

## **ОПД.Ф.02.02 СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛОСЕ С ВЫТОЧКАМИ**

Методические указания к лабораторной работе

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы по курсу «Сопротивление материалов». Содержат краткие теоретические сведения, касающиеся напряженного состояния элементов конструкций и деталей машин, ослабленных концентраторами напряжения. Рассмотрен метод тензометрирования и приведено описание экспериментальной установки, включающей образец для испытания и силовое оборудование, необходимое для выполнения лабораторной работы. Указан порядок выполнения работы и алгоритм обработки результатов испытаний.

Для студентов очной и заочной форм обучения, изучающих курс «Сопротивление материалов».

## ***ВВЕДЕНИЕ***

Важной составляющей изучения методов определения механических свойств конструкционных материалов под действием тех или иных статических и динамических нагрузок, рассматриваемых в курсе «Сопротивление материалов» является выполнение студентами лабораторных работ.

Цель лабораторных работ заключается в экспериментальной проверке гипотез, лежащих в основе теоретических выводов курса сопротивление материалов при исследовании деформаций и напряженного состояния стержней, балок, пластинок, оболочек и других элементов конструкций; в доказательстве справедливости расчетных формул и установлении границ их применимости; в оценке достоверности тех или иных аналитических и численных методов.

Данная работа нацелена на экспериментальную проверку принципа локальности напряжений и их распределения в элементах конструкций и деталей машин, ослабленных концентраторами напряжений. Также в ней уделяется большое внимание широко распространенному методу тензометрирования, позволяющему получать быструю и точную информацию о деформированном состоянии детали.

Вместе с тем рассматриваемая работа даёт общее представление о возможных методах диагностики состояния элементов конструкций в процессе их эксплуатации.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛОСЕ С ВЫТОЧКАМИ**

**Цель работы.** Установить опытным путем закон распределения нормальных напряжений в поперечном сечении растянутого стержня, ослабленного концентраторами напряжения в виде двух выточек радиусом  $r = 10$  мм. Проверить принцип локальности напряжений (принцип локальности Сен-Венана) и определить теоретический коэффициент концентрации местных напряжений  $k_T$ .

#### ***Краткие теоретические сведения***

Большинство деталей в инженерных конструкциях имеют то или иное изменение формы и размеров поперечных сечений. Они обуславливаются наличием отверстий, трещин, выточек, надрезов, углов, выступов, острых краев, а также различных неровностей поверхности, таких как риски, царапины, метки. Напряжения, возникающие в таких местах, а также в местах приложения сосредоточенных нагрузок, не могут быть определены методами сопротивления материалов. Расчетные формулы для определения напряжений в различных случаях нагружения в соответствии с принципом локальности Сен-Венана становятся справедливыми лишь при достаточном удалении от таких мест. На этих участках наблюдается явление, называемое концентрацией напряжений, которое справедливо для любых видов деформаций. Концентрация напряжений особенно опасна при напряжениях, переменных во времени, а также при статическом нагружении хрупких материалов.

Таким образом, под концентрацией напряжений понимается резкое нарушение равномерности распределения нормальных напряжений, обуславливающих появления перенапряжений частей сечения. А концентраторами напряжений принято считать различные нарушения целостности материала, влияющие на прочность изделия или элемента конструкции.

Концентраторы напряжений могут быть технологическими (дефекты изделия), конструктивными (отверстия, канавки) и эксплуатационными (трещины, царапины).

В некоторых случаях величину местных напряжений, вызванных ее концентрацией, определяют аналитическим (расчетным) путем, используя методы теории упругости. В большинстве же случаев концентрацию напряжения выявляют экспериментально, например, с помощью метода тензометрирования.

Рассмотрим пластину, растягиваемую осевыми (продольными) силами  $F$  и ослабленную двумя выточками  $r = 10$  мм (рис. 1). Эти выточки являются концентраторами напряжений.

В поперечных сечениях пластин, которые не ослаблены выточками наблюдается равномерное распределение нормального напряжения, которое распределяется как:

$$\sigma_0 = \frac{F}{A} = \frac{F}{b \cdot h}, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь неослабленного поперечного сечения.

