

**ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ  
СЛОЖНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ**

Методические указания

Даны методические указания к выполнению лабораторных работ по теме «Сложные деформации». Ко всем лабораторным работам приводятся теоретические обоснования и соответствующие формулы.

Изложены методика выполнения работ, основные требования к оформлению, даны схемы установок и 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 материалов и конструкций».



$J_x, J_y$  — главные центральные моменты инерции поперечного сечения стержня;

$x_F, y_F$  — координаты точки приложения силы  $F$  в главных центральных осях поперечного сечения;

$x, y$  — координаты точки поперечного сечения, в которой определяется напряжение.

### Опытное определение деформаций и напряжений

Опытные значения деформаций определяют с помощью тензорезисторов, наклеенных на поверхность стержня в заданных точках (см. рис. 12.1, 12.2). Для пересчёта показаний измерительного прибора, подключённого к тензорезисторам, в деформации используют результаты тарировки (см. лаб. работу № 2) или паспортную цену деления прибора с соответствующей поправкой на фактическое значение коэффициента тензочувствительности тензорезистора.

Для определения напряжений по известным деформациям используется закон Гука. При внецентренном растяжении в любой точке стержня имеет место линейное напряжённое состояние. В этом случае закон Гука выражается зависимостью

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (12.2)$$

где  $E$  — модуль продольной упругости материала стержня.

### Порядок проведения работы

1. Для заданной нагрузки  $F$  по формуле (12.1) вычислить расчётные значения напряжения  $\sigma_{\text{рас}}$  в исследуемых точках. Геометрические характеристики и координаты точек, входящие в формулу (12.1), следует взять из соответствующего стандарта на авиационный алюминиевый профиль.

2. Дать предварительную нагрузку на стержень и произвести отчёты по прибору, подключённому к тензорезисторам.

3. Увеличить нагрузку на заданную величину  $F'$  и вновь произвести отчёты по прибору.

4. Подсчитать приращения показаний прибора  $\Delta A$  и по средним значениям из трёх опытов вычислить опытные значения деформаций  $\varepsilon_{\text{оп}}$  в исследуемых точках.

5. Вычислить опытные значения напряжений  $\sigma_{\text{оп}}$  по формуле (12.2).

6. Сопоставить расчётные и опытные значения напряжений путем вычисления расхождений по формуле

$$\frac{|\sigma_{\text{рас}} - \sigma_{\text{оп}}|}{|\sigma_{\text{рас}}|} \cdot 100\%.$$

7. Опытные и расчетные величины занести в протоколы испытаний (табл. 12.1 и 12.2).

### Содержание отчёта

1. Расчётная схема стержня.
2. Поперечное сечение стержня с необходимыми размерами.
3. Расчёты, связанные с определением напряжений и деформаций.
4. Протоколы испытаний и результатов определения напряжений.
5. Общие выводы.

Таблица 12.1

### Протокол испытаний

Номер опыта	F, кН	Показания прибора, дел			Приращение показания прибора, дел					
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	ΔA <sub>1</sub>	ΔA <sub>1ср</sub>	ΔA <sub>2</sub>	ΔA <sub>2ср</sub>	ΔA <sub>3</sub>	ΔA <sub>3ср</sub>
1										
2										
3										

Таблица 12.2

### Напряжения, МПа

Точка I			Точка II			Точка III		
σ <sub>рас</sub>	σ <sub>оп</sub>	Расхождение, %	σ <sub>рас</sub>	σ <sub>оп</sub>	Расхождение, %	σ <sub>рас</sub>	σ <sub>оп</sub>	Расхождение, %

## Контрольные вопросы

1. В каком случае стержень испытывает внецентренное растяжение?
2. На какие простые деформации можно разложить внецентренное растяжение?
3. Какие напряжения возникают в поперечных сечениях стержня при внецентренном растяжении?
4. Как распределены напряжения в поперечном сечении стержня при внецентренном растяжении?
5. Как определить положение нейтральной оси поперечного сечения стержня при внецентренном растяжении?
6. Что называется ядром сечения и как его построить?
7. Можно ли применять формулу (1) для стержней любой длины при внецентренном сжатии?
8. Как определить напряжения в стержне опытным путём?

