

ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
ЦЕНТРАЛЬНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ И СЖАТИЕ. КРУЧЕНИЕ
Методические указания

Даны методические указания к выполнению лабораторных работ по темам: «Центральное растяжение и сжатие», «Кручение». Ко всем лабораторным работам приводятся теоретические обоснования и соответствующие формулы.

Изложены методика выполнения работ, основные требования к оформлению, даны контрольные вопросы.

Методические указания предназначены для студентов всех специальностей очной, очно-заочной и заочной форм обучения, изучающих дисциплины «Сопротивление материалов», «Прикладная механика», «Механика материалов и конструкций», «Общая теория механики».

ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: изучение зависимости между напряжениями и деформациями при растяжении до разрушения и определение основных механических характеристик материалов.

Теоретическое обоснование

При расчёте деталей машин и сооружений необходимо знание механических свойств материалов, характеризующих их прочность и пластичность.

К характеристикам прочности относятся: предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, предел прочности (временное сопротивление).

Предел прочности и предел текучести необходимы для назначения допускаемого напряжения, входящего в условие прочности. Например, при статическом растяжении или сжатии бруса допускаемое напряжение равно

$$[\sigma] = \frac{\sigma_L}{n},$$

где σ_L — опасное напряжение, в качестве которого для пластичных материалов принимается предел текучести, а для хрупких — предел прочности; n — коэффициент запаса, устанавливаемый на основании инженерной практики.

Характеристиками пластичности являются относительное остаточное удлинение и относительное сужение образца при разрыве.

Все перечисленные выше механические характеристики определяются при испытании на растяжение, которое является наиболее распространённым методом исследования и контроля механических свойств материалов. Испытания производятся на разрывных или универсальных испытательных машинах с соблюдением всех требований, указанных в соответствующих стандартах.

Образец для испытаний

По ГОСТ 1497 испытание металлов на растяжение производится на стандартных образцах круглого или прямоугольного поперечного сечения. В настоящей лабораторной работе используются круглые образцы (рис. 1.1). Рабочая цилиндрическая часть образца плавно сопрягается с хвостовиками, которые крепятся в захватах машины.

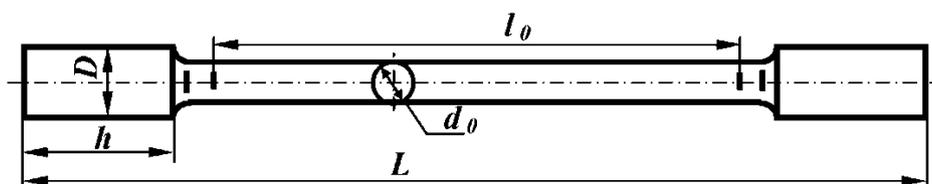


Рисунок 1.1 – Образец для испытания на растяжение

Перед началом испытаний с помощью штангенциркуля или специального шаблона в пределах рабочей части образца наносятся две неглубокие риски, расстояние между которыми равно расчётной длине l_0 . Погрешность базы l_0 не должно превышать 0,1 мм. Для получения сопоставимых результатов при определении механических характеристик необходимо соблюдать закон подобия, заключающийся в том, что между продольными и поперечными размерами образца должно сохраняться постоянное соотношение. Согласно ГОСТу приняты следующие соотношения между расчётной длиной l_0 и площадью поперечного сечения A_0 :

для нормальных образцов $\frac{l_0}{\sqrt{A_0}} = 11,3$;

для укороченных образцов $\frac{l_0}{\sqrt{A_0}} = 5,65$.

Для образцов круглого поперечного сечения из этих соотношений получаются следующие простые зависимости между расчётной длиной l_0 и начальным диаметром d_0 .

для нормальных образцов $l_0 = 10 d_0$;

для укороченных образцов $l_0 = 5 d_0$.

В соответствии с требованиями ГОСТа диаметр образца измеряется перед началом испытаний в трёх местах (в середине и по краям расчётной длины), в каждом месте - по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Измерение производится микрометром с точностью до 0,01 мм. За расчётный принимается наименьший диаметр d_0 . Площадь поперечного сечения образца A_0 вычисляется с точностью до 0,01 мм². Результаты измерений и вычислений заносят в протокол испытаний (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Протокол испытаний на растяжение

| № образца | Материал | d_0 , мм | A_0 , мм ² | l_0 , мм | F_T , кН | σ_T , МПа | F_{max} , кН | σ_{σ} , МПа | l_K , мм | δ , % | d_K , мм | A_K , мм ² | ψ , % |
|-----------|----------|------------|-------------------------|------------|------------|------------------|----------------|-------------------------|------------|--------------|------------|-------------------------|------------|
| 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |

Диаграмма растяжения

Подготовленный к испытаниям образец закрепляют в зажимы машины, в диаграммное устройство закладывают миллиметровую бумагу и производят плавное нагружение образца до разрушения. При этом диаграммное устройство автоматически вычерчивает зависимость между нагрузкой F и абсолютной деформацией образца Δl . Эта кривая называется диаграммой растяжения. Характер диаграммы растяжения зависит от свойств испытываемого материала. Для различных материалов диаграммы могут значительно отличаться друг от друга. На рисунке 1.2 показана типичная диаграмма растяжения для отожжённой малоуглеродистой стали, дающая полную картину поведения материала в процессе его испытания.

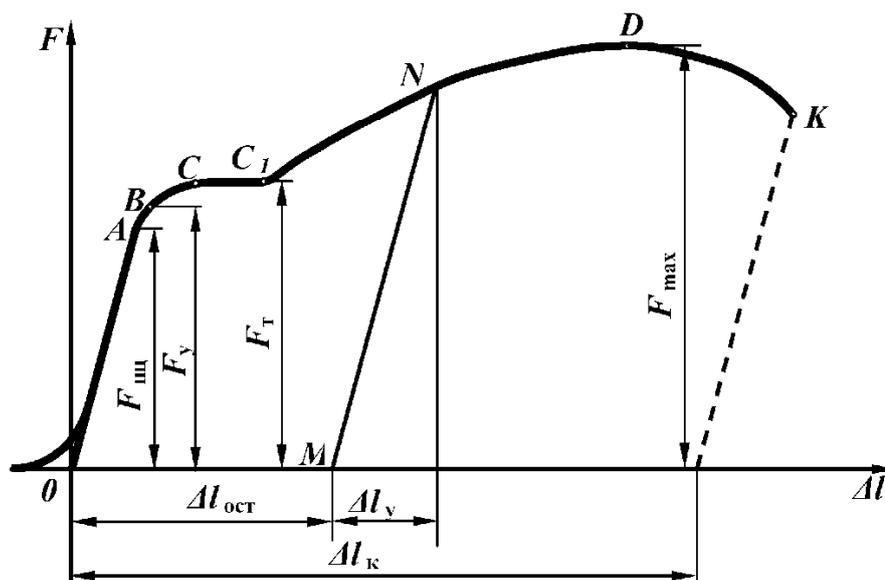


Рисунок 1.2 – Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

Начальный криволинейный участок диаграммы является результатом смятия головок образца и устранения различных зазоров в захватах. Этот участок не отражает свойств материала и его исключают, принимая за начало координат точку O (точка пересечения продолжения прямолинейного участка диаграммы с осью абсцисс).

Отметим на диаграмме растяжения ряд характерных точек и участков.

Первый участок изображается прямой OA . Здесь связь между усилиями и деформациями подчиняется закону Гука. Угол наклона линии OA определяется модулем упругости материала E . В точке A , являющейся границей 1-го участка, нарушается пропорциональность между F и Δl . Нагрузка $F_{ш}$ соответствует пределу пропорциональности. Второй участок — AB . Точка B находится в непосредственной близости к точке A . Нагрузка F_y соответствует пределу упругости. Это наибольшая нагрузка, при которой после разгрузки практически отсутствуют остаточные деформации.

Третий участок диаграммы растяжения изображается кривой BCC_1 . За точкой B в образце после разгрузки появляются остаточные деформации.

