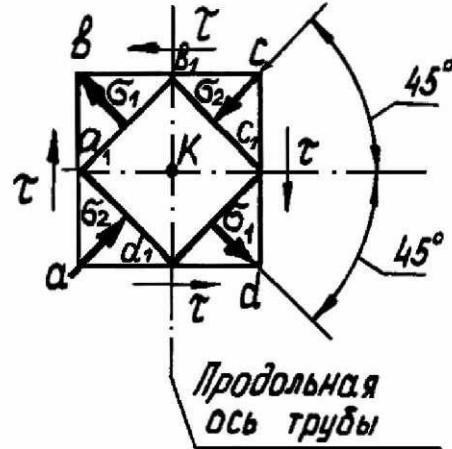


Рис. 3.3. Напряжённое состояние в окрестности точки K на поверхности трубы

Повернув эти площадки на 45° , получим главные площадки (главный элемент $a_1 b_1 c_1 d_1$), ориентируемые вдоль направлений тензодатчиков. На главных площадках действуют только нормальные напряжения: σ_1 – наибольшее растягивающее напряжение, σ_2 – наименьшее (в алгебраическом смысле) сжимающее напряжение.

Главные напряжения можно вычислить по формулам обобщённого закона Гука:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1),$$

где $E = 2,04 \cdot 10^5$ МПа – модуль Юнга материала трубы (сталь 10); $\mu = 0,27$ – коэффициент Пуассона; ε_1 и ε_2 – относительные деформации, фиксируемые тензодатчиками.

Экстремальные касательные напряжения согласно теории плоского напряжённого состояния определяют по формуле

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = G(\varepsilon_1 - \varepsilon_2).$$

Угол сдвига, соответствующий касательным напряжениям, $\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$.

Угол закручивания трубы в силу его малости можно вычислить из отношения

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\Delta b}{a} \cong \frac{\Delta b}{a},$$

где Δb – горизонтальное перемещение т. F рычага 3, фиксируемое индикатором часового типа 5 (см. рис. 3.1); a – длина рычага.

Проведение испытаний и сравнительный анализ опытных и теоретических результатов

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- измеряют размеры трубы D, d, l и длину рычага a (рис. 3.1);
- включают тензостанцию для прогрева в течение 10 мин;
- нагружают трубу начальной силой $F_0 = 50$ кгс для устранения всех зазоров и люфтов в установке. Берут отсчёты по шкале индикатора I_0 и цифровому табло тензостанции $T_{1,0}, T_{2,0}$ и записывают их в протокол испытания (табл. 3);
 - дают приращение нагрузки $\Delta F = 400$ кгс и записывают в протокол испытания соответствующие показания $I_F, T_{1,F}$ и $T_{2,F}$;
 - находят разность показаний приборов:

$$\Delta I = I_F - I_0; \quad \Delta T_1 = T_{1,F} - T_{1,0}; \quad \Delta T_2 = T_{2,F} - T_{2,0};$$

- вычисляют угол закручивания трубы в радианах

$$\varphi = \frac{\Delta I}{a};$$

- находят значение крутящего момента

$$M_k = \Delta F a;$$

- вычисляют полярный момент инерции сечения трубы

$$J_p = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4);$$

- находят опытное значение модуля сдвига

$$G_{\text{оп}} = \frac{M_k l}{\varphi J_p};$$

- определяют косвенное значение модуля сдвига по данным завода-изготовителя $E = 2,04 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,27$:

$$G_k = \frac{E}{2(1+\mu)};$$

- сравнивают полученные значения модуля сдвига

$$\delta(G) = \frac{G_{\text{оп}} - G_k}{G_{\text{оп}}} \cdot 100;$$

- вычисляют значения относительных деформаций, принимая $\Pi_\varepsilon = 1 \cdot 10^{-5}$:

$$\varepsilon_1 = \Delta T_1 \Pi_\varepsilon; \quad \varepsilon_2 = \Delta T_2 \Pi_\varepsilon;$$

- находят опытное значение угла сдвига

$$\gamma_{\text{оп}} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2;$$

- определяют опытное значение касательного напряжения

$$\tau_{\text{оп}} = G_{\text{оп}} \gamma_{\text{оп}};$$

- определяют теоретическое значение касательного напряжения

$$\tau_t = \frac{M_k}{J_p} \cdot \frac{D}{2};$$

- сравнивают полученные значения напряжения

$$\delta(\tau) = \frac{\tau_{\text{оп}} - \tau_t}{\tau_{\text{оп}}} \cdot 100;$$

- делают выводы по работе.

Таблица 3

Протокол испытания тонкостенной трубы на кручение

Нагрузка F , кгс	Показания приборов			Приращение нагрузки ΔF		Разность показаний		
	И, мм	T_1	T_2	кгс	Н	ΔI , мм	ΔT_1	ΔT_2
50								
450				400	3920			

Контрольные вопросы

1. Какова цель данной лабораторной работы?
2. Как определяют угол закручивания?
3. Как определяют касательное напряжение при кручении цилиндрических стержней?
4. Как опытным путём находят модуль сдвига?
5. Как опытным путём находят касательное напряжение?
6. Какое напряжённое состояние называют чистым сдвигом?
7. Какое напряжённое состояние соответствует главному элементу?
8. Чем отличаются площадки чистого сдвига от главных площадок?

9. Как ориентирован элемент чистого сдвига в тонкостенной трубе?
10. Как ориентирован главный элемент в тонкостенной трубе?
11. Как наклеены тензодатчики на поверхности трубы?
12. Как записывают формулы обобщённого закона Гука?
13. Как определяют экстремальные касательные напряжения при плоском напряжённом состоянии?
14. Как определяют угол сдвига при плоском напряжённом состоянии?
15. Как опытным путём находят угол закручивания трубы?
16. Как находят значение крутящего момента?
17. Как вычисляют полярный момент инерции сечения трубы?
18. Как определяют значение модуля сдвига косвенным путём?

Лабораторная работа № 4

ПЛОСКИЙ ИЗГИБ БАЛКИ

Цель работы: экспериментальная проверка формул для нормального напряжения и перемещения при плоском изгибе балки.

Оборудование и инструменты: экспериментальная установка СМ-4М, тензостанция ЦТМ-3, индикаторы часового типа, штангенциркуль.

Пояснения к работе

В основе теории чистого изгиба, когда во всех сечениях балки поперечная сила равна нулю, лежит гипотеза плоских сечений: поперечные сечения балки, будучи плоскими до нагружения, остаются плоскими и после нагружения, поворачиваясь относительно нейтральной линии, разделяющей сжатую и растянутую области сечения. С использованием этой гипотезы получена теоретическая формула для нормального напряжения σ :

$$\sigma = -\frac{M}{J_x} y, \quad (4.1)$$

где M – изгибающий момент в поперечном сечении; J_x – осевой момент инерции сечения балки; y – расстояние от точки, в которой определяется напряжение, до оси X , проходящей через центр тяжести сечения.

Чистый изгиб в инженерной практике встречается редко, гораздо чаще балки испытывают поперечный изгиб ($Q \neq 0$), при котором гипотеза плоских сечений нарушается вследствие сдвиговых деформаций, вызванных касательными напряжениями (см. лаб. работу № 3). Теоретические оценки погрешности формулы (4.1), распространяемой на случай поперечного изгиба, показывают, что ошибки редко превышают 5 %. В данной работе необходимо опытным путём убедиться в приемлемости формулы (4.1) для инженерных расчётов.