## Лабораторная работа 13

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ, НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

Цель работы - опытное определение деформаций, напряжений и перемещений балки при косом изгибе и сопоставление опытных данных с расчётными значениями, найденными по формулам сопротивления материалов.

#### Объект исследования

Испытуемая балка (рис. 13.1) представляет собой часть стрингера центроплана самолета Ту-154. Материал стрингера - алюминиевый сплав Д16Т, поперечное сечение двутавр (рис. 13.2). Балка закреплена одним концом и нагружена на свободном конце силой  $P$ . Балка может поворачиваться относительно продольной оси. Величину угла  $\varphi$  между вертикалью и главной центральной осью  $y$  устанавливают по круговой шкале 1 (см. рис. 13.1).

Деформации и напряжения определяют в точках I, II, III, IV сечения, отстоящего на расстоянии  $z$  от свободного конца балки. Кроме того, определяют перемещения свободного конца балки.

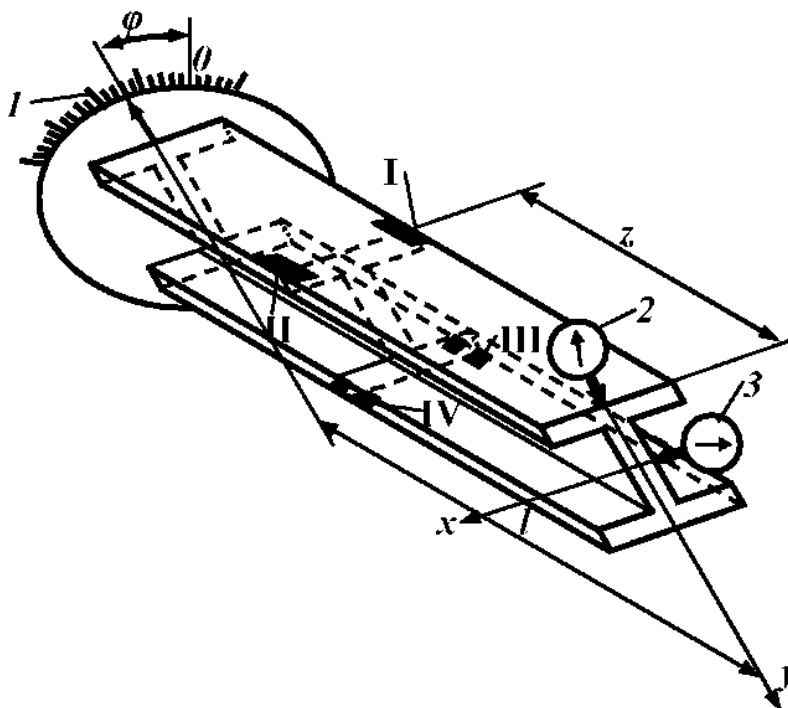


Рис. 13.1 Исследуемая балка-стрингер. Схема нагружения и наклейки тензорезисторов

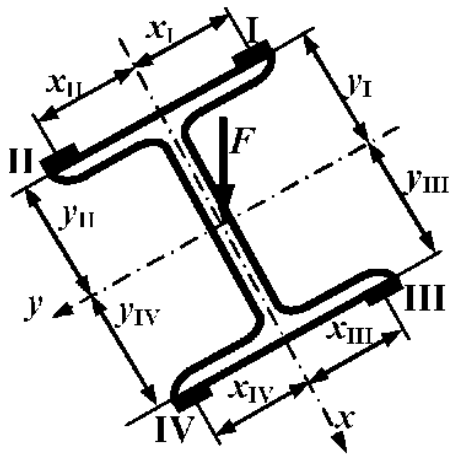


Рис. 13.2 Поперечное сечение стрингера

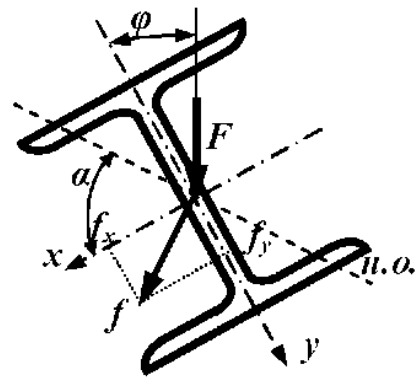


Рис. 13.3 Схема перемещений балки при косом изгибе

### Теоретическое решение

Нормальные напряжения балки при косом изгибе вычисляются по формуле

$$\sigma = \pm M \cdot \left( \frac{x \cdot \sin \varphi}{J_y} + \frac{y \cdot \cos \varphi}{J_x} \right), \quad (13.1)$$

где  $M$  — изгибающий момент в рассматриваемом сечении, взятый по абсолютной величине. Знак перед  $M$  должен совпадать со знаком напряжений в 1-м квадранте сечения;

$x, y$  — координаты точки, в которой вычисляется напряжение.