Начиная с точки C абсолютное удлинение возрастает практически без увеличения нагрузки, материал образца течёт. Горизонтальный участок CC_1 называется площадкой текучести, а нагрузка F_T соответствует физическому пределу текучести. Конец площадки текучести (точка C_1) характеризует момент, когда образец опять восстанавливает способность сопротивляться нарастанию нагрузки.

Четвёртый участок диаграммы C_1D , представляющий собой плавную кривую с небольшим подъёмом, называется зоной упрочнения. В конце этого участка в одном из сечений начинает образовываться местное сужение, так называемая «шейка». При этом нагрузка достигает максимальной величины F_{\max} , соответствующей пределу прочности (временному сопротивлению) материала образца.

Пятый участок диаграммы DK представляет ниспадающую кривую. Здесь наблюдается уменьшение нагрузки F вследствие прогрессивно развивающегося утонения образца в зоне шейки. В точке K происходит разрушение образца.

Если нагрузить образец силой, превышающей F_y (точка N), а затем снять нагрузку, то график разгрузки будет представлять собой прямую NM , параллельную участку диаграммы OA . При повторном нагружении график снова пойдёт по линии MN , а далее по линии NDK до разрушения материала. Из этого следует, что при разгрузке и повторном нагружении зависимость между силой и деформацией подчиняется закону Гука с одинаковым модулем упругости E . Общее удлинение образца при действии силы F состоит из двух частей: упругого удлинения Δl_v и остаточного или пластического — $\Delta l_{\text{ост}}$.

Основные механические характеристики материалов

На основании диаграммы растяжения строят диаграмму напряжений в координатах $\sigma - \varepsilon$ (напряжение — относительная деформация), где

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Диаграмма $\sigma - \varepsilon$ (рис. 1.3) подобна диаграмме $F - \Delta l$, так как при её построении изменяется лишь масштаб осей. Ординаты характерных точек диаграммы $\sigma - \varepsilon$ определяют основные характеристики прочности материала.

Предел пропорциональности $\sigma_{\text{мп}}$ — наибольшее напряжение, при котором ещё выполняется закон Гука:

$$\sigma_{\text{мп}} = \frac{F_{\text{мп}}}{A_0}.$$

Обычно предел пропорциональности определяется как напряжение, при котором тангенс угла наклона касательной к оси ординат увеличивается на 50% от значения в начале кривой растяжения.

Предел упругости σ_y — наибольшее напряжение, при котором деформации ещё имеют упругий характер:

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

Вначале остаточная деформация (деформация, остающаяся в образце после разгрузки) настолько мала, что её измерение связано с техническими

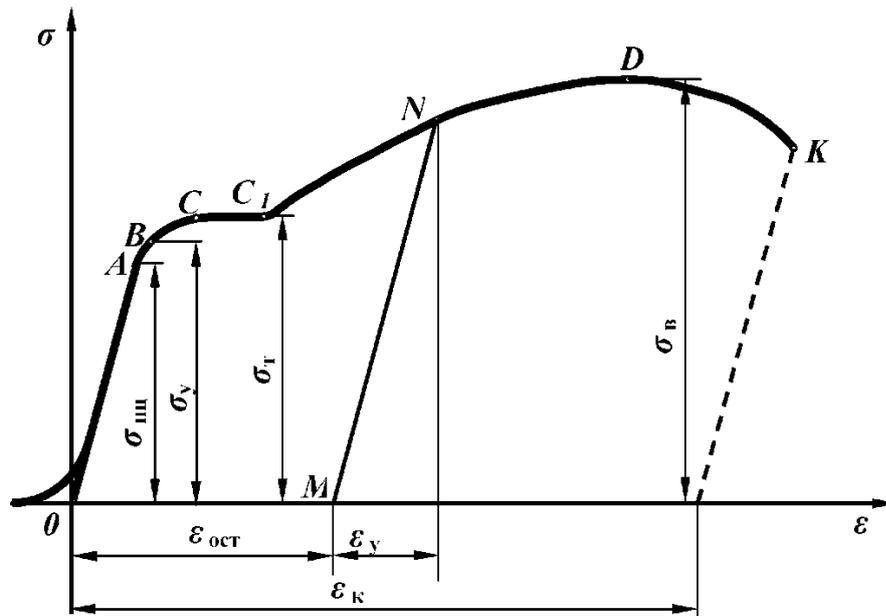


Рисунок 1.3 – Диаграмма условных напряжений малоуглеродистой стали

трудностями. Поэтому обычно определяют условный предел упругости $\sigma_{0,05}$, представляющий собой напряжение, при котором остаточное относительное удлинение достигает 0,05%.

Физический предел текучести σ_T — напряжение, при котором образец деформируется без увеличения нагрузки:

$$\sigma_T = \frac{F_T'}{A_0}$$

Многие пластичные материалы не имеют площадки текучести (рис. 1.4). Для них определяют *условный предел текучести* $\sigma_{0,2}$, равный напряжению, при котором относительное остаточное удлинение составляет 0,2%.

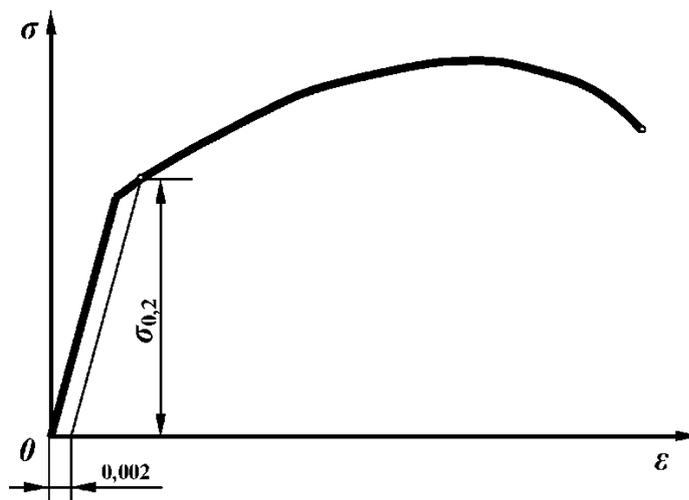


Рисунок 1.4 – Диаграмма условных напряжений для материала без площадки текучести

Предел прочности или *временное сопротивление* σ_B — условное напряжение, равное частному от деления максимальной нагрузки, которую выдерживает образец, на первоначальную площадь поперечного сечения образца:

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0}.$$

Характеристики пластичности материала определяются путём сравнения размеров образца до и после испытания.

Относительное удлинение образца после разрыва δ равно отношению приращения расчетной длины образца после разрушения к её исходной величине:

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

где l_k — длина расчётной части образца после разрыва.

Для определения l_k обе части разорванного образца состыковывают друг с другом и измеряют расстояние между рисками, определяющими границы расчетной длины. Если разрыв происходит на расстоянии двух и менее диаметров образца от какой-либо риски, то результаты этого опыта не учитываются и испытание нужно повторить на новом образце.

Относительное сужение после разрыва ψ есть отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения образца:

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\%,$$

где A_k — конечная, минимальная площадь поперечного сечения образца

Диаметр образца в месте разрыва (диаметр шейки) измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях, находят среднее значение d_k и по нему вычисляют A_k .

Порядок выполнения работы

1 На поверхности рабочей части образца, симметрично относительно его середины, при помощи шаблона или штангенциркуля нанести риски, ограничивающие рабочую длину образца l_0 .

2 При помощи микрометра измерить диаметр круглого образца d_0 .

3 Вычислить площадь поперечного сечения образца.

4 Образец установить в захваты машины.

5 Нагрузить образец до разрушения. В процессе нагружения наблюдать за стрелкой динамометра и характером деформирования образца.

6 После окончания испытания произвести обработку полученной диаграммы растяжения, построить диаграмму условных напряжений, определить механические характеристики: предел текучести σ_T , предел прочности σ_B .

Примечание: определение предела пропорциональности и предела упругости не проводить, так как для этого требуется более точное измерение деформаций.

7 Измерить длину образца после разрыва l_k и диаметр шейки d_k , вычислить A_k .

8 Определить характеристики пластичности δ и ψ .

9 Результаты измерения и вычислений занести в протокол испытаний (см. табл. 1.1).

