

**Пермский государственный технический университет  
Факультет прикладной математики и механики  
Кафедра «Динамика и прочность машин»**

**Е.В. Кузнецова**

# **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА**

**Учебно-методическое пособие**

**Пермь 2009**

УДК 519.3  
ББК 30.121  
Э413

Рецензент: кандидат физико-математических наук, профессор кафедры «Динамика и прочность машин» *А.А. Лежнева* (Пермский государственный технический университет).

**Кузнецова Е.В.**

**Э413 Экспериментальная механика:** Учебно-методическое пособие для студентов очного и заочного обучения специальностей «Динамика и прочность машин», «Компьютерная механика», «Компьютерная биомеханика», «Технология обработки металлов давлением». – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – 43 с.

Приведены общие сведения, понятия, определения, характеристики, используемые в экспериментальной механике, а также схемы оборудования для испытаний напряженно-деформированного состояния деталей конструкций и механических характеристик материалов. Теоретические положения по оценке точности экспериментальных данных проиллюстрированы примерами. Даны методические указания к лабораторным работам: метод тензометрирования и поляризационно-оптический метод.

Пособие предназначено для студентов, изучающих курсы: «Экспериментальная механика», «Материаловедение», «Конструкционная прочность», а также специалистов по проблемам механики в области материалов и конструкций.

© «Пермский государственный  
технический университет», 2009

## ВВЕДЕНИЕ

Квалифицированные специалисты в области технических наук должны исследовать надежность, ресурс и безопасность машин, конструкций и приборов, создавать и развивать аналитические и численные методы расчета новой техники и технологии из современных конструкционных материалов с применением теоретических, численных и экспериментальных методов. При этом необходимо изучение создание и использование сложных математических моделей механических систем и процессов, отражающих свойства реальных объектов природы и техники. Эффективность применения таких моделей в решающей степени зависит от достоверности исходных данных о механических характеристиках материалов и конструктивных элементов систем и воздействиях, которым эти системы подвергаются. Единственный источник таких данных – эксперимент. Сложные структуры и необычные свойства материалов, случайные процессы в реальных условиях эксплуатации – все это предъявляет высокие требования к методам и технике эксперимента, а также и к необходимой точности результатов экспериментальных исследований. Эксперимент, по сути, остается единственным реальным методом проверки адекватности сложных математических моделей современной механики.

На кафедре «Динамика и прочность машин» Пермского государственного технического университета существует достаточно большая лабораторная база для проведения экспериментальных исследований различного рода: механических и физических свойств материала, напряженно-деформированного состояния детали, динамических характеристик системы, а также исследование феноменов упругости, пластичности и ползучести и усталостной прочности.

Целью данного учебно-методического пособия является изложение основных сведений, понятий и определений экспериментальной механики, сосредоточение внимания на физическом содержании и сути некоторых современных технических средств экспериментальных исследований и используемой техники. Автором приведены теоретические положения по оценке точности экспериментальных данных. Даны методические указания к лабораторным работам по исследованию напряженно-деформированного состояния деталей с применением метода тензометрирования и поляризационно-оптического метода.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ

## 1.1. Моделирование реальных процессов

*Экспериментальная механика* – раздел механики деформируемого твердого тела, в котором изучаются методы экспериментального исследования напряжений, деформаций, перемещений с целью оценки прочности и деформируемости различных материалов, элементов машин и сооружений, натуральных конструкций и их моделей.

В развитии науки о прочности, долговечности и надежности материалов и конструкций важное место занимают экспериментальные исследования, которые выполняются с целью:

- определения механических, физических и химических характеристик материала, необходимых для построения теорий расчетов на прочность;
- изучения разрушения материала под действием приложенных сил и влияния различных внешних факторов на характер разрушения
- сопоставления полученных экспериментальных данных с расчетными значениями напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции, подверженных действию внешних нагрузок, полученными методами сопромата, теории упругости, теорий пластичности и ползучести, строительной механики, динамики машин и т.д.

Т.е. решается вопрос прочность жесткость и устойчивости механизмов и конструкций и их элементов при гарантированной их долговечности.

*Прочность* – это способность конструкции сопротивляться, не разрушаясь действию внешних нагрузок и других воздействий (температуры, агрессивной окружающей среды, смещению опорных устройств и т.п.)

*Жесткостью* обладает конструкция (материал), когда изменение формы и размеров при нагружении ее элементов настолько незначительно, что не приводит к нарушению эксплуатационных функций.

*Устойчивость*: если малые внешние воздействия приводят к малым и исчезающим после снятия воздействия отклонениям от первоначального положения равновесия, то положение называется устойчивостью.

Необходимо отметить, что при решении инженерных задач, достаточно сложно учесть все разнообразие факторов конфигурацию объектов, темп и вид нагрузок, влияние случайных факторов, изменение окружающей среды, поэтому для получения результатов и решения сложных технических и технологических задач применяют некоторые известные теоретические методы научного познания:

**Аналогия** – на основе сходства объектов по одним признакам сделать вывод об их сходстве по другим;

**Моделирование** – это оперирование объектами, которые являются аналогом других, по каким-то причинам недоступными для манипуляции;

**Абстрагирование** – мыслительный прием отвлечения от несущественных свойств и отношений объекта или явления и сосредоточение внимания на существенных;

**Идеализация** – мысленная процедура образования абстрактных объектов, не существующих в действительности.

Идеальные объекты – это не просто фикции – они выражают реальные связи и отношения, существующие в действительности и представляют собой предельные случаи этих связей и отношений, служат средством их анализа.

Для достижения результата при решении инженерной задачи необходимо предварительно определить самые основные *модели: материала, формы, нагружения, закрепления и разрушения.*

### **Модели материала**

Структура и свойства различных материалов, используемых в технике многообразны, поэтому применяют моделирование материалов

Например, в предположение о *сплошности* материала – пренебрегаем атомно-молекулярной и кристаллической структурой, следовательно, напряжения деформации и перемещения являются непрерывными функциями координат, а все процессы можно описать с помощью математического аппарата.

Гипотеза об *однородности* материала – свойства материала во всех точках одинаковы. В этом случае мы не учитываем, что в материале могут быть дефекты, различные примеси, изменение плотности и т.д.

*Гипотезы о направлении свойств материала:*

Материал считаем *изотропным*, если свойства материала для каждой точки во всех направлениях одинаковы. В технике принято считать, что металлы, стали и сплавы обладают свойством изотропии (квазиизотропны), так как сопротивляются разным нагрузкам практически одинаково.

Противоположным изотропии свойством называют *анизотропию* – если для каждой точки материала свойства во всех направлениях различны.

Материал, свойства которого различны в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, в механике принято считать *ортотропным*. Ярким представителем такого материала является – древесина, так ее структура волокнистая и прочность на растяжение значительно выше, чем на сжатие или изгиб.

Для конструкционных материалов наиболее распространенными также являются *модели упругости и пластичности*.

**Упругость** – это свойство тела изменять форму и размеры под действием внешних нагрузок и восстанавливать исходную конфигурацию при снятии нагрузок. Примеры: рессоры, резина, пружины

**Пластичность** – это положительное свойство материала изменять, не разрушаясь, форму и размеры под действием значительных внешних нагрузок. Примеры: сталь, пластилин.

**Хрупкость** – это отрицательное свойство материалов, но, тем не менее, такие материалы как чугун, камень, бетон, кирпич, стекло находят широкое применение в строительстве, так легко разрушаясь от удара или при растяжении, они выдерживают большие нагрузки на сжатие.

**Твердость** – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого более твердого тела. Пример: сталь тверже дерева – нож, алмаз тверже стекла - стеклорез

### **Модели разрушения**

Модели разрушения – это уравнения или условия, связывающие параметры работоспособности состояния элемента конструкции в момент разрушения с параметрами, обеспечивающими прочность. Эти условия называются критериями прочности, нарушение которых способствует переходу конструкции в предельное состояние, при этом ее дальнейшее применение недопустимо и нецелесообразно.

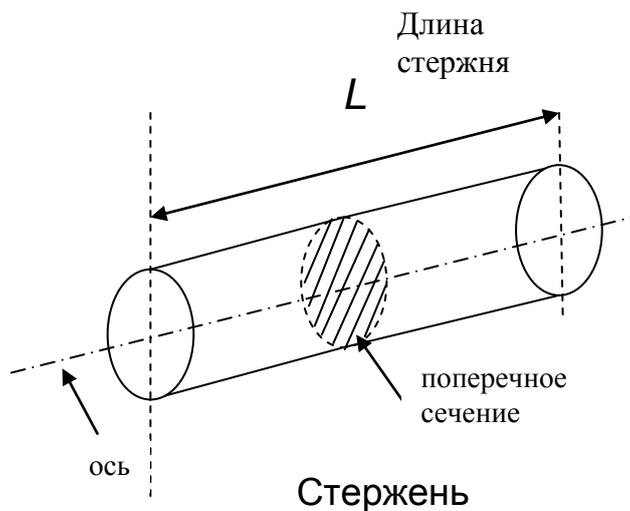
По характеру разрушения могут быть *хрупкими* и вязкими – с появлением пластических деформаций.

Разрушение может зависеть не только от величины действующего от длительности воздействия.

Разрушение может быть статическим, длительным статическим, малоцикловым (линейка изгибается, затем разрушается) и усталостным (рельсы)

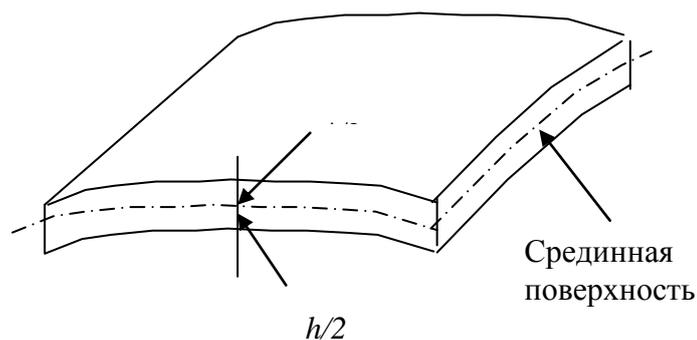
**Модели формы** – это схематизация конструкций и объектов по геометрическим признакам. В механике самыми основными можно считать:

**Стержни:** Детали и элементы конструкций машин и механизмов у которых один размер – длина много больше площади поперечного сечения. Стержень образуется движением в пространстве плоской фигуры, центральной точкой которой скользит вдоль некоторой оси стержня, а сама фигура перпендикулярна к оси, т.е совокупность поперечных сечений.