Направление осей следует выбрать таким, чтобы плоскость изгибающего момента проходила через первый квадрант;

$J_x, J_y$  — главные центральные моменты инерции поперечного сечения балки.

Составляющие полного перемещения свободного конца балки вдоль осей  $x, y$  определяются по формулам

$$f_x = \frac{F \cdot l^3 \cdot \sin \varphi}{3 E \cdot J_y}; \quad f_y = \frac{F \cdot l^3 \cdot \cos \varphi}{3 E \cdot J_x}. \quad (13.2)$$

Полное перемещение находится как геометрическая сумма составляющих:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (13.3)$$

Направление полного перемещения перпендикулярно нейтральной оси сечения, положение которой определяется углом  $\alpha$  (рис. 3). Угол  $\alpha$  определяют по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{J_x}{J_y} \cdot \operatorname{tg} \varphi \right). \quad (13.4)$$

### Опытное определение деформаций, напряжений и перемещений

Опытные значения деформаций  $\varepsilon$  определяются с помощью тензорезисторов, наклеенных на поверхность балки в заданных точках (см. рис. 13.1, 13.2). Для пересчёта показаний измерительного прибора, подключённого к тензорезисторам, в деформации используются результаты тарировки (см. лаб. работу № 2) или паспортная цена деления прибора с соответствующей поправкой на фактическое значение коэффициента тензочувствительности тензорезистора.

Для определения напряжений по известным деформациям используется закон Гука. В исследуемых точках балки имеет место линейное напряжённое состояние. В этом случае закон Гука выражается зависимостью

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (13.5)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости материала балки.

Опытные значения составляющих полного прогиба на свободном конце балки определяются с помощью индикаторов часового типа 2, 3 (см. рис. 13.1). Опытное значение угла  $\alpha$  определяют по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{f_x}{f_y}.$$

### Порядок проведения работы

1. Для заданных значений  $R$ ,  $z$  и  $\varphi$  по формуле (13.1) вычислить теоретические значения напряжений  $\sigma_{\text{рас}}$ . Характеристики и координаты точек, входящие в формулу (1), следует взять из соответствующего стандарта на авиационный алюминиевый профиль.

2. По формулам (13.2) определить теоретические значения составляющих полного прогиба  $f_{x \text{ рас}}$ ,  $f_{y \text{ рас}}$ . Затем по формуле (13.3) подсчитать полный прогиб  $f_{\text{рас}}$ .

3. Вычислить по формуле (13.4) теоретическое значение угла  $\varphi_{\text{рас}}$ , определяющего положение нейтральной оси сечения.

4. Используя шкалу 1 (см. рис. 13.1), повернуть балку на заданный угол  $\varphi$ . Дать предварительную нагрузку на балку и записать начальные показания индикаторов и прибора, подключённого к тензорезисторам.

5. Увеличить нагрузку на заданную величину  $R_{\text{рас}}$  и вновь записать показания прибора и индикаторов.

6. Вычислить приращения показаний прибора  $\Delta A$  и по средним



значениям из трёх опытов вычислить опытные деформации  $\varepsilon_{оп}$  в исследуемых точках.

7. Вычислить опытные значения напряжений  $\sigma_{оп}$  по формуле (13.5).

8. Подсчитать опытные значения составляющих  $f_{x\text{ оп}}$ ,  $f_{y\text{ оп}}$  и полного прогиба как осреднённые значения приращений показаний  $\Delta V_x$  и  $\Delta V_y$  индикаторов. По формуле 13. (3) вычислить полный прогиб  $f_{оп}$ .

9. Вычислить опытное значение угла  $\alpha_{оп}$  по формуле (13.6).