Перемещения поперечных сечений балок определяют путём решения приближённого дифференциального уравнения изогнутой оси

$$v''(z) \equiv \frac{M(z)}{EJ_x},$$

где $v(z)$ – прогиб балки, т.е. линейное перемещение центра тяжести сечения по перпендикуляру к геометрической оси; $M(z)$ – изгибающий момент в сечении z балки; E – модуль Юнга; J_X – осевой момент инерции поперечного сечения.

После интегрирования уравнения (4.1) получают выражения для угла поворота сечения относительно нейтральной линии и прогиба:

$$\theta(z) = v'(z) = \int \frac{M(z)}{EJ_X} dz + C,$$

$$v(z) = \int \left(\int \frac{M(z)}{EJ_X} dz \right) dz + Cz + D.$$

Здесь C и D – постоянные интегрирования, которые определяют из граничных условий, зависящих от способа опирания балки.

Учёные разработали упрощённые методы определения перемещений, к которым можно отнести метод начальных параметров и метод Мора. Эти методы подробно рассматривают на лекциях и используют при выполнении домашних заданий. В данной работе необходимо проверить справедливость формул для прогибов и углов поворота при частном случае нагружения балки.

На рис. 4.1 показана конструктивная схема установки СМ-4М для исследования напряжений и перемещений двухопорной балки.

Стержень 2 прямоугольного поперечного сечения установлен на шарнирных опорах 1. Нагружение балки осуществляют с помощью платформы с грузом 5. Для определения нормального напряжения на горизонтальных гранях среднего сечения наклеены два тензодатчика 4, подключённые в смежные плечи полумоста Уинстона. Так как они фиксируют деформации разных знаков (верхний – сжатие, нижний – растяжение), то тензостанция регистрирует удвоенную относительную деформацию, что необходимо учитывать при обработке результатов опыта.

Для определения прогиба среднего сечения балки используют индикатор часового типа 3. Поскольку угол поворота опорного сечения достаточно мал, его определяют косвенным путём с помощью индикатора 6, регистрирующего горизонтальное перемещение конца рычага 7, жёстко соединённого с балкой. Угол поворота находят как отношение перемещения рычага w к его длине c :

$$\theta \cong \operatorname{tg}\theta = \frac{w}{c}.$$

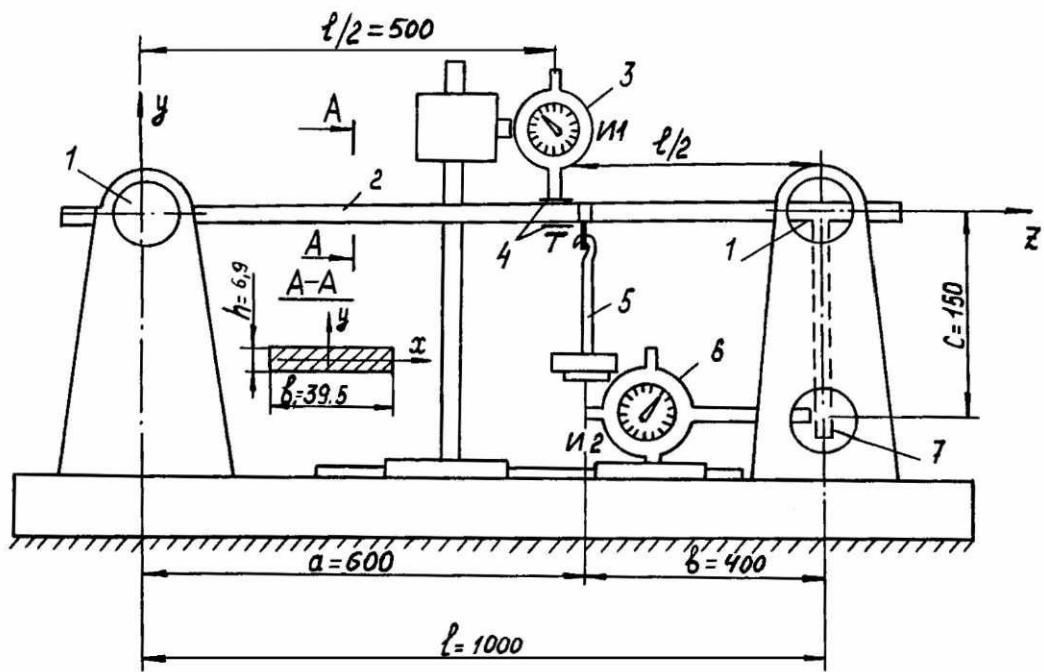


Рис. 4.1. Конструктивная схема установки СМ-4М:
1 – шарнирные опоры; 2 – балка; 3, 6 – индикаторы часового типа;
4 – тензодатчики; 5 – грузовая платформа; 7 – рычаг

На рис. 4.2 изображена расчётная схема балки, пользуясь которой определяют опорные реакции и строят эпюру изгибающих моментов. Формулы для прогиба и угла поворота записывают из справочника.

Проведение испытаний и сравнительный анализ опытных и теоретических результатов

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- измеряют штангенциркулем геометрические параметры балки: b_1 , h , l , a , b , c ;
- включают тензостанцию для прогрева в течение 10 мин;
- нагружают балку начальной силой $F_0 = 0,5$ кгс для устранения зазоров и люфтов. Записывают в протокол испытания (табл. 4) показания тензодатчика T_0 и индикаторов часового типа $I_{1,0}$, $I_{2,0}$;
- дают приращение нагрузки $\Delta F = 2$ кгс и записывают в протокол испытания изменившиеся показания T_F , $I_{1,F}$ и $I_{2,F}$;
- находят разность показаний приборов:

$$\Delta T = T_F - T_0; \quad \Delta I_1 = I_{1,F} - I_{1,0}; \quad \Delta I_2 = I_{2,F} - I_{2,0};$$

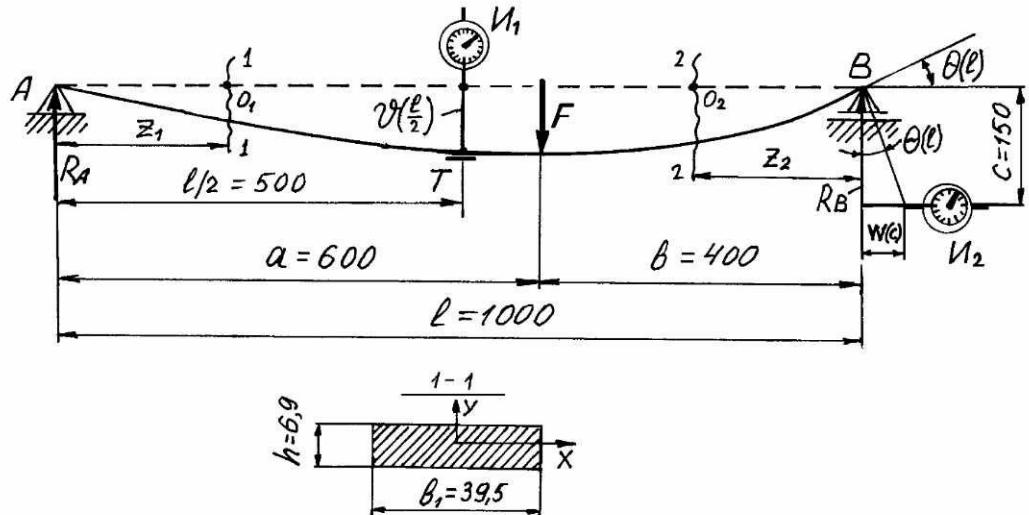


Рис. 4.2. Расчётная схема балки:

А – шарнирно-неподвижная опора; В – шарнирно-подвижная опора;
 F – внешняя активная нагрузка; Т – тензодатчики; И – индикаторы часового
 типа; $v(\frac{l}{2})$ – прогиб среднего сечения балки; $Q(l)$ – угол поворота правого
 опорного сечения балки; $w(c)$ – перемещение свободного конца рычага;
 (1-1) – поперечное сечение балки

- вычисляют значение относительной деформации при $\Pi_{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-5}$:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \Delta T \Pi_{\varepsilon};$$

- находят опытное значение напряжения, принимая $E = 2 \cdot 10^5$ МПа:

$$\sigma_{\text{оп}} = E \varepsilon;$$

- находят опытное значение прогиба среднего сечения $v_{\text{оп}} = \Delta I_1$;
- вычисляют опытное значение угла поворота опорного сечения

$$\theta_{\text{оп}} = \frac{\Delta I_2}{c};$$

- определяют для расчётной схемы балки опорные реакции, соответствующие нагрузке $\Delta F = 2$ кгс = 19,6 Н. Строят эпюру изгибающих моментов и находят значение момента M в месте наклейки тензодатчика при $z_1 = l/2$;

- вычисляют осевой момент инерции поперечного сечения балки

$$J_X = \frac{b_1 h^3}{12};$$

- находят теоретическое значение напряжения

$$\sigma_t = -\frac{M}{J_X} \frac{h}{2};$$

- сравнивают теоретическое и экспериментальное значения напряжения

$$\delta(\sigma) = \frac{\sigma_{\text{оп}} - \sigma_t}{\sigma_{\text{оп}}} 100;$$

- вычисляют теоретическое значение прогиба среднего сечения

$$v_t = \frac{\Delta F b (3l^2 - 4b^2)}{48 E J_X};$$

- сравнивают теоретическое и экспериментальное значения прогиба

$$\delta(v) = \frac{v_{\text{оп}} - v_t}{v_{\text{оп}}} 100;$$

- вычисляют теоретическое значение угла поворота опорного сечения

$$\theta_t = \frac{\Delta F a b (l + a)}{6 E J_X l};$$

- сравнивают теоретическое и экспериментальное значения угла поворота

$$\delta(\theta) = \frac{\theta_{\text{оп}} - \theta_t}{\theta_{\text{оп}}} 100;$$

- делают выводы по работе.

Таблица 4

Протокол испытания балки на изгиб

Нагрузка F , кгс	Показания приборов			Приращение на- грузки ΔF		Приращения показаний		
	T	I_1 , мм	I_2 , мм	кгс	Н	ΔT	ΔI_1 , мм	ΔI_2 , мм
0,5								
2,5				2,0	19,6			

Контрольные вопросы

1. Какова цель данной лабораторной работы?
2. В каком случае балка испытывает чистый изгиб?
3. Как формулируют гипотезу плоских сечений?
4. Как определяют нормальное напряжение при чистом изгибе?
5. Какой изгиб балки называют поперечным изгибом?
6. Почему при поперечном изгибе гипотеза плоских сечений несправедлива?
7. Как записывают приближённое дифференциальное уравнение изогнутой оси балки?
8. Как записывают общее выражение для угла поворота сечения балки?
9. Как записывают общее выражение для прогиба балки?
10. Из каких условий определяют постоянные интегрирования в общих выражениях для перемещений?
11. Почему тензостанция регистрирует удвоенную относительную деформацию на поверхности балки?
12. Как определяют нормальное напряжение опытным путём?
13. Как определяют прогиб балки опытным путём?
14. Как определяют угол поворота балки опытным путём?
15. Как определяют опорные реакции в балке?
16. Как строят эпюру изгибающих моментов в балке?
17. Как вычисляют осевой момент инерции сечения?
18. Как определяют теоретическое значение напряжения?

Лабораторная работа № 5

ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ СТЕРЖНЯ

Цель работы: экспериментальная проверка гипотезы плоских сечений и формулы для нормального напряжения при внецентренном сжатии.

Оборудование и инструменты: универсальная гидравлическая машина Р-10, тензостанция ЦТМ-3, штангенциркуль.

Пояснения к работе

Внецентренное сжатие стержня является частным случаем сложного сопротивления, когда сосредоточенные силы, параллельные геометрической оси, приложены к торцам стержня с некоторыми эксцентриситетами относительно центра тяжести сечения. Внецентренное сжатие можно представить как суперпозицию (наложение) простых видов нагружения: центрального сжатия и двух чистых изгибов относительно главных осей инерции сечения. Нормальные напряжения, возникающие при внецентренном сжатии, вычисляют по формуле

$$\sigma = -\frac{F}{A} \left(1 + \frac{u_F u}{i_V^2} + \frac{v_F v}{i_U^2} \right), \quad (5.1)$$

где F – сосредоточенная сила; A – площадь сечения; u_F, v_F – координаты точки приложения силы в главных центральных осях; u, v – главные координаты точки, в которой определяют напряжение; i_V, i_U – радиусы инерции сечения ($i_V = \sqrt{J_V / A}$; $i_U = \sqrt{J_U / A}$).

Формулу для напряжения (5.1) можно преобразовать в каноническую форму записи уравнения плоскости напряжений в отрезках, отсекаемых плоскостью на осях системы координат $OUVZ$:

$$\frac{u}{a_0} + \frac{v}{b_0} + \frac{\sigma}{c_0} = 1, \quad (5.2)$$

где $a_0 = -i_V^2 / u_F$; $b_0 = -i_U^2 / v_F$ и $c_0 = -F / A$ – отрезки, отсекаемые плоскостью напряжений на осях OU , OV и OZ .

В данной работе необходимо опытным путём проверить справедливость формулы (5.1) для нормального напряжения и достоверность гипотезы плоских сечений, выражаемой уравнением (5.2).

На рис. 5.1, *a* показан эскиз образца и способ его нагружения. Схема наклейки тензодатчиков в среднем сечении стержня представлена на рис. 5.1, *б*. Здесь же показана точка приложения силы F и нейтральная линия, образующаяся при пересечении плоскости напряжений (5.2) с плоскостью поперечного сечения. На нейтральной линии, разделяющей растянутую и сжатую области сечения, напряжение равно нулю. С учётом простоты сечения стержня система главных координатных осей обозначена традиционно: $OXYZ$.