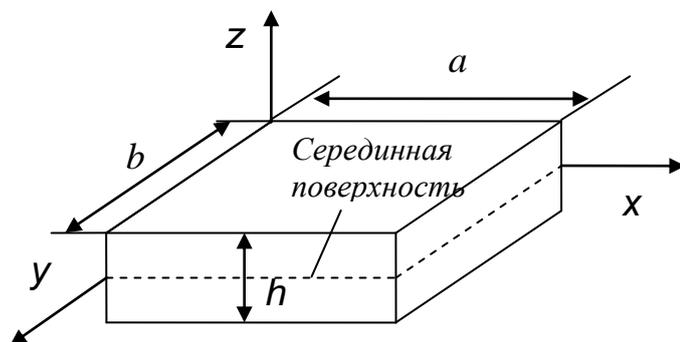
К стержням можно отнести длинные балки и трубы, рельсы, колонны

**Оболочки:** Детали и элементы конструкций у которых один размер (толщина  $h$ ), на много меньше габаритных размеров. Характеризуется срединной поверхностью – геометрическим местом точек, равноудаленных от образующих оболочку поверхностей.



К оболочкам можно отнести – тонкостенные трубы большого диаметра, купола, фюзеляж самолета, корпус космической ракеты, шифер –

**Пластины:** Детали и элементы конструкций у которых один размер (толщина  $h$ ), на много меньше габаритных размеров, а срединная поверхность является плоскостью.

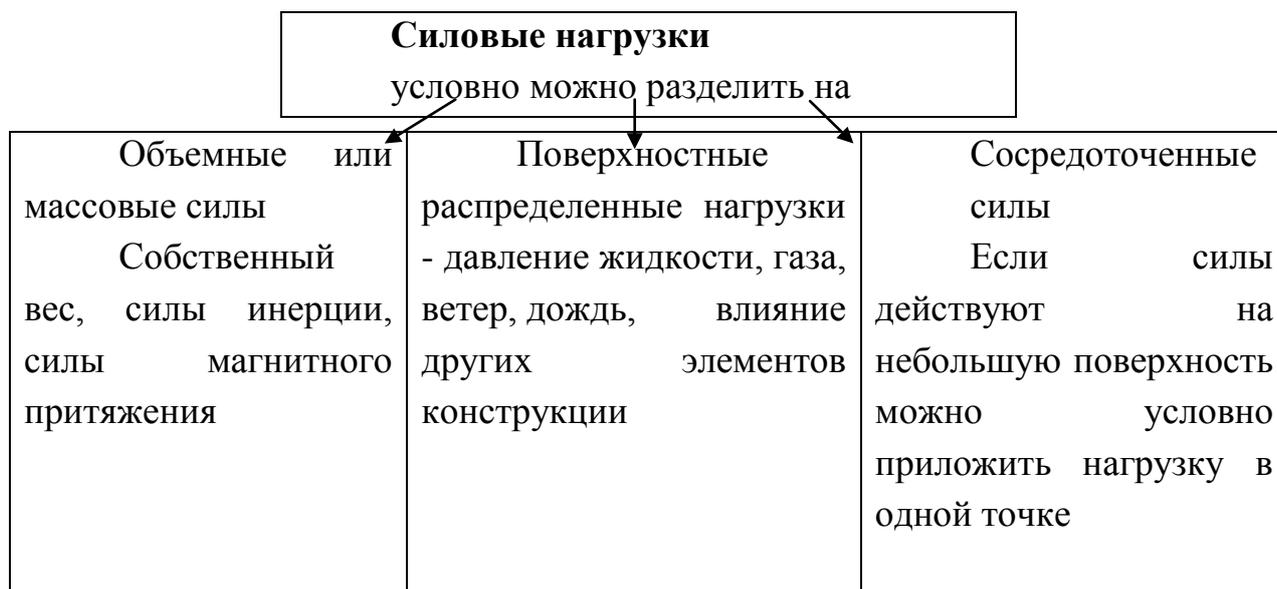


Пластинами считаются все строительные перекрытия, различные плиты с большой площадью образующих поверхностей и малой

**Массивные тела:** все три габаритных размера имеют одинаковый порядок. Резервуары, толстостенные цистерны, оборудование для производства металлов, прокатные станы, валки, толстостенные короткие трубы.

## Модели нагружения

Модели нагружения – это схематизация нагрузок по координатам, по времени, по воздействию внешних полей и сред.

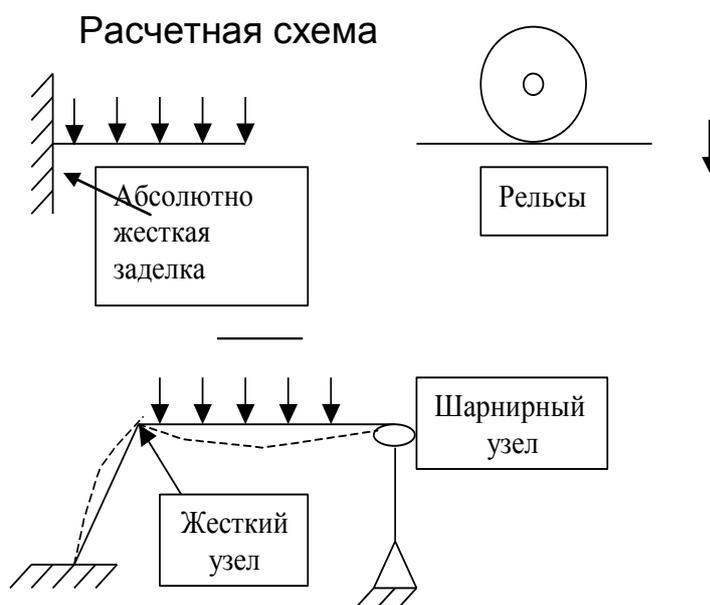


По характеру нагрузки делятся на статические – постоянные во время эксплуатации конструкции, и динамические – изменяющиеся во времени. Например, циклические – периодическое изменение величины и/или знака. В некоторых случаях необходимо учитывать влияние температуры, координатных осей, нейтронного облучения, электромагнитных полей и т.д.

### Модели закрепления

Как отмечалось ранее реальный расчет с учетом многообразия механических характеристик материала и их уравнений, вследствие взаимодействия с окружающей средой, отклонения от точечных геометрических размеров, изменчивости нагрузок является либо теоретически невозможным, либо практически не приемлемым по своей сложности. Поэтому проводят *схематизацию* конструкции, отбросив второстепенные факторы, которые не оказывают существенного влияния на достоверность и точность расчета.

*Расчетная схема* – упрощенная изолированная схема, отображающая наиболее существенные (факторы) особенности объекта.



В зависимости от того, как закреплена та или иная деталь, элемент конструкции, будет возникать различное напряженно-деформированное состояние. Модели закрепления дают нам информацию о том какие перемещения и в каких направлениях возникают. Например, в месте защемления перекрытия пола в стеновых панелях здания есть очень малые перемещения, тем не менее, для расчета на прочность этой конструкции они не существенны, поэтому мы считаем такое защемление абсолютно жестким, т.е. перемещения во всех направлениях  $U_x, U_y, U_z = 0$ .

### **Модели разрушения**

Модели разрушения – это уравнения или условия, связывающие параметры работоспособности состояния элемента конструкции в момент разрушения с параметрами, обеспечивающими прочность. Эти условия называются критериями прочности, нарушение которых способствует переходу конструкции в предельное состояние, при этом ее дальнейшее применение недопустимо и нецелесообразно.

По характеру разрушение может быть хрупким и с предварительными пластическими деформациями; статическим, длительным статическим, малоцикловым и усталостным; зависеть от величины и от длительности воздействия;

Деформированное состояние, связь между перемещениями и деформациями устанавливается из геометрии (кинематики) и также не зависит от физических свойств материала.

Для установления связи между напряжениями и деформациями необходимо учитывать реальные свойства материала и условия нагружения.

Все математические модели, описывающие связь между напряжениями и деформациями, разрабатываются на основе экспериментальных данных (эмпирически).

## 1.2. Классификация методов механических испытаний

- определение механических характеристик материалов;
- исследование напряженно-деформированного состояния конструкций;
- контроль поврежденности материала в конструкции и оценка остаточной долговечности элементов конструкции.

По виду напряженного состояния:

- исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций при одноосном напряженном состоянии (растяжение, сжатие, изгиб);
- исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций при двухосном напряженном состоянии;
- исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов и элементов конструкций при трехосном напряженном состоянии;

По характеру воздействия внешних сил:

- исследование при статическом нагружении (скорость деформаций мала);
  - исследование при динамическом нагружении (скорость деформаций велика и реализуется при ударе);
  - исследование при циклическом нагружении (частоты нагружения от  $3 \cdot 10^{-4}$  Гц до 100 кГц). Здесь различают методы исследования малоциклового, многоциклового и высокочастотной усталости.
4. По температуре испытаний:
- высокотемпературные испытания при 323 ... 3500 К;
  - низкотемпературные испытания при 1,5 ... 273 К;
  - испытания в климатическом диапазоне 273 ... 323 К.

По природе нагрузок, воздействующих на объект испытаний: - при силовом воздействии (сосредоточенные и распределенные нагрузки, силы инерции и тяжести);

- при воздействии на объект тепловых потоков и неоднородных температурных полей (термостойкость, термоусталость);
- при действии мощных магнитных и электрических полей. Объекты исследования при механических испытаниях - образцы, модели, элементы конструкций и конструкции в натуральную величину.

Образцом называется тело специальной формы, подвергающееся испытанию для оценки механических свойств материала. В настоящее время испытывают разнообразные образцы, которые отличаются друг от друга формой, размерами, назначением. Некоторые типы образцов регламентируются нормативами. К ним относятся образцы для испытаний на одноосное растяжение

и сжатие, на кручение и изгиб, образцы для усталостных испытаний и др. Многие типы образцов, особенно используемые в научно-исследовательской работе, не регламентируются нормативными документами, например образцы для испытаний в сложном напряженном состоянии.

Для получения сопоставимых и воспроизводимых результатов механических испытаний образцы должны отвечать соответствующим требованиям. Заготовки образцов должны быть отобраны из прутков, листов или отливок одной и той же плавки или партии. Прежде всего, изучается химический состав металла или сплава, т. е. устанавливается количественное содержание химических элементов в исследуемом материале. Механические свойства металлов и сплавов очень сильно зависят от их структурного состояния. Металлы и сплавы представляют собой поликристаллические вещества, поэтому необходимо провести микроструктурный анализ. Структурное состояние металлов зависит от режима термообработки, технологии литья или прокатки. Без знания химического состава и структурных характеристик металла невозможно достаточно надежно оценить его механические свойства. Всякий образец содержит рабочую часть, в которой реализуются однородное напряженное и деформированное состояния. Необходимость реализации однородного напряженно-деформированного состояния в рабочей части образца связана с тем, что не существует метода прямой оценки напряжений в точках деформированного тела. Существующие методы исследования напряженно-деформированного состояния тел позволяют измерять деформацию на внешней поверхности исследуемого тела. Величину напряжений в точках тела оценивают по внешним силам, но это возможно только при соблюдении определенных условий.

Условия проведения эксперимента реализуются путем выбора формы образца, приложением к нему таких внешних сил, при которых с достаточной степенью достоверности можно считать, что напряженное и деформированное состояния во всех точках исследуемого образца одинаковы, т. е. в нем создано однородное напряженно-деформированное состояние. Обеспечив такие условия эксперимента, по измерениям взаимных перемещений точек на поверхности образца можно судить о деформациях во внутренних точках. По измеренным внешним силам можно рассчитать напряжения во внутренних точках исследуемого образца, приняв гипотезы однородности, сплошности и изотропности. На рабочей части образца выделяется расчетный участок, который используется для измерения соответствующих параметров (удлинений, укорочений, углов закручивания и поворота, изменений поперечных размеров и

др.)