Содержание отчёта

- 1 Эскиз и размеры образца до испытаний.
- 2 Эскиз и размеры образца после испытаний.
- 3 Диаграмма растяжения в координатах $F - \Delta l$.
- 4 Диаграмма условных напряжений в координатах $\sigma - \varepsilon$.
- 5 Расчёты, относящиеся к определению характеристик прочности и пластичности.
- 6 Протокол испытаний.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего проводят испытания образцов на растяжение?
- 2 Каковы соотношения размеров стандартных образцов?
- 3 Дать определения основных механических характеристик материала — предела пропорциональности, предела упругости, предела текучести, предела прочности, относительного удлинения и относительного сужения.
- 4 Как определяют предел текучести материалов, не имеющих площадки текучести?
- 5 Как изменяются основные механические характеристики материала после предварительного нагружения образца выше предела текучести?
- 6 Как используются основные механические характеристики в расчётах на прочность?

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРОВОЛОЧНЫМИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРАМИ

Цель работы: ознакомление с методами измерения деформаций; тарирование тензометрического прибора с тензорезистором.

Теоретическое обоснование

Экспериментальное определение деформаций (тензометрирование) в деталях машин и элементах сооружений находит широкое применение при проверке точности расчётов, при исследовании распределения деформаций и напряжений в деталях сложной конфигурации, при определении динамических нагрузок и во многих других случаях.

Деформации можно измерять с помощью механических, оптических и электрических приборов - тензометров, из которых последние — электрические - получили в настоящее время наибольшее распространение. Принцип действия электрических тензометров, чувствительным элементом которых является тензорезистор, основан на изменении сопротивления проводника в результате его удлинения или укорочения вследствие деформации детали. Регистрируя изменение сопротивления, можно определить деформацию детали в месте закрепления тензорезистора. Одним из преимуществ тензорезисторов является малогабаритность, что позволяет устанавливать их в труднодоступных местах и измерять деформации на весьма малых участках поверхности детали. Применяются проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы.

Проволочный тензорезистор

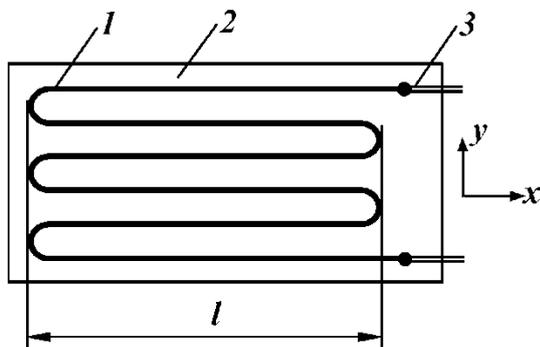


Рисунок 2.1 – Проволочный тензорезистор

Проволочный тензорезистор (рис. 2.1) представляет собой плоскую спираль 1 из константановой или нихромовой проволоки диаметром 0,015—0,030 мм, наклеенную на бумажную подложку 2. Концы спирали припаяются к выводам 3 из более толстого проводника. Сопротивление тензорезистора R обычно составляет 50-250 Ом, длина l , называемая базой, лежит в пределах 2,5-20 мм. Тензорезистор наклеивается на исследуемую деталь клеями: БФ-2, ЦИАКРИН-30, целлулоидным и другими.

При деформации тензорезистора вместе с деталью изменяется его сопротивление в силу известного физического закона об изменении сопротивления деформированного проводника:

$$\Delta R = S \cdot R \cdot \varepsilon_x,$$

где ΔR — изменение сопротивления тензорезистора в результате деформации;

R — сопротивление тензорезистора;

ε_x — деформация тензорезистора в направлении его главной оси x ;

S — коэффициент тензочувствительности тензорезистора ($S \approx 2$).

Из-за наличия у спирали криволинейных участков поперечная деформация ε_y также вызывает изменение сопротивления тензорезистора, однако оно относительно мало, и им пренебрегают. Чем меньше доля криволинейных участков в общем сопротивлении тензорезистора, тем меньше влияние поперечной деформации.

Фольговый тензорезистор

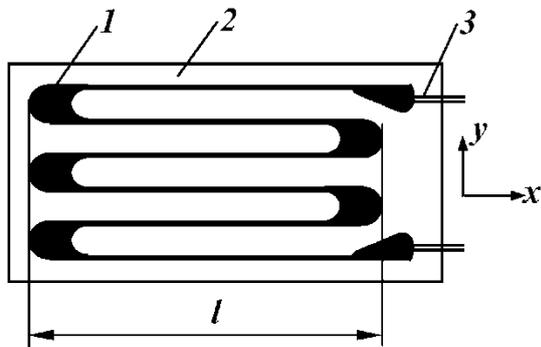


Рисунок 2.2 – Фольговый тензорезистор

В настоящее время широко применяются фольговые тензорезисторы, чувствительная решётка 1 которых выполняется из очень тонкой (толщиной 0,002—0,010 мм) константановой фольги (рис. 2.2). Основные преимущества фольговых тензорезисторов:

1) малая чувствительность к поперечной деформации благодаря широким перемычкам;

2) хорошая теплоотдача, что позволяет, с одной стороны, несколько расширить диапазон рабочих температур,

с другой — увеличить рабочий ток и тем самым повысить чувствительность электрической схемы, в которую включён тензорезистор.

Полупроводниковый тензорезистор



Рисунок 2.3 – Полупроводниковый тензорезистор

В последние годы начали применяться германиевые и кремниевые полупроводниковые тензорезисторы. Наибольшее распространение получили кремниевые тензорезисторы, которые выпускаются с базой 7,3 и 2 мм и сопротивлением 55-330 Ом. Такой тензорезистор представляет собой тонкую и узкую

пластинку 1 из монокристалла кремния, вырезанную в определённом кристаллографическом направлении (рис. 2.3). По обоим концам пластинки закреплены короткие выводы из золотой проволоки 2 , к концам которых приварены медные проводники 3 . Полупроводниковые тензорезисторы имеют ряд преимуществ:

1) высокий коэффициент тензочувствительности, достигающий до 200 и более, что позволяет измерять малые деформации без усиления выходного сигнала;

2) отсутствие гистерезиса;

3) малая поперечная тензочувствительность, не превышающая 1 % от продольной чувствительности.

Недостатком полупроводниковых тензорезисторов является существенная зависимость их удельного сопротивления от кристаллографического

направления, примесей и температуры.

Электрические схемы с тензорезисторами

При измерении деформаций с помощью тензорезисторов применяют две электрические схемы: мостовую и потенциметрическую. Наибольшее распространение получила мостовая схема, которая выполняется в двух вариантах: с отсчётом по гальванометру и с отсчётом по нулевому методу.

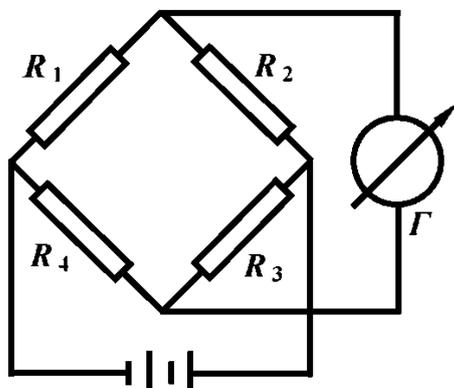


Рисунок 2.4 – Мостовая схема с отсчётом по гальванометру

На рис. 2.4 изображена мостовая схема с отсчётом по гальванометру. Она составлена из четырех сопротивлений: рабочего тензорезистора R_1 , компенсационного тензорезистора R_2 , постоянных сопротивлений R_3 и R_4 и гальванометра Γ . Наличие компенсационного тензорезистора в схеме исключает влияние температуры на результаты измерения деформаций. Этот тензорезистор, представляющий собой точную копию рабочего, наклеивается на образец, изготовленный из того же материала, что и исследуемая деталь, и

располагается в одинаковых с ней температурных условиях. При изменении температуры сопротивление тензорезисторов R_1 и R_2 меняются на одинаковую величину, и балансировка моста не нарушается.