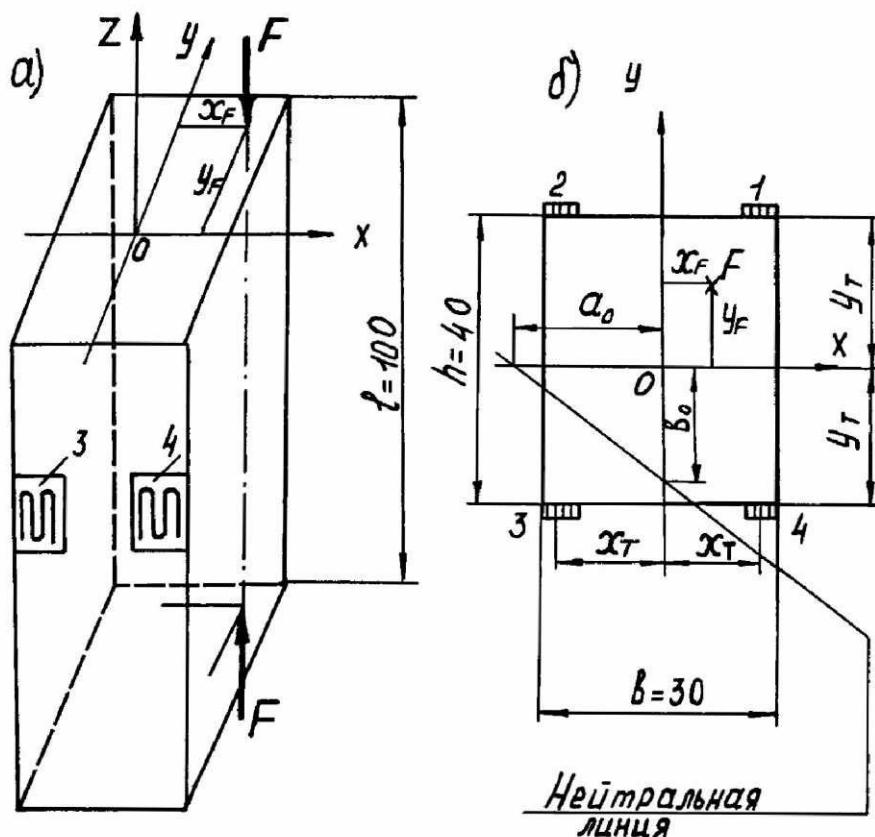


Рис. 5.1. Внекцентренное сжатие стержня:
а – схема нагружения; *б* – схема расположения тензодатчиков

Центры тензодатчиков, служащих для определения относительных деформаций, имеют следующие координаты $T_i(x_i; y_i)$ в мм:

$$T_1(12; 20); \quad T_2(-12; 20); \quad T_3(-12; -20); \quad T_4(12; -20).$$

Нагрузка на стержень передаётся через стальные шарики диаметром 10 мм. Центр сферической поверхности, фиксирующей шарик, имеет координаты x_F и y_F . Стержень устанавливают на под-

вижный верхний захват испытательной машины Р-10 и поджимают к цилиндру, соединённому с траверсой машины.

Проведение испытаний и сравнительный анализ опытных и теоретических результатов

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- измеряют штангенциркулем размеры образца l, b, h и координаты центра сферической поверхности x_F, y_F (точки приложения сосредоточенной силы);
- включают тензостанцию для прогрева в течение 10 мин;
- устанавливают призматический стержень на площадку верхнего захвата испытательной машины Р-10;
- нагружают образец начальной силой $F_0 = 200$ кгс и записывают в протокол испытаний (табл. 5) начальные показания тензодатчиков $T_{1,0} - T_{4,0}$;
- дают приращение нагрузки $\Delta F = 2000$ кгс и записывают в протокол испытания конечные показания тензодатчиков $T_{1,F} - T_{4,F}$;
- находят разность показаний тензодатчиков

$$\Delta T_i = T_{i,F} - T_{i,0}, \quad i = 1, 2, 3, 4;$$

- вычисляют значения относительных линейных деформаций для каждого датчика и оси стержня, принимая $\bar{\epsilon}_\varepsilon = 1 \cdot 10^{-5}$:

$$\varepsilon_i = \Delta T_i \bar{\epsilon}_\varepsilon, \quad \varepsilon_{oc} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \varepsilon_i;$$

- находят значение напряжения при центральном сжатии осевой силой $F_{oc} = \Delta F = 2000$ кгс ≈ 19600 Н:

$$A = bh; \quad \sigma_{oc} = \frac{F_{oc}}{A};$$

- вычисляют значение модуля Юнга материала образца

$$E = \frac{\sigma_{oc}}{\varepsilon_{oc}};$$

- определяют опытные значения нормальных напряжений

$$\sigma_{i,op} = E\varepsilon_i, \quad i = 1, 2, 3, 4;$$

- изображают сечение стержня в масштабе М 2:1 и показывают центры тензодатчиков 1, 2, 3, 4 и главные оси OXY ;

- строят эпюру напряжений σ вдоль контура сечения. Для этого от базисных линий, параллельных сторонам прямоугольника, откладывают отрезки, соответствующие $\sigma_{i,\text{оп}}$, приняв масштабный коэффициент μ_σ : в 1 мм – 1 МПа. Соединив концы отрезков прямыми линиями, получают эпюру напряжений σ ;
- проецируют нуль-точки эпюр σ на линии тензодатчиков 2-3 и 3-4 и проводят через полученные точки опытную нейтральную линию;
- проверяют справедливость гипотезы плоских сечений. Из аналитической геометрии известно, что если 4 точки расположены в одной плоскости, то будет равен нулю определитель четвёртого порядка следующего вида:

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix} = 0.$$

Подставив сюда координаты концов векторов напряжений и раскрыв определитель, получаем простое условие:

$$\sigma_{1,\text{оп}} - \sigma_{2,\text{оп}} + \sigma_{3,\text{оп}} - \sigma_{4,\text{оп}} = 0,$$

позволяющее легко проверить справедливость гипотезы плоских сечений;

- находят процентное отклонение результатов опыта от гипотезы плоских сечений

$$\delta(0) = \frac{\sum \sigma_+ + \sum \sigma_-}{\sum \sigma_+} 100, \quad (a)$$

где $\sum \sigma_+$ – сумма положительных арифметических слагаемых; $\sum \sigma_-$ – сумма отрицательных арифметических слагаемых в условии (a);

- вычисляют значения квадратов радиусов инерции:

$$i_X^2 = \frac{J_X}{A} = \frac{bh^2}{12}; \quad i_Y^2 = \frac{J_Y}{A} = \frac{b^2h}{12};$$

- находят значения отрезков, отсекаемых нейтральной линией на главных центральных осях X и Y :

$$a_0 = -\frac{i_Y^2}{x_F}; \quad b_0 = -\frac{i_X^2}{y_F};$$

- откладывают в масштабе М 2:1 отрезок a_0 на оси X , отрезок b_0 на оси Y и соединяют концы отрезков прямой, определяющей положение теоретической нейтральной линии;

- вычисляют теоретические значения нормальных напряжений

$$\sigma_{i,\tau} = -\frac{\Delta F}{A} \left(1 + \frac{x_F x_i}{i_Y^2} + \frac{y_F y_i}{i_X^2} \right), \quad i = 1, 2, 3, 4;$$

- сравнивают опытные и теоретические значения напряжений

$$\delta(\sigma_i) = \frac{\sigma_{i,\text{оп}} - \sigma_{i,\tau}}{\sigma_{i,\text{оп}}} \cdot 100, \quad i = 1, 2, 3, 4;$$

- делают выводы по работе.