Равномерность распределения нормальных напряжений нарушается в непосредственной близости от отверстий (рис. 2-3).

Задача о распределении напряжений в полосе, ослабленной выточками, решена методами теории упругости в предположении, что радиусы выточек  $r$  очень малы по сравнению с шириной полосы  $h$ .

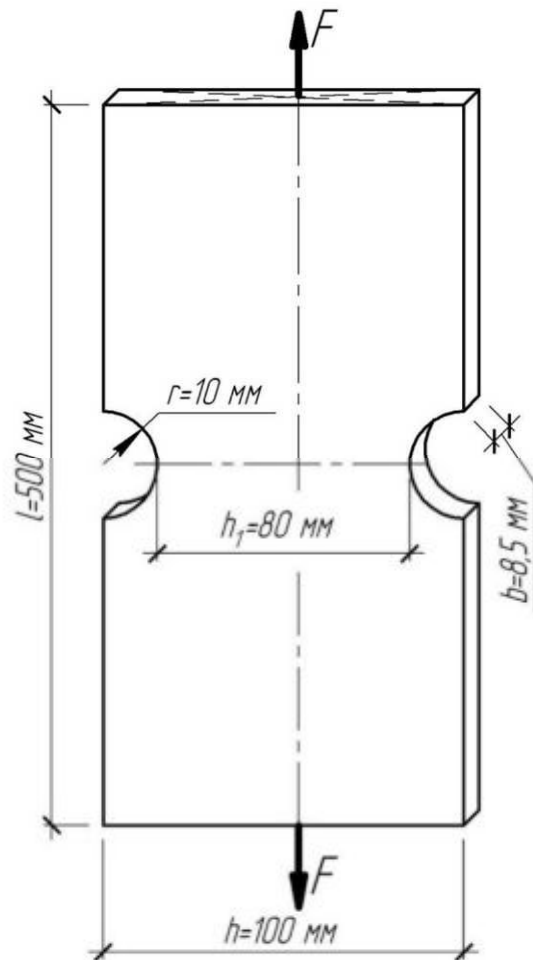
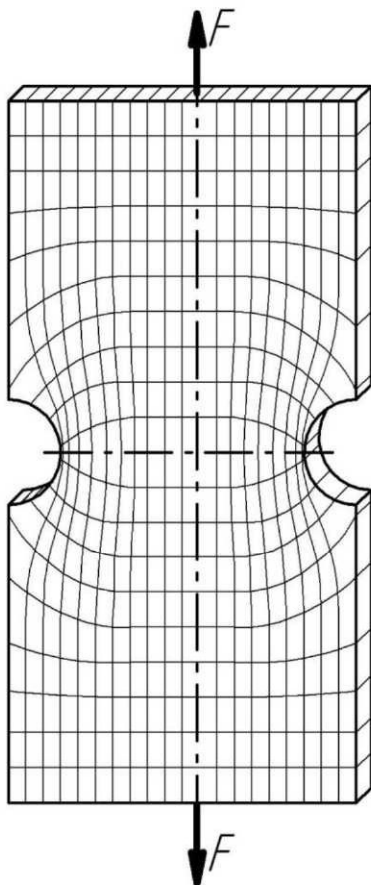
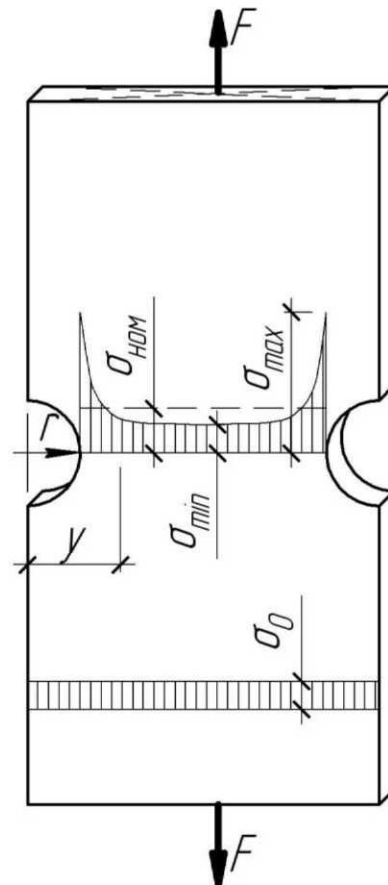


