

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени С. П. КОРОЛЕВА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ „СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ“

Под редакцией Е. С. БОГДАНОВА

Рассмотрен и утвержден
редакционным советом института
26 сентября 1969 года

КУЙБЫШЕВ, 1970

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Методические указания	4
Лабораторная работа № 1	7
Лабораторная работа № 2	17
Лабораторная работа № 3	26
Лабораторная работа № 4	33
Лабораторная работа № 5	35
Лабораторная работа № 6	44
Лабораторная работа № 7	48
Лабораторная работа № 8	52
Лабораторная работа № 9	59
Приложения	67

Евдоким Степанович Богданов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ «СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ»

Редактор — *А. И. Кондратьева.*

Корректор — *Е. П. Михайлова.*

Куйбышевский авиационный институт им. С. П. Королева

ЕО00266. Подписан в печать 14.IX.1970 г. Формат бумаги 60 × 90¹/₁₆.

Объем 5,0 печ. л. Тираж 2000 экз. Цена 25 коп.

г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151. Типография УЭЗ КуАИ.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Руководство к лабораторным работам составлено в соответствии с учебным планом и программой курса сопротивления материалов, применительно к оборудованию лаборатории кафедры сопротивления материалов Куйбышевского авиационного института.

Руководство содержит инструкции к девяти лабораторным работам. Первая работа «Испытание материалов на растяжение» выполняется в первом семестре для практического ознакомления с основными механическими характеристиками, необходимыми при назначении допускаемого напряжения и понимания расчетов на прочность.

Остальные восемь работ выполняются во втором семестре. Их цель — ознакомить студентов с методами лабораторного исследования напряженного и деформированного состояния при растяжении, сжатии, кручении, изгибе и сложном сопротивлении под действием статически прилагаемых нагрузок.

Кроме инструкций, в руководстве дано краткое описание применяемых измерительных приборов и испытательных машин, на которых проводятся намеченные работы.

Из-за недостатка времени, отводимого учебным планом на проведение лабораторных работ, приходится ограничиться постановкой только девяти работ, содержание которых включает лишь основные вопросы практикума применительно к лаборатории КуАИ.

Пользуясь руководством, студенты смогут без лишней затраты времени получить необходимые для освоения курса практические сведения и навыки лабораторного исследования.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Сопротивление материалов разрабатывает методы расчета деталей машин и элементы сооружений на прочность, жесткость и устойчивость. В расчетные формулы входят характеристики прочности—предел текучести σ_T , предел прочности σ_B , предел пропорциональности σ_H , предел выносливости σ_{-1} ; характеристики упругости — модуль упругости, коэффициент Пуассона μ , модуль поперечной упругости G ; характеристики пластичности — остаточное относительное удлинение δ , относительное сужение ψ .

Эти характеристики определяются в лабораториях путем испытания образцов. В учебной лаборатории предусматриваются работы по испытанию материалов для ознакомления с методикой определения механических характеристик.

При выводе расчетных формул используются те или иные рабочие гипотезы, вводятся некоторые допущения и ограничения. Вместо действительных явлений рассматриваются их упрощенные схемы. Основанием для принятия соответствующей гипотезы того или иного допущения является опытное изучение поведения соответствующих образцов под нагрузкой.

Полученные формулы являются приближенными, пригодность и точность проверяется опытом. В учебной лаборатории предусматриваются работы по проверке теоретических выводов, по изучению напряженного и деформированного состояния стержня при различных видах нагружения.

Теория сопротивления материалов не всегда может дать ответ на вопрос о прочности детали более сложной конфигурации, чем стержень. В таких случаях приходится пользоваться экспериментальными методами изучения напряженного состояния. В учебной лаборатории предусматриваются работы с применением метода электротензометрирования.

При изучении механических свойств и напряженного со-

стояния возникает необходимость приложения к образцу значительных нагрузок, измеряемых иногда десятками тонн. С этой целью применяются специальные испытательные машины различных конструкций. Некоторые опыты выполняются на особых установках, приспособленных только для проведения данного испытания.

Деформации, наблюдаемые при испытаниях, обычно весьма малы и не поддаются непосредственному измерению простыми инструментами (штангенциркулем или масштабной линейкой). Для измерения малых деформаций применяются особые весьма точные приборы — тензометры, индикаторы и т. п. или специальные установки. Описание испытательных машин и тензометров дается в отдельной главе, а описание установок — в инструкциях соответствующих работ.

При проведении лабораторных работ следует учитывать, что наряду с прямыми измерениями искомых величин приходится применять косвенные измерения, т. е. путем вычисления. Например, при измерении напряжения в изогнутой балке измеряется непосредственно величина деформации Δl , а напряжение находится по закону Гука $\sigma = E \frac{\Delta l}{l}$.

В этих случаях нагрузка не должна вызывать напряжение выше предела пропорциональности.

Лабораторный практикум является весьма важной составной частью курса сопротивления материалов.

Правильная организация проведения практикума является необходимым условием успешного овладения знаниями предмета. Проведению лабораторной работы должна предшествовать соответствующая теоретическая подготовка:

1. Студент должен освоить общие сведения, изложенные в инструкции к предстоящей лабораторной работе. Если их недостаточно для полного понимания вопроса, необходимо обратиться к учебникам.

2. Необходимо разобраться в схеме машины или установки, на которой будет проводиться работа.

3. Разобраться в схеме измерительного прибора.

4. Уяснить цель работы и порядок ее выполнения.

5. Подготовить протокол для записи результатов испытания и вычислений.

В процессе работы необходимо принять меры к уменьшению неизбежных погрешностей опыта, причиной которых могут быть неточность изготовления образца, неточность установки образца и приборов. Образцы, применяемые при ис-

пытании, следует тщательно измерить и учитывать не проектные, а действительные размеры. Влияние неточности установки образца устраняется применением образцов симметричной формы и приведением к середине результатов показаний двух приборов, поставленных по обе стороны от плоскости симметрии.

Чтобы избежать случайных ошибок, опыт производится несколько раз. Если показания приборов остаются те же, то можно ограничиться повторением опыта до трех раз.

Если производилось пять или более замеров одних и тех же величин, то крайние предельные величины отбрасываются, а по оставшимся вычисляется средняя арифметическая величина. Например, при одинаковых интервалах нагрузки прибор дал следующие замеры: 1,5; 1,6; 1,2; 1,5; 1,9. Средняя величина замеров будет $\frac{1,5 + 1,6 + 1,5}{3} = 1,53$.

Все расчеты рекомендуется производить с помощью двадцатипятисантиметровой линейки с точностью до единицы третьей значащей цифры. Например:

$$\frac{200}{7} = 28,6; \quad \frac{5}{920} = 0,00543$$

Результаты измерений и вычислений заносятся в протокол. В тетради лабораторных работ чернилами аккуратно записываются все вычисления, карандашом вычерчиваются необходимые схемы, поясняющие содержание работы.

После проведения работы отчет проверяется преподавателем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА

Цель работы — изучение зависимости между напряжениями и деформациями при растяжении до разрушения. Определение основных механических характеристик материала.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Основные механические характеристики материала. При проектировании и расчете элементов инженерных сооружений и деталей машин необходимо знание механических свойств материалов. К числу таких свойств в первую очередь относятся прочность и пластичность.

К характеристикам прочности относятся: предел пропорциональности, предел прочности или временное сопротивление.

Предел текучести и предел прочности необходимы для назначения допускаемого напряжения, входящего в формулы, выражающие условие прочности. Например, при статическом нагружении в случае растяжения или сжатия допускаемое напряжение $[\sigma] = \frac{\sigma^o}{n}$,

где n — коэффициент запаса, устанавливаемый на основании инженерной практики;

σ^o — опасное напряжение, каковым для пластичных материалов является предел текучести, а для хрупких — предел прочности.

Характеристиками пластичности являются относительное остаточное удлинение и относительное сужение образца при разрыве. Для пластичных материалов, к числу которых относятся, например, малоуглеродистая сталь, основными испытаниями, дающим возможность определить перечисленные выше механические характеристики, является испытание на растя-

жение. Все перечисленные характеристики прочности и пластичности могут быть найдены из диаграммы растяжения. Поэтому основной задачей испытания является **получение диаграммы растяжения — графика зависимости между силой, которая растягивает образец, и его удлинением.**

Испытание производится на машинах, снабженных специальным устройством для автоматической записи диаграммы растяжения.

Образец для испытаний

Испытание металла на растяжение производится на стандартных образцах круглого или прямоугольного сечения. По концам образцы имеют головки, которые закладываются в захваты машины (рис. 1).

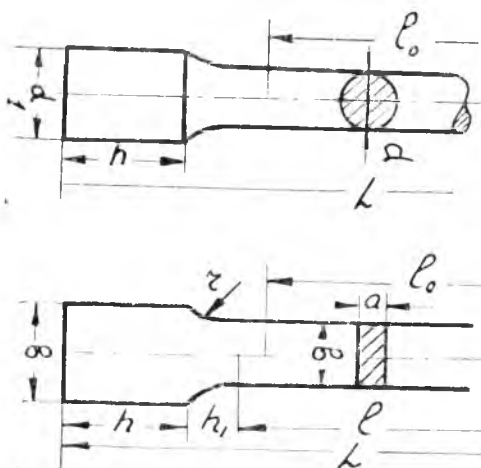


Рис. 1.

Так как соотношение размеров образца оказывает влияние на результаты испытаний, то для получения сравнимых результатов испытания одного и того же материала применяют образцы с нормированными размерами. С помощью шаблона на поверхности рабочей части испытуемого образца, симметрично по отношению к его середине, наносятся две неглубокие риски, расстояние между ними l_0 является расчетной длиной

образца и должно быть нанесено с точностью до 0,1 мм.

В соответствии с ГОСТом 1947—42 диаметр образца измеряется в трех местах расчетной части (в середине и по краям), в каждом месте по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Измерение производится микрометром с точностью до 0,1 мм. За расчетный принимается наименьший диаметр d_0 . Площадь поперечного сечения образца F_0 вычисляется с точностью до 0,1 мм².

Результаты измерений и вычислений заносятся в журнал лабораторных работ.

Диаграмма растяжения

Подготовленный к испытаниям образец закладывают в зажимы машины, в диаграммное устройство закладывают миллиметровую бумагу и производят нагружение образца.

Испытуемый образец деформируясь, подвергается действию нагрузки, постепенно и плавно изменяющейся вплоть до разрушения. При этом диаграммное устройство автоматически вычерчивает зависимость между нагрузкой P , действующей на образец, и абсолютной деформацией образца Δl . Эта кривая называется **диаграммой растяжения**.

Характер диаграммы растяжения зависит от свойств испытуемого материала и для различных материалов диаграммы могут значительно отличаться друг от друга. Наиболее развитый вид имеет диаграмма растяжения для пластичных материалов.

На рис. 2 показана типичная диаграмма растяжения для мягкой малоуглеродистой стали, дающая полную картину по-

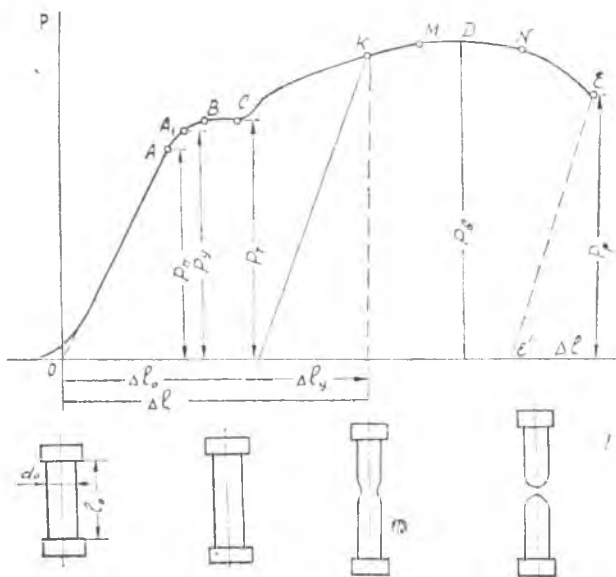


Рис. 2.

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

Отметим на диаграмме растяжения ряд характерных участков и точек. 1-й участок изображается прямой OA . Здесь связь между усилиями и деформациями подчиняется закону Гука. В точке A , являющейся границей 1-го участка, нарушается пропорциональность между P и ΔL .

Нагрузка P_n называется нагрузкой, соответствующей пределу пропорциональности.

В непосредственной близости к точке A находится точка A_1 . Нагрузка P_y называется нагрузкой, соответствующей пределу упругости.

P_y — наибольшая нагрузка, при которой еще не появляются остаточные деформации.

Как показывает опыт, обе величины P_n и P_y для сталей весьма близки и практически можно считать $P_n = P_y$. 2-й участок диаграммы растяжения изображается кривой ABC . За точкой A_1 появляются остаточные деформации. За точкой B абсолютное удлинение возрастает почти без увеличения нагрузки и материал как бы теряет способность к увеличению сопротивления.

Горизонтальный участок BC называется площадкой текучести. Нагрузка P_T называется нагрузкой, соответствующей пределу текучести.

Конец площадки текучести (точка C) характеризует момент, когда образец, получив некоторое удлинение, опять восстанавливает способность сопротивляться нарастанию нагрузки.

Точкой C заканчивается 2-й участок диаграммы, называемый участком общего течения металла. 3-й участок диаграммы CM представляет собой плавную кривую с небольшим подъемом и называется зоной упрочнения. В конце этого участка в одном из сечений образца, ослабленном какими-либо дефектами (местное ослабление, посторонние включения, трещины и т. п.), начинает образовываться местное сужение, так называемая «шейка». В каком месте по длине образца появится шейка, заранее предугадать невозможно.

4-й участок диаграммы представляет весьма пологую кривую

вую MN , почти совпадающую с горизонтальной прямой. На этом участке небольшое изменение нагрузки вызывает значительную деформацию. На образце уже наметилось слабое место, появилась шейка. Этот участок называется участком местного течения металла, так как вторичное течение материала локализуется на небольшой части длины образца в пределах шейки. Максимальная нагрузка P_{max} диаграммы называется нагрузкой, соответствующей временному сопротивлению.

5-й участок диаграммы NE характеризуется тем, что площадь сечения шейки настолько сильно уменьшается, что образец деформируется при заметном уменьшении нагрузки.

5-й участок заканчивается разрушением образца (точка E). Ордината P_p точки E дает величину разрушающей нагрузки.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ

Предел пропорциональности

Пределом пропорциональности называется напряжение, до которого справедлив закон Гука. Предел пропорциональности

$$\sigma_{II} = \frac{P_{II}}{F_0},$$

где F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца;

P_{II} — нагрузка, соответствующая пределу пропорциональности.

Предел текучести

Различают предел текучести физический и условный. Физический — есть напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки. Предел текучести

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} \text{ кгс/см}^2$$

— ордината площадки текучести на диаграмме растяжения. Нагрузку при физическом пределе текучести, если последний выражен площадкой, определяют непосредственно по диаграмме, как ординату точки B (рис. 3).

Иногда явление текучести сопровождается резким уменьшением нагрузки и на диаграмме получается так называемый «зуб текучести» (фиг. 4). В этом случае различают верхний предел текучести, соответствующий большей нагрузке (точка B_1), и нижний предел текучести, соответствующий меньшей нагрузке (точка B).