Чаще всего образец представляет собой стержень круглого, кольцевого или прямоугольного поперечного сечения. Форма рабочей части образца зависит от вида заготовки. Если в качестве заготовки используется пруток, отливка или лист большой толщины, то рабочая часть образца имеет цилиндрическую форму; если заготовка – относительно тонкий лист, то рабочая часть образца имеет призматическую форму. Процесс получения заготовки образца регламентируется нормативными документами. Предпочтительным является образец цилиндрической формы.

Образец получают механической обработкой (точением, фрезерованием, шлифованием, полированием). При этом нужно исключить изменение механических свойств материала образца относительно механических свойств исходных заготовок. В некоторых случаях в качестве образцов используются полуфабрикаты (проволока, лента, нити, канаты, арматура и т. п.).

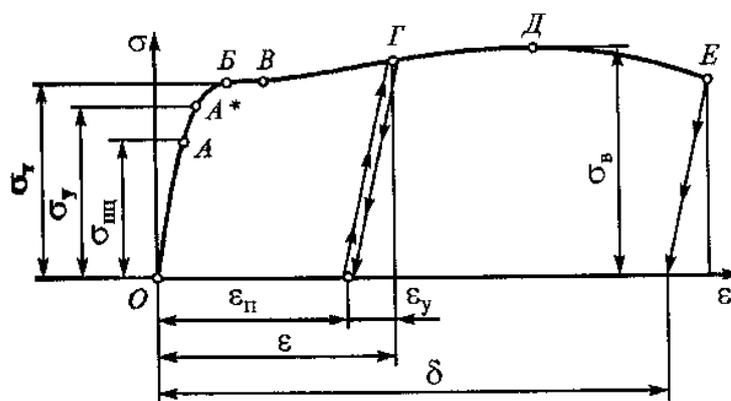
К геометрической форме образца предъявляются требования, которые регламентируются нормативными документами и инструкциями. Совершенство геометрической формы образца позволяет правильно оценить результаты испытаний и воспроизвести эти результаты в последующих опытах. Недопустимы изменения поперечных размеров рабочей части образца, искривление его оси и другие геометрические несовершенства формы, приводящие к неоднородности напряженно-деформированного состояния выше предельных значений, предусмотренных инструкциями

В экспериментальной механике проводятся стандартные испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение, определяется предел выносливости при испытаниях на усталостную прочность, ползучесть, твердость и ударную прочность материалов.

### 1.3. Определение фундаментальных механических характеристик материалов

Испытания образцов на растяжение проводятся с целью экспериментального определения механических характеристик материалов. Наиболее распространенными в настоящее время являются испытания цилиндрических и плоских образцов в условиях одноосного растяжения. Широкому применению этого вида испытаний способствует относительная простота их осуществления, так как имеется большой парк разрывных и универсальных испытательных машин. Испытание на растяжение заключается в плавном деформировании закрепленного в захватах испытательной машины образца из исследуемого материала до наступления его разрушения. В процессе испытаний измеряются сила, действующая на образец, и удлинение его расчетного участка. Результатом испытаний является графическая диаграмма (см. рис.) растяжения.

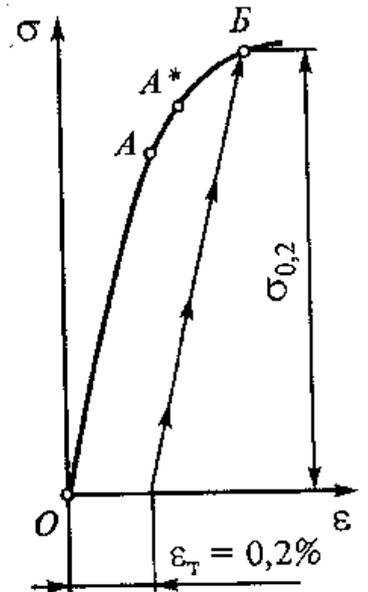
Диаграмма растяжения



На начальном этапе растяжения абсолютные деформации пропорциональны нагрузке, а относительные деформации пропорциональны напряжению. На этом участке выполняется закон Гука — математическая линейная зависимость между напряжениями и деформациями:  $\sigma = E\epsilon$ , где  $E$  — модуль упругости (Юнга) равный тангенсу угла наклона прямого участка диаграммы к оси абсцисс.

В точке  $A$  закон Гука нарушается, а зависимость становится нелинейной. Далее на диаграмме присутствует практически горизонтальный участок  $BB$ , называемый площадкой текучести. Такое явление называется текучестью: образец удлиняется (деформируется) практически при постоянной силе. Затем следует участок  $BD$ , называемый зоной упрочнения, после которого в точке  $D$  достигается максимальная сила, которую может выдержать образец. Последний участок разрушения  $DE$  — зона локальной деформации, когда появляется местное утонение образца (шейка).

Пределом пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ , называется максимальное напряжение, при котором выполняется закон Гука. При достижении нагрузкой некоторой величины в образце появляются остаточные деформации. Пределом упругости  $\sigma_y$  называют максимальное напряжение, при котором не возникают остаточные деформации. Принято считать за максимальное то напряжение, при котором в испытуемом образце появляются деформации 0,05%. Предел пропорциональности, предел упругости, модуль упругости и коэффициент поперечной деформации характеризуют упругие свойства материала. Предел текучести материала  $\sigma_T$  – наименьшее напряжение, при котором деформация увеличивается без заметного увеличения нагрузки. Если после возникновения текучести продолжать увеличивать действие нагрузки, наступает разрушение. Пределом прочности (временным сопротивлением) называют напряжение, соответствующее максимальной нагрузке, предшествующей разрушению образца. При отсутствии площадки текучести (что характерно для диаграмм растяжения большинства материалов, после предварительной пластической деформации) определяют условный (технический) предел текучести. Условным пределом текучести  $\sigma_{0,2}$  называется напряжение, при котором остаточная (пластическая) деформация составляет 0,2%. Условный предел текучести определяется аналогично пределу упругости.



Еще одна важная характеристика материала – это оценка интенсивности деформации, где применяют такие понятия как: относительная продольная  $\epsilon$  и относительная поперечная  $\epsilon'$  деформации, приходящиеся на единицу длины или площади сечения стержня:  $\epsilon = \Delta l / l$ ;  $\epsilon' = \Delta s / s$ , где  $\Delta l$  – изменение длины,  $\Delta s$  – изменение площади сечения образца.

Продольная и поперечная деформации связаны соотношением

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

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона – постоянная материала в пределах упругости.

Таким образом, испытания на растяжение дают возможность определить самые важные механические параметры материала необходимые для создания прочных и надежных конструкций.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Любому материальному объекту присущи вполне определенные свойства, большинство из которых характеризуется численными величинами. Для определения численного значения какого-либо параметра необходимо знать, во сколько раз оно больше или меньше эталонной величины. Операция сравнения определяемой величины для исследуемого объекта с соответствующей величиной эталона называется *измерением*.

Например, за единицу длины принят эталонный метр – определенное расстояние между штрихами, нанесенными на стержне из особого стойкого сплава. При измерении массы некоторого тела устанавливается, во сколько раз измеряемая масса превосходит массу эталонного образца в один килограмм. Разумеется, очень редко пользуются сравнением измеряемых величин с величинами эталонов, хранящихся в государственных метрологических учреждениях. В основном используют различного рода измерительные устройства и приборы, тем или иным способом сверенные с эталонами. Это относится в одинаковой мере как к устройствам и приборам для измерения длины (различные линейки, микрометр, измерительный микроскоп и т. п.), так и к измерителям времени, массы, а также электроизмерительным, оптическим и многим другим приборам.

Принято различать два вида экспериментальных измерений – прямые и косвенные. При *прямом измерении* определяемая величина сравнивается с единицей измерения непосредственно при помощи измерительного прибора. Измерение длины рулеткой либо штангенциркулем, измерение промежутков времени секундомером, измерение силы тока амперметром и т. п. – все это примеры прямых измерений, при которых измеряемая величина отсчитывается непосредственно по шкале прибора.

При *косвенном измерении* определяемая величина вычисляется по формуле, включающей результаты прямых измерений. К косвенным измерениям относятся, например, определение площади прямоугольника по измеренным двум его сторонам, определение деформаций по перемещениям от механического нагружения и напряженного состояния с применением гипотетических теорий.

Независимо от способа измерения определение той или иной величины сопровождается ошибкой, показывающей, насколько искомая величина отличается от ее истинного значения.

## 2.1. Погрешности измерений

*Никакое измерение нельзя выполнить абсолютно точно.* Другими словами, при измерении какой-либо величины любым способом абсолютное значение ее недостижимо, а это означает, что результат измерения содержит некоторую погрешность – ошибку измерений. Такой вывод следует из одного из положений теории естественнонаучного познания окружающего мира – любое научное знание относительно. Ограниченные возможности измерительных приборов, несовершенство органов чувств, неоднородность измерительных объектов, внешние и внутренние факторы, влияющие на объекты и т. п. – вот основные причины недостижимости абсолютного значения измеряемой величины.

Точность измерений возрастает по мере увеличения чувствительности измерительного прибора. Однако при измерении сколь угодно чувствительным прибором нельзя сделать ошибку измерений меньше ошибки измерительного прибора, даже при многократном повторении измерений. Например, если линейка позволяет измерить длину с относительной ошибкой 0,1 %, что соответствует 1 мм на линейке длиной 1 м, то, применяя ее для измерения длины любых объектов, нельзя определить длину с ошибкой, меньшей 0,1 %. Абсолютное значение является идеальным, недостижимым на практике. Чем точнее поставлен эксперимент, чем совершеннее измерительная техника и т. п., тем ближе измеряемая величина к абсолютной. Одна из важных целей экспериментатора – приблизить получаемые экспериментальные данные к их абсолютным величинам.

В зависимости от причин, порождающих погрешности, различают систематические, случайные и приборные ошибки. К ним не относят *грубые* ошибки, вызванные невниманием при снятии показаний приборов, неправильной записью измеряемых данных, ошибками при вычислениях и т. п. Такие ошибки не подчиняются какому-либо закону и устраняются при промежуточной оценке результатов измерений.

*Систематические ошибки* возникают при многократном повторении измерений и обуславливаются неисправностью измерительных приборов, неточностью методов измерений и использованием для расчетов неточных данных. Если, например, стрелка прибора изогнута или смещен «нуль» прибора, то при измерении таким прибором всегда получится ошибочная величина. Сколько бы раз ни проводились измерения, как бы тщательно ни записывались показания прибора, в измерениях всегда будет одна и та же ошибка. Для устранения систематической ошибки, вызванной неисправностью прибора,

необходимо ввести соответствующие поправки, полученные при сравнении показаний неисправного и исправного приборов. Систематическая ошибка всегда увеличивает или уменьшает результат измерений на одну и ту же величину. Следовательно, даже полное совпадение ряда измеренных величин не является признаком отсутствия систематической ошибки – ее нельзя выявить при повторных измерениях.