Рис. 1. Пластина, ослабленная двумя выточками



*Рис. 2.* Линии распределения напряжений в полосе с выточками



*Рис. 3.* Эпюры напряжений в полосе с выточками

В поперечном сечении, проведенном через центр выточек, распределение нормальных напряжений подчиняется следующему выражению

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{2} \left( 2 + \frac{r^2}{y^2} + 3 \cdot \frac{r^4}{y^4} \right), \quad (2)$$

где  $r$  – радиус выточки,

$y$  - расстояние от центра выточки до точки, в которой определяется напряжение.

Из этой формулы следует, что в точках, расположенных около выточек ( $y = r$ ), возникают наибольшие напряжения, которые можно выразить так:

$$\sigma_{\max} = 3\sigma_0. \quad (3)$$

А с увеличением координаты  $y$ , т.е. с удалением от выточки напряжения быстро убывают и выравниваются.

На практике при недостаточной прочности элемента конструкции места концентрации напряжений становятся очагами первичных разрушений материала. Расчет на прочность сводится в этом случае к установлению требуемого запаса прочности не по величине отношения предельного напряжения материала к номинальному напряжению в поперечном сечении элемента конструкции, а по отношению к наибольшему местному напряжению, концентрирующемуся в отдельных точках сечения.

За теоретический коэффициент концентрации напряжений принимают отношение максимального напряжения, возникающего в местах действия концентраторов напряжения, к номинальному напряжению в той же точке.

$$k_T = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ном}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{ном}$  - номинальное напряжение.

За номинальное напряжение  $\sigma_{ном}$  принимают такое напряжение, которое можно определить, используя законы сопротивления материалов без учета эффекта концентрации напряжения.

Обычно номинальное напряжение определяют для наиболее ослабленного участка.

$$\sigma_{ном} = \frac{F}{A_1} = \frac{F}{b \cdot (h - 2 \cdot r)} = \frac{F}{b \cdot h_1}, \quad (5)$$

Очевидно, что теоретический коэффициент концентрации напряжений не может быть меньше единицы.

Его величина не связана со свойствами материала, а зависит от вида концентратора напряжений, его остроты, абсолютного размера, размера элемента конструкции, от вида деформации и типа напряжённого состояния.

Кроме теоретического коэффициента концентрации напряжений, существует технический коэффициент концентрации напряжений, учитывающий структуру и пластические свойства материала. Величины этих коэффициентов для разнообразных слу-

чаев нарушения равномерного распределения напряжений указываются в технических справочниках.

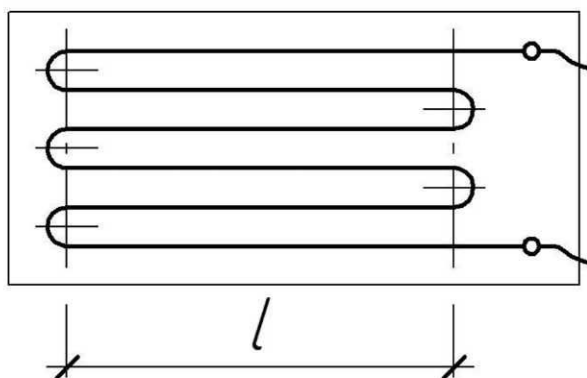
Экспериментальное определение нормальных напряжений производится методом тензометрирования. С помощью электрических проводников (тензометров) определяются относительные линейные деформации в направлении базы датчика, которые при работе в упругой стадии пропорциональны действующим нормальным напряжениям.

### *Метод тензометрирования*

Тензометрированием называется измерение деформаций поверхностного слоя элемента конструкции (образца) под действием заданных внешних сил.

С помощью данного метода определяют малые линейные деформации, которые возникают в упругой стадии исследуемого образца. Упругие деформации большинства материалов очень малы ( $\varepsilon = 10^{-5} \div 10^{-6}$ ), и для их измерения требуются приборы со значительным масштабом увеличения. Эти приборы называют тензометрами.