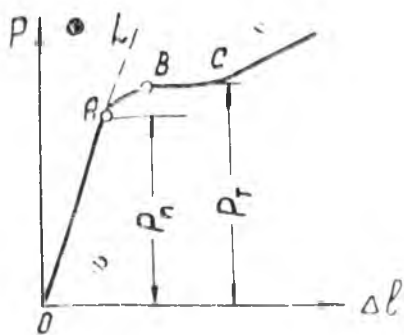


Рис. 3.

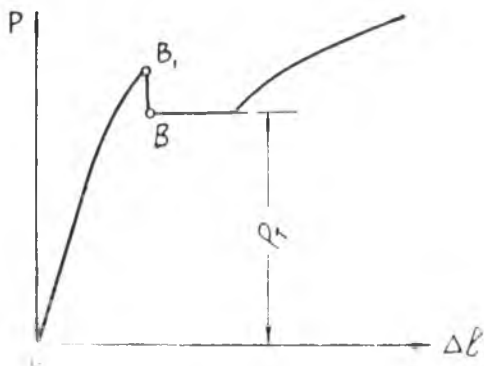


Рис. 4.

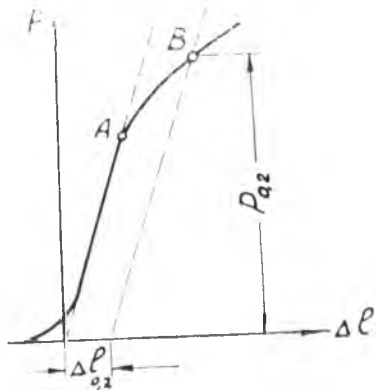


Рис. 5.

Так как нагрузка, соответствующая верхнему пределу текучести, зависит от целого ряда причин, не связанных со свойствами материала образца, то при определении предела текучести берется нагрузка, соответствующая нижнему пределу текучести. Некоторые металлы не имеют ярко выраженного физического предела текучести и диаграмма растяжения для них отличается отсутствием площадки текучести. В этом случае определяют условный предел текучести.

Условным пределом текучести называют напряжение при котором остаточная деформация образца достигает некоторой определенной величины, устанавливаемой техническими условиями. По нашему стандарту берется величина остаточной деформации 0,2%. Условный предел текучести

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0},$$

где $P_{0,2}$ — нагрузка, соответствующая этому напряжению (рис. 5).

Временное сопротивление (предел прочности)

Временное сопротивление — максимальное условное напряжение при растяжении образца до разрыва. Временное сопротивление при растяжении:

$$\sigma_{в} = \frac{P_{max}}{F_0},$$

где P_{max} — наибольшая нагрузка, предшествующая разрыву образца.

По кривой растяжения величина P_{max} определяется ординатой наивысшей точки D (рис. 2). Вычисление $\sigma_{т}$ и $\sigma_{в}$ производят с точностью до 50 кг/см². Различают напряжения условные и истинные.

Условным называется напряжение, определяемое по отношению действующей силы к исходной площади поперечного сечения образца.

Истинным называется напряжение, определяемое по отношению силы к изменяющейся по времени площади поперечного сечения образца.

$\sigma_{п}$, $\sigma_{т}$ и $\sigma_{в}$ — условные напряжения.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛА

Относительное остаточное удлинение образца при разрыве — отношение остающегося приращения расчетной длины образца после разрушения к ее исходной величине:

$$\delta_{п} = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%,$$

где l_0 — расчетная длина образца;

l_1 — длина расчетной части образца после разрыва.

Для определения l_1 обе части разорванного образца тщательно, возможно плотнее прикладываются друг к другу и измеряется расстояние между рисками, определяющими границы расчетной длины. Необходимо отметить, что в этом случае упругие деформации полностью исчезли и остались только пластические.

Если разрыв произошел на расстоянии двух и менее диаметров или ширины образца от его головки, то удлинение образца меньше обычного и испытание считается несостоявшимся. В этом случае испытание повторяют, для чего берут от той же партии новый образец.

Индекс $n = \frac{l_0}{d_0}$ — для круглых образцов и

$$n = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{4}{\pi} F}} \text{ — для плоских образцов.}$$

В нашем случае $n = 10$. Часто применяются укороченные образцы с $n = 5$. Величина остаточного удлинения зависит от n ,

$$\delta_{10} \neq \delta_5.$$

Относительное сужение при разрыве — остающееся относительное сужение образца при разрыве в наименьшем сечении шейки:

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} 100\%,$$

где F_0 — начальная площадь сечения образца;

F_1 — площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Диаметр шейки измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По среднему арифметическому значению d_1 — вычисляют площадь поперечного сечения в месте разрыва F_1 . Для образца прямоугольного сечения вычисление площади поперечного сечения в месте разрыва производят путем умножения наибольшей ширины образца в месте раз-

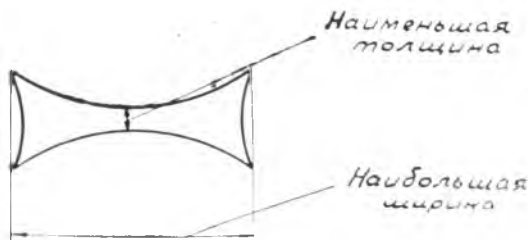


Рис. 6.

рыва на наименьшую толщину (рис. 6). Величина δ характеризует способность материала воспринимать однородную остаточную деформацию, а величина ψ — способность воспринимать местную деформацию.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. На поверхности образца, симметрично относительно середины, при помощи шаблона наносятся риски, ограничивающие рабочую длину образца.

2. При помощи микрометра или штангенциркуля измеряется диаметр круглого образца d или ширина b и толщина a плоского образца.

3. Вычисляется площадь поперечного сечения образца.

4. Образец вставляется в захваты машины.

5. На барабан записывающего устройства наматывается миллиметровая бумага.

6. Производится нагружение образца. В процессе нагружения ведется наблюдение за стрелкой динамометра и поверхностью образца. Записывается наибольшая нагрузка по показанию фиксатора.

7. После окончания испытания производится обработка полученной диаграммы растяжения. Определяются механические характеристики: предел текучести σ_T , временное сопротивление (предел прочности) σ_B .

ПРИМЕЧАНИЕ: определение предела пропорциональности и предела упругости требует более точного измерения деформаций.

8. Измеряется длина образца после разрыва и диаметр шейки. Определяются характеристики пластичности δ и ψ . Результаты измерения и вычислений записываются в протокол испытания (табл. 1).

Таблица 1

№ образца	Материал	Размеры образца			Определение временного сопротивления		Определение предела текучести		Определение относительного остат. удлинения			Определение относительного сужения		
		размеры сечения, мм	площадь поперечного сечения, мм ²	расчетная длина, мм	макс. нагрузка	временное сопротивление	нагрузка при пред. текуч.	предел текучести	длина после разрыва	абсолютное удлинение	относительное удлинение	размеры шейки	площадь сечения шейки	относит. сужение

Контрольные вопросы

1. Что такое предел пропорциональности, предел упругости, предел текучести, временное сопротивление?
2. Что такое условный предел текучести и как он определяется?
3. Какие напряжения называются истинными?
4. Какие характерные участки имеются на диаграмме растяжения?
5. Какие свойства материала характеризуют величины δ и ψ ?
6. Как назначается допускаемое напряжение для пластичных и хрупких материалов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОВОЛОЧНЫХ ДАТЧИКОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Целью настоящей работы являются: ознакомление с основами проволочной тензометрии; опытное определение продольных и поперечных деформаций стержня при центральном растяжении и сопоставление результатов опыта с вычисленными по формулам сопротивления материалов.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Экспериментальное определение деформации в деталях машин и элементах сооружений необходимо при проверке точности выполненных расчетов; при исследовании распределения деформаций и напряжений в деталях сложной конфигурации, неподдающихся расчету; при определении нагрузок, воспринимаемых деталями в тех случаях, когда рассчитать эти нагрузки затруднительно.

Деформации можно измерить с помощью механических оптических и электрических тензометров. Преимуществом электрических тензометров является малогабаритность датчика, а значит, и возможность его установки в труднодоступных местах.

Проволочный датчик сопротивления

Проволочный тензодатчик (рис. 7) представляет собой несколько плоских петель тонкой (диаметром 15—30 мк) проволоки, наклеенных на полоску бумаги. Концы проволоки припаиваются или привариваются к выводам, изготовленным из более толстого проводника.

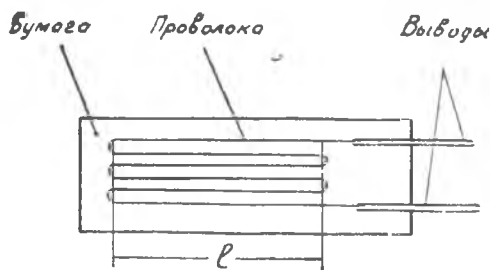


Рис. 7.

Для прямой проволоки была получена следующая экспериментальная формула:

$$\Delta R = \gamma_0 R \epsilon,$$

где ΔR — изменения сопротивления проволоки;

R — исходное сопротивление;

ϵ — относительное удлинение;

γ_0 — коэффициент тензочувствительности материала проволоки.

Например, для константана (сплав 60% меди и 40% никеля) $\gamma_0 = 2,0 \div 2,1$.

Изменение сопротивления датчика, наклеенного на деталь, также линейно связано с деформациями последней:

$$\Delta R = (\gamma \epsilon_x + \delta \epsilon_y) R,$$

где ϵ_x — относительное удлинение в направлении петель;

ϵ_y — относительное удлинение в поперечном направлении;

γ — коэффициент продольной тензочувствительности;

δ — коэффициент поперечной тензочувствительности.

Коэффициент δ , как правило, мал сравнительно с γ и поэтому им пренебрегают. Коэффициент тензочувствительности датчика γ несколько меньше коэффициента тензочувствительности проволоки γ_0 , так как криволинейные участки петель не воспринимают продольную деформацию. Чем больше база датчика, тем меньше доля криволинейных участков и, следовательно, меньше разница между γ и γ_0 . Датчики изготавлиются с базой 20, 10, 5 и 2,5 мм. Датчики с большей базой при-

меняются при измерении плавно меняющихся по длине детали деформаций, с малой базой — при резком изменении деформаций.

Для наклейки датчика на зачищенную поверхность детали применяю, например, клей БФ-2 и БФ-4, а для защиты от атмосферных влияний рекомендуется покрыть его лаком или клеом БФ.

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ ДАТЧИКОВ

При измерении деформаций с помощью проволочных датчиков применяют две схемы их включения — мостовую и потенциометрическую. Наибольшее распространение получила мостовая схема, которая применяется в двух вариантах: с отсчетом по гальванометру и с отсчетом по нулевому методу. На рис. 8 изображена мостовая схема с отчетом по гальванометру.

Мост составлен из четырех сопротивлений:

R_1 — рабочий датчик;

R_2 — компенсационный датчик;

R_3 и R_4 — постоянные сопротивления;

Γ — гальванометр.

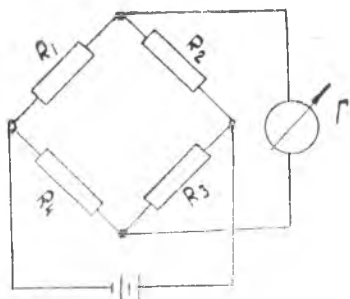


Рис. 8.

Компенсационный датчик в схеме исключает влияние температуры на результаты измерения деформаций, наклеивается он на образец, изготовленный из того же материала, что и исследуемая деталь, и располагается в одинаковых с ней температурных условиях. При изменении температуры меняется удельное сопротивление проволоки датчиков и, следовательно, сопротивление самих датчиков. Сопротивление датчиков R_1 и R_2 меняется на одинаковую величину и балансировка моста не нарушается. Изменение сопротивления за счет температурной деформации детали одинаково для рабочего и компенсационного датчиков, а поэтому балансировка моста также не нарушается.

Изменение сопротивления датчика R_1 за счет деформации

детали приводит к появлению разности потенциалов в измерительной диагонали моста. При сравнительно небольших деформациях отклонение стрелки гальванометра пропорционально ΔR и, следовательно, пропорционально измеряемой деформации. Для увеличения чувствительности системы сигнал с измерительной диагонали моста может подаваться на электронный усилитель, к которому подключается регистрирующий прибор.

Мостовая схема с отсчетом по гальванометру может применяться для измерения как постоянных, так и переменных деформаций. В последнем случае в качестве регистрирующего прибора применяется шлейфовый или катодный осциллограф.

Можно показать, что ток в измерительной диагонали моста пропорционален напряжению источника питания, подключаемого ко второй диагонали. В связи с этим напряжение источника питания при измерениях деформаций должно быть стабильным. В этом заключается основной недостаток мостовой схемы с отсчетом по гальванометру.

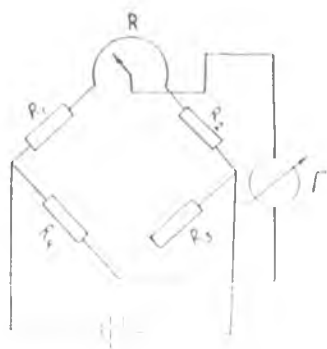


Рис. 8а.

Схема с отсчетом по нулевому методу изображена на рис. 8а.

При нулевом методе измерения в схему моста включается переменное сопротивление-реохорд R . Измерительная диагональ подключается к мосту через движок реохорда. Изменение сопротивления рабочего тензомера R_1 , вызванное деформацией детали, приводит, как и в предыдущей схеме, к разбалансу моста, т. е. к появлению тока в измерительной диагонали. Поворотом движка реохорда мост приводится в равновесие. По углу поворота движка, на основании предварительной тарировки, можно определить измеряемую деформацию.

Балансировка моста осуществляется как вручную, так и автоматически. При автоматической — поворот движка реохорда производится электромотором, на который подается сигнал с диагонали моста через электронный усилитель. В

отличие от предыдущего способа измерения показания прибора здесь не будут зависеть от напряжения источника питания моста, что является большим преимуществом нулевого метода измерения. Однако из-за инерционности схемы с отсчетом по нулевому методу, последняя может применяться для измерения постоянных или медленно меняющихся деформаций.

Для измерения деформаций, меняющихся во времени, применяются схемы с непосредственным отсчетом измеряемой величины, несмотря на указанные недостатки этих схем.

Тарировка датчика

До измерения деформаций схему с рабочим датчиком необходимо протарировать, т. е. установить зависимость $\epsilon = f(A)$ где ϵ — измеряемая деформация и A — показание регистрирующего прибора. Обычно тарировке подвергается несколько датчиков от партии, изготовленной из одной катушки проволоки на одном и том же приспособлении. Чувствительность остальных датчиков в партии, наклеиваемых на последующую деталь, принимается равной средней чувствительности испытуемых.

Тарировку можно осуществить, например, на консольной балочке равного сопротивления, изображенной на рис. 9.