Изменение сопротивления тензорезистора R_1 за счёт деформации детали приводит к появлению разности потенциалов в измерительной диагонали моста. При умеренных деформациях отклонение стрелки гальванометра пропорционально ΔR и, следовательно, пропорционально измеряемой деформации. Для увеличения чувствительности схемы сигнал с измерительной диагонали моста может подаваться на электронный усилитель, к которому подключается регистрирующий прибор. Рассмотренная мостовая схема может применяться для измерения как постоянных, так и переменных деформаций. В последнем случае в качестве регистрирующего прибора используется шлейфовый или катодный осциллограф. Недостатком схемы с отсчётом по гальванометру является зависимость показаний прибора от напряжения источника питания.

Схема с отсчётом по нулевому методу изображена на рисунке 2.5. При нулевом методе измерения в схему моста включается переменное сопротивление — реохорд R . Измерительная диагональ подключается к мосту через движок реохорда. Изменение сопротивления рабочего тензорезистора R_1 ,

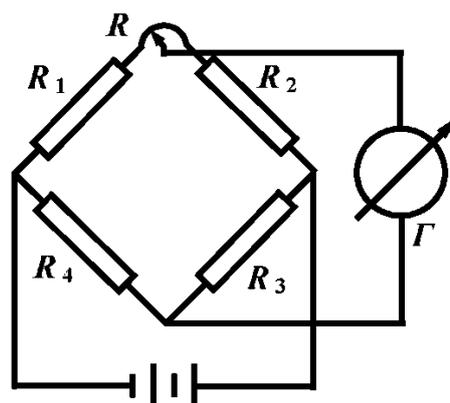


Рисунок 2.5 – Мостовая схема с отсчётом по нулевому методу

вызванное деформацией детали, приводит к разбалансировке моста, т. е. к появлению тока в измерительной диагонали. Поворотом движка реохорда мост приводится в равновесие. По углу поворота движка реохорда, на основании предварительной тарировки, можно определить измеряемую деформацию. Балансировка моста осуществляется либо вручную, либо автоматически. При автоматической балансировке поворот движка реохорда производится электродвигателем, на который подается сигнал с диагонали моста через электронный усилитель. В отличие от предыдущего способа измерения показания прибора здесь не будут зависеть от напряжения источника питания моста, что является большим преимуществом нулевого метода измерения. Однако из-за инерционности схемы с отсчётом по нулевому методу, последняя может применяться только для измерения постоянных или медленно меняющихся деформаций.

Тарировка тензорезистора

До измерения деформаций электрическую схему с рабочим тензорезистором необходимо протарировать, т. е. установить зависимость $\varepsilon - f(\Delta A)$, где ε - измеряемая деформация, ΔA - приращение показания регистрирующего прибора, соответствующее деформации ε . Обычно тарировке подвергаются несколько тензорезисторов из партии, в которой все тензорезисторы изготовлены из одной катушки проволоки на одном и том же приспособлении. Чувствительность остальных тензорезисторов в партии принимается равной средней чувствительности испытанных.

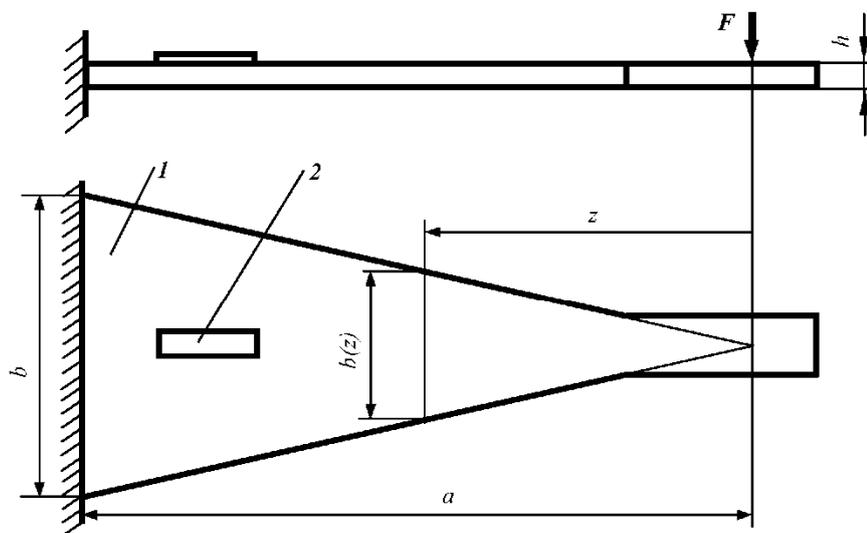


Рисунок 2.6 – Балка равного сопротивления для тарировки тензорезисторов

Для тарировки чаще всего применяют балочку равного сопротивления, схема которой показана на рисунке 2.6. Балочка *1* нагружается в точке пересечения боковых сторон. В пределах клиновидной части балочки её деформации по длине остаются постоянными. Эта часть балочки и используется для наклейки тензорезисторов *2*, включённых в мостовую схему. Измеряемую деформацию балочки можно выразить через нагрузку *F*, размеры сечения, модуль

упругости материала балочки E .

Учитывая, что

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad \sigma = \frac{M}{W},$$

где $M = F \cdot z$, $W = \frac{b(z) \cdot h^2}{6}$, $b(z) = \frac{b}{a} \cdot z$, получим зависимость между деформацией и нагрузкой в виде

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot a}{b \cdot h^2 \cdot E} \cdot F \quad (1)$$

Таблица 2.1 – Протокол тарировки тензорезистора

| | | | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|--|--|--|--|
| F , Н | | | | | | | |
| A , дел | | | | | | | |
| ΔA , дел | | | | | | | |
| ε , мм/мм | | | | | | | |

Для построения тарировочного графика $\varepsilon - f(\Delta A)$ к балочке ступенями прикладывается нагрузка F , для каждого значения которой по формуле (1) подсчитывается величина относительной деформации ε , а со шкалы прибора снимается соответствующее показание A . Расчётные и опытные величины заносятся в протокол (табл. 2.1).

Затем строится тарировочный график, который обычно имеет вид прямой линии, проходящей через начало координат (рис. 2.7):

$$\varepsilon = k \cdot \Delta A. \quad (2)$$

В линейной зависимости (2) коэффициент k представляет собой цену деления шкалы прибора и называется тарировочным коэффициентом.

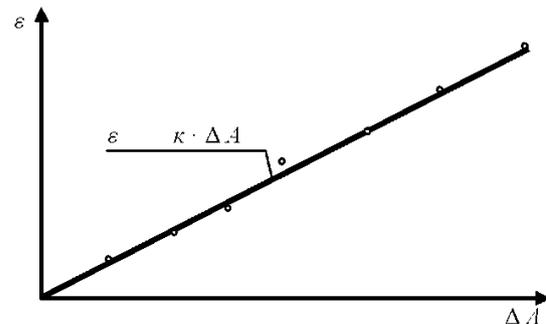


Рисунок 2.2 – Тарировочный график

Порядок выполнения работы

- 1 Включить измерительный прибор и прогреть его в течение 15 мин.
- 2 Установить переключатель каналов в позицию, соответствующую включению в измерительную схему прибора тензорезистора, наклеенного на тарировочную балочку.
- 3 Ступенями приложить нагрузку F и снять показания прибора для каждой ступени. Результаты измерений занести в протокол (см. табл. 2.1).
- 4 Построить тарировочный график и вычислить цену деления прибора.

Содержание отчета

- 1 Эскиз тарировочной балочки.
- 2 Принципиальная электрическая схема прибора для определения деформаций.

3 Эскиз проволочного тензорезистора.

4 Протокол тарировки, расчёты, тарировочный график, значение цены деления шкалы прибора.

Контрольные вопросы

1 Устройство и принцип действия проволочного тензорезистора.

2 Какая зависимость существует между относительной деформацией и изменением сопротивления тензорезисторов?

3 Как компенсируется влияние температуры при измерении деформаций тензорезисторами?

4 В чём заключается разница измерений деформаций по нулевому методу и с отсчётом по гальванометру? Преимущества и недостатки того и другого способов.

5 Почему для тарировки тензорезисторов применяется балка равного сопротивления?

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Цель работы: опытное определение продольных и поперечных деформаций бруса при центральном растяжении и сопоставление полученных результатов с расчётными величинами, вычисленными по формулам сопротивления материалов.