Для измерения напряжений чаще всего применяют проволочные датчики сопротивления, которые имеют небольшие размеры, малую массу, легко крепятся клеем к любой части конструкции. Проволочные датчики просты, дешевы, надежны в эксплуатации, могут применяться при дистанционной записи и позволяют составлять схемы, дающие возможность определять напряжения при минимальном количестве каналов записи. Тензодатчик является преобразователем механической величины – удлинения (укорочения) – в электрическую величину – приращение омического сопротивления. Основной тип тензодатчика сопротивления – проволочные петлевые тензодатчики.



*Рис. 4.* Проволочный петлевой датчик

Главной частью датчика является тонкая, обычно манганиновая или константановая проволока\* (рис. 4), имеющая диаметр от 0,015 до 0,03 мм, уложенная несколькими параллельными витками. Длину  $l$  петли называют базой датчика. Датчик наклеивают на испытуемый образец, причем между образцом и проволокой прокладывают изолирующий слой бумаги толщиной 0,02 – 0,05 мм.

Величина омического сопротивления зависит от длины и площади поперечного сечения проволоки, которая меняет свои геометрические характеристики при удлинении или укорочении образца.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (6)$$

Относительное изменение сопротивления проводника пропорционально величине его относительной деформации, которая определяется по цифровому табло прибора ИДЦ-1 (измеритель деформаций цифровой). Начальное показание принимается за условный нуль измерения, поэтому для определения деформаций необходимо вычислить приращение показаний.

Величина истинной относительной деформации равна:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0$  – относительная деформация, измеренная прибором ИДЦ-1, т.е. разность показаний отсчетов по индикатору; 1 еод. =  $10^{-6}$  относительной деформации  $\frac{\Delta l}{l}$ . Цена одной единицы дискретности показаний прибора равна 10 еод.

### ***Образец и машина для испытаний***

Исследуемый образец (рис. 1) представляет собой длинный призматический стержень, выполненный из конструкционной уг-

---

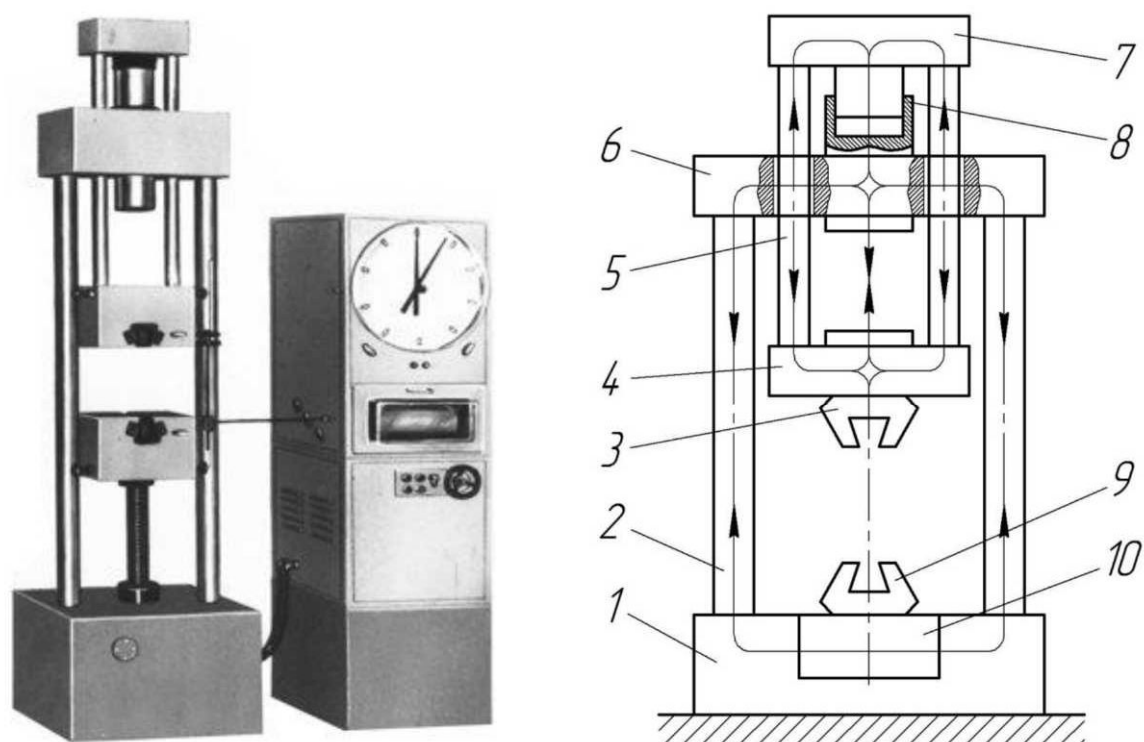
\* Манганин – сплав меди (84%), никеля (4%) и марганца (12%);  
константан – сплав меди (60%) и никеля (40%).