Балочка имеет в плане треугольную форму и нагружается в точке пересечения боковых сторон. В этом случае в пределах клиновидной ее части деформации по длине постоянны. Эта часть балочки и используется для наклейки тарируемых датчиков, включаемых в мостовую схему, которая в дальнейшем будет использоваться для замера деформации детали. Измеряемую деформацию балочки можно выразить через нагруз-

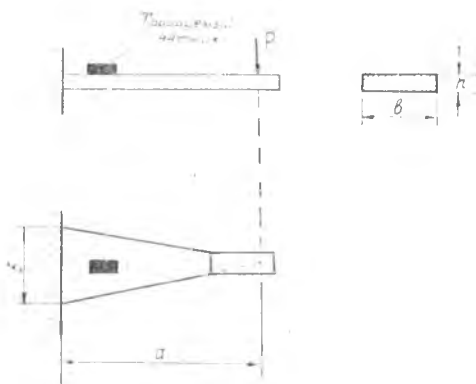


Рис. 9.

ку P , размеры сечения у заделки и упругие свойства материала балочки. Учитывая, что

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}; \quad \sigma = \frac{M}{W}; \quad M = P_1 a; \quad W = \frac{bh^2}{6},$$

получим для ϵ выражение:

$$\epsilon = \frac{6a}{bh^2 E} P.$$

Постоянная тарировочной балочки $\frac{6a}{bh^2 E}$ всегда может быть вычислена заранее.

Для каждого значения силы P вычисляем соответствующую ей деформацию ϵ и записываем показания прибора. Таким образом получим табличную зависимость $A = f(\epsilon)$, где A — показание регистрирующего прибора. Результаты тарировки представляются графически (рис. 10).



Рис. 10.

Тарировочный график используется в дальнейшем для определения деформации детали по показаниям прибора. Обычно зависимость $\epsilon = f(A)$ оказывается линейной. В этом случае определяется цена деления K и значение ϵ определяется по формуле: $\epsilon = kA$.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В качестве примера применения проволочных датчиков взят простейший вид деформации — центральное растяжение, для осуществления которого стержень круглого сечения закреплен в захваты разрывной машины и нагружается силой P .

Для определения относительной продольной деформации ϵ на стержень наклеиваются в продольном направлении два датчика (рис. 11). Расположены они на противоположных волокнах, что позволяет суммированием их показаний исключить влияние изгиба, вызванного некоторым несовпаде-

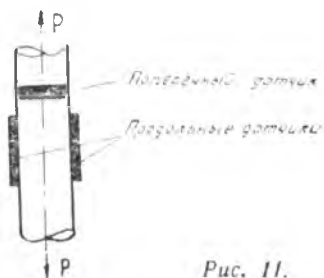


Рис. 11.

нием линии действия растягивающих сил соось стержня. Для определения относительной поперечной деформации на стержень наклеивается датчик в поперечном направлении (рис. 11).

Все датчики с помощью переключателя поочередно включаются в мостовую схему регистрирующего прибора с отсчетом по нулевому методу. Перемещение движка реохорда для балансировки моста осуществляется автоматически с помощью электромотора. Стрелка прибора для отсчета деформаций перемещается синхронно с движком реохорда. В коробке многопозиционного переключателя установлены переменные сопротивления для установки стрелки прибора на ноль при всех положениях переключателя.

Подготовка и порядок проведения работы

Стержень испытывает центральное растяжение. Относительная продольная деформация в этом случае определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{FE},$$

где σ — напряжение в поперечном сечении;

l — нагрузка, действующая на стержень;

F — площадь поперечного сечения стержня;

E — модуль упругости материала.

Относительная поперечная деформация подсчитывается по формуле

$$\varepsilon_{\text{поп}} = -\mu \varepsilon,$$

μ — коэффициент Пуассона.

Результаты вычислений заносятся в протокол. Для определения продольной и поперечной деформации опытным путем опыт необходимо проводить в следующем порядке:

1. Включить регистрирующий прибор и выдержать время, необходимое для его прогрева (10-15 минут).

2. Установить ручку переключателя в позицию, соответствующую включению в прибор датчика тарировочной балочки.

3. С помощью соответствующего переменного сопротивления установить стрелку прибора в нулевое положение.

4. Произвести тарировку датчика с прибором. Результаты тарировки представить графиком и вычислить цену деления.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ

№ опыта	P кг	Продольные датчики					опыт	теорет	Поперечный датчик					
		A _{лев}	ΔA _{лев}	A _{пр}	ΔA _{пр}	ΔA = $\frac{\Delta A_{лев} + \Delta A_{пр}}{2}$			A	ΔA	ΔA _{ср}	опыт	теор	
									Расхождение, %					
I														
II														
III														
									Расхождение, %					

5. Дать предварительную нагрузку на исследуемую деталь и снять показания тензометров.

6. Дать окончательную нагрузку и снять показания тензометров. Опыт повторить три раза.

7. Результаты замеров вписать в протокол испытания. По результатам замеров вычислить деформации и вписать их в протокол.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Подсчитав значения продольной и поперечной деформации по теоретическим формулам и по результатам эксперимента, определить расхождение опыта и теории.

$$\delta_1 = \frac{|\varepsilon - \varepsilon^*|}{\varepsilon} \cdot 100\%$$

и

$$\delta_2 = \frac{|\varepsilon_{\text{поп}} - \varepsilon^*_{\text{поп}}|}{|\varepsilon_{\text{поп}}|} \cdot 100\%$$

Сделать заключение о точности эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Почему для тарировки датчиков берется балка равного сопротивления?

2. Можно ли для тарировки применить балку постоянного сечения?

3. В чем заключается разница измерений по нулевому методу и по дисбалансу?

4. Почему надо взять два продольных датчика, чтобы найти продольную деформацию стержня?

5. Написать и объяснить формулы для напряжений и деформации при центральном растяжении и сжатии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ И КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО СЕЧЕНИЮ БАЛКИ ПРИ ИЗГИБЕ

Цель работы — изучение распределения нормальных и касательных напряжений по поперечному сечению балки при изгибе и сопоставление опытных значений с теоретическими.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Распределение нормальных и касательных напряжений в поперечном сечении балки согласно теории сопротивления материалов

Теория сопротивления материалов дает следующую аналитическую зависимость распределения нормальных напряжений в поперечном сечении балки при плоском изгибе:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y, \quad (1)$$

где M_x — изгибающий момент в данном сечении балки;

I_x — момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси;

y — ордината точки в системе главных центральных осей инерции поперечного сечения.

Нагрузки на балку действуют в главной плоскости жесткости yz . Касательные напряжения в поперечном сечении балки вычисляются по формуле Журавского

$$\tau = \frac{Q \cdot S_{(y)}^{\text{отр}}}{I_x b(y)}, \quad (2)$$

где Q — поперечная сила в данном сечении балки;

$S_{(y)}^{\text{отр}}$ — статический момент отрезанной части площади сечения относительно нейтральной оси;

I_x — момент инерции сечения относительно оси;

$b_{(y)}$ — ширина сечения на уровне точки, в которой вычисляется напряжение.

Для двутаврового сечения эпюры σ и τ , вычисленных по формулам (1) и (2), изображены на рис. 12:

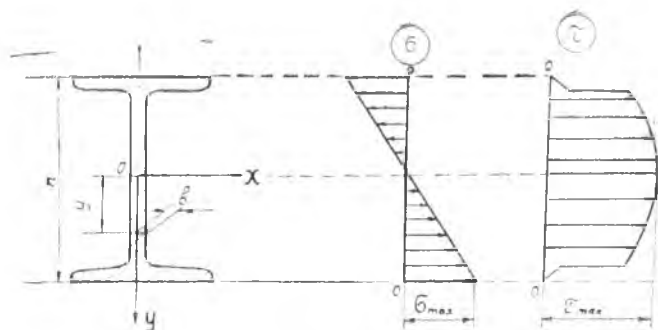


Рис. 12.

Методика определения напряжений опытным путем

Определение напряжений в теле сводится к измерению деформаций.

По замеренным деформациям напряжения определяются с помощью закона Гука.

В данной работе определяются напряжения в точках сечения, наиболее удаленных от нейтральной оси, испытывающих линейное напряженное состояние, и точках на нейтральной оси, испытывающих чистый сдвиг. Для линейного напряженного состояния, представленного на рис. 13

$$\sigma = \varepsilon_1 E = \frac{\Delta l_1}{l_1} \cdot E, \quad (3)$$

где Δl_1 — абсолютная деформация в направлении σ_1 между точками A и B .

E — модуль продольной упругости материала.

При плоском напряженном состоянии, если известны направления главных напряжений (рис. 14), следует измерить абсолютные деформации в направлении обоих главных напряжений:

Δl_1 на длине l_1 и Δl_2 на длине l_2 .

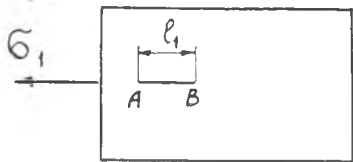


Рис. 13.

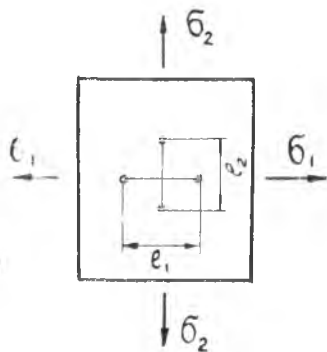


Рис. 14.

Затем можно подсчитать относительные деформации

$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1}$ и $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2}$ и по закону Гука определить главные напряжения по формулам:

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

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1).$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Опыт производится на балке двутаврового поперечного сечения, установленной на двух опорах и нагруженной силой в середине пролета (рис. 15). Сечение, в котором исследуется распределение напряжений, отстоит от правой опоры на расстоянии C .

Нагружение балки осуществляется на универсальной испытательной машине с вертикальной осью. Опоры балки устанавливаются на подвижной траверсе. Силу P передает на балку нож, закрепленный в неподвижной траверсе. Нормальные напряжения определяются в крайних волокнах ($y = \frac{h}{2}$ и $y = -\frac{h}{2}$) и на нейтральной оси ($y = 0$). Касательные на-

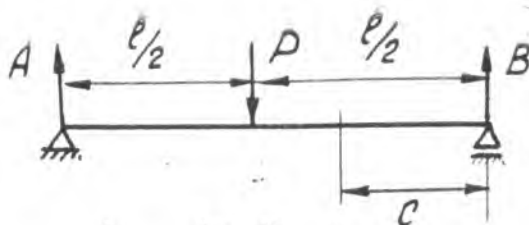


Рис. 15.

пряжения определяются в точке на нейтральной оси ($y=0$).
 Схема установки тензометров приведена на рис. 16.

Показания двух тензометров для одного слоя позволяют определить деформацию, приведенную к плоскости симметрии.

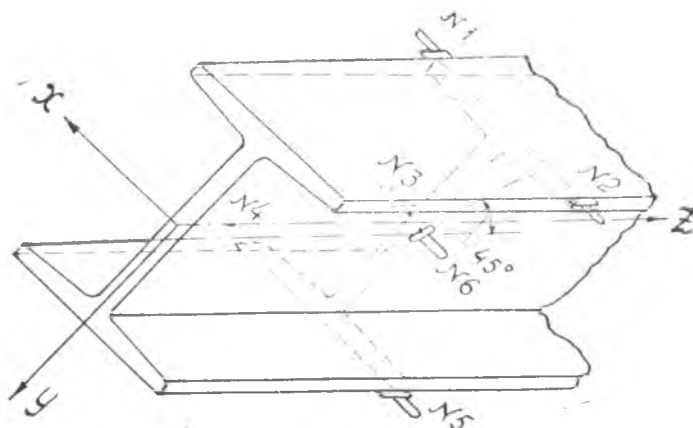


Рис. 16.

ПРОВЕДЕНИЕ РАБОТЫ, ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОПЫТА И ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Опыт осуществляется в следующей последовательности:

1. Дается предварительная нагрузка для так называемого обжатия балки и записываются показания всех тензометров.

2. Дается окончательная нагрузка, после чего записываются показания всех тензометров.

Опыт повторяется три раза.

Нагрузки на балку P , кг и соответствующие им показания тензометров заносятся в протокол испытаний.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИИ

№ опыта	Нагрузка P , кг	Верхние волокна				Нижние волокна				Средние волокна			
		A_1 , мм	ΔA_1 , мм	A_2 , мм	ΔA_2 , мм	A_4 , мм	ΔA_4 , мм	A_5 , мм	ΔA_5 , мм	A_3 , мм	ΔA_3 , мм	A_6 , мм	ΔA_6 , мм
1													
2													
3													
		ср. $\Delta A_1 =$		ср. $\Delta A_2 =$		ср. $\Delta A_4 =$		ср. $\Delta A_5 =$		ср. $\Delta A_3 =$		ср. $\Delta A_6 =$	

По найденным средним значениям показаний каждого тензометра (ср. ΔA_i) определяются абсолютные деформации, соответствующие принятой в опыте нагрузке P .

$$\Delta l_v = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{ср. } \Delta A_1}{k_1} + \frac{\text{ср. } \Delta A_2}{k_2} \right) \quad \text{— для верхних точек балки;}$$

$$\Delta l_c = \frac{\text{ср. } \Delta A_3}{k_3} \quad \text{— для точки на нейтральной оси (по направлению оси балки);}$$

$$\Delta l_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{ср. } \Delta A_4}{k_4} + \frac{\text{ср. } \Delta A_5}{k_5} \right) \quad \text{— для нижних точек балки;}$$

$$\Delta l_{n0} = \frac{\text{ср. } \Delta A_6}{k_6} \quad \text{— для точки на нейтральной оси (по направлению под углом } 45^\circ \text{ к оси балки);}$$

$k_1; k_2 \dots k_6$ — коэффициенты увеличения соответствующих тензометров.

Опытные значения нормальных напряжений определяются по следующим формулам:

$$\sigma_B^* = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l_B}{l} E,$$

$$\sigma_C^* = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l_C}{l} \cdot E,$$

$$\sigma_H^* = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l_H}{l} \cdot E.$$

Опытные значения касательного напряжения в точке на нейтральной оси определяются по показанию тензомера, установленного под углом 45° к оси балки. В данной точке происходит чистый сдвиг, для которого главные напряжения σ_1 и σ_3 равны по величине τ_{max} и действуют на площадках под углом 45° к оси балки (рис. 17).

В связи с тем, что $|\varepsilon = \varepsilon_3|$, в опыте можно ограничиться измерением линейной деформации по направлению лишь одного главного напряжения (тензомер № 6 установлен на нейтральном слое под углом 45° к оси балки). По закону Гука

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \sigma_1 - \mu \sigma_3 = \frac{1 + \mu}{E} \cdot \tau_{max}.$$

Следовательно, опытное касательное напряжение

$$\tau_{max}^* = \frac{E}{1 + \mu} \cdot \varepsilon_1 = \frac{E}{1 + \mu} \cdot \frac{\text{ст. } \Delta A_6}{k_6 \cdot l}.$$

В качестве вывода по работе следует произвести сопоставление опытных значений напряжений с теоретическими, подсчитав процент расхождения по верхним, средним и нижним волокнам. Погрешность вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{|\sigma - \sigma^*|}{|\sigma|} \cdot 100\%.$$

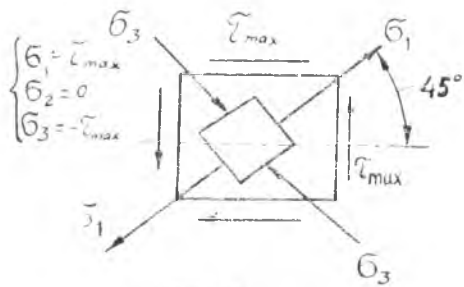


Рис. 17.