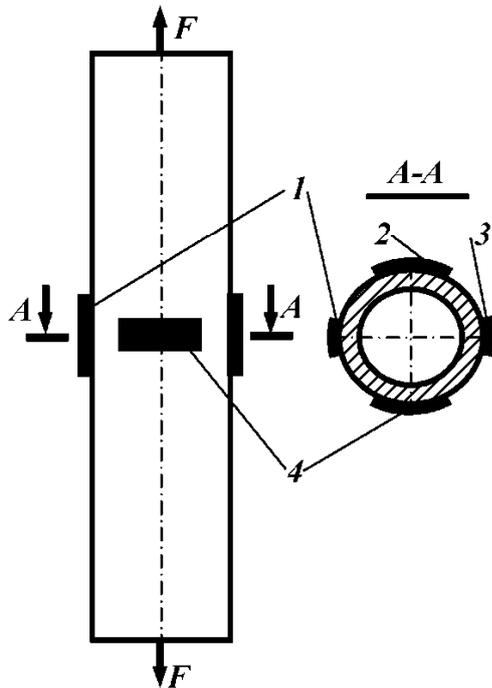


Рисунок 3.1 – Схема нагружения и наклейки тензорезисторов на тяге

Объект исследования

В лабораторной работе с помощью проволочных тензорезисторов определяются деформации титановой тяги привода створки регулируемого сопла турбореактивного авиационного двигателя, которая во время эксплуатации испытывает центральное растяжение (рис. 3.1).

Теоретическое решение

При центральном растяжении относительная продольная деформация тяги определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{E \cdot A}, \quad (1)$$

где σ — напряжение в поперечном сечении;
 F — нагрузка, действующая на тягу;
 A — площадь поперечного сечения тяги;
 E — модуль продольной упругости материала.

Относительная поперечная деформация вычисляется по формуле

$$\varepsilon_{\text{поп}} = -\mu \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Экспериментальное исследование деформаций

Тяга закрепляется в захваты разрывной машины и нагружается силой F . Для определения относительной продольной деформации $\varepsilon_{\text{ол}}$ на тягу наклеиваются в продольном направлении тензорезисторы 1, 3 (см. рис. 3.1). Они располагаются на противоположных сторонах тяги, что позволяет путём вычисления полусуммы показаний исключить влияние изгибающего момента, возникающего в результате несовпадения линии действия силы F с осью стержня.

Для определения относительной поперечной $(\varepsilon_{\text{поп}})_{\text{ол}}$ деформации на стержень наклеиваются тензорезисторы 2, 4 в поперечном направлении. Поперечная деформация также определяется как полусумма показаний двух тензорезисторов. Все тензорезисторы с помощью переключателя поочередно включаются в мостовую схему регистрирующего прибора с отсчётом по

нулевому методу. Перемещение движка реохорда для балансировки моста осуществляется вручную. Отсчёт показаний прибора A по шкале реохорда производится после вывода стрелки гальванометра измерительной диагонали на ноль. Зная цену деления прибора k , деформацию можно подсчитать по формуле

$$\varepsilon = k \cdot \Delta A, \quad (3)$$

где ΔA — приращение показания прибора.

Результаты опытного определения деформаций заносятся в протокол (табл. 3.1).

Порядок выполнения работы

- 1 Включить измерительный прибор и прогреть его в течение 15 мин.
- 2 Установить переключатель в позицию, соответствующую включению в измерительную схему прибора продольного тензорезистора I .
- 3 Приложить предварительную нагрузку F_0 к исследуемой детали и снять показания прибора.
- 4 Приложить окончательную нагрузку $F_k = F_0 + F_{расч}$ и снять новое показание прибора.
- 5 Установить поочередно переключатель в позиции, соответствующие включению тензорезисторов **2, 3, 4** и повторить п.п.3 и 4.
- 6 Опыт проделать не менее 3 раз.
- 7 Результаты замеров занести в протокол испытания (см. табл. 3.1).
- 8 Вычислить деформации $\varepsilon_{он}$, $(\varepsilon_{non})_{он}$ по результатам замеров.
- 9 Подсчитать значения продольной ε и поперечной ε_{non} деформации по формулам сопротивления материалов.
- 10 Определить расхождение между опытными и теоретическими результатами:

$$\delta_{np} = \frac{|\varepsilon - \varepsilon_{он}|}{\varepsilon} \cdot 100\%,$$

$$\delta_{non} = \frac{|\varepsilon_{non} - (\varepsilon_{non})_{он}|}{\varepsilon_{non}} \cdot 100\%.$$

Содержание отчёта

- 1 Эскиз тяги с тензорезисторами.
- 2 Расчёты.
- 3 Протокол испытаний.
- 4 Выводы о достоверности формул сопротивления материалов.

Контрольные вопросы

- 1 Как формулируются и записываются законы Гука и Пуассона?
- 2 Как рассчитываются напряжения в поперечном сечении стержня при центральном растяжении?
- 3 Как рассчитываются продольная и поперечная деформации стержня при центральном растяжении?
- 4 Почему для измерения каждой деформации используются два тензоре-зистора, наклеенные на противоположные стороны?
- 5 Почему для изготовления авиационных деталей применяются титановые сплавы?

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ СИСТЕМЕ ПРИ СЖАТИИ

Цель работы: опытное определение деформаций и напряжений в статически неопределимой системе и сопоставление опытных данных с расчётными величинами, найденными по формулам сопротивления материалов.

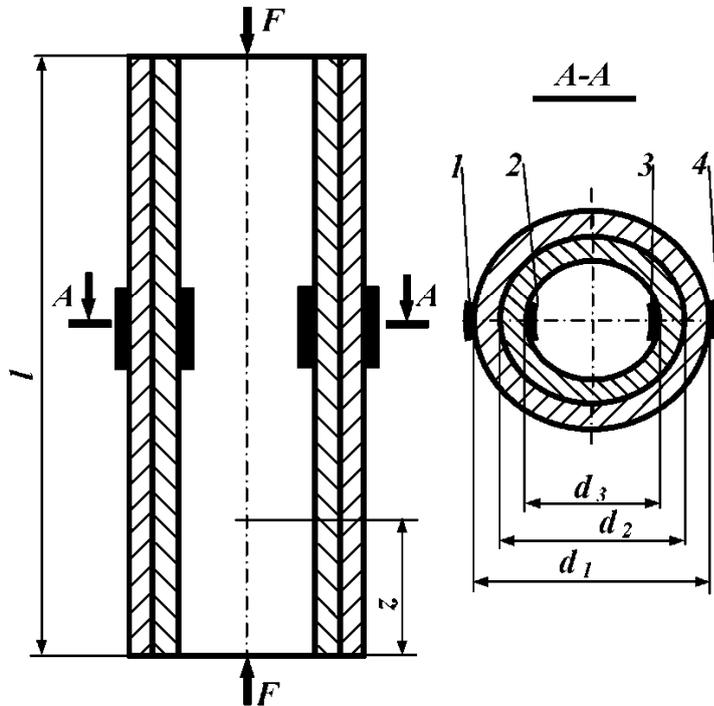


Рисунок 4.1 – Схема нагружения и наклейки тензорезисторов на трубе

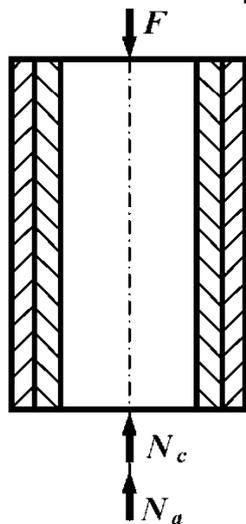


Рисунок 4.2 – Силы, действующие на часть трубы

Объект исследования

Испытанию подвергается биметаллическая труба, показанная на рисунке 4.1. С помощью универсальной испытательной машины она нагружается сжимающими силами F , направленными по ее оси. Материал внешней трубы — сталь X18H10T ($E_c = 1,9 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_s = 600$ МПа, $\sigma_{0,2} = 280$ МПа). Материал внутренней трубы — алюминиево-магниевый сплав АМг6 ($E_a = 0,7 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_s = 320$ МПа, $\sigma_{0,2} = 170$ МПа).