Сущность систематических ошибок, обусловленных методом измерений, можно пояснить на примере применения тензодатчиков, которые показывают изменения сопротивления за счет деформаций, при этом возникает систематическая ошибка, вызванная неучтенным электрическим сопротивлением соединительных проводов в цепи измерительной схемы. Чтобы ее устранить, нужно ввести поправки на неучтенное сопротивление. Для устранения систематических ошибок требуются тщательная проверка всех измерительных приборов и кропотливый анализ методов измерений.

*Случайные ошибки* возникают случайно при совокупном действии многих факторов и остаются при устранении грубых и систематических ошибок. Можно назвать многочисленные объективные и субъективные причины случайных ошибок: изменение напряжения в сети при электрических измерениях, неоднородность вещества, несплошности и дефекты структуры, изменение условий окружающей среды (температуры, влажности, давления), и др. Подобные причины приводят к тому, что несколько измерений одной и той же величины дают различные результаты или даже эксперимент может быть не завершен. На пример, при использовании хрупких покрытий заметное влияние имеет перепад температур и дополнительные механические и ударные нагрузки, что может привести к преждевременному растрескиванию покрытий. К случайным ошибкам относятся и те, причины которых неизвестны или неясны. Вследствие непредсказуемых обстоятельств случайные ошибки могут, как увеличивать, так и уменьшать значения измеряемой величины. Обычно случайные ошибки не устраняются – их нельзя избежать в каждом из результатов измерений.

Случайные ошибки подчиняются законам теории вероятностей, установленным для случайных явлений. С помощью методов теории вероятностей можно уменьшить влияние случайных ошибок на результат эксперимента. Широко известен нормальный закон распределения случайных ошибок (закон Гаусса), из которого следуют важные выводы: малые по модулю ошибки встречаются чаще; равные по модулю случайные ошибки разных знаков

встречаются одинаково часто; с увеличением точности (уменьшением интервала разброса измеренных значений) плотность случайных ошибок возрастет.

Теория случайных ошибок позволяет определить наиболее вероятные значения измеряемых величин и возможные отклонения от них. Однако следует отметить, что выводы теории вероятностей справедливы только для достаточно большого числа случайных событий. Поэтому, строго говоря, применение теории случайных ошибок целесообразно только к сравнительно большому числу измерений. На практике же часто ограничиваются 5–10 измерениями, хотя следует помнить, что увеличение числа измерений уменьшает влияние случайных ошибок. В каждом конкретном случае для получения заданной точности устанавливается необходимое число измерений.

*Приборные ошибки* обуславливаются конструктивными особенностями измерительных приборов. Приборную ошибку иногда называют точностью измерительного прибора. По величине ошибок, которые могут вносить при измерении электроизмерительные приборы, различают семь классов точности приборов, которые обозначаются цифрами: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. *Цифра класса точности показывает величину относительной ошибки в процентах при отклонении стрелки прибора до последнего деления шкалы.* Абсолютная ошибка прибора при любом отклонении стрелки одинакова. Поэтому при меньших отклонениях стрелки относительная ошибка больше. Например, если у прибора класса точности 0,5 вся шкала содержит 150 делений, то относительная ошибка при отклонении на все 150 делений составляет 0,5%, а абсолютная ошибка равна 0,75 деления. При отклонении стрелки на 25 делений абсолютная ошибка та же – 0,75 деления, а относительная ошибка – 3 %. Для получения возможно меньших относительных ошибок при пользовании измерительными приборами необходимо добиваться достаточно большого отклонения стрелки, не меньше, чем на половину шкалы. Для этого нужно выбирать прибор с достаточно высокой чувствительностью или переходить к меньшим пределам измерений многопредельного прибора.

## 2.2. Измерительные приборы

Большинство приборов для измерения разных механических и физических величин содержит линейные, угловые или круговые шкалы. Показание того или иного прибора соответствует длине отрезков прямой или дуги. Чем больше точность прибора, тем больше должно быть число делений, на которые разбита шкала. Для одной и той же шкалы с увеличением числа делений расстояние между штрихами уменьшается.

В некоторых приборах для повышения точности измерений применяют различные приспособления, позволяющие отсчитывать доли деления шкалы. Наиболее широко распространены нониусы и микрометрические винты, их обычно применяют в приборах для измерения длины или угла, в которых части прибора, перемещаются относительно друг друга. На одной из частей наносится основная шкала, а на другой – нониус, представляющий собой небольшую дополнительную шкалу, передвигающуюся при измерении вдоль основной шкалы. Удобство отсчета с применением нониуса заключается в том, что человеческий глаз легко различает, является ли один штрих продолжением другого или они сдвинуты друг относительно друга.

Иногда для отсчета долей деления применяют специальный циферблат, указатель которого связан с перемещением измерительного устройства механической передачей. В оптических приборах современных конструкций наносят микроскопические цифры около каждого штриха шкалы, и показание отсчетов снимают при помощи отсчетного микроскопа, в поле зрения которого видна только одна необходимая цифра и дополнительная шкала для отсчета долей деления. На пример, для измерения небольших линейных размеров наиболее часто применяют штангенциркуль и микрометр. Размеры от 3 до 5 мм удобно определять измерительным микроскопом. Современные технические средства позволяют определить минимальное расстояние, примерно равное  $10^{-18}$  м. Максимальное расстояние, доступное современным измерениям, составляет около  $10^{26}$  м (такому расстоянию соответствует радиус космологического горизонта).

Для измерения различных механических характеристик, констант материала, напряженно-деформированного состояния широко применяют электроизмерительные приборы. Принцип действия таких приборов основан на связи между электрическими физическими и другими явлениями, а также на законах или закономерностях, устанавливающих зависимость между различными физическими и механическими величинами.

### 2.3. Выполнение и оформление лабораторных работ

Выполняя лабораторную работу, студент самостоятельно получает экспериментальные результаты и оценивает их достоверность. Основу лабораторных работ составляют измерения – неотъемная часть любого эксперимента.

Механическая направленность представленных лабораторных работ обусловлена возможностью с помощью простых измерительных средств получить количественные экспериментальные результаты.

При выполнении лабораторных работ необходимо придерживаться следующих правил:

- Описание лабораторных работ – всего лишь ориентир для самостоятельной работы. Успех определяется главным образом не столько изучением описания работы, сколько сознательным отношением к экспериментальным измерениям.

- Необходимое условие для начала выполнения лабораторной работы – ясное понимание сущности изучаемого объекта и цели эксперимента.

- Главное условие успешного выполнения измерений – внимательное и неторопливое ознакомление с лабораторной установкой и приборами перед измерениями.

- Работу с приборами следует начинать лишь после изучения инструкции и необходимых мер предосторожности. Не следует вскрывать приборы, прикасаться к оптическим и тонким деталям лабораторных установок. Необходимо бережно обращаться с экспериментальным оборудованием.

- В лабораторных работах, содержащих электрические схемы, источник питания подключают после того, как вся схема тщательно проверена и получен допуск от преподавателя к выполнению измерений. Нарушение данного правила может привести к несчастному случаю.

- Измерения должны производиться с максимальной точностью. Только точные, достоверные результаты позволяют наиболее полно количественно описать изучаемый объект и представляют интерес при их математической обработке.

- При измерениях следует учесть, что некоторые приборы могут существенно изменить физическое состояние исследуемого объекта. Например, при превышении допустимой нагрузки в детали могут произойти пластические (необратимые деформации).

- Стремясь получить достоверную картину изучаемого объекта, следует согласовать точность измерений различных величин.

- В описаниях лабораторных работ обычно указывается приближенное число измерений. Как правило, число измерений устанавливает сам экспериментатор, основываясь на точности приборов и результатах измерений. Если в результатах измерений получен большой разброс, лучше еще раз обратиться к описанию установки, чем продолжать измерения.

- При построении кривой зависимости одной величины от другой плотность числа экспериментальных точек на различных участках кривой выбирается с таким расчетом, чтобы четко изображались изгибы, максимумы и минимумы. На участках плавного хода кривой зависимости плотность точек может быть меньшей.

- Следует стремиться к аккуратности и полноте первичных (черновых) записей при выполнении лабораторных работ. Записи измерений лучше вести в виде таблиц с указанием единиц измеряемых величин. Необходимо записывать точность и чувствительность приборов.

Оформление отчета каждой работы начинается с титульного листа с указанием названия, группы студентов выполнявшей работу. Далее кратко излагается сущность теории, описание лабораторной установки и основное содержание заданий вместе с таблицами для занесения результатов измерений. Желательно изобразить схему установки, нагружения, закрепления и формы модели. Далее производят запись обработки результатов измерений и окончательного результата в стандартной форме.

При обработке результатов лабораторной работы следует тщательно обдумывать возможные источники ошибок. Сравнивая свои результаты с данными таблиц либо с полученными ранее результатами других студентов, не следует при их несовпадении сразу считать свои результаты ошибочными. В таком случае нужно еще раз продумать методику измерений.

Перед началом выполнения лабораторной работы следует получить допуск-разрешение от преподавателя на выполнение измерений. Если студент показал знание сущности выполняемой работы и порядка измерений, то преподаватель делает пометку «допуск» в таблице лабораторной тетради.

Получив допуск к выполнению работы, студент проводит измерения и заносит их в соответствующие таблицы.

Лабораторная работа считается полностью выполненной, если она защищена. При защите преподаватель вправе спросить не только о сущности выполненной работы и о результатах измерений, но и теоретический материал того раздела, к которому относится данная лабораторная работа.

## 2.4. Математическая обработка результатов измерений

После измерительной операции наступает следующая стадия экспериментальной работы – *математическая обработка результатов измерений*. Все числа, получаемые при измерениях, являются приближенными. Точность измерений нельзя повысить математическими действиями над полученными результатами измерений. Учет большого числа значащих цифр без оценки их достоверности затрудняет вычисления и оказывается бесполезным.

В качестве истинного, наиболее вероятного значения измеряемой величины обычно принимают *среднее арифметическое* измеренных значений:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – значения измеренной величины;  $n$  – число измерений.

После расчета среднего арифметического значения измеряемой величины приступают к определению абсолютной и относительной ошибок измерений.

Абсолютное значение разности между средним арифметическим  $\langle x \rangle$  и каждым из отдельных результатов измерений называется *абсолютной ошибкой отдельного измерения* и обозначается

$$\Delta x_i = |\langle x \rangle - x_i|.$$

Часто *среднюю абсолютную ошибку* определяют как среднее арифметическое абсолютных ошибок отдельных измерений, т. е.

$$\langle \Delta x_i \rangle = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + \dots + |\Delta x_n|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta x_i|}{n}.$$

Абсолютная ошибка указывает два значения измеряемой величины, между которыми заключено ее истинное значение. Например, в результате измерений и последующих вычислений диаметра проволоки получили:

$$\langle d \rangle = 2,4 \text{ мм и } \langle \Delta d_i \rangle = \pm 0,1 \text{ мм.}$$

Это означает, что истинное значение диаметра проволоки находится в интервале между 2,3 и 2,5 мм.