Таблица 5

Протокол испытания стержня на внецентренное сжатие

Нагрузка F , кгс	Показания тензодатчиков				Приращение нагрузки ΔF		Приращение показаний тензодатчиков			
	T_1	T_2	T_3	T_4	кгс	Н	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4
200					2000	19600				
2200										

Контрольные вопросы

- Какова цель данной лабораторной работы?
- Как нагружен стержень при внецентренном сжатии?
- Из каких видов простого нагружения складывается внецентренное сжатие?
- По какой формуле вычисляют нормальное напряжение при внецентренном сжатии?
- Как записывают уравнение плоскости напряжений при внецентренном сжатии?
- Каким свойством обладает нейтральная линия?
- Как вычисляют осевую относительную деформацию при внецентренном сжатии?
- Как находят напряжение при осевом действии сил?
- Как определяют значение модуля Юнга при внецентренном сжатии?
- Как определяют опытные значения напряжений?

11. Как строят эпюру нормальных напряжений при внецентренном сжатии?
12. Как определяют положение опытной нейтральной линии при внецентренном сжатии?
13. Как проверяют справедливость гипотезы плоских сечений при внецентренном сжатии?
14. Как вычисляют радиусы инерции сечения?
15. Как определяют положение теоретической нейтральной линии при внецентренном сжатии?

Лабораторная работа № 6

6. ИЗГИБ С КРУЧЕНИЕМ ТОНКОСТЕННОЙ ТРУБЫ

Цель работы: экспериментальная проверка теории плоского напряжённого состояния при изгибе с кручением.

Оборудование и инструменты: экспериментальная установка СМ-18М, тензостанция ЦТМ-3, штангенциркуль.

Пояснения к работе

Изгиб с кручением (наряду с внецентренным сжатием) является частным случаем сложного сопротивления, когда внешние силы расположены в плоскостях поперечных сечений, но не пересекают при этом геометрическую ось стержня. Изгиб с кручением можно разложить на несколько простых видов нагружения: кручение, два чистых изгиба в главных плоскостях инерции и два чистых сдвига.

Для стержня произвольного поперечного сечения возникают затруднения при вычислении касательных напряжений от кручения и сдвига. В данной работе изучается поведение под изгибо-крутильной нагрузкой тонкостенной трубы, для которой расчёт напряжённого состояния не представляет большой сложности.

Нормальное напряжение при чистом плоском изгибе определяют по формуле (см. лаб. работу № 4)

$$\sigma = -\frac{M}{J_X} y. \quad (6.1)$$

Касательное напряжение при кручении определяют по формуле (см. лаб. работу № 3)

$$\tau = \frac{M_k}{J_p} \rho. \quad (6.2)$$

Касательным напряжением при сдвиге, вызванном поперечной силой Q , обычно пренебрегают в силу его малости по сравнению с первыми двумя напряжениями.

Так как в поперечных сечениях одновременно возникают нормальные напряжения σ от изгиба и касательные напряжения τ от кручения, бесконечно малый элемент $abcd$, выделенный из трубы поперечными ad, bc и меридиональными ab, cd сечениями, находится в условиях плоского напряжённого состояния (рис. 6.1). Главные площадки повернуты на угол α_0 по отношению к исход-

ным площадкам. На них действуют наибольшее σ_1 и наименьшее σ_2 главные напряжения, определяющие прочность стержней.

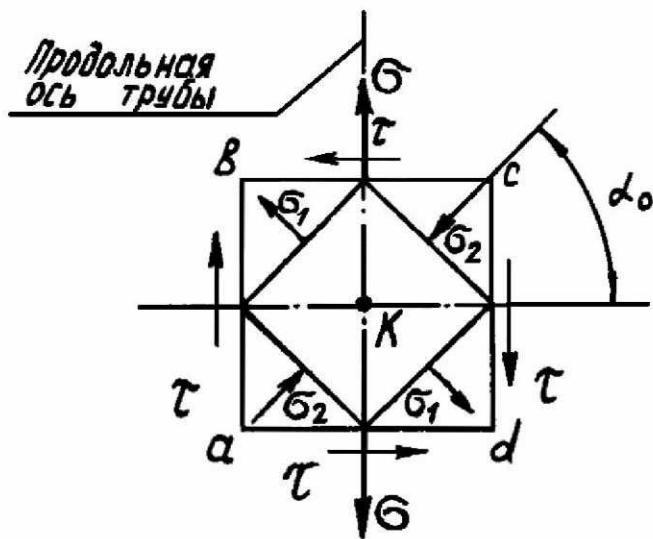


Рис. 6.1. Плоское напряжённое состояние в точке

Согласно теории плоского напряжённого состояния главные напряжения вычисляют по формуле

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2}(\sigma \pm \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}). \quad (6.3)$$

Положение главных площадок согласно той же теории определяют по формуле

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2\tau}{\sigma}. \quad (6.4)$$

Для проверки комбинации теоретических формул (6.1) – (6.4) служит экспериментальная установка СМ-18М, конструктивная схема которой показана на рис. 6.2.

Тонкостенная труба 1, выполненная из алюминиевого сплава Д16Т, с помощью фланца 2 жёстко закреплена с основанием 3. К свободному концу трубы с помощью фланца 2 прикреплён рычаг 4, к которому подвешен гиревой подвес 5. На поверхности трубы в окрестности т. К наклеена прямоугольная розетка из трёх тензодатчиков, как показано на рис. 6.3. Тензодатчик I ориентирован вдоль геометрической оси трубы, датчик III наклеен в окружном направлении, а датчик II – под углом 45° к первым двум. При нагружении трубы тензодатчики фиксируют относительные линейные деформации в соответствующих направлениях ε_1 , ε_{II} , ε_{III} .

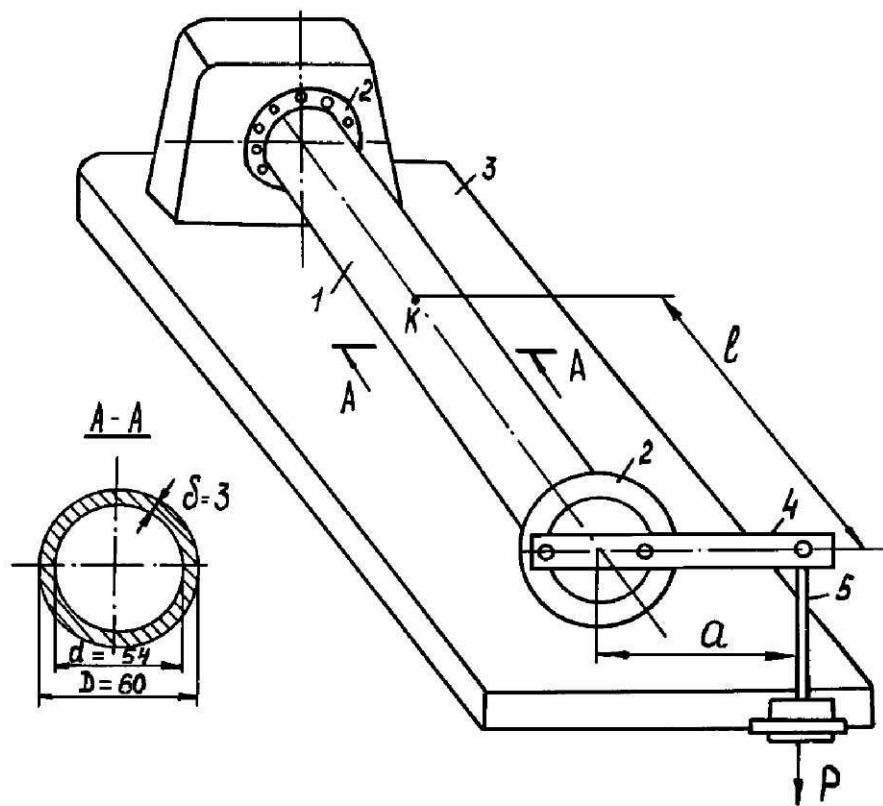


Рис. 6.2. Схема испытания трубы на изгиб с кручением:
1 – труба; 2 – фланцы; 3 – основание; 4 – рычаг; 5 – гиревой подвес