Биметаллические трубы применяются в авиационной технике для соединения сваркой трубопроводов из разных материалов.

Теоретическое решение

При центральном сжатии биметаллической трубы в ней возникает линейное напряжённое состояние, характеризующееся тем, что все внешние и внутренние силы направлены по одной оси. Поэтому если воспользоваться методом сечений и рассмотреть равновесие верхней части трубы (рис. 4.2), то из всех уравнений равновесия останется только одно:

$$-F + N_c - N_a = 0, \quad (1)$$

где N_c — результирующая внутренняя сила, приложенная к сечению стальной части;

N_a — результирующая внутренняя сила, приложенная к сечению алюминиевой части.

Одно уравнение равновесия (1)

содержит две неизвестные величины N_c , N_a , следовательно задача один раз статически неопределимая.

Чтобы решить её, необходимо получить еще одно уравнение. Оно составляется, исходя из условия совместности деформаций. В данном случае это условие заключается в том, что обе части трубы имеют одинаковую осевую деформацию, т. е.

$$\Delta l_c = \Delta l_a = \Delta l, \quad (2)$$

где $\Delta l_c, \Delta l_a$ — абсолютные осевые деформации стальной и алюминиевой частей трубы.

На основании закона Гука имеем

$$\Delta l_c = \frac{N_c \cdot l}{E_c \cdot A_c}, \quad \Delta l_a = \frac{N_a \cdot l}{E_a \cdot A_a}, \quad (3)$$

где A_c, A_a — площади поперечных сечений стальной и алюминиевой частей трубы.

Подставив выражения (3) в равенство (2), получим

$$\frac{N_a \cdot l}{E_a \cdot A_a} = \frac{N_c \cdot l}{E_c \cdot A_c}. \quad (4)$$

Из соотношений (1) и (4) найдём

$$N_c = \frac{E_c \cdot A_c}{E_c \cdot A_c + E_a \cdot A_a} \cdot F; \quad (5)$$

$$N_a = \frac{E_a \cdot A_a}{E_c \cdot A_c + E_a \cdot A_a} \cdot F. \quad (6)$$

Теоретическое значение напряжения в биметаллической трубе определяется по формулам

$$\sigma_c = \frac{N_c}{A_c} = \frac{E_c}{E_c \cdot A_c + E_a \cdot A_a} \cdot F; \quad (7)$$

$$\sigma_a = \frac{N_a}{A_a} = \frac{E_a}{E_c \cdot A_c + E_a \cdot A_a} \cdot F. \quad (8)$$

Экспериментальное определение напряжений

На внешней и внутренней поверхности биметаллической трубы наклеиваются в осевом направлении проволочные тензорезисторы, как показано на рисунке 4.1. С помощью этих тензорезисторов и тензометрической аппаратуры измеряются осевые деформации в двух парах точек, расположенных на одном диаметре поперечного сечения. Осевая деформация трубы ε определяется как среднеарифметическое показаний всех четырёх тензорезисторов. Такое осреднение позволяет исключить влияние изгибной деформации, обусловленной эксцентриситетом нагрузки. Опытные значения осевых напряжений вычисляются по формулам:

$$\text{в наружной части трубы } (\sigma_c)_{\text{опыт}} = E_c \cdot \varepsilon; \quad (9)$$

$$\text{во внутренней части трубы } (\sigma_a)_{\text{опыт}} = E_a \cdot \varepsilon. \quad (10)$$

Порядок проведения работы

1 Вычислить по формулам (7), (8) теоретические значения напряжений в

- биметаллической трубе для заданной нагрузки F' .
- 2 Включить измерительный прибор и прогреть его в течение 15 мин.
 - 3 Установить переключатель в позицию, соответствующую включению в измерительную схему прибора тензорезистора **1**.
 - 4 Приложить предварительную нагрузку F_0 к исследуемой детали и снять показания прибора.
 - 5 Приложить окончательную нагрузку $F'_к = F_0 - F_{расч}$ и снять новое показание прибора.
 - 6 Установить поочередно переключатель в позиции, соответствующие включению тензорезисторов **2, 3, 4** и повторить п.п.4 и 5.
 - 7 В каждом опыте относительную деформацию ε определить как среднее арифметическое показаний четырёх тензорезисторов. Опыт проделать не менее 3 раз и результаты осреднить.
 - 8 Результаты замеров занести в протокол испытаний (см. табл. 4.1).
 - 9 По измеренным деформациям с помощью формул (9), (10) определить опытные значения напряжений в стальной и алюминиевой частях трубы.
 - 10 Определить расхождение между опытными и теоретическими результатами:

$$\delta_c = \frac{|\sigma_c - (\sigma_c)_{оп}|}{\sigma_c} \cdot 100\%,$$

$$\delta_a = \frac{|\sigma_a - (\sigma_a)_{оп}|}{\sigma_a} \cdot 100\%.$$

Расчётные и опытные данные занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.1 – Протокол испытаний

| № опыта | F' , кН | A_1 | | ε_1 , мм/мм | A_2 | | ε_2 , мм/мм | A_3 | | ε_3 , мм/мм | A_4 | | ε_4 , мм/мм | ε , мм/мм | $\varepsilon_{ср}$, мм/мм |
|---------|-----------|--------------|--|-------------------------|--------------|--|-------------------------|--------------|--|-------------------------|--------------|--|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | | ΔA_1 | | | ΔA_2 | | | ΔA_3 | | | ΔA_4 | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | |

Таблица 4.1 – Сравнение расчётных и опытных значений напряжений

| $\varepsilon_{ср}$ | σ_c | $(\sigma_c)_{опыт}$ | δ_c | σ_a | $(\sigma_a)_{опыт}$ | δ_a |
|--------------------|------------|---------------------|------------|------------|---------------------|------------|
| | МПа | | % | МПа | | % |
| | | | | | | |

Содержание отчёта

- 1 Схема объекта исследования (см. рис. 4.1, 4.2) с указанием фактических размеров.
- 2 Расчёты, относящиеся к опытному и теоретическому определению напряжений.
- 3 Выводы о степени соответствия теоретических и опытных результатов.
- 4 Протоколы испытаний и сравнение результатов.

Контрольные вопросы

- 1 Почему биметаллическая труба является статически неопределимой системой?
- 2 Какие уравнения составляются при решении задач о напряжениях в статически неопределимых системах?
- 3 В чём сущность условия совместности деформаций при осевом сжатии биметаллической трубы?
- 4 Какое напряжённое состояние наблюдается в каждой части биметаллической трубы при центральном сжатии?
- 5 Для каких целей на испытываемую трубу наклеивается несколько тензорезисторов?
- 6 В какой части биметаллической трубы напряжения будут больше и почему?

КРУЧЕНИЕ БРУСЬЕВ

Цель работы: определение напряжений и перемещений при кручении брусков круглого и коробчатого сечений опытным путем и сопоставление полученных данных с результатами вычислений по формулам сопротивления материалов.

**КРУЧЕНИЕ СТУПЕНЧАТОГО БРУСА
КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ****Теоретическое решение**

В сопротивлении материалов для определения абсолютного угла закручивания бруса переменного круглого сечения применяется формула

$$\varphi = \int_0^l \frac{M_k(z)}{GJ_p} dz, \quad (1)$$

где $M_k(z)$ — крутящий момент в сечении с координатой z ;

G — модуль упругости при сдвиге, равный $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)}$;

$J_p = \frac{\pi \cdot d^4(z)}{32}$ — полярный момент инерции поперечного сечения.

Если диаметр изменяется по длине бруса ступенями, а крутящий момент остаётся постоянным, выражение (1) приводится к виду

$$\varphi = \frac{M_k}{G} \sum_{i=1}^m \frac{l_i}{J_{p_i}}, \quad (2)$$

где l_i , J_{p_i} — длина и полярный момент инерции поперечного сечения ступени i .