Можно уменьшить абсолютную ошибку и, следовательно, уменьшить интервал, в котором находится истинное значение измеряемой величины, но абсолютная ошибка не может быть равной нулю.

Для полной характеристики точности измерений рассчитывают *относительную ошибку*, равную отношению средней абсолютной ошибки к среднему результату измерений:

$$E = \frac{\langle \Delta x_i \rangle}{\langle x \rangle}.$$

Если выполнено достаточно большое число измерений и результаты подчиняются закону статистического распределения, то вместо средней абсолютной ошибки определяется *средняя квадратичная ошибка*

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 / n(n-1)}.$$

Относительная ошибка в данном случае

$$E_s = \frac{S}{\langle x \rangle}.$$

*Относительная ошибка* – безразмерная величина. Ее часто выражают в процентах, для чего безразмерную величину надо умножить на 100 %.

Если необходимо учитывать как приборную ( $\delta$ ), так и случайную ( $S_x$ ) ошибки, то *полная абсолютная ошибка среднего значения* измеренной величины

$$\Delta_{\langle x \rangle} = \sqrt{\delta^2 + S_{\langle x \rangle}^2}.$$

*Если одна из данных ошибок меньше другой в 4 и более раз, то ее в окончательном результате можно не учитывать.*

Для косвенных измерений, когда определяемая величина получается путем вычислений по известной формуле, ошибки в простейших случаях находят следующим образом.

Если определяемая величина  $A$  связана с непосредственно измеряемыми величинами  $B$  и  $C$  выражением

$$A = BC,$$

то относительная ошибка величины  $A$  равна сумме относительных ошибок величин  $B$  и  $C$ , т. е.

$$E = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta C}{C},$$

а абсолютная ошибка

$$\Delta A = EA.$$

Относительные ошибки складываются и при делении двух измеряемых величин.

Если же определяемая величина  $A$  равна сумме или разности измеряемых величин  $B$  и  $C$ , т. е. если

$$A = B \pm C,$$

то абсолютная ошибка  $A$  равна сумме абсолютных ошибок  $B$  и  $C$ :

$$\Delta A = \Delta B + \Delta C.$$

Относительная ошибка в данном случае

$$E = \Delta A/A.$$

*Окончательный результат измерений* обычно записывают в *стандартной форме*, удобной для анализа:

- вначале записывают название определяемой физической величины;
- затем пишется буквенный символ определяемой величины, знак равенства и в скобках ее среднее значение плюс-минус средняя абсолютная ошибка, а за скобкой указывается единица измерения;
- отдельно записывают значение относительной ошибки в процентах;
- окончательные результаты заключаются в общую рамку.

Среднее значение, полная абсолютная ошибка и относительная ошибка округляются по следующим правилам:

- вначале округляют до одной или двух значащих цифр среднюю абсолютную ошибку (если старшая цифра больше 4, оставляют одну значащую цифру, в остальных случаях — две);
- затем округляют среднее значение до разряда, совпадающего с младшим разрядом абсолютной ошибки;
- относительную ошибку записывают в % с точностью до двух значащих цифр.

Например, запись окончательного результата определения объема цилиндрического тела имеет вид

<p style="text-align: center;"><b>Объем цилиндрического тела</b> <b><math>V=(10,43 \pm 0,25) \text{ см}^3</math></b> <b><math>E=2,4\%</math></b></p>
--

При совпадении двух результатов, т. е. при установлении их равенства, когда указаны полные абсолютные ошибки, удобно пользоваться следующим правилом определения наличия систематической ошибки: если модуль разности средних значений двух измеренных величин не превышает суммы их абсолютных ошибок, сравниваемые величины можно считать равными или

совпадающими в пределах ошибок измерений. В противном случае данные величины считаются неравными или несовпадающими. При таком сравнении в пределах указанных ошибок, если измеренная величина не совпадает, например, с табличной (более точной), можно говорить о наличии в измерениях систематической ошибки.

Рассмотрим два характерных примера решения простейших задач на определение ошибки измерений.

**Пример 1.** При измерении начального диаметра галтели для испытаний на растяжение были получены следующие результаты:  $d_1 = 3,1$ ;  $d_2 = 3,2$ ;  $d_3 = 3,0$ ;  $d_4 = 3,5$ ;  $d_5 = 3,3$ ;  $d_6 = 3,2$  мм. Определить среднюю квадратичную ошибку диаметра, относительную ошибку и представить окончательный результат в стандартной форме.

*Решение.* Вначале находим среднее значение периода:

$$\langle d \rangle = (3,1 + 3,2 + 3,0 + 3,5 + 3,3 + 3,2)/6 = 3,21(6) \approx 3,22 \text{ мм.}$$

Округление промежуточного результата произведено до трех значащих цифр.

Далее по формуле

$$\Delta d_i = |\langle d \rangle - d_i|$$

вычисляем абсолютные ошибки отдельных измерений (с):

$$\Delta d_1 = |3,22 - 3,1| = 0,12; \quad \Delta d_2 = |3,22 - 3,2| = 0,02;$$

$$\Delta d_3 = |3,22 - 3,0| = 0,22; \quad \Delta d_4 = |3,22 - 3,5| = 0,28;$$

$$\Delta d_5 = |3,22 - 3,3| = 0,08; \quad \Delta d_6 = |3,22 - 3,2| = 0,02.$$

Затем находим среднюю квадратичную ошибку среднего значения периода

$$S_{\langle d \rangle} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta d_i)^2 / n(n-1)} = \\ = \sqrt{(0,12^2 + 0,02^2 + 0,22^2 + 0,28^2 + 0,08^2 + 0,02^2) / 30} = 0,0703 \text{ мм.}$$

Вычисляем относительную ошибку среднего значения периода:

$$E_{\langle d \rangle} = 0,0703 \cdot 100 \% / 3,22 = 2,19 \%$$

В окончательном результате величину  $S_{\langle T \rangle}$  округляем до одной значащей цифры (поскольку старшая значащая цифра равна 7), среднее значение периода –

до разряда округленной величины  $S_{\langle T \rangle}$ , т. е. до сотых долей, а относительную ошибку – до двух значащих цифр.

*Ответ:*

**Диаметр образца**  
 $d = (3,22 \pm 0,07) \text{ мм}$   
 $E_{\langle d \rangle} = 2,2\%$

**Пример 2.** Равны ли в пределах ошибок измерений определяемое значение предела прочности материала (временного сопротивления)  $[\sigma]$  и табличное значение предела для того же материала  $\sigma_g$ , если

$$[\sigma] = (0,9567 \pm 0,0003) \text{ кгс/см}^2;$$

$$\sigma_g = (0,9561 \pm 0,0001) \text{ кгс/см}^2?$$

Имеется ли систематическая ошибка при определении временного сопротивления?

*Решение.* Сумма абсолютных ошибок определенного в результате измерений и табличного значений предела составляет  $0,0004 \text{ кгс/см}^2$ . Эта сумма меньше разности по модулю их средних значений, равной  $0,0006 \text{ кгс/см}^2$ . Следовательно, данные результаты нельзя считать равными в пределах ошибок измерений. Так как  $[\sigma] > \sigma_g$ , то в измерениях допущена систематическая ошибка, которая привела к завышенному результату по сравнению с табличным.

*Ответ:* значения предела прочности  $[\sigma]$  и  $\sigma_g$  в пределах ошибок измерений не равны; при измерении временного сопротивления допущена систематическая ошибка.

### **Вопросы для самопроверки**

- Математическая обработка результатов эксперимента.
- Погрешности эксперимента. Классификация ошибок измерения. Способы учета. Методы исключения или минимизации.
- Средние значения, типы оценки экспериментальных данных. Абсолютные и относительные погрешности измерения. Средняя квадратичная оценка результатов.
- Прямые и косвенные измерения. Формулы расчета и оценки погрешности при использовании косвенных измерений.
- Стандартная форма записи результатов и оформление экспериментальной работы

## 3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

### 3.1. Метод тензометрирования

Применяется для измерения деформаций, которые вызывают в различных тензомерах определенные изменения: активного или реактивного сопротивления, емкости, фототока, положения частей тензомера и т.п., эффект которых преобразуется, увеличивается и регистрируется.

*Область применения* – по скорости деформации: при статистическом и динамическом нагружении, включая удар; 2) по объектам: на моделях и натуральных деталях; 3) по условиям испытаний: в лабораторных, цеховых и полевых условиях; при нормальной, пониженной и повышенной температурах; 4) по диапазону деформаций: упругие и упругопластические до ~ 2%.

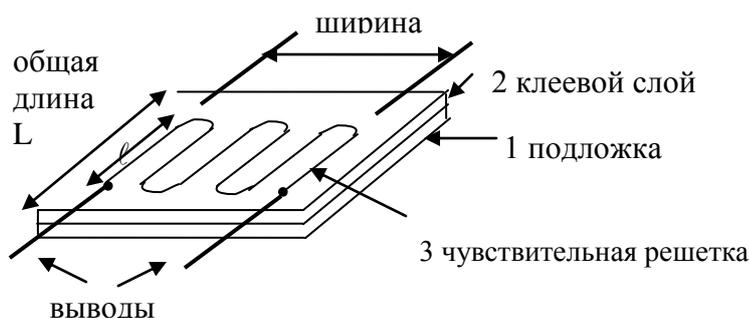
*К достоинствам* метода можно отнести – высокую точность измерения деформаций, применимость на движущихся деталях, на натуральных объектах и почти в любых условиях, также возможны регистрации изменения во времени.

*К недостаткам* метода тензометрирования относят: возможность измерения точечных деформаций только на поверхности, необходимость предварительных экспериментов (метод хрупких покрытий) для определения напряженных мест и лучших конструктивных форм.

#### Основные типы тензометров

1. Тензометры электрические: проволочные, фольговые, омического сопротивления, индукционные, фотоэлектрические, емкостный, полупроводниковые;
2. Тензометры механические: тензометр Гугенберга, тензометр Аистова;
3. Тензометры оптико-механические: тензометр Лера, Тензометр Петерсона, струнный тензометр, Давиденкова, зеркальный

Особое место среди перечисленных тензометров занимают тензометрические преобразователи или тензодатчики, т.к. обладают простой конструкцией, дешевизной (особенно проволочные), высокой чувствительностью, малыми габаритами и весом.



Проволочный тензодатчик

Чувствительный элемент тензорезистора выполняют в виде петлеобразной решетки из тонкой проволоочки или фольги и располагаются на подложке. Внутри тонкой двойной бумажной или целлофановой подложки - 1 находится тонкая зигзагообразная ( $\ell = 5 \div 20$  мм) тензометрическая проволочка (2) диаметром  $d \approx 0,01 \div 0,5$  мм с медными выходами (3)

Проволочный датчик приклеивается (закрепляется) на поверхности детали по направлению ее деформации.