10. Сопоставить теоретические и опытные значения найденных величин путем вычисления расхождений по формулам

$$\frac{|\sigma_{рас} - \sigma_{оп}|}{|\sigma_{рас}|} \cdot 100\%; \quad \frac{|f_{рас} - f_{оп}|}{|f_{рас}|} \cdot 100\%; \quad \frac{|\alpha_{рас} - \alpha_{оп}|}{|\alpha_{рас}|} \cdot 100\%.$$

11. Опытные и расчётные величины занести в протокол испытаний и таблицу результатов исследований

Таблица 13.1

### Протокол испытаний

Номер опыта	Показания прибора, дел				Приращения показаний прибора, дел								Показания индикаторов мм		Приращение показаний индикаторов, мм				
	F, кН	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	ΔA <sub>1</sub>	ΔA <sub>1 ср</sub>	ΔA <sub>2</sub>	ΔA <sub>2 ср</sub>	ΔA <sub>3</sub>	ΔA <sub>3 ср</sub>	ΔA <sub>4</sub>	ΔA <sub>4 ср</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	ΔV <sub>x</sub>	f <sub>x оп</sub> = ΔV <sub>x ср</sub>	ΔV <sub>y</sub>	f <sub>y оп</sub> = ΔV <sub>y ср</sub>
1																			
2																			
3																			

### Содержание отчёта

1. Схема балки.
2. Поперечное сечение с необходимыми размерами.
3. Схема перемещений концевого сечения балки.
4. Расчёты, связанные с определением деформаций, напряжений и перемещений.
5. Протоколы испытаний и результатов определения напряжений и

перемещений.

6. Общие выводы.

Таблица 13.2

Результаты исследований

Напряжения, МПа												Перемещение, мм			Угол, рад		
Точка I			Точка II			Точка III			Точка IV								
$\sigma_{рас}$	$\sigma_{оп}$	расхожд., %	$\sigma_{рас}$	$\sigma_{оп}$	расхожд., %	$\sigma_{рас}$	$\sigma_{оп}$	расхожд., %	$\sigma_{рас}$	$\sigma_{оп}$	расхожд., %	$f_{рас}$	$f_{оп}$	расхожд., %	$\alpha_{рас}$	$\alpha_{оп}$	расхожд., %

**Контрольные вопросы**

1. В каком случае балка испытывает прямой (плоский) изгиб?
2. В каком случае балка испытывает косой изгиб?
3. На какие простые деформации можно разложить косой изгиб?
4. Какие напряжения возникают в поперечных сечениях балки при косом изгибе?
5. Как распределены нормальные напряжения в поперечном сечении балки при косом изгибе?
6. Как определить положение нейтральной оси поперечного сечения балки при косом изгибе?
7. Как связаны между собой положения нейтральной оси поперечного сечения и вектора полного перемещения?
8. Какие балки испытывают прямой изгиб при нагружении в любой осевой плоскости?

## Лабораторная работа 14

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

Цель работы - опытно-определить деформации и напряжения в валу при кручении с изгибом с помощью розетки тензорезисторов и сопоставление опытных данных с расчетными значениями, найденными по формулам сопротивления материалов.

#### Объект исследования

Объект исследования представляет собой вал авиационного двигателя НК-4, испытывающий кручение с изгибом (рис. 14.1). Один конец вала 1 закреплён в основании 2, на другом конце установлен рычаг 3, через который осуществляется нагружение силой, направленной вертикально вверх. Сила создаётся с помощью винтовой пары 4 вращением штурвала 5. Величина силы определяется по деформации динамометра 6.