Контрольные вопросы

1. Какие гипотезы принимаются при изучении деформации изгиба?
 2. Как изменяются по поперечному сечению нормальные и касательные напряжения?
 3. Какой вид напряженного состояния имеет место в различных точках балки?
 4. Каково выражение закона Гука для плоского напряженного состояния?
 5. Какова методика опытного определения напряжений?
 6. Что представляет собой коэффициент увеличения тензометра?
 7. Какие причины вызывают отклонение опытных значений напряжений от теоретических?
-

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4,

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГИБОВ БАЛКИ ПРИ ПЛОСКОМ ИЗГИБЕ

Цель работы — сравнить прогиб балки, вычисленный по формулам сопротивления материалов, с прогибом, полученным опытным путем; проверить теорему о взаимности перемещений.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. В работе требуется определить прогиб балки AC в сечении D (рис. 18).

Для аналитического определения прогиба балки проще воспользоваться формулой Максвелла-Мора с применением правила Верещагина.

Поскольку балка AC статически неопределима, необходимо предварительно раскрыть статическую неопределимость, т. е. определить величину лишней реакции. Для раскрытия статической неопределимости следует воспользоваться методом сил, приняв за лишнюю связь опору B (рис. 19).



Рис. 18.

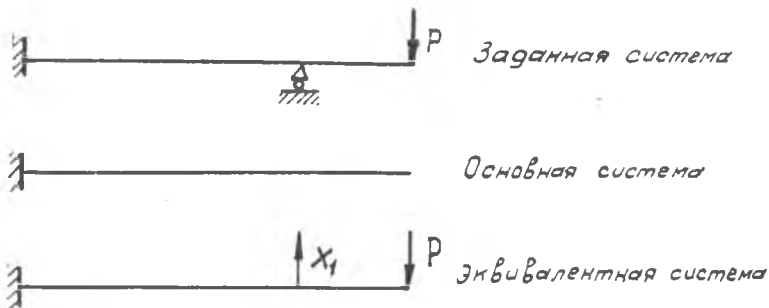


Рис. 19.

Лишняя реакция $B = x_1$ находится из канонического уравнения метода сил

$$\delta_{11} x_1 + \Delta_{1P} = 0,$$

где δ_{11} — единичное перемещение по направлению x_1 ;

Δ_{1P} — перемещение по направлению x_1 , вызванное нагрузкой P_1 ;

δ_{11} — находится путем перемножения единичной эпюры моментов самой на себя;

Δ_{1P} — находится путем перемножения единичной и грузовой эпюр (рис. 20).

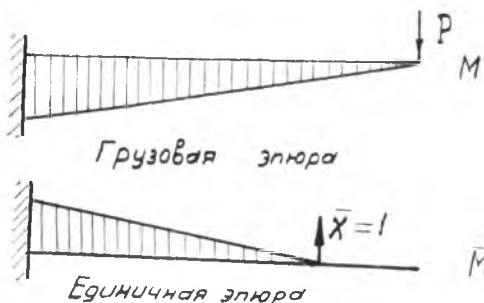


Рис. 20.

После определения реакции $B = x_1$ можно определить прогиб сечения D по формуле Максвелла-Мора

$$y = \sum_{i=1}^n \int_0^l \frac{\bar{M}_i M_i \cdot dx}{EI}$$

или, пользуясь правилом Верещагина,

$$y = \sum \frac{\omega_i M_i}{EI},$$

где ω_i — площадь эпюры изгибающих моментов на i участке эквивалентной системы;

\bar{M}_i — ордината единичной эпюры под центром тяжести площади эпюры моментов на i участке (рис. 21).

Примечание. Поскольку обе эпюры на участке AD прямолинейные, то можно площадь единичной эпюры умножить на изгибающий момент над центром тяжести площади единичной эпюры, что несколько сократит вычисление.

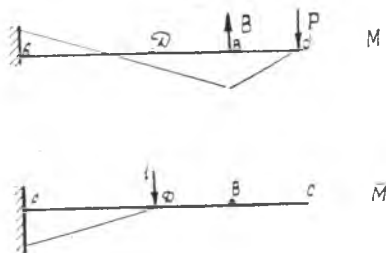


Рис. 21.

2. В работе требуется проверить теорему о взаимности перемещений, которая гласит: для двух численно

равных нагрузок упругой системы перемещение по направлению первой нагрузки, вызванное второй нагрузкой, равно перемещению по направлению второй нагрузки, вызванному первой нагрузкой: $\Delta_{12} = \Delta_{21}$. Если нагрузки единичные, то $\delta_{12} = \delta_{21}$. Для экспериментальной проверки нагрузить заданную балку грузом P в сечении D и измерить прогиб в точке C . Согласно теореме о взаимности перемещений должны получить: $u_D = u_C$, где u_D — прогиб, о котором говорилось выше.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Стальная балка AC (рис. 22) прямоугольного поперечного сечения жестко закреплена одним концом A и опирается на шарнирно-подвижную опору в сечении B .

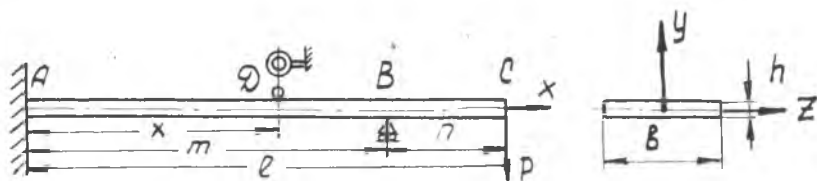


Рис. 22.

На свободном конце балка загружается силой P . В пролете AB на расстоянии x от заземленного конца балки установлен индикатор часового типа, измеряющий прогиб балки в сечении D .

ПОДГОТОВКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Зарисовывается схема установки (рис. 22).
2. Замеряются размеры балки — l , m , b , h .
3. Вычисляется прогиб в сечении в соответствии с общими указаниями.
4. В заданном сечении устанавливается индикатор.
5. Балка загружается предварительной нагрузкой, при этом записывается показание индикатора.
6. Балка загружается заданной нагрузкой P , после чего записывается новое показание индикатора.
7. По разности показаний индикатора определяется опыт-

ная величина прогиба балки y^* . Опыт повторяется три раза и вычисляется среднее значение прогибов.

$$y_{\text{ср}}^* = \frac{y_1^* + y_2^* + y_3^*}{3}.$$

8. Определяется относительная погрешность в процентах к теоретическому значению прогиба по формуле

$$\delta = \frac{y - y^*}{y} \cdot 100\%.$$

9. Проверяется теорема о взаимности перемещений, для чего балка загружается заданным грузом P в сечении D и замеряется прогиб в сечении C . Согласно этой теореме $u_d = y_c$. Подсчитывается расхождение

$$\delta = \frac{u_d - y_c}{y} \cdot 100\%.$$

Примечание. Нагрузка на балку и положение сечения задаются преподавателем.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ

Нагрузка на балку P , кг	Расстояние от задетки до сечения, мм	№ опыта	Опытный прогиб, мм	Среднее значение опытного прогиба, мм	Размеры поперечного сечения		Момент инерции сечения I_d , мм ⁴	Теоретический прогиб, мм	Расхождение опыта и теории, %
					b , мм	h , мм			
		1							
		2							
		3							

Контрольные вопросы

1. Что называется прогибом балки?
2. Как устроен индикатор? Что он измеряет?
3. Какая система является статически неопределимой?
4. Что такое основная система?
5. Что такое эквивалентная система?
6. Что выражает каноническое уравнение $\delta_{11} \cdot x_1 + \Delta_{1p} = 0$, физический смысл каждого из его слагаемых?
7. Какими способами можно раскрыть статическую неопределимость, кроме метода сил?
8. Какими методами можно определить прогиб балки, кроме метода Верещагина?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ КРУЧЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ КРУГЛОГО И ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Цель работы — опытное определение напряжений при кручении и сопоставлении с результатами вычислений по формулам сопротивления материалов.

КРУЧЕНИЕ БРУСА КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Деформация кручения вызывается парами сил, лежащими в плоскостях, перпендикулярных оси стержня. Угол закручивания на длине определяется по формуле

$$\varphi = \frac{M_{кр} l}{G I_p}, \quad (1)$$

где $M_{кр}$ — крутящий момент;

$I_p = \frac{\pi D^4}{32}$ — полярный момент инерции круглого сечения;

G — модуль поперечной упругости.

Цель данной части работы — сравнить теоретическое значение угла закручивания, подсчитанного по формуле (1), с опытным, полученным путем непосредственного измерения.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Испытания проводятся на установке, схема которой приведена на рис. 23. Испытуемый образец 1 жестко закрепляется в захватах машины. Один из захватов через червяч-

ную пару связан с рукояткой 2. Второй захват жестко соединен с противовесом 3.

Вращение рукоятки передается через образец на противовес, который отклоняется из вертикального положения. Чем больше угол отклонения противовеса, тем больший скручивающий момент прикладывается к образцу.

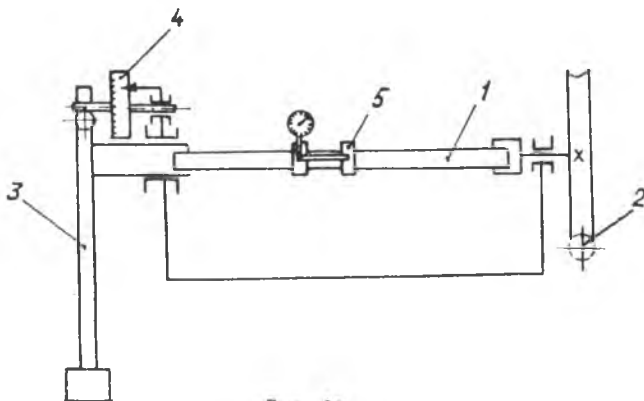


Рис. 23.

Для замера величины скручивающего момента противовес через рейку соединен с круглым лимбом 4. Перемещение лимба на одно деление соответствует изменению момента на 3 кгсм.

Замер угла закручивания осуществляется с помощью угломера 5, установленного на испытуемый образец. На рис. 24 показана схема угломера.

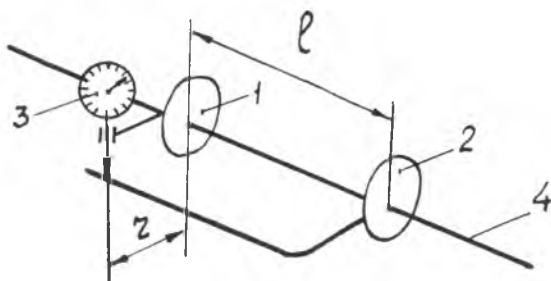


Рис. 24.

Угломер состоит из двух отдельно выполненных частей 1 и 2, которые закрепляются на испытуемом образце 4. Держатель индикатора 3 неподвижно связан с частью угломера 1. Вторая часть угломера имеет поверхность, на которую перпендикулярно опирается ножка индикатора 3.

При скручивании стержня сечение 1 поворачивается относительно сечения 2. Этот поворот фиксируется с помощью индикатора. Если при нагружении образца ножка индикатора переместилась на ΔA , то опытный угол закручивания на длине l можно вычислить по формуле:

$$\varphi^* = \frac{\Delta A}{r}, \quad (2)$$

где r — расстояние между ножкой индикатора и осью образца.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Измеряется диаметр образца.

2. По заданному преподавателем значению крутящего момента определяется теоретическое значение угла закручивания φ по формуле (1).

3. На установке задается предварительная нагрузка и снимается показание индикатора A_1 .

4. Образец догружается заданным моментом и снимается показание индикатора A_2 . Затем образец разгружается. Опыт повторяется три раза.

5. Определяется перемещение ножки индикатора ΔA , соответствующее каждому из трех догрузений

$$\Delta A = A_2 - A_1.$$

6. Определяется среднее значение ΔA

$$\Delta A_{\text{ср}} = \frac{\Sigma \Delta A}{n},$$

где n — число нагружений.

7. По формуле (2) определяется опытный угол закручивания φ^* ; результат сопоставляется с теоретическим путем вычисления расхождения

$$\delta = \frac{|\varphi - \varphi^*|}{\varphi^*} \cdot 100\%.$$

КРУЧЕНИЕ БРУСА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

На рис. 25 представлено поперечное сечение рассматриваемого бруса. Задача о кручении бруса некруглого поперечного сечения решается методами математической теории упругости. Результаты решения показывают, что в любой точке бруса происходит чистый сдвиг. Показания тензометров III и IV подтверждают эти выводы (см. фиг. 29).

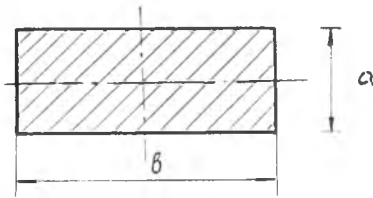


Рис. 25.

На рис. 26 изображен элемент, вырезанный в точке на поверхности бруса. Верхняя и нижняя грани элемента перпендикулярны оси бруса, а передняя грань совпадает с боковой поверхностью бруса.

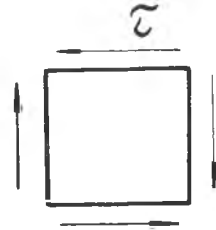


Рис. 26.

На рис. 27 показан элемент, грани которого параллельны главным площадкам. Относительные удлинения по главным направлениям вычисляются с помощью закона Гука.

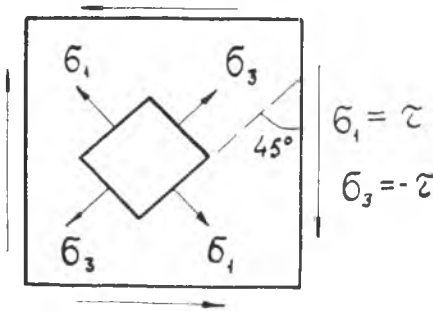


Рис. 27.

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_3) = \frac{1+\mu}{E}\tau,$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E}(\sigma_3 - \mu\sigma_1) = -\frac{1+\mu}{E}\tau.$$

Отсюда $\tau_{\text{наиб}} = \sigma_1 = \frac{\epsilon_1 E}{1+\mu}$ (4)

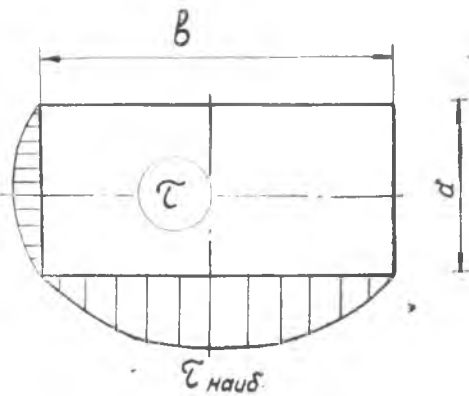


Рис. 28.