В основу метода положена зависимость омического сопротивления  $R$  проводника от его длины  $\ell$  и удельного сопротивления  $\rho$  материала и площади поперечного сечения проводника  $F$

$$R = \rho \frac{\ell}{F} \quad (1)$$

При деформации объекта деформируется и тензодатчик, а значит, меняется его сопротивление

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \ell}{\ell} - R \frac{\Delta d}{d} \quad (2)$$

Изменения удельного сопротивления проводника под действием растягивающих или сжимающих деформаций называют тензорезистивным эффектом. Он характеризуется тензочувствительностью  $S$ , устанавливающей связь между относительным изменением сопротивления и относительной деформацией в направлении измерений.

Коэффициент тензочувствительности тензорезистора

$$s = \frac{\Delta R}{R} / \frac{\Delta \ell}{\ell} = (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho} / \frac{\Delta \ell}{\ell}. \quad (3)$$

где  $\mu = -\frac{\Delta d}{d} / \frac{\Delta \ell}{\ell}$  – коэффициент Пуассона тензометрической проволоки и для применяемых материалов величина его постоянна и лежит в пределах  $0,24 \div 0,4$ .

Значения  $S$ , определяются экспериментально для наиболее распространенных проводниковых или полупроводниковых тензочувствительных материалов, сводятся в таблицы наряду с такими данными как температурный коэффициент расширения, сопротивление и т.д.

**Цель лабораторной работы** – Изучение метода тензометрирования

**Сущность метода** – на участке измерения деформации (базе) устанавливается измерительный прибор (тензометр) или часть его, воспринимающая деформацию (датчик). Деформация вызывает в тензометре определенные изменения (активного или реактивного сопротивления, емкости, фототока, положения частей тензометра и т.п.) эффект которых преобразуется, увеличивается и регистрируется.

**Определяемые величины** – 1) непосредственно измерением определяются – величина, знак и направление главных деформаций и напряжений.

**База** – от 1 до 30 мм и более.

**Погрешность измерений** – от  $\pm 1$  до  $\pm 7\%$ .

Датчик с помощью клея (например, БФ-2) закрепляется на поверхности испытуемой детали по направлению ее деформации. При деформации детали деформируется и датчик (растягивается или сжимается) его сопротивление.

**Аппаратура для тензометрирования**

Для тензометрирования могут быть использованы различные серийные приборы и аппаратура. Это одноканальные и многоканальные тензостанции, позволяющие подключать регистрирующие приборы (например, шлейфовые осциллографы) для регистрации измеряемых величин и различные автоматические и полуавтоматические самопишущие измерители деформации и т.д.

Многообразие приборов (из-за их различного назначения) определяют и различие их измерительных схем, которые могут быть потенциометрическими и мостовыми, уравновешенными и неуравновешенными, питаемые постоянным током и переменным током (схемы с усилением на несущей частоте). Преимущественное распространение из-за простоты, малой чувствительности к помехам и возможности регистрации как статических, так и динамических деформаций, получили приборы с мостовой неуравновешенной измерительной схемой с усилением по несущей частоте.

Наиболее общей задачей при исследовании являются экспериментальное определение наиболее напряженных участков детали и установления в них напряженного состояния. Для этого применяют следующую методику: вначале проводят испытания методом хрупких покрытий, на основании которого устанавливают наиболее напряженные участки детали и направления главных деформаций. Затем уже по известным направлениям прикрепляют тензометры и измеряют главные деформации. При проведении исследований только

тензомерами по поверхности детали размечается сетка, в узлах которой производятся измерения деформаций. При этом количество и расположение тензомеров, установленных в каждой точке (узле) выбирается в зависимости от наличия предварительных данных о типе напряженного состояния и направления главных деформаций.

Главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  при условии упругих деформациях и изотропном материале связаны с главными деформациями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  зависимостями:

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

где  $E$  – модуль упругости и  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала исследуемого объекта.

Для линейного напряженного состояния

$$\sigma_2 = -\mu\varepsilon_1 \quad \sigma_1 = -\mu\varepsilon_1, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

### Порядок проведения работы

1. Выбрать для исследования наиболее опасную зону образца (заготовки, конструкции и т.д.)
2. Обработать и обезжирить ацетоном выбранный участок детали.
3. Выбрать направление для приклейки датчиков. (В случае необходимости можно использовать хрупкие покрытия).
4. Произвести приклеивание датчиков клеем БФ-4 или БФ-2. Температура сушки  $100^{\circ}$ , длительность сушки 2-3 часа.
5. Применить в качестве измерительного прибора микроамперметр с пределами измерения  $0 + 50$  мкА, а в качестве источника питания – источник с регулируемым напряжением  $0 + 20$  В, установив напряжение питания на последнем  $U_n = 15$ В.
6. Нагружение системы, балансировка и снятие показаний.
7. Определить усилия как функцию от перемещения.
8. По значению максимального прогиба и соответствующим ему значениям напряжений определить чувствительность одного тензодатчика. Для этого сначала, зная сопротивление рамки прибора  $r_n$ ,  $I_{\max}$  и сопротивления датчика в недеформированном состоянии  $r = 200$  Ом, определить для датчика соответствующую величину  $\Delta r$ . Используя выражение  $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\delta}{E}$  (для балок),

находим  $K = \frac{\Delta r}{r} / \frac{\Delta l}{l}$ , где  $l$  – база тензодатчика.

### Задание №1

1. Определить теоретически величину предельного упругого перемещения свободного конца балки  $[\delta]$ .

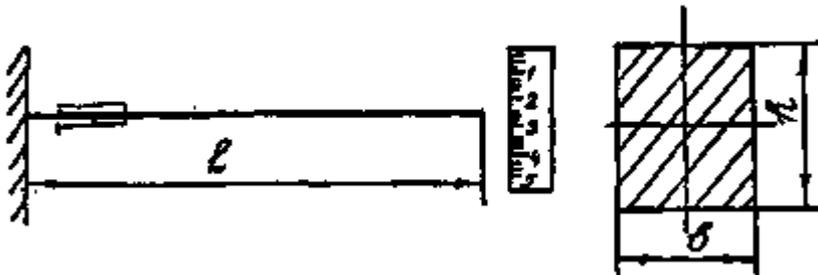
2. Определить величину относительных деформаций у консольной балки или коэффициент тензочувствительности датчиков, задаваясь прогибом.

При эксперименте должно соблюдаться условие  $\delta_{\max} \leq [\delta]$ .

Данные к работе:  $L, b, h, E = 2,1 \times 10^4 \text{ кг/мм}^2$ ,  $\sigma_{\text{упр}} = 2100 \text{ кг/см}^2$ ,

$$I = \frac{bh^3}{12}, W = \frac{bh^2}{6}, \delta = \frac{Pl^3}{3EI}, \sigma = \frac{M}{W} = \frac{Pl}{W}$$

где  $l$  – расстояние от свободного конца балки до середины тензодатчика.



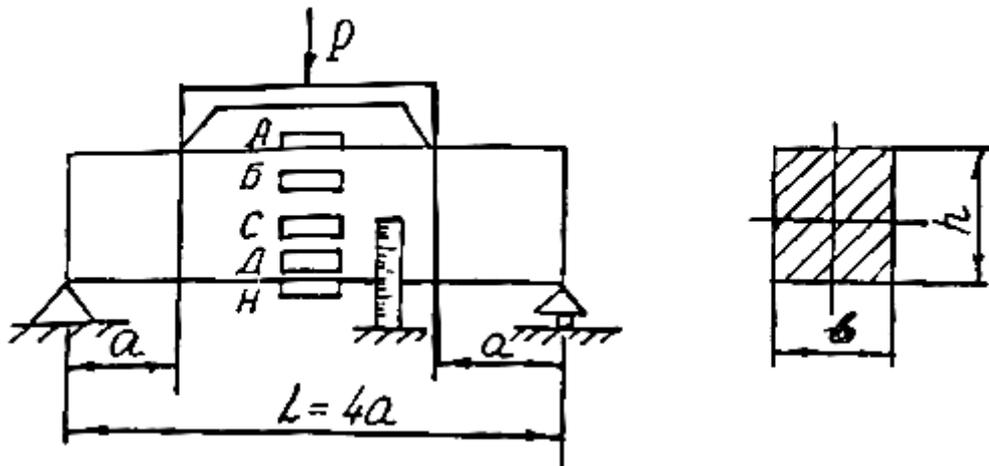
Консольная балка

### Задание №2

1. Определить теоретически величину предельного упругого перемещения  $[\delta]$  средней части двухопорной балки.

2. Определить величины относительных деформаций у двухопорной балки или коэффициент тензочувствительности датчиков при известном прогибе.

Данные к работе:  $L, b, h, \sigma_{\text{упр}}, \delta = \frac{11 Pa^3}{6 EI}$ .

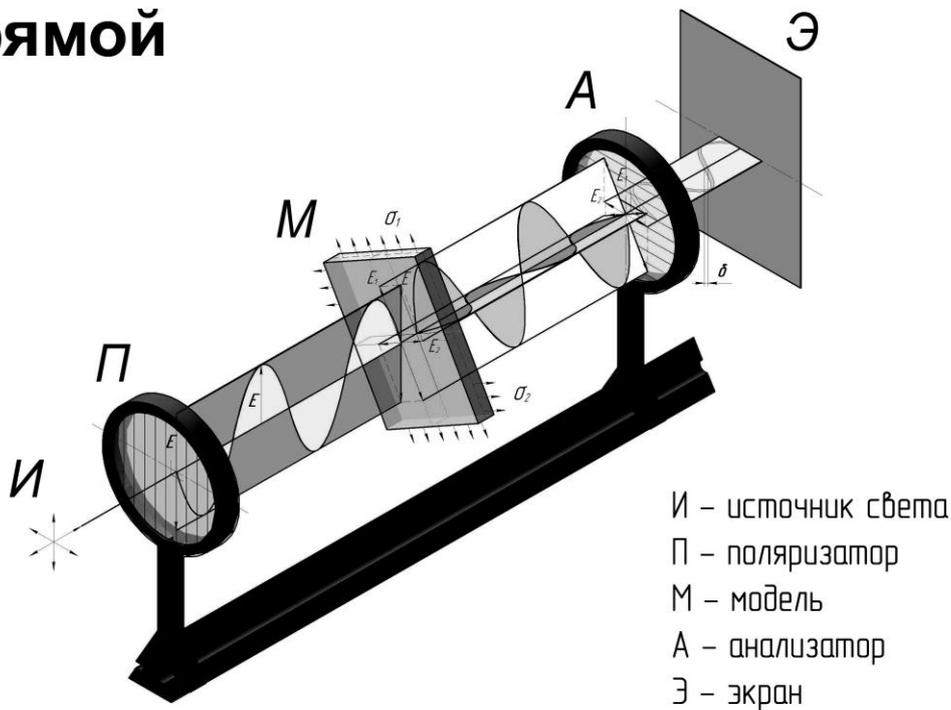


### 3.2. Поляризационно-оптический метод

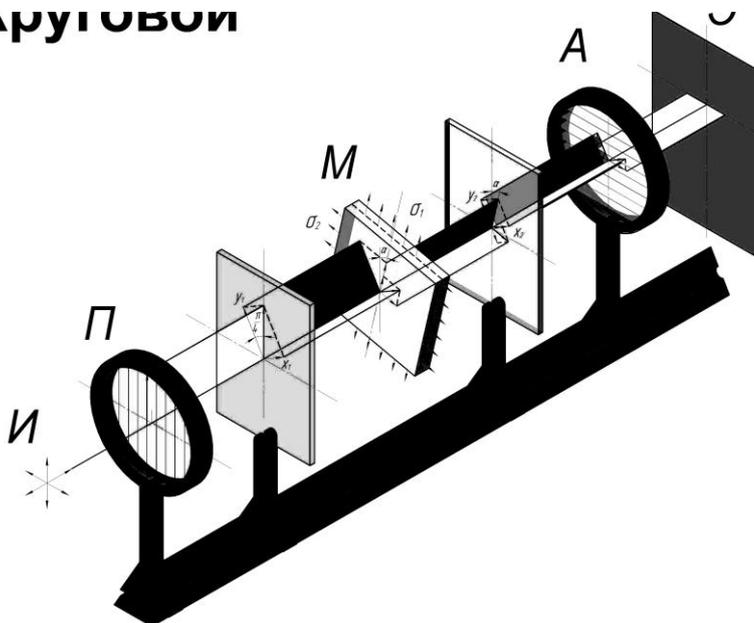
**Сущность метода.** Исследование проводится на прозрачных моделях или образцах с фотоупругим покрытием, изготовляемых из специального материала и просвечиваемых поляризационным светом. При нагружении возникает эффект двойного лучепреломления, величина которого пропорциональна величине напряжения в рассматриваемой точке и измеряется либо прибором (компенсатором), либо по цвету или порядку интерференционных полос.