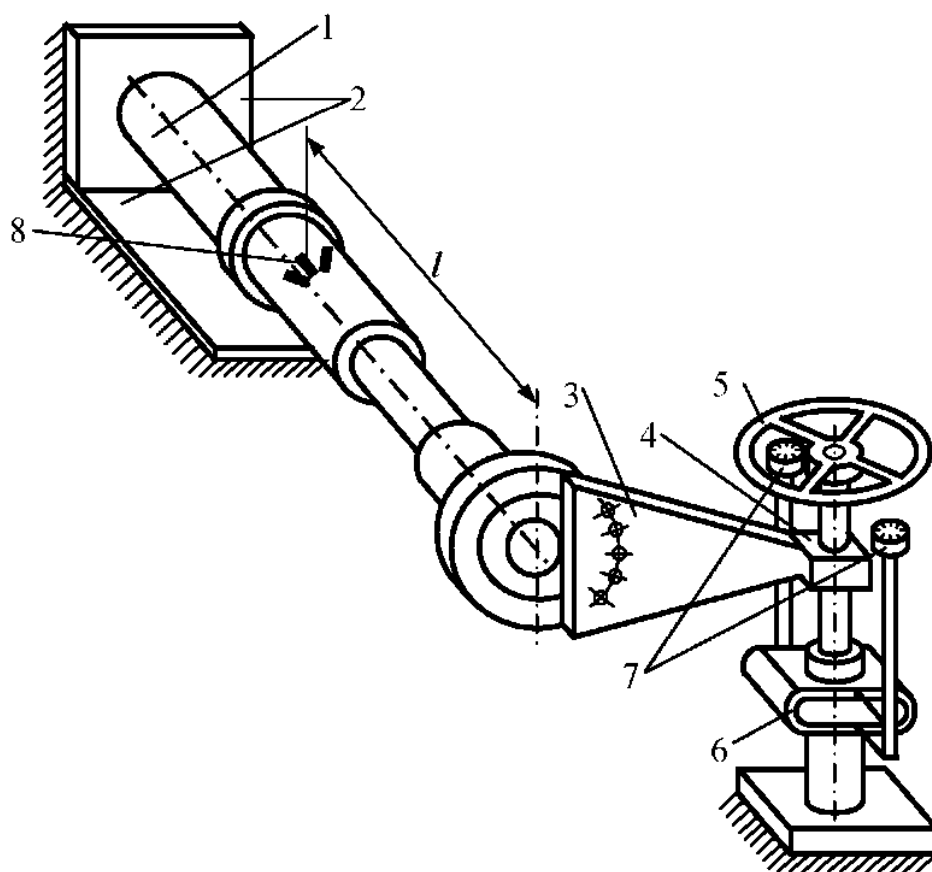


Рис.14.1 Вал авиационного двигателя НК-4 с устройством для нагружения

регистрируемой индикаторами часового типа 7.

Деформации и напряжения определяются в верхней точке 8 сечения, отстоящего от свободного конца вала на расстоянии  $l$ .

### Теоретическое решение

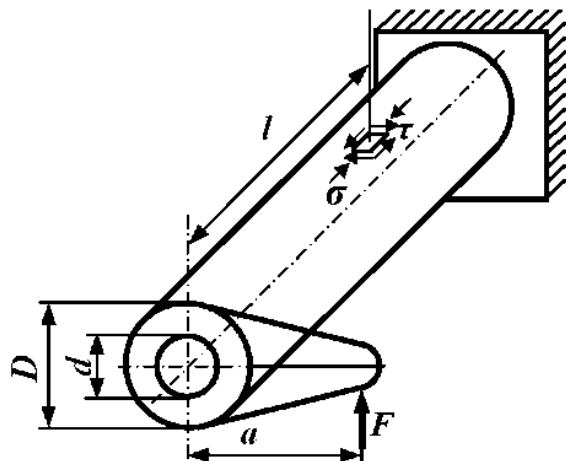


Рис. 14.2 Расчётная схема вала

Расчётная схема вала и напряжённое состояние в исследуемой точке представлены на рис. 14.2. Нормальное напряжение определяется

$$\sigma = \frac{M_u}{W_u}, \quad (14.1)$$

касательное — по формуле

$$\tau = \frac{M_k}{W_p}, \quad (14.2)$$

где  $M_u = F \cdot l$  — изгибающий момент в сечении;

$$W_u = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \cdot \left( 1 - \frac{d^4}{D^4} \right) \quad \text{— момент сопротивления поперечного}$$

сечения вала при изгибе;

$D$  — наружный диаметр вала;

$d$  — внутренний диаметр вала;

$M_k = F \cdot a$  — крутящий момент в сечении;

$$W_p = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \cdot \left( 1 - \frac{d^4}{D^4} \right) \quad \text{— момент сопротивления поперечного}$$

сечения вала при кручении.