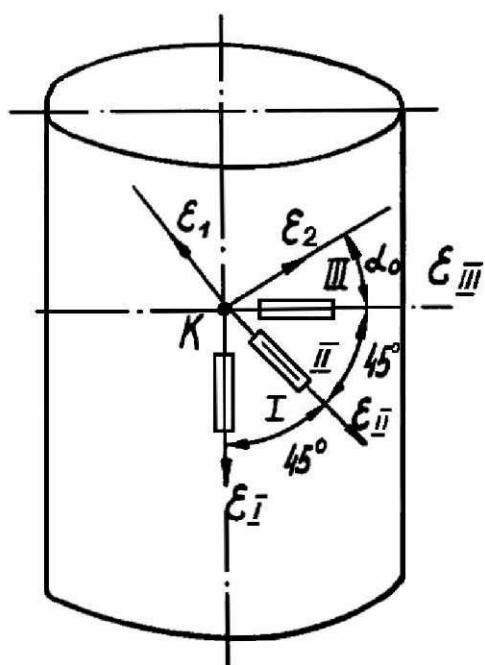


Рис. 6.3. Схема наклейки прямоугольной розетки тензодатчиков

Согласно теории плоского деформированного состояния главные деформации ε_1 и ε_2 , соответствующие главным напряжениям σ_1 и σ_2 , находят для случая прямоугольной розетки по формуле

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}(\varepsilon_I + \varepsilon_{III} \pm \sqrt{2[(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})^2 + (\varepsilon_{II} - \varepsilon_{III})^2]}). \quad (6.5)$$

Положение главных площадок для той же розетки определяют по формуле

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2\varepsilon_{II} - \varepsilon_I - \varepsilon_{III}}{\varepsilon_I - \varepsilon_{III}}. \quad (6.6)$$

Главные напряжения вычисляют по формулам обобщённого закона Гука:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_3 + \mu\varepsilon_1). \quad (6.7)$$

Проведение испытаний и сравнительный анализ опытных и теоретических результатов

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- измеряют штангенциркулем размеры сечения трубы D и d , длину рычага a и расстояние l от рычага до т. K ;
- включают тензостанцию для прогрева в течение 10 мин;
- нагружают трубу начальной силой $F_0 = 0,5$ кгс и записывают в протокол испытаний (табл. 6) начальные показания тензодатчиков $T_{I,0}$, $T_{II,0}$, $T_{III,0}$;
- дают приращение нагрузки $\Delta F = 5$ кгс и записывают в протокол испытания конечные показания тензодатчиков $T_{I,F}$, $T_{II,F}$, $T_{III,F}$;
- находят разности показаний тензодатчиков

$$\Delta T_i = T_{i,F} - T_{i,0}, \quad i = I, II, III;$$

- вычисляют значения относительных линейных деформаций для каждого тензодатчика, принимая $\Pi_\varepsilon = 1 \cdot 10^{-5}$:

$$\varepsilon_i = \Delta T_i \Pi_\varepsilon, \quad i = I, II, III;$$

- определяют значения главных деформаций, используя формулу (6.5):

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}(\varepsilon_I + \varepsilon_{III} \pm \sqrt{2[(\varepsilon_I - \varepsilon_{II})^2 + (\varepsilon_{II} - \varepsilon_{III})^2]});$$

- определяют опытное положение главных площадок, используя формулу (6.6):

$$\alpha_{0,\text{оп}} = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\epsilon_{\text{II}} - \epsilon_1 - \epsilon_{\text{III}}}{\epsilon_1 - \epsilon_{\text{III}}} ;$$

- вычисляют опытные значения главных напряжений по формулам (6.7), принимая $E = 0,7 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu = 0,3$:

$$\sigma_{1,\text{оп}} = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_1 + \mu \epsilon_2); \quad \sigma_{2,\text{оп}} = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_2 + \mu \epsilon_1);$$

- вычисляют значения внутренних усилий в расчётном сечении:

$$M = \Delta Fl, \quad M_k = \Delta Fa;$$

- определяют геометрические характеристики поперечного сечения:

$$J_X = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4), \quad J_p = 2J_X, \quad y = \rho = \frac{D}{2};$$

- находят теоретические значения нормального и касательного напряжений, используя формулы (6.1) и (6.2):

$$\sigma = -\frac{M}{J_X} y, \quad \tau = \frac{M_k}{J_p} \rho;$$

- определяют теоретические значения главных напряжений по формуле (6.3):

$$\sigma_{1,\text{T}} = \frac{1}{2} (\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}), \quad \sigma_{2,\text{T}} = \frac{1}{2} (\sigma - \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2});$$

- определяют теоретическое положение главных площадок по формуле (6.4):

$$\alpha_{0,\text{T}} = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\tau}{\sigma};$$

- сравнивают опытные и теоретические значения величин:

$$\delta(\sigma_1) = \frac{\sigma_{1,\text{оп}} - \sigma_{1,\text{T}}}{\sigma_{1,\text{оп}}} 100, \quad \delta(\sigma_2) = \frac{\sigma_{2,\text{оп}} - \sigma_{2,\text{T}}}{\sigma_{2,\text{оп}}} 100,$$

$$\delta(\alpha_0) = \frac{\alpha_{0,\text{оп}} - \alpha_{0,\text{T}}}{\alpha_{0,\text{оп}}} 100;$$

- делают выводы по работе.

Таблица 6

Протокол испытания тонкостенной трубы на изгиб с кручением

Нагрузка F , кгс	Показания тензодатчиков			Приращение нагрузки ΔF		Приращение показаний тензодатчиков		
	T_1	T_{II}	T_{III}	кгс	Н	ΔT_1	ΔT_{II}	ΔT_{III}
0,5								
5,5				5	49			

Контрольные вопросы

1. Какова цель данной лабораторной работы?
2. Из каких простых видов нагружения состоит изгиб с кручением?
3. Как определяют нормальные напряжения при чистом изгибе?
4. Как определяют касательные напряжения при кручении?
5. Что собой представляет напряжённое состояние в точке при изгибе с кручением?
6. Как вычисляют главные напряжения при изгибе с кручением?
7. Как определяют положение главных площадок при изгибе с кручением?
8. Как вычисляют главные деформации при плоском напряжённом состоянии с использованием прямоугольной тензорозетки?
9. Как вычисляют положение главных площадок для случая прямоугольной тензорозетки?
10. Как определяют главные напряжения по формулам обобщённого закона Гука?

Лабораторная работа № 7

КОСОЙ ИЗГИБ БАЛКИ

Цель работы: экспериментальная проверка формул для нормального напряжения и прогиба при косом изгибе балки.

Оборудование и инструменты: экспериментальная установка СМ-8М, тензостанция ЦТМ-3, штангенциркуль.

Пояснения к работе

Косой изгиб – это третий частный случай сложного сопротивления, при котором внешние силы перпендикулярны геометрической оси стержня, но не совпадают ни с одной из двух главных осей инерции сечения. Косой изгиб можно представить в виде линейной комбинации двух плоских изгибов, происходящих в главных плоскостях инерции стержня (балки).