В качестве оборудования применяют прямой или круговой полярископ:

#### Прямой



#### Круговой



**Погрешность измерений.** До 5-7% для плоских моделей и от  $\pm 5$  до  $\pm 20\%$  для объемных моделей.

**Область применения.** Только на моделях, в лабораторных условиях, при статическом нагружении, исследование в упругой области.

**Достоинства.** Возможность определения напряжений в любой точке объекта, как для плоских, так и для объемных задач. Достаточная точность. Простота изготовления моделей, варьирование их формы. Наглядность полученных картин распределения напряжений в виде траекторий точек равных касательных напряжений (изохром) и одинаковых направлений главных напряжений (изоклин).

**Применяемое оборудование:**

1. Поляризационно-оптическая установка ППУ-7.
2. Координатно-синхронный полярископ КСП-7, состоящий из координатника и поляризационно-оптической установки.
3. Образцы из оптически активного материала или покрытия.

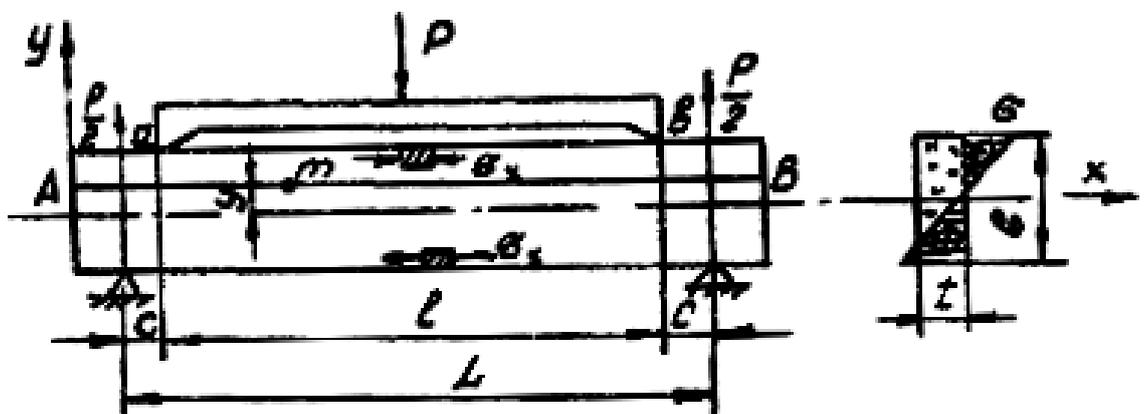
**Задание № 1**

**Определение цены полосы материала модели**

1. Ознакомиться с установкой ППУ-7.
2. Установить образец (двухпорную балку). Схема нагружения соответствует чистому изгибу:

$$\sigma_x = \frac{MY}{I} = \sigma_1; \quad \sigma_y = \sigma_2 = 0; \quad \tau_{xy} = 0,$$

где  $M$  и  $I$  – соответственно изгибающий момент и момент инерции относительно нейтральной оси;  $Y$  – расстояние от нейтральной оси до рассматриваемой в сечении напряженной точки.



Двухпорная балка

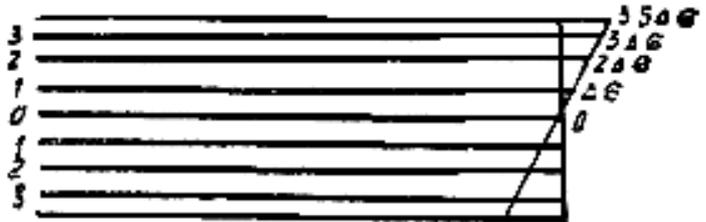
3. Настроить установку и нагрузить балку до появления темных и светлых полос. Две ближайшие к нейтральной оси полосы первого порядка, расположенные одна сверху, а другая снизу от нее соответствует  $\delta = \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волна света. Напряжения обозначить  $\Delta\sigma$ . Следующие две полосы обозначаются как  $2 \Delta\sigma$  (от второго порядка) и соответствуют разности хода  $2 \lambda$ .

Цену полосы можно определить по формуле

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{n} t,$$

где  $n$  – количество интервалов между полосами

Интерференционная картина для определения цены полосы



При небольшом краевом эффекте край образца не рассматривается; замеряется средний шаг полос  $\Delta y$  в средней части и цена полосы:

$$\sigma_{0t} = \frac{M}{I} \Delta y \quad \text{или} \quad \sigma_0 = \frac{M}{I} \Delta y t,$$

где  $I = \frac{th^2}{12}$  – момент инерции сечения балки.

Полученная цена  $\sigma_0$  относится к листу материала толщиной 1 см, измеряется она в кгс/см<sup>2</sup>.

4. Результаты опыта записать в таблицу

Таблица

Нагрузка $P$ , кг	Изгибающий момент $M = \frac{P}{2} C$	Момент сопротивления $W = \frac{th^2}{6}$	Максимальное напряжение $\sigma_{\max} = \frac{M}{W}$	Кол-во интервалов между полосами, $n$	Цена полосы $\sigma_{0t} = \frac{\sigma_{\max}}{n}$	Приведенная Цена полосы $\sigma_0 = \frac{\sigma_{\max}}{n} t$

## Задание № 2

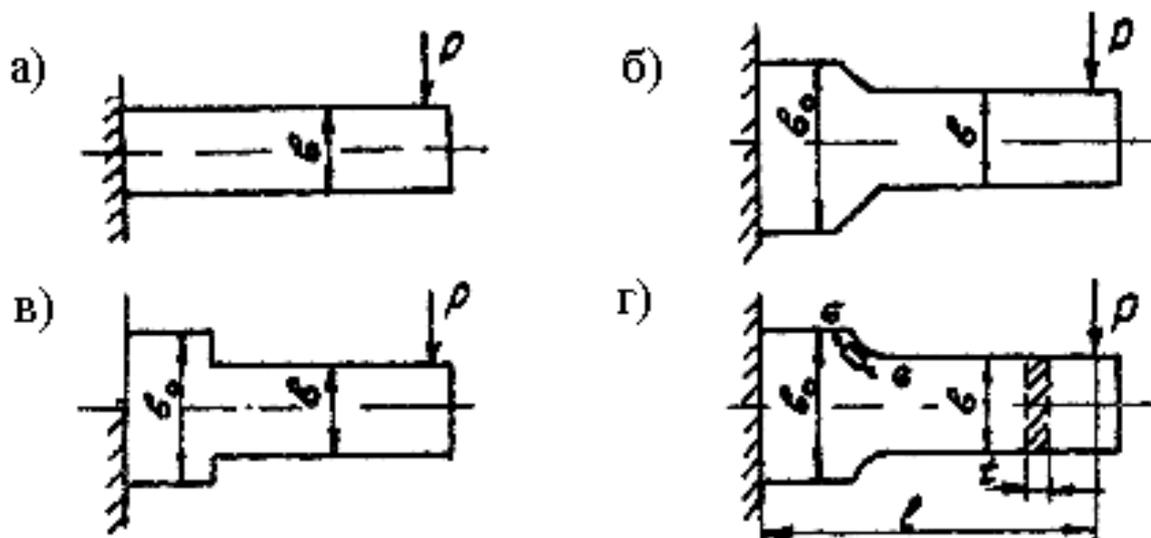
### Определение коэффициента концентрации напряжения

1. Ознакомиться с установкой ППУ-7.
2. Настроить установку и поочередно нагрузить каждый образец (консольные балки) с концентраторами 3–4 нагрузками. Полученные интерференционные картины, характеризующие распределение напряжений, занести на бумагу.
3. Пронумеровать полосы по верхнему краю консоли, начиная от средней линии. Напряжение в точке выхода полосы, имеющей порядок 1, соответствует напряжению  $\sigma_{0t}$ . В точке выхода второй полосы –  $2 \sigma_{0t}$  и т.д. Откладывая в одном масштабе эти напряжения, построить эпюры краевых напряжений.
4. Коэффициент концентрации напряжений для рассматриваемого случая

$$k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}},$$

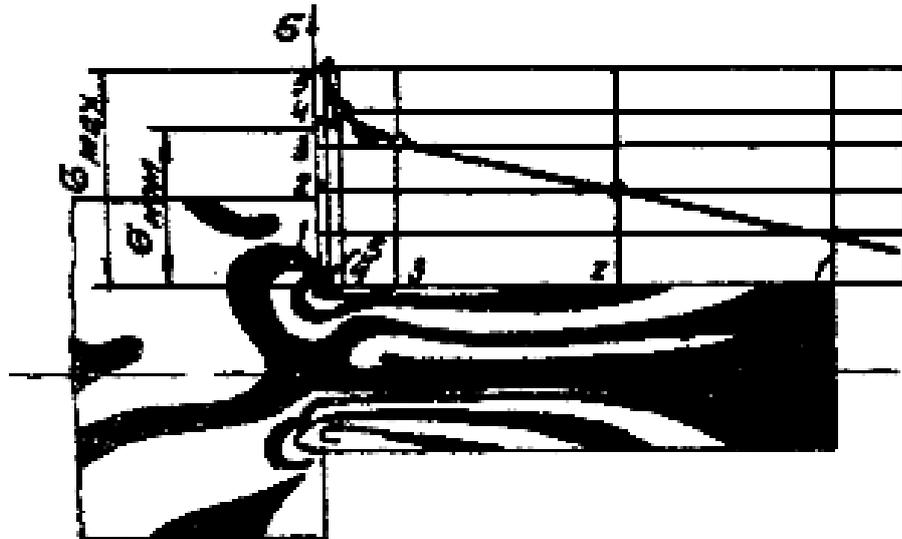
где  $\sigma_{\text{ном}} = \frac{M}{W} = \frac{6pl}{b^2t}$ ,  $\sigma_{\max}$  определяется экспериментально по количеству полос (порядковый номер – 5) и цены полосы.