Эпюра касательных напряжений в точках, расположенных на сторонах поперечного сечения, приведена на рис. 28. Наибольшее касательное напряжение действует в середине длинной стороны сечения

$$\tau_{\text{наиб}} = \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{к}}}, \quad (5)$$

где $W_{\text{к}}$ — условный момент сопротивления

сечения кручению. Для прямоугольного сечения $W_{\text{к}} = \alpha a^2 b$, где $\alpha = f\left(\frac{b}{a}\right)$

1	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0	10	∞
0,208	0,231	0,239	0,246	0,256	0,267	0,282	0,299	0,307	0,313	0,333

При $b > a$ значительная часть длинной стороны сечения испытывает напряжения, близкие к $\tau_{\text{наиб}}$. Это обстоятельство используется при опытном определении наибольшего касательного напряжения.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Опыт проводится на машине для испытаний на кручение. Брус прямоугольного поперечного сечения устанавливается в захватах машины и нагружается крутящим моментом. На поверхности бруса (рис. 29) по четырем направлениям установлены тензометры для замера деформаций. Тензометры I и II установлены по главным осям, III — по оси бруса, а IV — перпендикулярно оси. Изменением напряжений в пределах базы тензометра для бруса, который используется в опыте, можно пренебречь.

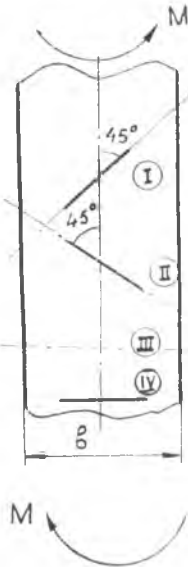


Рис. 29.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Измеряются размеры образца.
2. По заданному $M_{кр}$ по формуле (5) вычисляется теоретическое значение $\tau_{наиб}$.
3. Образец нагружается предварительной нагрузкой и записываются показания тензометров.
4. После догружения образца заданным моментом записываются новые показания тензометров. Затем образец разгружается. Опыт повторяется три раза.
5. Определяются приращения показаний тензометров ΔA_I ; ΔA_{II} ; ΔA_{III} ; ΔA_{IV} и среднее значение приращений по результатам трех опытов $-\Delta A_{ср}^I$.
6. Вычисляются опытные значения деформаций

$$\varepsilon_i^* = \frac{\Delta A_i^{ср}}{kl},$$

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

7. Вычисляется опытное значение напряжений по формуле (4). Производится сопоставление опыта и теории путем вычисления расхождений

$$\delta = \frac{\tau_{наиб} - \tau_{наиб}^*}{\tau_{наиб}} \cdot 100\%.$$

Контрольные вопросы

1. Как формулируется закон Гука при сдвиге?
2. Какова связь между упругими постоянными материала E , G и μ ?
3. Какое напряженное состояние материала возникает при кручении вала?
4. Что такое угол закручивания вала?
5. Что называется полярным моментом инерции и какова его размерность?
6. Какая величина называется жесткостью при кручении?
7. Что такое крутящий момент?
8. Как выражается условие прочности при кручении?
9. В каких точках бруса прямоугольного поперечного сечения действует $\tau_{наиб}$, как определить это напряжение?
10. Что происходит с поперечными сечениями бруса прямоугольного сечения при кручении?
11. Какое кручение называется свободным?
12. Почему нулевые показания тензометров III и IV подтверждают предположение о наличии «чистого» сдвига на поверхности стержня?

ВНЕЦЕНТРЕННОЕ РАСТЯЖЕНИЕ СТЕРЖНЯ

Цель работы — экспериментальная проверка расчетной формулы сопротивления материалов при внецентренном растяжении стержня.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

На рис. 30 изображен стержень постоянного поперечного сечения с прямой осью x , нагруженный силами $P-P$, линия действия которых параллельна оси стержня. Стержень испытывает деформацию внецентренного растяжения, которая сводится к комбинации осевого растяжения и чистого косоугольного изгиба. Косой изгиб в свою очередь представляет комбинацию двух плоских изгибов. Расчетная схема деформации внецентренного растяжения после приведения сил $P-P$ к оси стержня изображена на рис. 31.

Применяя принцип независимости действия сил, получим следующую расчетную формулу для определения напряжения

$$\sigma = P \left(\frac{1}{F} + \frac{y_p y}{I_z} + \frac{Z_p Z}{I_y} \right), \quad (1)$$

где P — осевая сила;

F — площадь поперечного сечения стержня;

y_p и Z_p — координаты точки приложения силы в системе главных центральных осей сечения;

y и Z — координаты точки поперечного сечения, в которой вычисляется напряжение.

В формуле (1) первое слагаемое отражает простое растяжение, а второе и третье — чистый косой изгиб. При внецентренном растяжении (сжатии) вводится понятие о ядре сече-

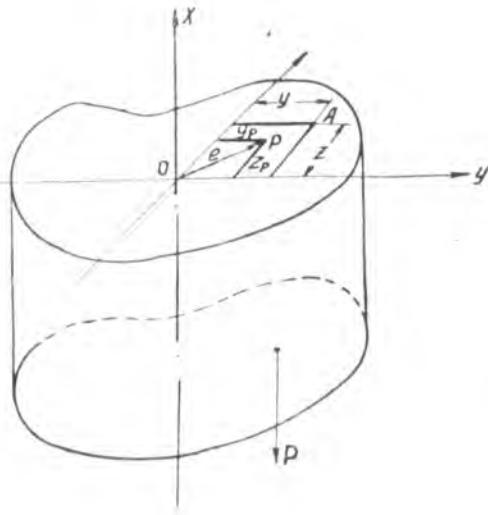


Рис. 30.

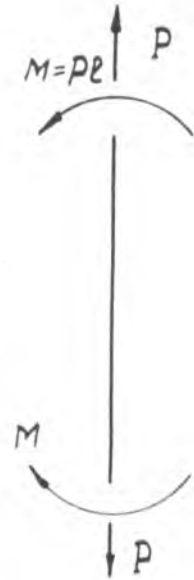


Рис. 31.

ния, представляющем собой некоторую область вокруг центра тяжести сечения, внутри которой нужно располагать точку приложения силы P , не вызывая в сечении напряжений разного знака.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Опыт проводится на стержне прямоугольного сечения, изображенном на рис. 32. Формула (1) для данного случая принимает следующий частный вид:

$$\sigma = \frac{P}{F} \left(1 + 12 \frac{l}{h^2} y \right). \quad (2)$$

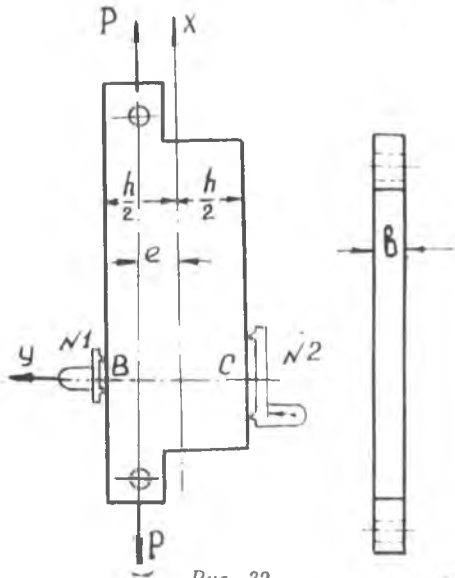


Рис. 32.

Для крайних волокон в точках B и C

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{P}{F} \left(1 + 6 \frac{l}{n} \right) \\ \sigma_c &= \frac{P}{F} \left(1 - 6 \frac{l}{n} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для определения деформаций в точках B и C устанавливаются рычажные тензометры.

ПОДГОТОВКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

При помощи штангенциркуля измеряются поперечные размеры стержня. Опыт производится на испытательной машине. Дается некоторая начальная нагрузка и записываются показания тензометров A_1 и A_2 . Затем стержень нагружается до заданной силы и опять записываются показания тензометров A_1 и A_2 . Для получения надежных результатов опыт повторяется три раза. Показания тензометров заносятся в протокол испытаний.

Протокол испытаний

№ опыта	Нагрузка, P кг	Тензометр № 1			Тензометр № 2		
		A_1 , мм	ΔA_1 , мм	$A_{1\text{ср}}$, мм	ΔA_2 , мм	ΔA_2 , мм	$\Delta A_{2\text{ср}}$, мм

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОПЫТА И ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Записанные показания тензометров дают возможность вычислить величину напряжений, возникающих в точках B и C . Зная изменение показаний тензометров в каждом опыте, определяются средние арифметические значения ($\text{ср} \Delta A_1$ и $\text{ср} \Delta A_2$)

показаний тензометров, соответствующие заданной нагрузке. Зная величину базы тензометров, коэффициент увеличения тензометра и модуль упругости материала стержня можно определить напряжение в точках B и C .

Например, для точки B будем иметь:

$$\text{абсолютное удлинение} \quad \Delta l_1 = \frac{\text{ср} \Delta A_1}{k_1} \text{ м.и.},$$

$$\text{относительное удлинение} \quad \epsilon_B = \frac{\Delta l_1}{l_1} = \frac{\text{ср} \Delta A_1}{k_1 l_1},$$

$$\text{нормальное напряжение} \quad \sigma_B^* = \frac{\text{ср} \Delta A_1}{k_1 l_1},$$

l_1 — база тензометра № 1,

k_1 — коэффициент увеличения этого тензометра.

В качестве вывода по работе следует произвести сопоставление опытных значений напряжений σ_B^* и σ_C^* с теоретическими σ_B и σ_C , вычисленными по формуле (3). Отличие опытных напряжений от теоретических, как правило, невелико и является результатом использования приближенного значения модуля упругости, наличия погрешности показаний приборов и др. Расхождение между опытными и теоретическими значениями не должно превосходить 10%.

При выполнении данной работы следует определить положение нейтральной оси, построить эпюру напряжений в поперечном сечении и построить ядро сечения.

Контрольные вопросы

1. На какие простые деформации можно разложить внецентренное растяжение (сжатие) стержня?
2. Что такое ядро сечения и как его построить?
3. Как определяется положение нейтральной оси при внецентренном растяжении (сжатии)?
4. Какие причины вызывают отклонение опытных значений напряжений от теоретических?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ПОТЕРЯ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТЫМ СТЕРЖНЕМ (продольный изгиб)

Цель работы — изучение явления потери устойчивости, сравнение опытной критической силы с результатами расчета по теоретическим формулам.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

При сжатии достаточно длинного стержня (рис. 33) можно наблюдать потерю устойчивости упругой формы, сопровождающуюся внезапным выпучиванием и быстрым нарастанием перемещений в направлении, перпендикулярном оси стержня.

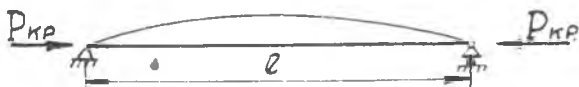


Рис. 33.

Силу, при которой происходит потеря устойчивости упругой формы, называют критической $P_{кр}$. Выпучивание заканчивается либо разрушением стержня, либо нарушением нормальных условий работы конструкции, в которой находится стержень.

Рассматривая описанное явление, можно говорить об устойчивой и неустойчивой форме равновесия. При нагрузке $P < P_{кр}$ устойчивой является прямолинейная форма равновесия, к которой стержень возвращается после снятия дополнительной поперечной нагрузки, так как упругие силы соп-

противления, возникающие при отклонении стержня, превышают сжимающую силу P .

При нагрузке $P = P_{кр}$ наступает равенство сжимающих сил и упругих сил сопротивления, стержень способен удерживать как прямолинейную, так и искривленную форму — наступает безразличное равновесие.

Для вычисления критической силы применяется формула Эйлера:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{(\mu l)^2},$$

где E — модуль упругости 1-го рода;

I — момент инерции сечения стержня относительно главной центральной оси, перпендикулярной плоскости выпучивания;

μ — коэффициент приведения длины;

l — длина стержня.

Формула Эйлера применима тогда, когда критическое напряжение, вычисленное по ней, не превышает предела пропорциональности материала стержня.

Это условие выполняется для достаточно длинных стержней, у которых $\lambda \gg \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{п}}}$,

где $\lambda = \frac{\mu l}{i}$ — гибкость стержня;

$\sigma_{п}$ — предел пропорциональности.

Коэффициент приведения длины μ зависит от способа закрепления концов стержня, поэтому изучение потери устойчивости упругой формы проводится при различных способах закрепления стержня.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установки для проведения опытов изображены на рис. 34 и 35. На рис. 34 показана установка, в которой стержень жестко защемлен нижним концом. С помощью винтов 2 стержень устанавливается в вертикальное положение. Нагружение осуществляется сменными грузами, помещенными на втулку 3. Ограничитель перемещений 4 предотвращает разрушение стержня после потери устойчивости.

Вторая установка (рис. 35) представляет собой кронштейн, один стержень которого сжат, а другой растянут. Стержень 1, испытывающий сжатие, опирается заостренными концами в пяты 3 и 4. Пята 3 соединена шарнирно с неподвижной скобой 8, а пята 4 со стержнем 2, который другим концом соединен с неподвижной скобой 9. К шарнирному болту 6 подвешивается переменная нагрузка 7, вызывающая сжатие стержня 1. Для предотвращения возникновения пластических деформаций в изогнутом стержне установка имеет ограничитель.

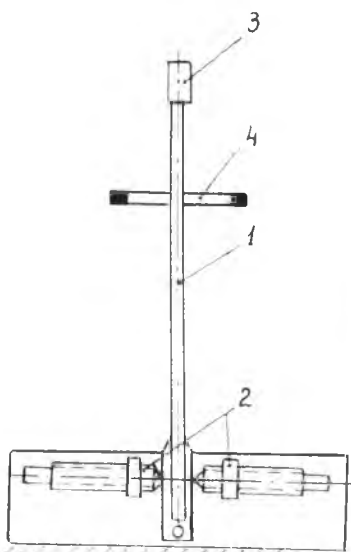


Рис. 34.

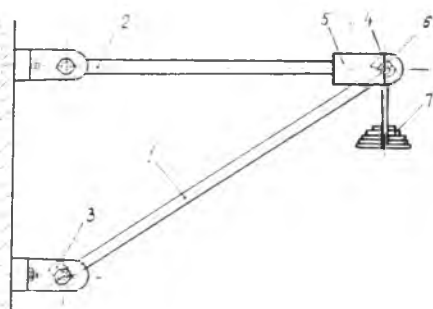


Рис. 35.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

А. Расчетное определение критической силы

1. Измеряются длина и поперечные размеры стержней, необходимые для расчета.
2. Выясняется возможность применения формулы Эйлера для подсчета критической силы.
3. Вычисляется критическая сила для исследуемого стержня.

В. Опытное определение критической силы

1. Изменяя сжимающую нагрузку при помощи грузов, добиваются возникновения выпучивания. Сжимающая сила,

Сжимающая сила, при которой стержень остается слегка изогнутым, и является критической силой.

2. Опыт повторяется три раза, после чего вычисляется среднее значение критической силы

$$P_{кр}^* = \frac{P_{кр1} + P_{кр2} + P_{кр3}}{3}.$$

Опытная критическая сила сравнивается с расчетной путем вычисления величины расхождения

$$\delta = \frac{|P_{кр}^* - P_{кр}|}{P_{кр}} \cdot 100\%.$$

Результаты исследований заносятся в протокол.