Экспериментальное определение угла закручивания

Испытания проводятся на установке, принципиальная схема которой показана на рис. 5.1. Испытуемый образец **1** из стали 60Г закрепляется в захватах установки и нагружается скручивающим моментом, создаваемым червячной парой и маятником-противовесом. Определение абсолютных углов закручивания осуществляется с помощью угломерного устройства, состоящего из двух разрезных втулок **2** и **3**, закреплённых на испытуемом образце **1**, и индикатора **4**. Держатель индикатора жёстко связан со втулкой **3**, а другая втулка составляет одно целое с коленчатым рычагом, на плоскую опорную поверхность которого опирается ножка индикатора. При нагружении образца крутящим моментом сечения **2** и **3** повернутся одно по отношению к другому на некоторый угол φ , и индикатор **4** зафиксирует взаимное смещение концов рычагов ΔB . Угол закручивания образца на длине l будет определяться отношением

$$\varphi = \frac{\Delta B}{r}, \quad (3)$$

где r — расстояние между ножкой индикатора и осью образца.

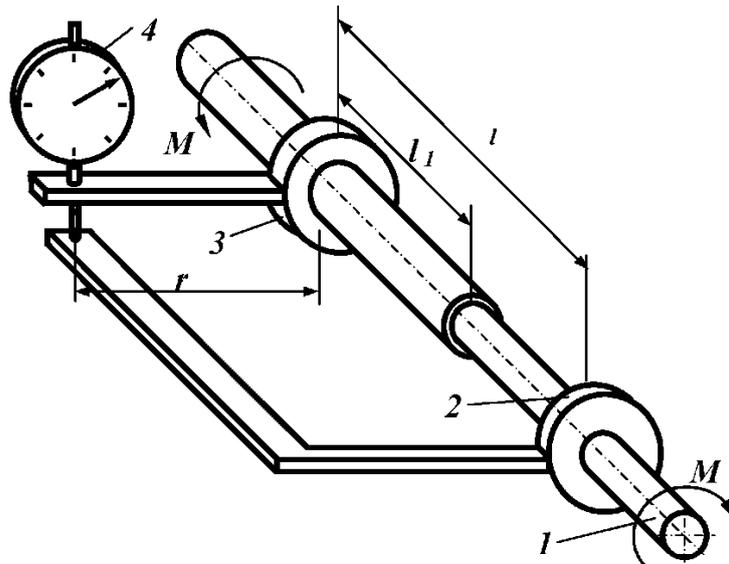


Рисунок 5.1 – Схема установки для определения углов закручивания бруса круглого сечения

Порядок выполнения работы

- 1 Измерить диаметры образца d_1, d_2 и длины l_1, l_2 .
- 2 По заданному преподавателем значению крутящего момента определить теоретическое значение угла закручивания с помощью формулы (2).
- 3 Задать на установке предварительную нагрузку и снять показание индикатора 4.
- 4 Догрузить образец заданным моментом и снять новое показание индикатора. Опыт повторить не менее трёх раз.
- 5 Вычислить приращения показаний индикатора и найти их среднее значение.
- 6 Определить по формуле (3) опытный угол закручивания $\varphi_{оп}$.
- 7 Полученный результат сопоставить с теоретическим путём вычисления расхождения

$$\delta = \frac{|\varphi - \varphi_{оп}|}{\varphi} \cdot 100\%.$$

- 8 Результаты исследования занести в протокол (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Протокол испытаний

| № опыта | $M_{кр}$ кН·м | B | ΔB | $\Delta B_{ср}$ | $\varphi_{оп}$ | $\varphi_{расч}$ | $\delta, \%$ |
|---------|------------------|-----|------------|-----------------|----------------|------------------|--------------|
| | | мм | | | рад | | |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |

КРУЧЕНИЕ ТОНКОСТЕННОГО БРУСА КОРОБЧАТОГО СЕЧЕНИЯ

Теоретическое решение

Конструкция и схема нагружения рассматриваемого стержня показаны на рисунке 5.2.

Известно, что касательные напряжения при кручении тонкостенного бруса с замкнутым профилем определяются по формуле

$$\tau = \frac{M_k}{2 \cdot A^* \cdot \delta}, \quad (4)$$

где M_k — крутящий момент;

A^* — площадь фигуры, ограниченной срединной линией поперечного сечения;

δ — толщина стенки бруса.

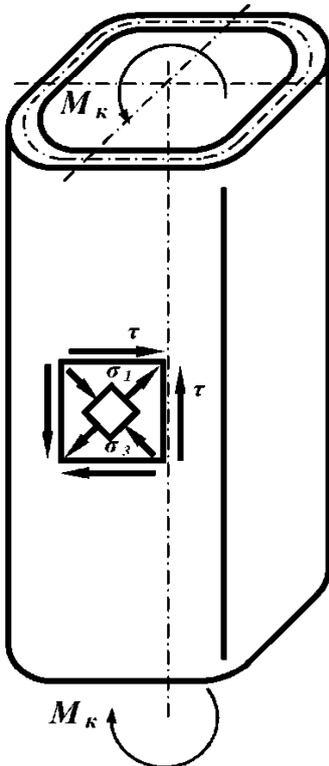


Рисунок 5.2 – Схема нагружения бруса коробчатого сечения

Материал стержня в каждой точке боковой плоской грани испытывает деформации чистого сдвига (см. рис. 5.2). При чистом сдвиге главные напряжения равны: $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = 0$, $\sigma_3 = -\tau$. Выражения для главных деформаций на основании обобщённого закона Гука запишутся в виде

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_1 - \mu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)] = \frac{1+\mu}{E} \cdot \tau; \quad (5)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_3 - \mu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)] = -\frac{1+\mu}{E} \cdot \tau.$$

Отсюда можно получить формулы для определения касательных напряжений через главные деформации ε_1 или ε_3

$$\tau = \frac{E}{1+\mu} \cdot \varepsilon_1 = -\frac{E}{1+\mu} \cdot \varepsilon_3. \quad (6)$$

Главные деформации могут быть измерены с помощью тензометров, установленных в направлении главных напряжений, т. е. под углом 45° к оси стержня.

Угол закручивания тонкостенного стержня с замкнутым профилем определяется по формуле

$$\varphi = \frac{M_k \cdot l}{(2 \cdot A^*)^2}, \quad (7)$$

$$\oint_s \frac{ds}{\delta}$$

где l — длина закручиваемого стержня;

ds — дифференциал дуги срединной линии поперечного сечения;

δ — толщина стенки.

При постоянной толщине стенки стержня получим

$$\oint_s \frac{ds}{\delta} = \frac{1}{\delta} \cdot \oint_s ds = \frac{S}{\delta}. \quad (8)$$

Здесь через S обозначена длина срединной линии поперечного сечения

стержня. В этом случае зависимость (7) примет вид

$$\varphi = \frac{M_k \cdot l \cdot S}{4 \cdot G \cdot (A^*)^2 \cdot \delta} \quad (9)$$

Экспериментальное определение угла закручивания и напряжений

Опыт проводится на машине для испытаний на кручение вертикального типа. Брус коробчатого сечения из алюминиевого сплава Д16 с помощью жёстких вставок устанавливается в захватах машины и нагружается крутящим моментом. На поверхности бруса установлены четыре рычажных тензометра для измерения деформаций в различных направлениях (рис. 5.3). Тензометры *I* и *II*, расположенные под углом 45° к оси стержня, служат для измерения главных деформаций $\varepsilon_I - \varepsilon_I$ и $\varepsilon_{II} - \varepsilon_{II}$, необходимых при вычислении опытных значений касательного напряжения по формуле (6). Тензометры *III* и *IV* служат для того, чтобы убедиться в отсутствии деформаций в продольном (ε_{III}) и поперечном (ε_{IV}) направлениях. Только при отсутствии этих деформаций в стержне будет иметь место чистый сдвиг, что позволит применить формулу (6). Степень отклонения от чистого сдвига оценивается величинами

$$\frac{|\varepsilon_{III}|}{\varepsilon_I} \cdot 100\%; \quad \frac{|\varepsilon_{IV}|}{\varepsilon_I} \cdot 100\%; \quad \frac{|\varepsilon_I + \varepsilon_{II}|}{\varepsilon_I} \cdot 100\% \quad (10)$$