леродистой стали Ст 3, прямоугольного поперечного сечения ( $100 \times 8,5$  мм), который ослаблен двумя выточками  $r = 10$  мм.

Испытание производится на разрывной машине с гидравлическим приводом Р-20 (наибольшая предельная нагрузка 20 т / 200 кН), которая предназначена для статических испытаний образцов металлов и элементов конструкций статическими нагрузками при растяжении-сжатии.

На рис. 5 приведена силовая схема разрывной машины Р-20, стрелками на которой показана передача усилий по элементам конструкции. Принцип работы следующий: при помощи насоса в гидравлический цилиндр машины нагнетается масло, благодаря чему перемещается вверх поршень пресса, а вместе с ним и подвижная рама с закрепленным на ней образцом. Если последний установлен в нижних захватах, то для него создаются условия растяжения; если же он расположен сверху поперечины, то будет сжиматься или изгибаться.



**Рис. 5.** Разрывная машина с гидравлическим приводом Р-20:  
1 – станина; 2 – колонны; 3, 9 – верхний и нижний захваты для испытаний на растяжение-сжатие; 4, 7 – нижняя и верхняя траверсы реверсора; 5 – колонны реверсора; 6 – верхняя траверса; 8 – нагружающий цилиндр; 10 – механический привод установочного перемещения захвата 9

## Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой и схемой расположения тензометрических датчиков на исследуемом образце (рис. 6).

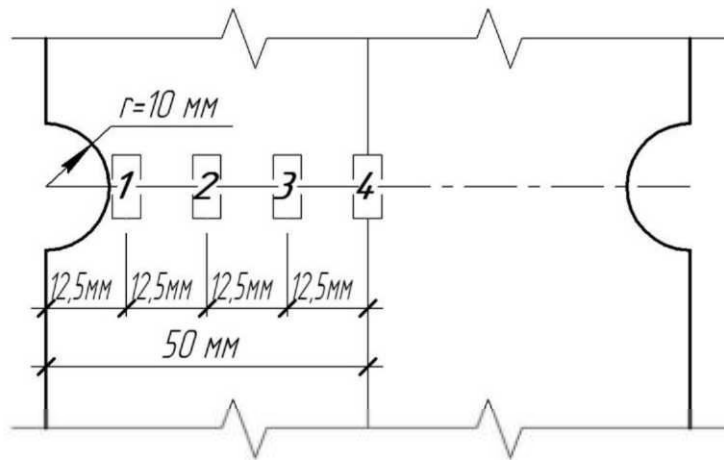


Рис. 6. Схема расположения тензометрических датчиков

2. До начала испытания определить предельно допустимое значение нагрузки, соответствующей пределу пропорциональности исследуемого стального образца, по формуле

$$F_{\text{пред.}} = \sigma_{pr} \cdot A_1, \quad (8)$$

где  $\sigma_{pr}$  - предел пропорциональности, величина которого для стали Ст 3 составляет 210 МПа.

$$F_{\text{пред.}} = \sigma_{pr} \cdot A_1 = 210 \cdot 10^6 \cdot 80 \cdot 10^{-3} \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} = 142,8 \text{ кН}$$

3. Загрузить образец начальной нагрузкой  $F_1 = 4$  кН, необходимой для выборки зазоров в системе крепления образца.