Протокол испытаний

Расчетная схема стержня	Размеры стержня			Гибкость стержня	$\sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{п}}}$	Расчетное зна- чение критиче- ской силы, кг	№ опыта	Опытное зна- чение опытной критической силы, кг	Среднее зна- чение опытной критической силы, кг	Разница опыта и теории, %
	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>							

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление потери устойчивости сжатым стержнем?
2. Записать и объяснить формулу Эйлера для вычисления критической силы.
3. Чему равен коэффициент приведения длины μ для различных способов закрепления концов стержня?
4. Как определяется грузоподъемность сжатых стержней?
5. Какая форма поперечного сечения сжатого стержня является наиболее рациональной?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

Цель работы — экспериментальная проверка формул для нормальных напряжений и прогибов при косом изгибе.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Косым изгибом называется деформация, при которой плоскость действия изгибающего момента, проходящая через ось бруса, не совпадает ни с одной из плоскостей жесткости. Рассмотрим стержень, защемленный одним концом и нагруженный на другом свободном конце сосредоточенной силой P , направление которой составляет угол α с главной центральной осью y поперечного сечения (рис. 36).

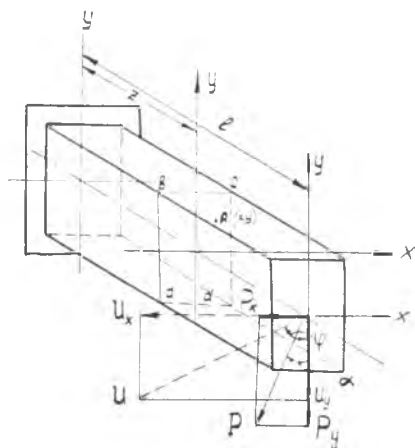


Рис. 36.

Под действием силы P в сечении, отстоящем на расстоянии z от заделки, возникает изгибающий момент

$$M = P \cdot (l - z),$$

плоскость действия которого не совпадает ни с одной из плоскостей жесткости. Составляющие силы P по главным осям

$$P_x = P \cdot \sin \alpha,$$

$$P_y = P \cdot \cos \alpha$$

создают изгибающие моменты относительно главных центральных осей:

$$M_x = P_y(l - z) = P_1 \cdot \cos \alpha (l - z) = M \cdot \cos \alpha,$$

$$M_y = P_x(l - z) = P \cdot \sin \alpha (l - z) = M \cdot \sin \alpha,$$

которые являются проекциями суммарного изгибающего момента M на соответствующие оси.

Используя принцип независимости действия сил, можно записать выражение для нормальных напряжений в произвольной точке A . При этом необходимо учитывать знаки нормальных напряжений от отдельно взятых моментов M_x и M_y . В данном случае это выражение запишется в следующем виде:

$$\sigma = \frac{M_x}{I_x} y + \frac{M_y}{I_x} x \quad (1)$$

или, после подстановки значений M_x и M_y через заданную нагрузку P ,

$$\sigma = P(l - z) \left(\frac{\cos \alpha}{I_x} y + \frac{\sin \alpha}{I_x} x \right), \quad (2)$$

где x и y — координаты точки A .

Пользуясь формулой (1), можно определить величину и знак нормальных напряжений в любой точке выбранного поперечного сечения.

Полный прогиб U свободного конца балки определяется как геометрическая сумма прогибов в направлении главных центральных осей инерции от действия соответствующих P_x и P_y :

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}. \quad (3)$$

Для данной схемы нагружения балки составляющие полного прогиба равны: $U_x = \frac{Pz^2}{2EI_y} \left(l - \frac{1}{3}z \right)$,

$$U_y = \frac{Pz^2}{2EI_x} \left(l - \frac{1}{3}z \right). \quad (4)$$

Угол наклона полного прогиба к оси y определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_x}{U_y} = \frac{I_x}{I_y} \operatorname{tg} \alpha. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива для других схем нагружения балок при условии, что все нагрузки лежат в одной плоскости.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для проведения опыта применяют балку прямоугольного или двутаврового поперечного сечения, защемленную одним концом и несущую на свободном конце вертикальную нагрузку P (рис. 37).

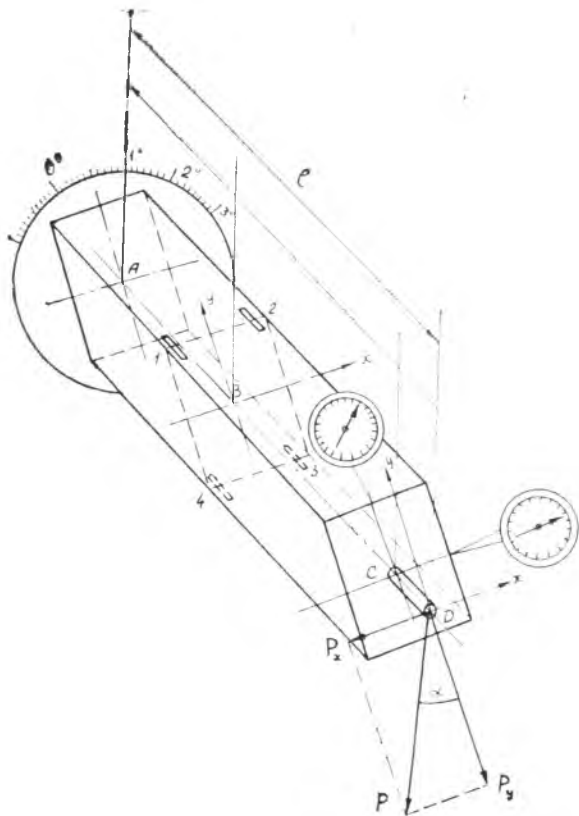


Рис. 37.

Балка может поворачиваться относительно продольной оси, вследствие чего угол α между направлением вертикальной силы P и главной центральной осью y может изменяться. Требуемую величину угла α устанавливают по круг-

лой шкале, расположенной в сечении заделки. Определение прогибов производится в сечении C балки с помощью двух индикаторов часового типа, которые измеряют составляющие полного прогиба в направлении главных центральных осей. Экспериментальное определение нормальных напряжений производится в сечении B с помощью четырех проволочных датчиков, наклеенных в точках 1, 2, 3, и 4 в непосредственной близости ребер балки.

Определение напряжений по показаниям прибора, к которому подключаются датчики, производится с помощью тарировочного графика.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Теоретическая часть

1. По формулам (4) вычисляются значения составляющих полного прогиба U_x и U_y в направлении главных центральных осей от действия заданной нагрузки.

2. Подсчитывается значение полного прогиба

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}.$$

3. По формулам (5) определяется величина угла φ .

4. По формулам (2) вычисляются значения нормальных напряжений в точках 1, 2, 3 и 4.

Экспериментальная часть

5. К балке прикладывается предварительная нагрузка и фиксируются показания индикаторов и прибора для измерения деформаций.

6. К балке прикладывается окончательная нагрузка P и фиксируются показания индикаторов и потенциометра.

ПРИМЕЧАНИЕ: приложение предварительной и рабочей нагрузки, снятие показаний и приборов производится не менее двух-трех раз.

7. По найденным экспериментальным значениям U_x^* и U_y^* подсчитывается полный прогиб U^* .

8. По формуле

$$\operatorname{tg} \varphi^* = \frac{U_x^*}{U_y^*}$$

(рис. 38.) вычисляется экспериментальное значение угла φ^* .

9. С помощью тарировочного графика определяются экспериментальные величины напряжений в точках 1, 2, 3 и 4. Показания приборов, теоретические и экспериментальные значения перемещений и напряжений заносятся в протокол.

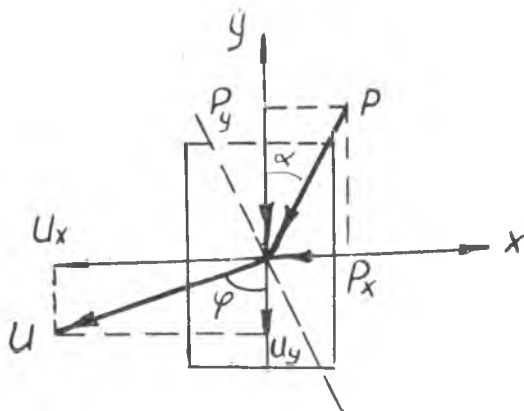


Рис. 38.

10. Перемещения и напряжения, полученные опытным путем, сравниваются с вычисленными по формулам сопротивления материалов и определяется процент расхождения:

$$\delta = \frac{|U - U^*|}{U} \cdot 100\% ,$$

$$\delta = \frac{|\sigma - \sigma^*|}{\sigma} \cdot 100\% .$$

Контрольные вопросы

1. Какой изгиб называется плоским?
2. Какой изгиб называется косым (сложным)?
3. Какие балки не испытывают косоугольного изгиба?
4. Каково взаимное расположение направлений полного перемещения и нейтральной оси?
5. Построить эпюру нормальных напряжений для исследуемого сечения.

ПРОТОКОЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГИБОВ

№ п/п	Нагрузка, P , кг	Приращение нагрузки, P , кг	Показания индикаторов, мм		Прираще- ния показан- ний индика- торов, мм		Полный прогиб, мм		Расхожде- ние, % δ	Угол φ^* град	
			A_x	A_y	ΔA_x	ΔA_y	U	U^*			
1											
2											
3											
					Ср. $\Delta A_x =$ $= U_x$	Ср. $\Delta A_y =$ $= U_y$					

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ С ПОМОЩЬЮ РОЗЕТКИ ДАТЧИКОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Цель работы — ознакомление студентов с методикой определения напряжений при плоском напряженном состоянии с помощью проволочных датчиков.

На поверхности детали, свободной от нагрузок, т. е. свободной от контактных напряжений, имеет место плоское напряженное состояние, поддающееся тензометрированию. Как известно, в большинстве случаев наиболее напряженными точками материала являются точки на поверхности детали, поэтому проверка прочности детали сводится к проверке прочности материала на ее поверхности.

Тензометрирование применяется, с одной стороны, для оценки прочности детали, когда из-за сложности задачи нельзя определить напряжения теоретическим путем, и, с другой стороны, для экспериментальной проверки закономерностей, полученных теоретическим путем.

В настоящей работе объектом экспериментального изучения напряженного состояния является полый вал, испытывающий кручение с изгибом.

При кручении с изгибом круглого вала напряжения могут быть найдены по формулам сопротивления материалов.

Таким образом, в данной работе имеется возможность сопоставить напряжения, найденные теоретическим путем, с напряжениями, найденными при помощи тензометрирования.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Определение напряжений при помощи розетки датчиков

При плоском напряженном состоянии главные деформации и их направления определяются по формулам, аналогичным тем, которые выведены для определения величины и направления главных напряжений (рис. 39).

$$\varepsilon_{\min}^{\max} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}, \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = - \frac{\gamma_{xy}}{2(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_y)}. \quad (2)$$

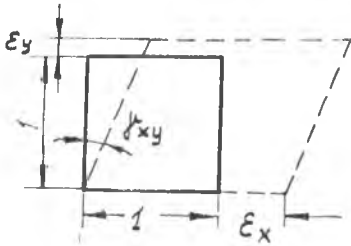


Рис. 39.

Линейные относительные деформации ε_x и ε_y легко поддаются измерению при помощи тензометров. Измерение же относительного сдвига γ_{xy} (искажение прямого угла $\chi O\gamma$) требует очень сложной аппаратуры, а поэтому определение главных деформаций производится по величине трех линейных деформаций: к тензодат-

чикам по двум взаимно перпендикулярным направлениям добавляется еще один датчик, направленный под углом 45° к первым двум. Три датчика составляют розетку (рис. 40).

Зная три линейные деформации ε_x , ε_y и ε_u , найдем γ_{xy} .

Для этого воспользуемся формулами перехода от одной системы координат к другой, повернутой на некоторый угол φ . Если оси US повернуты на угол φ относительно осей xu , то нормальное напряжение по направлению оси U будет оп-

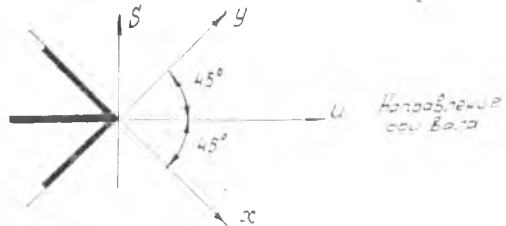


Рис. 40.

ределяться по известной формуле:

$$\sigma_u = \sigma_x \cos^2 \varphi + \sigma_y \sin^2 \varphi - \tau_{xy} \sin 2\varphi.$$

Аналогично этому линейная деформация по направлению оси U будет

$$\varepsilon_u = \varepsilon_x \cos^2 \varphi + \varepsilon_y \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \gamma_{xy} \sin 2\varphi.$$

При угле поворота $\varphi = 45^\circ$ получим:

$$\varepsilon_u = \frac{1}{2} \varepsilon_x + \frac{1}{2} \varepsilon_y - \frac{1}{2} \gamma_{xy}$$

откуда

$$\gamma_{xy} = -2\varepsilon_u + \varepsilon_x + \varepsilon_y. \quad (3)$$

Подставляя выражение γ_{xy} в (1) и (2), получим основные расчетные формулы для определения величины и направления главных деформаций по экспериментальным данным:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_u - \varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_u - \varepsilon_y)^2} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\varepsilon_u - \varepsilon_x - \varepsilon_y}{2(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_y)} \quad (5)$$

Здесь α — угол, который составляет направление σ_{\max} и ε_{\max} с направлением оси x -ов.

Зная ε_{\max} и ε_{\min} , нетрудно определить опытные значения главных напряжений σ_{\max}^* и σ_{\min}^* .

По закону Гука при плоском напряженном состоянии имеем:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{E} (\sigma_{\max} - \mu \sigma_{\min}),$$

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{E} (\sigma_{\min} - \mu \sigma_{\max}), \text{ откуда}$$

$$\sigma_{\max} = E \frac{\varepsilon_{\max} + \mu \varepsilon_{\min}}{1 - \mu^2},$$

$$\sigma_{\min} = E \frac{\mu \varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}}{1 - \mu^2}, \quad (6)$$

Подставляя в формулы (6) опытные значения ε_{\max} и ε_{\min} , найдем опытные значения σ_{\max}^* и σ_{\min}^* .

Определение напряжений расчетным путем

На рис. 41 показано распределение нормальных σ_n и касательных τ_k напряжений по поперечному сечению вала. Направление этих напряжений показано в соответствии с направлением действия нагрузки на мысленно отброшенную часть вала.

Выделенный около точки A элемент материала $abcd$ будет испытывать напряженное состояние, изображенное на рис. 42.

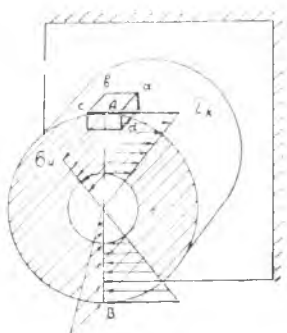


Рис. 41.