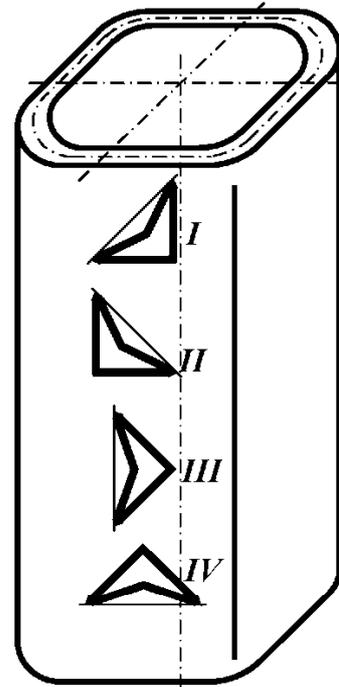


Рисунок 5.3 – Схема установки тензорезисторов

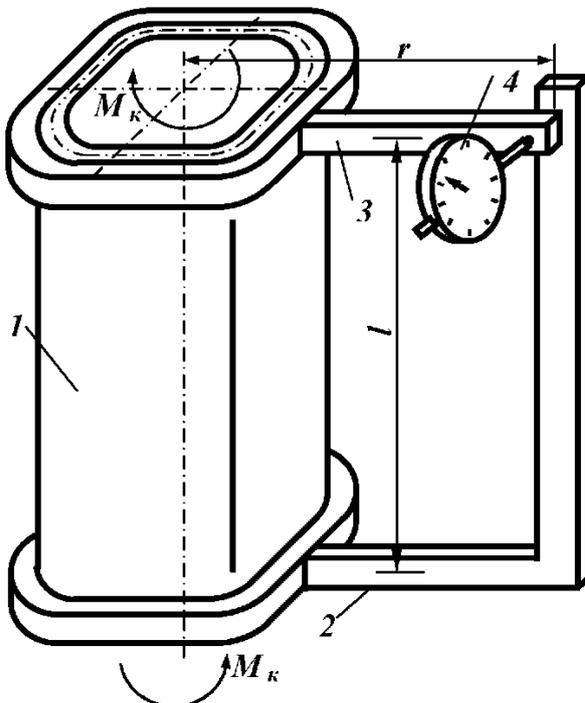


Рисунок 5.4 – Схема измерения угла поворота

В эти величины входят также ошибки опыта при определении деформаций.

Определение абсолютных углов закручивания осуществляется с помощью угломерного устройства (рис. 5.4), состоящего из двух жёстких рычагов *2* и *3*, закреплённых на испытуемом образце *1*, и индикатора *4*. Держатель индикатора жёстко связан со втулкой *3*, а на плоскую опорную поверхность коленчатого рычага *2* опирается ножка индикатора. При нагружении образца крутящим моментом сечения *2* и *3* повернутся одно по отношению к другому на некоторый угол φ , и индикатор *4* зафиксирует взаимное смещение концов рычагов ΔB . Угол

закручивания образца на длине l будет определяться отношением

$$\varphi = \frac{\Delta B}{r}, \quad (3)$$

где r — расстояние между ножкой индикатора и осью образца.

Порядок выполнения работы

1 По заданной величине M_k и размерам бруса вычислить теоретические значения τ и φ (формулы (4) и (9)).

2 Брус нагрузить небольшим предварительным моментом M_{k0} , после чего записать начальные показания тензометров и индикатора.

3 Приложить окончательную нагрузку M_k $M_{k0} + M_{kрасч}$ и записать конечные показания тензометров и индикатора. Опыт выполнить не менее трёх раз.

4 Определить приращения показаний тензометров ΔA , индикатора ΔB и их средние значения по результатам опытов $\Delta A_{ср}$, $\Delta B_{ср}$.

5 Вычислить опытные значения деформаций:

$$\varepsilon_{оп} = \frac{\Delta A_{ср}}{k \cdot l_T},$$

где k — коэффициент увеличения тензометра; l_T — база тензометра.

6 Найти опытное значение угла закручивания по формуле (3).

7 Оценить степень отклонения от чистого сдвига по формулам (10).

8 По формуле (6) вычислить опытное значение касательного напряжения. Если $\varepsilon_I \neq |\varepsilon_{II}|$, то следует принять для расчетов их среднее арифметическое, тогда

$$\tau_{оп} = \frac{E_s}{1 + \mu} \cdot \frac{\varepsilon_I + |\varepsilon_{II}|}{2}.$$

9 Произвести сопоставление опытных и теоретических значений рассматриваемых величин путём вычисления расхождений:

$$\delta_\tau = \frac{\tau - \tau_{оп}}{\tau} \cdot 100\%; \quad \delta_\varphi = \frac{\varphi - \varphi_{оп}}{\varphi} \cdot 100\%.$$

10 Результаты исследований занести в таблицы 5.2 и 5.3

Таблица 5.2 – Определение угла поворота бруса

| № опыта | $M_{кз}$ кН·м | B | ΔB | $\Delta B_{ср}$ | $\varphi_{оп}$ | $\varphi_{расч}$ | $\delta, \%$ |
|---------|------------------|-----|------------|-----------------|----------------|------------------|--------------|
| | | мм | | | рад | | |
| 1 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| | | | | | | | |

Содержание отчёта

1-я часть — кручение ступенчатого бруса:

- 1 Схема угломера с основными размерами.
- 2 Расчёты, относящиеся к определению теоретических и опытных значений углов закручивания.
- 3 Протокол испытаний.
- 4 Выводы о достоверности формул сопротивления материалов

2-я часть — кручение бруса коробчатого сечения:

- 1 Поперечное сечение бруса с размерами.
- 2 Схема установки тензометров и угломера.
- 3 Расчёты, относящиеся к определению теоретических и опытных значений углов закручивания и напряжений.
- 4 Протоколы испытаний.
- 5 Выводы о достоверности формул сопротивления материалов.

Контрольные вопросы

- 1 Какое нпряжённое состояние материала возникает при кручении бруса?
- 2 Что такое угол закручивания?
- 3 Что называется полярным моментом инерции сечения и какова его размерность?
- 4 Что такое крутящий момент?
- 5 Почему нулевые показания тензометров *III* и *IV* подтверждают предположение о наличии «чистого» сдвига на поверхности бруса?
- 6 Какая связь существует между касательными и главными напряжениями чистом сдвиге?

Таблица 5.3 – Определение напряжений

| № опыта | M_3 , кН | Показания тензосметров | | | | ΔA , мм | | | | $\Delta A_{ср}$, мм | | | | МПа | | % | | | |
|---------|------------|------------------------|----|-----|----|-----------------|----|-----|----|----------------------|----|-----|----|------------|----------------|---|--|---|---------------|
| | | I | II | III | IV | I | II | III | IV | I | II | III | IV | σ_1 | $\sigma_{рач}$ | $\frac{\epsilon_{III} \cdot 100}{\epsilon_I}$ | $\frac{\epsilon_{IV} \cdot 100}{\epsilon_I}$ | $\frac{\epsilon_I + \epsilon_{II} \cdot 100}{\epsilon_I}$ | δ_τ |
| 1 | | | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | I | II | III | IV | I | II | III | IV | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьев А. М., Марьин В. А.* Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. – М.: Наука, 1975. - 285 с.
2. *Беляев Н.М.* Лабораторные работы по сопротивлению материалов. – М.: Госиздат, 1954. - 186с.
3. Лабораторные работы по сопротивлению материалов на универсальном стенде. – М. МАИ, 1989. – 41 с.:
4. Расчеты на прочность в машиностроении: В 3 т./Под ред. *С. Д. Пономарева* - М.: Машгиз, Т. 1, 1956. - 884с.; Т. 2, 1958. – 975 с.; Т. 3, 1959. – 1118 с.
5. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов.- М.: МГТУ им. Баумана, 2010.- 512 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Работа № 1

Испытание на растяжение. Основные механические характеристики материалов.....3

Работа № 2

Измерение деформаций проволочными тензорезисторами.....10

Работа № 3

Измерение деформаций при центральном растяжении.....16

Работа № 4

Исследование деформаций и напряжений в статически неопределимой системе.....19

Работа № 5

Кручение брусьев.....23

Рекомендуемая литература.....30