4. Задать нагрузку, не превышающую рассчитанного по формуле (8) предельного значения. Например,  $F_2 = 36$  кН (величина, принятая с учетом технических характеристик силового оборудования для диапазона измерений от 0 до 40 кН).

5. При каждом значении нагрузки снять показания отсчетов единиц относительной деформации (еод.) по цифровому табло прибора ИДЦ-1. Полученные данные записать в табл.

## Обработка результатов испытания

1. Вычислить значение нормального напряжения  $\sigma_0$  в неослабленной выточками части пластины по формуле (1).

2. Выполнить необходимые расчеты по формулам, приведенным в таблице.

Таблица

### Экспериментальные данные

Нагрузка, <i>кН</i>	Показания отсчетов $\varepsilon_0$ , еод.				Приращение отсчетов $\Delta\varepsilon_0$ , еод.			
	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>4</b>					<del> </del>	<del> </del>	<del> </del>	<del> </del>
<b>36</b>					<del> </del>	<del> </del>	<del> </del>	<del> </del>
Приращение относительной деформации $\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_0 \cdot 10^6 \cdot 10 = \Delta\varepsilon_0 \cdot 10^5$								
Приращение нормальных напряжений $\Delta\sigma = \Delta\varepsilon \cdot E$ , где $E$ – модуль упругости I рода (модуль Юнга), величина которого для стали составляет $2 \cdot 10^5$ МПа								
Координаты исследуемых точек №1÷№4 (мм)					12,5	25,0	37,5	50,0
Теоретические значения приращения напряжения в точках №1÷№4 $\sigma = \frac{\sigma_0}{2} \left( 2 + \frac{r^2}{y^2} + 3 \frac{r^4}{y^4} \right), \text{ МПа}$								

3. Рассчитать величину максимального напряжения, используя формулу (3).

4. Вычислить номинальное напряжение для наиболее ослабленного участка, воспользовавшись формулой (5).

5. Определить значение теоретического коэффициента концентрации местных напряжений по формуле (4).

## ***КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ***

1. Что называется концентрацией напряжений?
2. Что относят к концентраторам напряжения?
3. Какие виды концентраторов напряжения встречаются в элементах конструкций и деталях машин? Является ли приложенная к детали сосредоточенная сила концентратором напряжения?
4. В чем заключается принцип локальности Сен-Венана?
5. Каков характер распределения напряжений в неослабленном и ослабленном концентраторами напряжения частях поперечного сечения образца?
6. Что называют номинальным напряжением и как его вычисляют?
7. Чему равно наибольшее (максимальное) напряжение, возникающее в точках, расположенных около выточек?
8. Как определяется теоретический коэффициент концентрации напряжений?
9. Какова практическая значимость теоретического коэффициента концентрации напряжений и как он учитывается при расчетах на прочность?
10. Что понимают под упругой стадией материала?
11. С помощью какого метода определяют малые линейные деформации? В чем заключается суть данного метода?
12. С помощью какого прибора фиксируют изменение сопротивления проводника?
13. Для чего при выполнении работы необходимо задаваться первоначальной нагрузкой?
14. Какова цель работы?
15. Каков порядок выполнения работы?

## ***БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК***

1. Вольмир А.С. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: Учеб. пособие для вузов/ А.С. Вольмир, Ю.П. Григорьев, В.А. Марьин, А.И. Станкевич. – 2-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2004. – 352 с.: ил.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для втузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 590 с.: ил.
3. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. – М.: Наука, 1981. – 141 с.: ил.
4. Беляев М.Н. Сопротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1962. – 610 с.: ил.
5. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. – М.: Высш. шк., 1995. – 560 с.: ил.
6. Саргсян А.Е. Сопротивление материалов, теории упругости и пластичности. – М.: АСВ, 1998. – 240 с.: ил.

## ***СОДЕРЖАНИЕ***

<b><i>ВВЕДЕНИЕ</i></b> .....	3
<b><i>ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА</i></b> .....	4
Цель работы.....	4
Краткие теоретические сведения.....	4
Метод тензометрирования.....	8
Образец и машина для испытаний.....	10
Порядок выполнения работы.....	11
Обработка результатов испытания.....	12
Контрольные вопросы.....	13
<b><i>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК</i></b> .....	14