Главные напряжения и положение главных площадок определяются по

формулам

$$\sigma_{I,II} = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_\alpha + \sigma_\beta) \pm \sqrt{(\sigma_\alpha - \sigma_\beta)^2 + 4\tau_\alpha^2} \right], \quad (14.3)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = -\frac{\tau_\alpha}{\sigma_\alpha - \sigma_{II}}.$$

Приняв, что грань элемента  $\alpha$  совпадает с поперечным сечением и, следовательно,  $\sigma_\alpha = -\sigma$ ,  $\tau_\alpha = \tau$ ,  $\sigma_\beta = 0$ ,  $\tau_\beta = -\tau$ , получим

$$(14.4)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \left( \sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \right)}.$$

Теоретические значения главных напряжений  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$  и угла  $\alpha_0$  между напряжениями  $\sigma_\alpha$  и  $\sigma_I$  можно получить также с помощью круга Мора (рис. 14.3).

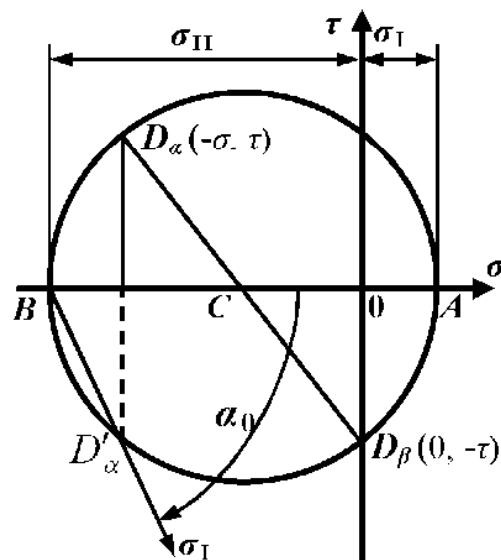


Рис.14.3 Круг Мора

### Опытное определение деформаций и напряжений

Деформации измеряются проволочными или фольговыми тензорезисторами. Для вычисления деформаций по показаниям измерительного прибора, подключённого к тензорезисторам, используются результаты тарировки прибора с тензорезисторами (см. лаб. работу № 2) или паспортная цена деления прибора с соответствующей поправкой на фактический коэффициент тензочувствительности тензорезистора.

Напряжения определяются по найденным деформациям с помощью

закона Гука. В исследуемой точке имеет место плоское напряжённое состояние. В этом случае закон Гука в главных осях выражается зависимостями

$$\varepsilon_I = \frac{1}{E}(\sigma_I - \mu \sigma_{II}), \quad \varepsilon_{II} = \frac{1}{E}(\sigma_{II} - \mu \sigma_I). \quad (14.5)$$

Откуда

$$\sigma_I = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_I + \mu \varepsilon_{II}), \quad \sigma_{II} = \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_{II} + \mu \varepsilon_I). \quad (14.6)$$

К сожалению, непосредственное измерение  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_{II}$  невозможно, так как заранее неизвестно направление главных площадок напряжённого и деформированного состояний. Поэтому выразим главные деформации через деформации, замеренные в произвольных осях  $x$ ,  $y$ . Для этого воспользуемся формулами поворота от главных площадок.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_I \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_{II} \cdot \sin^2 \alpha, \\ \sigma_y &= \sigma_{II} \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_I \cdot \sin^2 \alpha, \\ \tau_{xy} &= \frac{\sigma_I - \sigma_{II}}{2} \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (14.7)$$

Подставим выражения (14.6) в формулы (14.7):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1 - \mu^2} [(\varepsilon_I + \mu \varepsilon_{II}) \cos^2 \alpha + (\varepsilon_{II} + \mu \varepsilon_I) \sin^2 \alpha], \\ \sigma_y &= \frac{E}{1 - \mu^2} [(\varepsilon_{II} + \mu \varepsilon_I) \cos^2 \alpha + (\varepsilon_I + \mu \varepsilon_{II}) \sin^2 \alpha], \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1 - \mu^2)} (\varepsilon_I + \mu \varepsilon_{II} - \varepsilon_{II} - \mu \varepsilon_I) \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (14.8)$$

Левые части выражений (14.8) выразим с помощью закона Гука, записанного в произвольных осях:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_x + \mu \varepsilon_y), \\ \sigma_y &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_y + \mu \varepsilon_x), \\ \tau_{xy} &= G \gamma_{xy}. \end{aligned} \quad (14.9)$$