Определение цены полосы подробно изложено в задании №1 для условия чистого изгиба.



Варианты концентраторов напряжений в консольных балках

5. Установить закон изменения коэффициента концентрации напряжения в зависимости от концентратора.



Интерференционная картина для определения коэффициента концентрации напряжений

6. По проделанной работе оформить соответствующие графики и рисунки.

#### 4. СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Приставки для образования кратных и дольных единиц

Приставка	Обозначение	Кратность и дольность	Приставка	Обозначение	Кратность и дольность
Пета	П	$10^{15}$	Деци	д	$10^{-1}$
Тера	Т	$10^{12}$	Санتي	с	$10^{-2}$
Гига	Г	$10^9$	Милли	м	$10^{-3}$
Мега	М	$10^6$	Микро	мк	$10^{-6}$
Кило	к	$10^3$	Нано	н	$10^{-9}$
Гекто	г	$10^2$	Пико	п	$10^{-12}$
Дека	да	$10^1$	Фемто	ф	$10^{-15}$

#### Единицы механических величин в СИ

Величина	Единица величины в СИ	Величина	Единица величины в СИ
Длина	м	Момент силы	Н · м
Время	с	Энергия, работа	Дж
Скорость	м/с	Мощность	Вт
Ускорение	м/с <sup>2</sup>	Момент импульса	кг · м <sup>2</sup> /с
Частота колебаний	Гц	Момент инерции	кг · м <sup>2</sup>
Круговая частота	с <sup>-1</sup>	Температура	К
Угловая скорость	рад/с	Вязкость	
Угловое ускорение	рад/с <sup>2</sup>	динамическая	Па · с
Масса	кг	кинематическая	м <sup>2</sup> /с
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	Поверхностное натяжение	Н/м
Сила	Н		
Давление, напряжение	Па		
Импульс	кг · м/с		

## СВЯЗЬ ВНЕСИСТЕМНЫХ ЕДИНИЦ С ЕДИНИЦАМИ СИ

### Длина

$$1 \text{ ангстрем (А)} = 10^{-10} \text{ м}$$

$$1 \text{ ферми (Фм)} = 10^{-15} \text{ м}$$

$$1 \text{ астрономическая единица длины (а.е.)} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м}$$

$$1 \text{ световой год (св. год)} = 9,4605 \cdot 10^{15} \text{ м}$$

$$1 \text{ парсек (пк)} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

$$1 \text{ морская миля} = 1852 \text{ м}$$

$$1 \text{ дюйм (Д)} = 0,0254 \text{ м}$$

$$1 \text{ фут} = 12 \text{ Д} = 0,3048 \text{ м}$$

### Площадь

$$1 \text{ ар (а)} = 100 \text{ м}^2$$

$$1 \text{ гектар (га)} = 100 \text{ а} = 10^4 \text{ м}^2$$

### Масса

$$1 \text{ грамм (г)} = 10^{-3} \text{ кг}$$

$$1 \text{ центнер (ц)} = 100 \text{ кг}$$

$$1 \text{ тонна (т)} = 1000 \text{ кг}$$

$$1 \text{ карат (кар)} = 0,2 \text{ г} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$1 \text{ атомная единица массы (а.е.м)} = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

### Скорость

$$1 \text{ километр в час (км/ч)} = 0,277 \text{ м/с}$$

$$1 \text{ узел} = 1 \text{ морская миля в час} = 0,514 \text{ м/с}$$

### Сила

$$1 \text{ дина (дин)} = 10^{-5} \text{ Н}$$

### Давление

$$1 \text{ бар (бар)} = 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.)} = 1 \text{ торр (Тор)} = 133,3 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атмосфера физическая (атм.)} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атмосфера техническая (ат)} = 9,807 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

### Энергия

$$1 \text{ эрг (эрг)} = 10^{-7} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ киловатт-час (кВт·ч)} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ электрон-вольт (эВ)} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$1 \text{ калория международная (кал)} = 4,1868 \text{ Дж}$$

## Основные и дополнительные единицы СИ

*Основные единицы СИ.* К основным единицам СИ относятся: *метр* – единица длины; *килограмм* – единица массы; *секунда* – единица времени; *ампер* – единица силы тока; *кельвин* – единица температуры; *кандела* – единица силы света; *моль* – количество вещества.

*Метр* равен длине пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени  $1/299792458$  секунды.

*Килограмм* равен массе международного прототипа килограмма, принятого на 1 Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) в 1989 г. и подтвержденного ГКМВ в 1991 г.

*Секунда* равна  $9192631770$  периодам излучения, соответствующим его переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133 при отсутствии возмущения со стороны внешних полей.

*Ампер* равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

*Кельвин* равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды.

*Кандела* равна силе света в заданном направлении источника, испускающего излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/с.

*Моль* равен количеству вещества, содержащему столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой  $0,012$  кг.

Дополнительные единицы. К дополнительным единицам относится радиан и стерadian.

*Радиан* равен углу между двумя радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу.

*Стерadian* равен телесному углу с вершиной в центре сферы, вырезающему на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Модули упругости и коэффициенты Пуассона

Материал	Модуль упругости, кгс/см <sup>2</sup>		Коэффициент Пуассона $\mu$
	E	G	
Чугун серый, белый	$(1,15 \div 1,60) \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^5$	0,23—0,27
» ковкий	$1,55 \cdot 10^6$	—	—
Стали углеродистые	$(2,0 \div 2,1) \cdot 10^6$	$(8,0 \div 8,1) \cdot 10^5$	0,24—0,28
» легированные	$(2,1 \div 2,2) \cdot 10^6$	$(8,0 \div 8,1) \cdot 10^5$	0,25—0,30
Медь прокатанная	$1,1 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$	0,31—0,34
» холодноотянутая	$1,3 \cdot 10^6$	$4,9 \cdot 10^5$	—
» литая	$0,84 \cdot 10^6$	—	—
Бронза фосфористая	$1,15 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^5$	0,32—0,35
катаная			
Бронза марганцовистая	$1,1 \cdot 10^6$	$4,0 \cdot 10^5$	0,35
катаная			
Бронза алюминиевая	$1,05 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^5$	—
литая			
Латунь холодноотянутая	$(0,91 \div 0,99) \cdot 10^6$	$(3,5 \div 3,7) \cdot 10^5$	0,32—0,42
» корабельная	$1,0 \cdot 10^6$	—	0,36
катаная			
Алюминий катаный	$0,69 \cdot 10^6$	$(2,6 \div 2,7) \cdot 10^5$	0,32—0,36
Проволока алюминиевая	$0,7 \cdot 10^6$	—	—
тянутая			
Дуралюмин катаный	$0,71 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^5$	—
Цинк катаный	$0,84 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^5$	0,27
Свинец	$0,17 \cdot 10^6$	$0,70 \cdot 10^5$	0,42
Лед	$0,1 \cdot 10^6$	$(0,28 \div 0,3) \cdot 10^5$	—
Стекло	$0,56 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^5$	0,25
Гранит	$0,49 \cdot 10^6$	—	—
Известняк	$0,42 \cdot 10^6$	—	—
Мрамор	$0,56 \cdot 10^6$	—	—
Песчаник	$0,18 \cdot 10^6$	—	—
Каменная кладка из	$(0,09 \div 0,1) \cdot 10^6$	—	—
гранита			
Каменная кладка из	$0,06 \cdot 10^6$	—	—
известняка			
Каменная кладка из	$(0,027 \div 0,030) \cdot 10^6$	—	—
кирпича			
Бетон при пределе			
прочности, кгс/см <sup>2</sup>			
100	$(0,146 \div 0,196) \cdot 10^6$	—	0,16—0,18
150	$(0,164 \div 0,214) \cdot 10^6$	—	0,16—0,18
200	$(0,182 \div 0,232) \cdot 10^6$	—	0,16—0,18
Дерево вдоль волокон	$(0,1 \div 0,12) \cdot 10^6$	$0,055 \cdot 10^5$	—
» поперек	$(0,005 \div 0,01) \cdot 10^6$	—	—
Каучук	$0,00008 \cdot 10^6$	—	0,47
Текстолит	$(0,06 \div 0,1) \cdot 10^6$	—	—
Гетинакс	$(0,1 \div 0,17) \cdot 10^6$	—	—
Бакелит	$43 \cdot 10^6$	—	0,36
Вискомлит (ИМ-44)	$(40 \div 42) \cdot 10^6$	—	0,37
Целлулоид	$(14,3 \div 27,5) \cdot 10^6$	—	0,33—0,38

**Ориентировочные значения основных допускаемых напряжений  
на растяжение и сжатие**

Материал	Допускаемое напряжение, кгс/см <sup>2</sup> , на	
	растяжение	сжатие
Чугун серый в отливках . . . . .	280—800	1200—1500
Сталь Ст2 . . . . .	1400	
» Ст3 . . . . .	1600	
» Ст3 в мостах . . . . .	1400	
» машиностроительная (конструкционная) углеродистая . . . . .	600—2500	
Сталь машиностроительная (конструкционная) легированная . . . . .	1000—4000 и выше	
Медь . . . . .	300—1200	
Латунь . . . . .	700—1400	
Бронза . . . . .	600—1200	
Алюминий . . . . .	300—800	
Алюминиевая бронза . . . . .	800—1200	
Дуралюмин . . . . .	800—1500	
Текстолит . . . . .	300—400	
Гетинакс . . . . .	500—700	
Бакелизированная фанера . . . . .	400—500	
Сосна вдоль волокон . . . . .	70—100	100—120
» поперек » . . . . .	—	15—20
Дуб вдоль волокон . . . . .	90—130	130—150
» поперек » . . . . .	—	20—35
Каменная кладка . . . . .	до 3	4—40
Кирпичная » . . . . .	до 2	6—25
Бетон . . . . .	1—7	10—90

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальная механика / Б.В. Букетин и др. – М.: Изд.-во МГТУ им. Баумана, 2004. –136 с.
2. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / справочное пособие / под ред. Б.С. Касаткина и др. – Киев: «Наукова думка», 1981 –589 с.
3. Специальные разделы естествознания: учебно-методическое пособие / Е.В. Кузнецова. – Пермь: Издательство Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 88 с.  
Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания / С.Х. Карпенков. М.: Высш. шк., 2003. –334 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕХАНИКИ.....</b>	<b>4</b>
1.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ .....	4
1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ .....	10
1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ.....	13
<b>2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ .....</b>	<b>15</b>
2.1. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ .....	16
2.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ .....	19
2.3. ВЫПОЛНЕНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	20
2.4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ .....	22
<b>3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ .....</b>	<b>27</b>
3.1. МЕТОД ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ .....	27
3.2. ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД .....	32
<b>4. СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ.....</b>	<b>37</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>42</b>