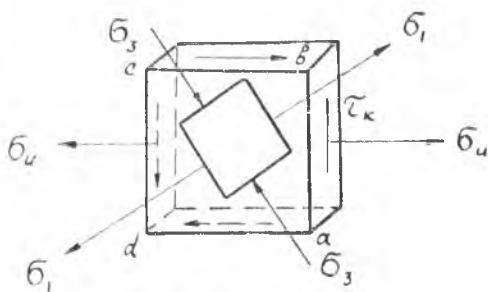


Рис. 42.

Величина нормального напряжения в точке A поперечного сечения, взятого на расстоянии C от заделки (см. рис. 45),

$$\text{будет } \sigma_n = \frac{M_{изг}}{W} = \frac{P(l-c)}{\frac{\pi D^3}{32}(1-\beta^4)}. \quad (7)$$

Величина касательного напряжения в той же точке будет

$$\tau_k = \frac{M_{кр}}{W_p} = \frac{Pa}{\frac{\pi D^3}{16}(1-\beta^4)}. \quad (8)$$

Величина и направление главных напряжений в точке определяются формулами:

$$\sigma_{1,3} = \frac{1}{2} (\sigma_n \pm \sqrt{\sigma_n^2 + 4\tau_k^2}), \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\tau_{\text{к}}}{\sigma_1}, \quad (10)$$

где α_1 — угол наклона σ_1 к направлению $\sigma_{\text{н}}$.

Для наглядного представления о величине и направлении напряжений в точке A , вычисленных по формулам сопротивления материалов, можно воспользоваться кругом напряжений (рис. 43).

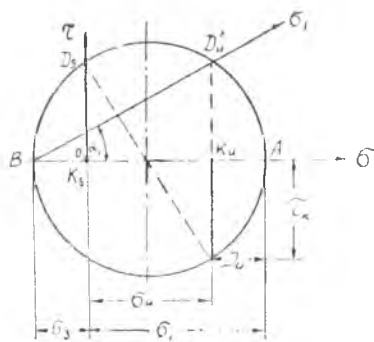


Рис. 43.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка состоит из трех основных частей: полого вала, измерителя деформаций и нагружающего устройства (рис. 44).

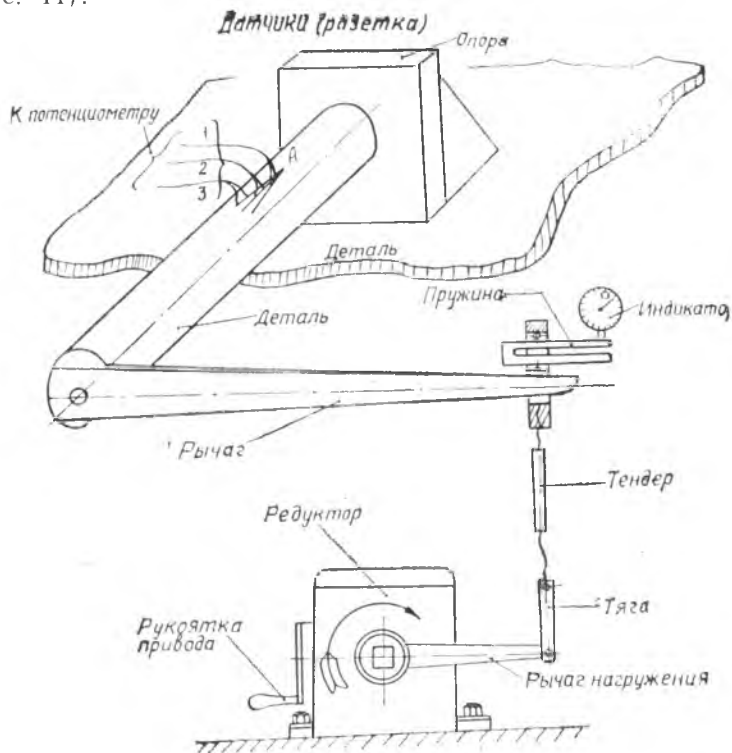


Рис. 44.

Один конец полого вала жестко прикреплен к опоре, удерживающей его в горизонтальном положении. К другому концу перпендикулярно к оси вала прикреплен рычаг, воспринимающий нагрузку. На расстоянии C от заделки, на поверхности вала в точке A , где действует наибольшее для данного сечения нормальное напряжение, наклеена розетка датчиков.

Концы проволочных датчиков через переключатель присоединены к прибору, регистрирующему изменение омического сопротивления проволочных датчиков.

Нагружающее устройство состоит из редуктора, кривошипа которого соединен тягой с концом рычага. Между рычагом и тягой помещена П-образная пружина, по величине деформации которой определяется величина нагрузки. Изменение деформации пружины производится при помощи индикатора. Нагружение производится путем вращения рукоятки редуктора.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Путем измерения находят необходимые для расчета размеры установки:

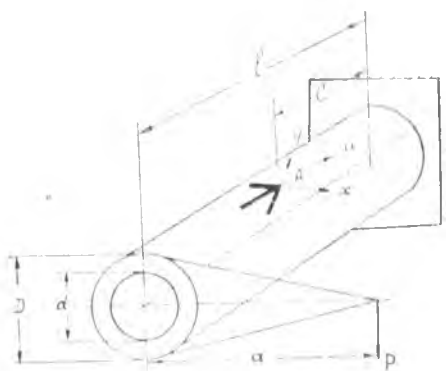


Рис. 45.

а) длина рычага a (рис. 45),

б) внешний диаметр вала D ,

в) внутренний диаметр вала d ,

г) длина вала от заделки до плоскости нагружения l ,

д) расстояние от плоскости заделки до точки, где наклеены датчики C .

2. За 5—10 минут до начала эксперимента включается измерительный

прибор для прогрева ламп.

3. Дается предварительная нагрузка.

4. Шкала индикатора, регистрирующего нагрузку, ставится на 0 и для каждого датчика стрелка прибора устанавливается на 0 шкалы.

5. Дается основная нагрузка, при которой фиксируются

путем. Находится отклонение экспериментальных величин от расчетных:

$$\delta_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_1^*}{\sigma_3} \cdot 100\% .$$

$$\delta_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_2^*}{\sigma_3} \cdot 100\% .$$

Примечание. При сравнении углов α_1 и α необходимо учесть, что α_1 — угол наклона направления ϵ_1 к оси U , а α — угол наклона того же направления к оси x -ов (рис. 46).

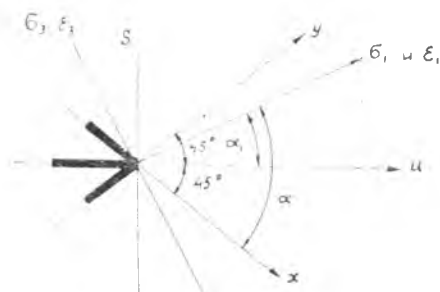


Рис. 46.

Контрольные вопросы

1. Какое напряженное состояние испытывает материал на поверхности детали?
2. Какими компонентами определяется напряженное состояние на поверхности детали?
3. Какими компонентами определяется деформированное состояние на поверхности детали?
4. Почему розетка датчиков содержит 3 датчика?
5. Почему в розетке датчиков углы между датчиками выбираются 45° или 60° ?
6. В каком порядке определяются главные напряжения при помощи розетки датчиков?

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

РАЗРЫВНАЯ МАШИНА УСИЛИЕМ 5 ТОНН

Машина усилием 5 тонн механического действия предназначена для статических испытаний на растяжение. Испытания на сжатие, срез и изгиб могут производиться на машине только при наличии специальных приспособлений.

Схема машины показана на рис. 47. Машина состоит из станины 10, опорных колонн 11 и верхней неподвижной траверсы 12, на которых смонтированы механизм нагружения и силоизмерительное устройство. С помощью червячной пары в ступицу червячного колеса ввинчивается ходовой винт 8, перемещающий нижний захват 2. Верхний захват 2 с помощью тяг соединен с верхней траверсой 3, которая опирается на поршень 4, находящийся в цилиндре, заполненном глицерином. В процессе нагружения в жидкости под поршнем возникает давление, пропорциональное нагрузке. Полость цилиндра соединена при помощи трубопровода 6 с манометром 7, который показывает величину давления, а следовательно, и величину нагрузки.

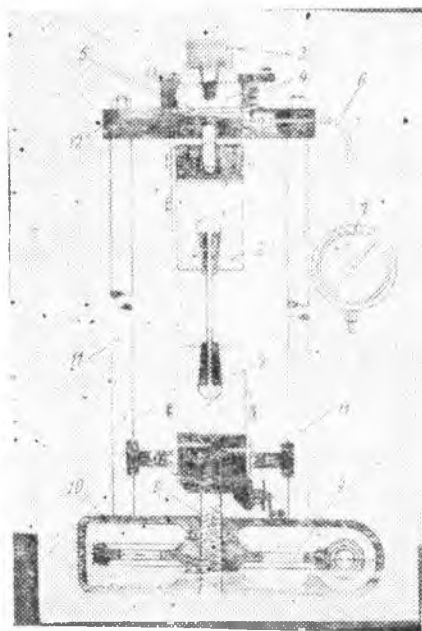


Рис. 47.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА УМ-5А УСИЛИЕМ 5 ТОНН

Универсальная испытательная машина УМ-5А усилием 5 тонн, схема которой представлена на рис. 48, имеет механический привод, работающий от руки и электродвигателя. Вращение вала электродвигателя передается на червячную пару 7, 8, у которой в ступицу червячного колеса ввинчивается ходовой винт 9, на котором закреплен нижний захват 5 машины. Опускание захвата 5 вызывает растяжение образца. Усилие, возникающее в образце, передается через верхний захват 6 рычагу 10 маятникового силонизмерителя 11. Отклонение ма-

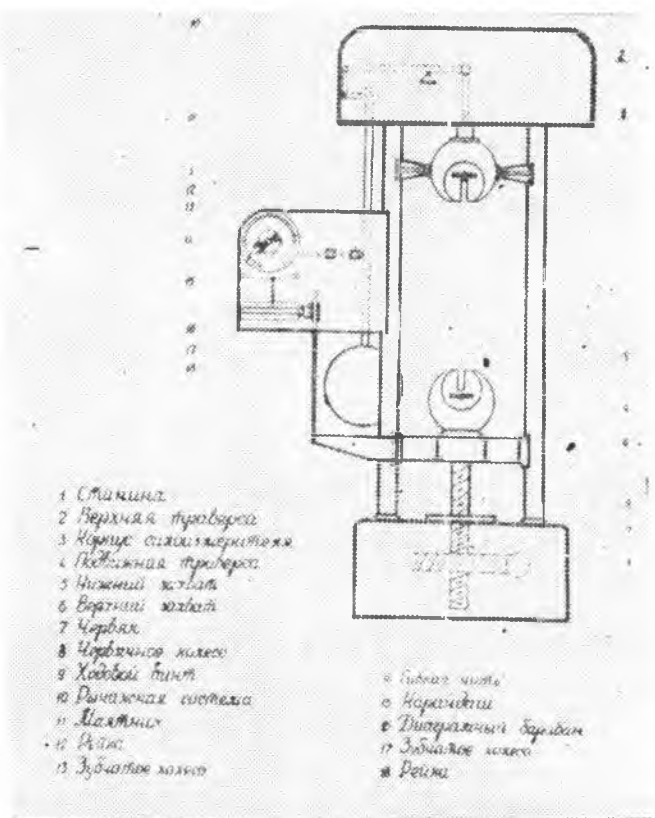


Рис. 48.

ятника передается через рейку 12 зубчатому колесу 13, соединенному со стрелкой силовизмерителя.

Зубчатое колесо 13 имеет блок, на котором намотана гибкая нить 14, предназначенная для перемещения карандаша 15. Перемещение карандаша по образующей цилиндра 16 пропорционально нагрузке P . Рейка 18, соединенная с подвижным захватом машины 5, при помощи зубчатого колеса 17 вращает диаграммный барабан 16, угол поворота которого пропорционален удлинению образца.

Таким образом, в определенных масштабах карандаш вычерчивает на поверхности цилиндра график зависимости между нагрузкой Δl и абсолютным удлинением образца l , т.е. вычерчивает диаграмму растяжения.

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ МАШИНА УСИЛИЕМ 10 ТОНН

Схема универсальной испытательной машины усилием 10 тонн (ЦНИИМАШ-10) гидравлического действия изображена на рис. 49.

Масляный насос высокого давления 1 приводится в действие при помощи электродвигателя.

По трубопроводу 2 масло подается в рабочий цилиндр и давит на поршень 6. Поршень, поднимаясь вверх, перемещает перекладину и связанную с ней при помощи двух тяг подвижную траверсу 8, на которой закреплены нижняя опора 7 и верхний захват 9.

Рама машины состоит из чугуинной отливки 12, на которой установлены две колонны, жестко связанные наверху перекладиной. На перекладине укреплены рабочий цилиндр и верхняя опора 7.

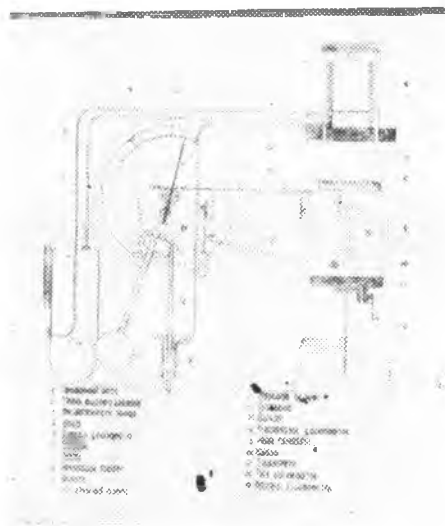


Рис. 49.

При рабочем ходе расстояние между опорами 7 сокращается, поэтому между опорами 7 производится испытание на сжатие и другие испытания, требующие сближения опоры.

Захваты 9 предназначены для испытания на растяжение, так как при рабочем ходе расстояние между ними увеличивается. Один конец образца, вставляется в нижний неподвижный захват 9, закрепленный на неподвижной траверсе 10. С помощью механизма подачи 11 другой конец образца подводится к верхнему захвату 9 и оба конца образца зажимаются клиновыми захватами.

Для измерения нагрузки на испытуемый образец применяется маятниковый динамометр. Рабочий цилиндр соединен трубопроводом 14 с цилиндром динамометра. Поршень этого цилиндра при помощи тяги 18 соединен с кривошипом 17 тяжелого маятника.

В процессе нагружения пропорционально нагрузке растут давление масла и момент силы тяги относительно оси маятника, который уравнивается моментом силы тяжести маятника. Таким образом, величина нагрузки пропорциональна углу отклонения маятника от вертикали:

$$M = Q \cdot R \cdot \sin \alpha \approx QR\alpha,$$

где Q — вес маятника;

R — расстояние от центра тяжести маятника до оси вращения;

α — угол наклона маятника к вертикали.

При повороте маятника прикрепленная к нему планка перемещает рейку 15. С рейкой при помощи зубчатой передачи связана стрелка динамометра 5, показывающая на шкале 4 величину нагрузки. Для записи диаграммы растяжения — (графика зависимости между нагрузками P и абсолютным удлинением M) применяется записывающее устройство.