Приравняем правые части выражений (14.8) и (14.9). После преобразований получим

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \varepsilon_I \cdot \cos^2 \alpha + \varepsilon_{II} \cdot \sin^2 \alpha, \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_{II} \cdot \cos^2 \alpha + \varepsilon_I \cdot \sin^2 \alpha, \\ \gamma_{xy} &= (\varepsilon_I - \varepsilon_{II}) \sin 2\alpha.\end{aligned}\quad (14.10)$$

Формулы (14.10) аналогичны формулам для напряжений на произвольных площадках (14.7). На этом основании по аналогии с формулами для главных напряжений

$$\sigma_{I,II} = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right], \quad (14.11)$$

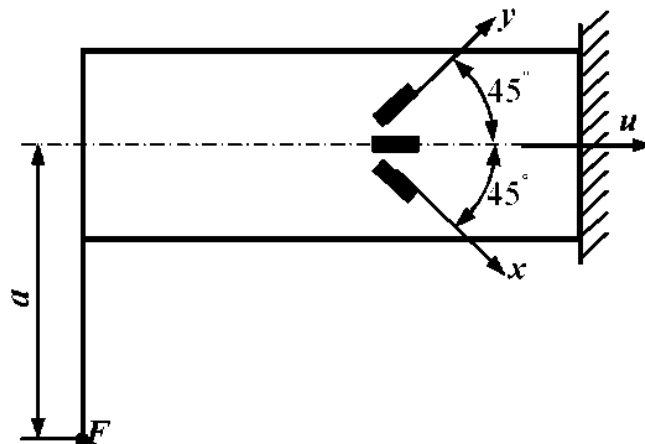
$$\operatorname{tg} \alpha_0 = -\frac{\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_{II}}.$$

запишем формулы для главных деформаций:

$$\varepsilon_{I,II} = \frac{1}{2} \left[ (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2} \right], \quad (14.12)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = -\frac{\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_{II}}.$$

В формулы (14.12) входит деформация сдвига  $\gamma_{xy}$ , которую тензорезисторами непосредственно измерить нельзя. Ее можно определить, если для измерения деформаций использовать розетку из трёх тензорезисторов. Направление тензорезисторов в розетке может быть любым, наиболее распространены розетки, у которых углы между тензорезисторами составляют  $45^\circ$ , так как подсчёт  $\gamma_{xy}$  и, следовательно,  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_{II}$ ,  $\alpha_0$  в этом случае упрощается. Схема установки розетки тензорезисторов в исследуемой точке вала приведена на рис. 14.4. Выразим  $\gamma_{xy}$  через деформации  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_u$ . С этой целью найдем  $\varepsilon_u$ , используя первую



зависимость (14.10), заменив в соответствии с рис. 14.4 угол  $\alpha$  на  $\alpha + 45^\circ$ :

$$\varepsilon_u = \varepsilon_I \cdot \cos^2(\alpha + 45^\circ) + \varepsilon_{II} \cdot \sin^2(\alpha + 45^\circ).$$

После преобразований будем иметь

$$\varepsilon_u = \frac{\varepsilon_I + \varepsilon_{II}}{2} - \frac{\varepsilon_I - \varepsilon_{II}}{2} \sin 2\alpha. \quad (14.13)$$

В соответствии с формулой (14.12)

$$\varepsilon_I + \varepsilon_{II} = \varepsilon_x + \varepsilon_y. \quad (14.14)$$

Из третьей формулы (14.10)

$$\varepsilon_I - \varepsilon_{II} = \frac{\gamma_{xy}}{\sin 2\alpha}. \quad (14.15)$$

После подстановки выражений (14.14), (14.15) в формулу (14.13) и преобразований получим

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_u. \quad (14.16)$$

С учётом выражения (14.16) формулы (14.12) приобретают следующий вид:

$$\varepsilon_{I,II} = \frac{1}{2} \left[ (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_u)^2} \right]; \quad (14.17)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y - 2\varepsilon_u}{2(\varepsilon_x - \varepsilon_u)}.$$

### Порядок проведения работы

1. Для заданных  $F$  и  $l$  по формулам (14.4) подсчитать теоретические значения главных напряжений  $\sigma_{I \text{ рас.}}$ ,  $\sigma_{II \text{ рас.}}$  и угла  $\alpha_{0 \text{ рас.}}$ , вычислив предварительно по формулам (14.1) и (14.2) нормальные и касательные напряжения в исследуемой точке вала.