Теория плоского изгиба проверялась в лабораторной работе № 4, где были верифицированы формулы для напряжений, прогибов и углов поворота. В данной работе необходимо проверить аналогичные формулы для случая косого изгиба балки. Для рассматриваемого случая нагружения полный изгибающий момент, вычисленный относительно центра тяжести сечения, равен геометрической сумме моментов относительно главных осей инерции:

$$\bar{M} = \bar{M}_X + \bar{M}_Y; \quad M = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2}.$$

Каждый из моментов M_X и M_Y создаёт нормальное напряжение, перпендикулярное плоскости сечения, следовательно, эти напряжения можно суммировать алгебраически, т.е.

$$\sigma(M) = \sigma(M_X) + \sigma(M_Y), \text{ или } \sigma = \frac{M_X}{J_X} y + \frac{M_Y}{J_Y} x, \quad (7.1)$$

где J_X , J_Y – осевые моменты инерции; x, y – координаты точки, в которой определяется напряжение.

В то же время каждый из моментов M_X или M_Y создаёт прогиб, направленный по оси Y или X , следовательно, эти прогибы нужно суммировать геометрически, т.е.

$$\bar{f}(M) = \bar{f}(M_X) + \bar{f}(M_Y), \text{ или } f = \sqrt{f_X^2 + f_Y^2}, \quad (7.2)$$

где f – значение полного прогиба; f_Y и f_X – значения прогибов от соответствующих изгибающих моментов M_X и M_Y .

В случае плоского изгиба балки по схеме нагружения, показанной на рис. 7.1, прогиб конца балки определяют по формуле

$$f = \frac{Fb^3}{6EJ} \left(2 + 3 \frac{a}{b} \right), \quad (7.3)$$

где F – сосредоточенная сила; EJ – изгибная жёсткость поперечного сечения.

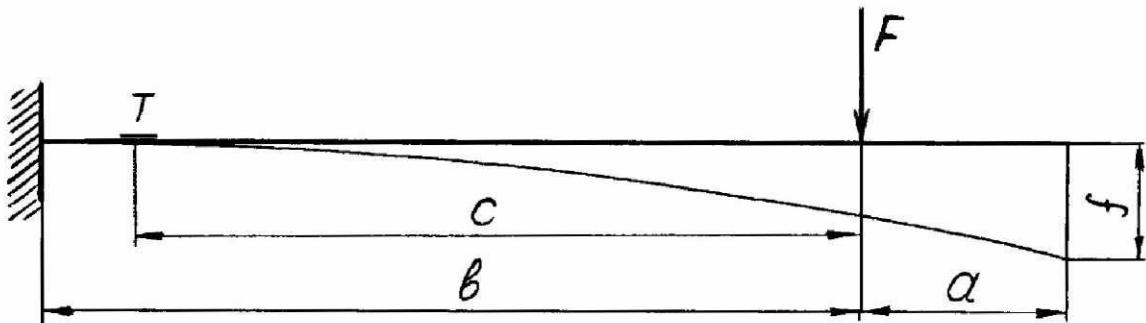


Рис. 7.1. Расчётная схема для определения прогиба

Для проверки формул (7.1) – (7.3) служит экспериментальная лабораторная установка СМ-8М, показанная на рис. 7.2.

Балка 1 закреплена на станине 2 с помощью обоймы 3, позволяющей поворачивать балку вокруг геометрической оси на угол α . Нагружение производят путём установки грузов на платформу 5, подвешенную к подшипнику 4, обеспечивающему вертикальность нагрузки при любом положении балки. Для регистрации относительной деформации на поверхность балки наклеен тензодатчик 6 (см. сечение А-А). Для определения перемещений конца балки в вертикальной и горизонтальной плоскостях служат индикаторы часового типа 7.

Проведение испытаний и сравнительный анализ опытных и теоретических результатов

Лабораторную работу выполняют в следующем порядке:

- измеряют штангенциркулем размеры сечения балки b_1 и h , расстояния a, b, c (рис. 7.1) и устанавливают по круговой шкале на обойме угол наклона балки α (рис. 7.2);

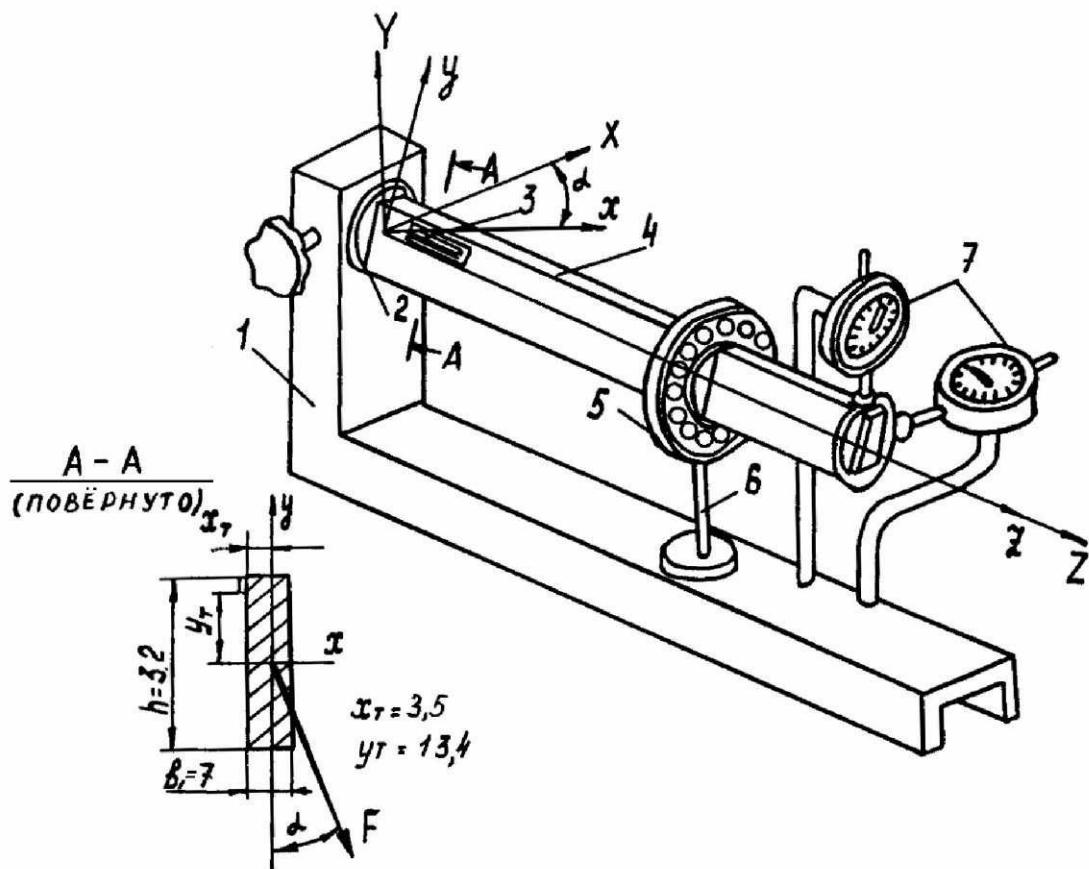


Рис. 7.2. Схема установки для исследования косого изгиба балки:

1 – балка; 2 – станина; 3 – обойма; 4 – шарикоподшипник;
5 – платформа для грузов; 6 – тензодатчик; 7 – индикаторы часового
типа; (A-A) – сечение стержня в месте наклейки тензодатчика

- включают тензостанцию ЦТМ-3 для прогрева в течение 10 мин;
- нагружают балку начальной силой 0,5 кгс и записывают в протокол испытания (табл. 7) начальные показания тензодатчика T_0 и горизонтального и вертикального индикаторов $I_{r,0}$ и $I_{b,0}$;
- дают приращение нагрузки $\Delta F = 4$ кгс и записывают в протокол испытания конечные показания T_F , $I_{r,F}$, $I_{b,F}$;
- находят разность показаний измерительных приборов:

$$\Delta T = T_F - T_0, \quad \Delta I_r = I_{r,F} - I_{r,0}, \quad \Delta I_b = I_{b,F} - I_{b,0};$$
- вычисляют значение относительной продольной деформации, принимая $\bar{\epsilon}_e = 1 \cdot 10^{-5}$:

$$\varepsilon = \Delta T \bar{\epsilon}_e;$$

- определяют опытное значение нормального напряжения, принимая модуль Юнга материала балки $E = 2,04 \cdot 10^5$ МПа:

$$\sigma_{\text{оп}} = E\varepsilon;$$

- вычисляют опытное значение полного перемещения конца балки

$$f_{\text{оп}} = \sqrt{\Delta I_r^2 + \Delta I_b^2};$$

- раскладывают приращение нагрузки ΔF на компоненты по осям координат X и Y :

$$\Delta F_x = \Delta F \cos \alpha, \quad \Delta F_y = \Delta F \sin \alpha;$$

- вычисляют значения изгибающих моментов относительно главных осей X и Y для сечения, в котором находится центр тензодатчика:

$$M_x = \Delta F_y c, \quad M_y = \Delta F_x c;$$

- вычисляют осевые моменты инерции сечения относительно главных осей:

$$J_x = \frac{b_1 h^3}{12}, \quad J_y = \frac{b_1^3 h}{12};$$

- находят теоретическое значение нормального напряжения, принимая координаты центра тензодатчика $x_t = 3,5$ мм, $y_t = 13,4$ мм:

$$\sigma_t = \frac{M_x}{J_x} y_t + \frac{M_y}{J_y} x_t;$$

- определяют компоненты полного прогиба балки, используя формулу (7.3):

$$f_x = \frac{\Delta F_x b^3}{6EJ_y} \left(2 + 3 \frac{a}{b} \right), \quad f_y = \frac{\Delta F_y b^3}{6EJ_x} \left(2 + 3 \frac{a}{b} \right);$$

- вычисляют теоретическое значение полного прогиба конца балки

$$f_t = \sqrt{f_x^2 + f_y^2};$$

- сравнивают опытные и теоретические значения напряжения и прогиба: $\delta(\sigma) = \frac{\sigma_{\text{оп}} - \sigma_t}{\sigma_{\text{оп}}} 100$, $\delta(f) = \frac{f_{\text{оп}} - f_t}{f_{\text{оп}}} 100$;
- делают выводы по работе.

Таблица 7

Протокол испытания балки при косом изгибе

Нагрузка F , кгс	Показания приборов			Приращение нагрузки ΔF		Приращения показаний тензодатчиков		
	T	$I_{T, \text{мм}}$	$I_{B, \text{мм}}$	кгс	H	ΔT	$\Delta I_{T, \text{мм}}$	$\Delta I_{B, \text{мм}}$
0,5					4	39,2		
4,5								

Контрольные вопросы

1. Какова цель данной лабораторной работы?
2. Какое нагружение создаёт косой изгиб балки?
3. На какие простые виды нагружения раскладывают косой изгиб?
4. Как вычисляют нормальное напряжение при косом изгибе?
5. Как вычисляют полный прогиб при косом изгибе балки?
6. Как опытным путём определяют нормальное напряжение?
7. Как опытным путём определяют полный прогиб балки?
8. Почему составляющие нормального напряжения суммируют алгебраически, а составляющие прогиба – геометрически?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнив предложенные в практикуме лабораторные работы, студенты приобретают навыки проведения экспериментальных исследований с целью получения упругих и механических характеристик материалов, а также определения напряжённо-деформированного состояния стержней и балок при простых и сложных случаях нагружения. Столкнувшись в производственных условиях с аналогичными задачами, будущие инженеры-механики вполне будут способны использовать полученные знания для решения поставленных перед ними задач прочностной надёжности машин и оборудования.

Многолетний опыт преподавания показал, что из трёх видов учебных занятий с наибольшим интересом студенты относятся к лабораторным работам, и этот интерес необходимо всячески подкреплять поиском новых форм и подходов при преподавании курса сопротивления материалов. Автор практикума надеется, что данное пособие, выданное на дом каждому студенту, положительно скажется на ритмичности учебного процесса и будет в какой-то мере способствовать повышению качества подготовки инженеров-механиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дудченко А.Н. Практикум по сопротивлению материалов/ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – 112 с.
2. Дудченко А.Н., Наугольнов В.А., Панасенко Н.Н., Юзиков В.П. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов/ Новочерк. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск: НГТУ, 1994. – 74 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Механические свойства сталей

Марка стали	Предел текучести σ_y , МПа	Предел прочности σ_u , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
Углеродистые стали				
<i>обыкновенного качества</i>				
Ст 1	180	320 – 400	28	–
Ст 2	190 – 220	320 – 400	26	–
Ст 3	210 – 240	380 – 470	21 – 23	–
Ст 4	240 – 260	420 – 520	19 – 21	–
Ст 5	260 – 280	500 – 620	15 – 17	–
Ст 6	300 - 310	600 - 720	–	–
<i>качественные</i>				
Сталь 10	210	340 – 420	31	55
Сталь 20	250	420 – 500	25	55
Сталь 30	300	500 – 600	21	50
Сталь 40	340	580 – 700	19	45
Сталь 45	360	610 – 750	16	40
Сталь 50	380	640 – 800	14	40
Сталь 60	410	690 – 900	12	35
Легированные стали				
Сталь 20 Х	400 – 650	720 – 850	–	–
Сталь 40 Х	650 – 900	730 – 1050	–	–
Сталь 45 Х	700 – 950	850 – 1050	9	45
Сталь 30 ХМ	540 – 850	740 – 1000	–	–
Сталь 40 ХН	800 – 1300	1000 – 1450	–	–
Сталь 15 ХСНД	390 - 420	640 – 660	18 – 21	–

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Важнейшие понятия курса и краткие сведения об испытаниях материалов	6
Основные понятия	6
Машины и образцы для испытания материалов	9
Измерение деформаций и перемещений	13
Правила оформления лабораторных работ	16
Лабораторная работа № 1. Испытание стали на растяжение	21
Лабораторная работа № 2. Определение упругих постоянных стали при растяжении	30
Лабораторная работа № 3. Кручение тонкостенной трубы	36
Лабораторная работа № 4. Плоский изгиб балки	42
Лабораторная работа № 5. Внекентренное сжатие стержня	48
Лабораторная работа № 6. Изгиб с кручением тонкостенной трубы	54
Лабораторная работа № 7. Косой изгиб балки	60
Заключение	65
Библиографический список	66
Приложение	67