2. Нагрузить вал предварительной силой и снять показания прибора, подключённого к розетке тензорезисторов.

3. Увеличить силу на заданную величину  $F$  и вновь снять показания прибора.

4. По средним из трёх опытов приращением показаний прибора, переведенных в величины деформаций, с помощью формул (14.17) вычислить опытные значения главных деформаций  $\varepsilon_{I \text{ оп.}}$ ,  $\varepsilon_{II \text{ оп.}}$  и угла  $\alpha_{0 \text{ оп.}}$ .

5. Вычислить по формулам (14.6) опытные значения главных напряжений  $\sigma_{I \text{ оп.}}$ ,  $\sigma_{II \text{ оп.}}$ .

6. Сопоставить опытные и теоретические значения главных напряжений и угла  $\alpha_0$  путём вычисления расхождений по формулам



$$\frac{|\sigma_{I \text{ рас}} - \sigma_{I \text{ оп}}|}{|\sigma_{I \text{ рас}}|} \cdot 100\% ; \quad \frac{|\sigma_{II \text{ рас}} - \sigma_{II \text{ оп}}|}{|\sigma_{II \text{ рас}}|} \cdot 100\% ; \quad \frac{|\alpha_{0 \text{ рас}} - (\alpha_{0 \text{ оп}} + 45^\circ)|}{|\alpha_{0 \text{ рас}}|} \cdot 100\% .$$

В последней формуле учтено, что  $\alpha_{0 \text{ рас}}$  и  $\alpha_{0 \text{ оп}}$  отсчитываются от разных осей, угол между которыми составляет  $45^\circ$ .

7. Опытные и теоретические значения искомых величин занести в протокол и таблицу результатов исследований.

### Содержание отчета

1. Расчётная схема вала с необходимыми размерами.
2. Схема установки розетки тензорезисторов.
3. Расчёты, связанные с определением теоретических значений главных напряжений и угла  $\alpha_0$  аналитическим и графическим (круг Мора) методами.
4. Расчёты, связанные с определением опытных значений главных напряжений и угла  $\alpha_0$ .
5. Протоколы испытаний и результатов исследований.
6. Общие выводы.

Таблица 14.1

Протокол тензометрирования

Номер опыта	F, кН	Показания прибора, дел			Приращения показания прибора, дел					
		A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	ΔA <sub>1</sub>	ΔA <sub>1 ср</sub>	ΔA <sub>2</sub>	ΔA <sub>2 ср</sub>	ΔA <sub>3</sub>	ΔA <sub>3 ср</sub>

Таблица 14.2

Результаты исследований

Напряжения, МПа						Угол, радиан		
σ <sub>I рас</sub>	σ <sub>I оп</sub>	расхождение, %	σ <sub>II рас</sub>	σ <sub>II оп</sub>	расхождение, %	α <sub>0 рас</sub>	α <sub>0 оп</sub>	расхождение, %

### Контрольные вопросы

1. Какое напряженное состояние возникает в материале вала, испытывающего кручение с изгибом?
2. Почему в формуле (14.1) применяется знак "минус", а в формуле (14.2) знак "плюс"?
3. Каков порядок определения значений  $\sigma_I$ ,  $\sigma_{II}$ , с помощью круга Мора?
4. Какими компонентами определяются деформированное и напряжённое состояния на поверхности детали?
5. Почему розетка содержит три тензорезистора?
6. Каков порядок определения напряжений в точке при помощи розетки тензорезисторов?
7. Почему при сравнении теоретического и опытного значений угла  $\alpha_0$  в формулу вводится угол  $45^\circ$ ?

## Содержание

### *Лабораторная работа 12*

Определение деформаций и напряжений  
при внецентренном растяжении.....3

### *Лабораторная работа 13*

Определение деформаций, напряжений и  
перемещений при косом изгибе .....7

### *Лабораторная работа 14*

Определение деформаций и напряжений  
при кручении с изгибом .....12