К рейке 15 прикрепляется карандаш, кончик которого опирается на бумагу, накрученную на барабан 16. При нагружении карандаш перемещается по образующей цилиндра, фиксируя величину нагрузки. Величина M , равная перемещению подвижной траверсы, фиксируется поворотом барабана, приводимого в движение нитью, один конец которой прикреплен к подвижной траверсе, а другой посредством блоков перекинут через шкив барабана и нагружен гирей. Перемещение точек на поверхности барабана пропорционально величине

не Δl . При вращении барабана и одновременном перемещении карандаша на бумаге вычерчивается кривая, ординаты точек которой пропорциональны нагрузке, а абсциссы пропорциональны абсолютному удлинению образца. Масштаб удлинений равен отношению диаметра барабана к диаметру шкива. Вместе со стрелкой динамометра перемещается стрелка-фиксатор, которая показывает максимальную нагрузку. Масштаб нагрузки равен отношению показания фиксатора к соответствующей ординате.

МАШИНА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА КРУЧЕНИЕ КМ-50-1

Схема машины для испытания на кручение (КМ-50-1) с максимальным моментом, равным 50 кгм, изображена на рис. 50. Машина состоит из чугунной станины 1, на которой установлены две колонны, соединенные верхней неподвижной перекладной 2. Чугунная станина одновременно служит корпусом привода.

Нагружение производится при помощи электромотора 5 через червячную пару 6, 7. К ступице червячного колеса прикреплен нижний захват 10, передающий крутящий момент образцу 21. Крутящий момент, возникающий в поперечном сечении образца, передается верхнему неподвижному захвату 11, который через горизонтальный кривошип 12 соединен гибкой связью 13 с втулкой-кривошипом 14 маятника 15. Момент силы тяги гибкой связи (пропорциональный крутящему моменту образца) уравнивается моментом силы тяжести маятника 15, благодаря чему крутящий момент пропорционален углу поворота маятника. На оси маятника закреплен рычаг 16, который перемещает рейку, приводящую в движение шестерню 18 и стрелку динамометра. Перемещение рейки и стрелки пропорционально углу поворота маятника и, следовательно, пропорционально крутящему моменту.

Для записи графика зависимости между крутящим моментом и углом закручивания на рейке укреплен карандаш 19, опирающийся на поверхность барабана 20. Поворот нижнего подвижного захвата, равный углу закручивания, передается при помощи зубчатой передачи барабану. В процессе нагружения карандаш вычерчивает кривую, ординаты точек которой пропорциональны крутящему моменту M , а абсциссы пропорциональны углу закручивания. Масштаб моментов

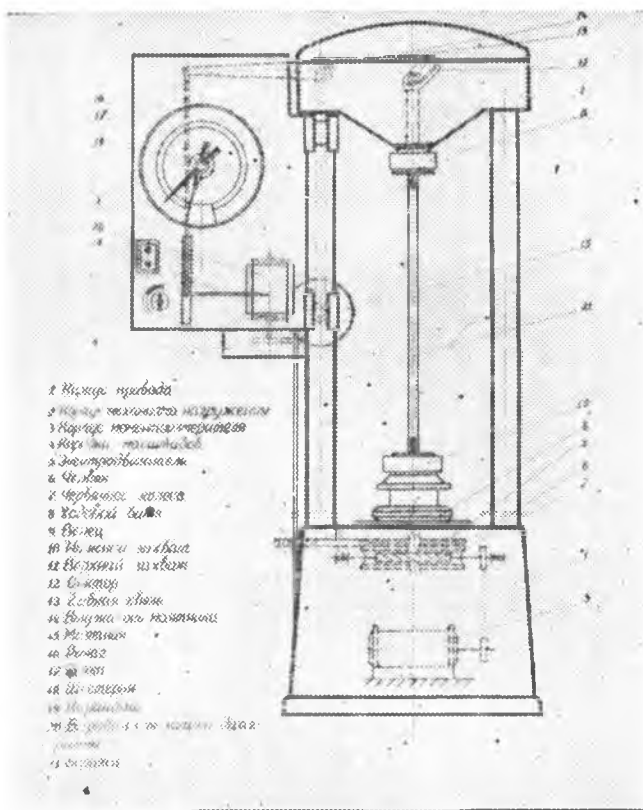


Рис. 50.

можно найти как отношение показания фиксатора к соответствующей ординате, а масштаб угла закручивания равен передаточному числу зубчатой передачи.

МАШИНА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА КРУЧЕНИЕ АМ-1

Схема машины для испытания на кручение (АМ-1) с максимальным крутящим моментом 6 кгм изображена на рис. 51. Машина имеет чугунную станину, на которой размещены нагружающее и регистрирующее устройства.

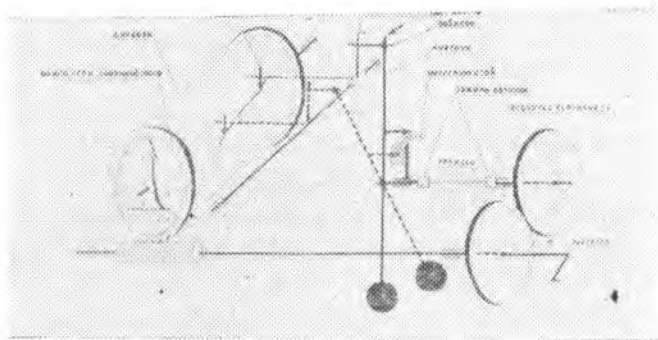


Рис. 51.

Нагружение образца производится вручную при помощи рукоятки 2. Крутящий момент зубчатой передачи уравнивается моментом силы тяжести маятника 3. Таким образом, величина крутящего момента определяется моментом силы тяжести маятника и пропорциональна углу отклонения маятника от вертикали:

$$M = RQ \sin \alpha \approx RQ \alpha, \text{ где}$$

Q — вес маятника,

R — расстояние от центра тяжести маятника до его оси вращения.

α — угол отклонения маятника от вертикали. Маятник имеет поводок 6, который перемещает рейку 7 и вращает лимб 4. Поворот лимба пропорционален отклонению маятника, а значит, пропорционален крутящему моменту. Таким образом величина крутящего момента определяется по углу поворота лимба. Угол закручивания образца 1 определяется при помощи угломера 5.

РЫЧАЖНЫЙ ТЕНЗОМЕТР

Рычажный тензометр применяется для измерения линейных деформаций. Тензометр этот обычно имеет базу 20 мм (у некоторых моделей 10 мм). Присоединением специального удлиителя (рис. 52) база может быть увеличена до любых размеров в пределах 50—1000 мм. Схема прибора показана на рис. 53.

Прибор прижимается к испытываемой детали при помощи струбцины, не показанной на схеме. Расстояние между нижним ребром призмы 1 и острием ножа 2 является базой прибора. Жесткая рамка прибора 6 вместе с призмой 1 составляет часть прибора, воспринимающую деформацию. Частью прибора, увеличивающей деформацию, являются рычаг 3, жестко соединенный с призмой 1, и стрелка 5, шарнирно соединенная с рычагом 3 тягой 4. Стрелка 5 верхним концом шарнирно прикреплена к рамке. По шкале 7 производятся отсчеты.



Рис. 52.

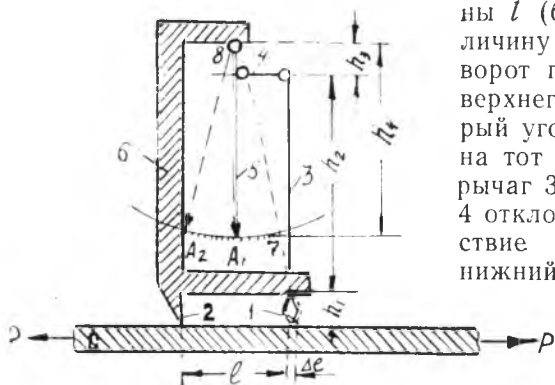


Рис. 53.

ны l (база прибора) на величину Δl произойдет поворот призмы 1 вокруг ее верхнего ребра на некоторый угол. Вместе с призмой на тот же угол повернется рычаг 3 и при помощи тяги 4 отклонит стрелку 5. Вследствие поворота стрелки 5 нижний конец ее переместится по шкале 7 на величину ΔA с отсчетом A_1 на отсчет A_2 . Разность отсчетов по шкале пропорциональна

удлинению Δl . Коэффициент K увеличения зависит от соотношения плеч рычагов 3 и 5 и равняется

$$K = \frac{\Delta A}{\Delta l} = \frac{h_2 h_4}{h_1 h_5}.$$

Обычно увеличение прибора R равно 1000—1200. Если известен коэффициент увеличения прибора, то по разности отсчетов легко определяется удлинение

$$\Delta l = \frac{\Delta A}{R}.$$

СТРЕЛОЧНЫЙ ИНДИКАТОР

Стрелочный индикатор предназначен для непосредственного измерения линейных перемещений, схема его представлена на рис. 54. Основанием прибора является корпус 1, внутри которого в диаметральной плоскости может перемещаться мерительный стержень 2 с нарезанными зубьями, образующими зубчатую рейку. При поступательном движении мерительного стержня зубья рейки приводят во вращение систему зубчатых колес (4, 5, 6, 7, 8). На оси последнего зубчатого колеса 8 укреплена указательная стрелка 9, передвигающаяся по круговому циферблату 10. Передаточные числа зубчатой рейки и системы зубчатых колес подобраны таким образом, что при перемещении мерительного стержня на 0,01 мм стрелка передвигается на одно деление кругового циферблата, разбитого на 100 делений. Следовательно, при перемещении мерительного стержня на один мм указательная стрелка описывает полный круг.

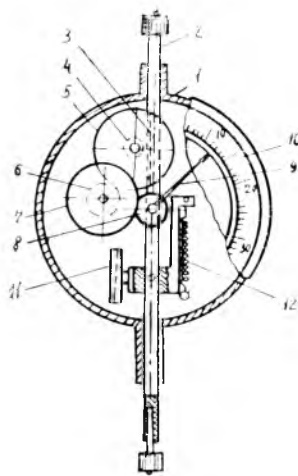


Рис. 54.

На оси зубчатых колес 4 и 5 укреплена малая стрелка (на рис. 122 не показана). Малая стрелка совершает один оборот при перемещении мерительного стержня на 10 мм. Циферблат малой стрелки разбит на 10 делений; цена одного деления 1 мм.

Таким образом, стрелочный индикатор измеряет линейные перемещения до 10 мм с точностью 0,01 мм.

Для согласования движений большой и малой стрелок прибора мерительный стержень перемещают до тех пор, пока малая стрелка не остановится на каком-либо делении своего циферблата. Затем поворачиваем подвижный круговой циферблат до совпадения его нулевого деления с концом указательной стрелки. После этого можно отпустить мерительный стержень. Рамка 11 служит для предотвращения проворачивания мерительного стержня. К рамке крепится пружинка 12, оттягивающая мерительный стержень в крайнее положение.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Таблица 1

Механические свойства углеродистых сталей, кг/мм

Марки стали	σ_B	σ_T	τ_T	σ_{-1p}	σ_{-1}	τ_{-1}
10, Ст. 1	32—42	18	14	12—15	16—22	8 —12
15, Ст. 2	35—45	20	14	12—16	17—22	8,5—13
20, Ст. 3	40—50	22	16	12—16	17—22	10 —13
25, Ст. 4	43—55	24	—	—	19—25	—
30	48—60	26	17	17—21	20—27	11 —12
35, Ст. 5	52—65	28	19	17—22	22—30	13 —18
45, Ст. 6	60—75	32	22	19—25	25—34	15 —20
50	63—80	34	—	—	27—35	16 —20
45Г2	70—90	40	—	—	31—40	—
60Г	67—78	34	—	25—32	—	—

Примечание. Данные приведены для сталей, подвергнутых нормализации.

Таблица 2

Механические свойства легированных сталей кг/мм

Марка стали	σ_B	σ_T	σ_T	ζ_{-1p}	ζ_{-1}	Режим термической обработки	
						σ_{-1}	ζ_{-1}
20X	80	60	—	—	—	—	
40X	100	80	—	25	35—38	22,5	
40XH	90	75	39	29	40	24	Закалка в масле при 820°, отпуск при 500°
50XH	110	85	—	—	55	—	Закалка в масле при 820°, отпуск при 500°
30XMA	95	75	—	—	47	—	Закалка в масле при 880°, отпуск при 560°
12XH3A	95	70	40	27—32	39—47	22—26	Закалка в масле при 860°, отпуск при 150°
20XH3A	95	75	—	30—32	43—45	24,5—25,5	Закалка в масле при 820°, отпуск при 500°
18XH3A	115	85	—	36—40	54—59	33—36,5	Закалка на воздухе при 950°, вторичная — при 850°, отпуск при 160°.
25XH3A	110	95	60	31—36	46—54	28—31	Закалка в масле при 850°, отпуск при 560°
30XH3A	110	85	—	50—53,5	51—54	22—24,5	Закалка в масле при 880°, отпуск при 520°

Примечания. 1. Данные, приведенные в таблице, соответствуют образцам малого диаметра (7—10 мм).

2. В тех случаях, когда отсутствуют опытные данные о величинах пределов выносливости, можно пользоваться следующими соотношениями: $\sigma_{-1} / \sigma_B = 0,45—0,55$ (меньше значения для вязких сталей, больше — для твердых и хрупких сталей).

Механические свойства пружинных сталей, кг/мм

Название сталей	Р а с т я ж е н и е				К р у ч е н и е			
	σ_b	σ_t	σ_p	$E \cdot 10^4$	τ_b	τ_t	$G \cdot 10^3$	Предел выносливости при кручении в пульсирующем цикле
Средисуглеродистая	150—160	100—120	75—90	2,1·10 ⁴	85—110	60—80	8,1	50—65
Высокоуглеродистая	145—170	95—135	80—100	2,0	110—140	65—90	7,6	50—70
			2,2				8,3	
Хромованадиевая	160—175	150—160	90—100	2,1	170—130	95—100	8,0	55—60
Кремнемарганцовая	160—170	140—150	90—95	2,05	135	95—100	7,6	50—55
Кремневанадиевая	140—150	95—105	60—65	2,3·10 ⁴	120—125	90	8,3	45—50

П р и м е ч а н и е. Предел выносливости пружины при симметричном цикле $\tau_{-1} = 0,6 \tau_0$; диаграмма предельных напряжений для пружины характеризуется коэффициентом $\psi \tau = 0,2$.

Таблица 4

Механические свойства чугунов с шаровидным графитом, кг/мм²

Содержание феррита, %	σ_B	σ_T	τ_B	σ_{-1}
5	80	60	70	33
45	67	43	56	28
80	50	36	44	26
90	50	34	40	25
100	48	32	37	24

Таблица 5

Механические свойства легких сплавов в термообработанном состоянии
(в кг/мм²)

Марка сплава	σ_B	σ_T	σ_{-1}
АЛ1	15—31	12—25	5,5—11
АС1	16—20	6—14	4,5—6
ДЗП	34	21	10
Д16	47	33	11,5
Д18	30	17	9,5
АК2	42	28	10
АК8	49	38	11,5—13
АМц	10—19	3,5—17,5	5 — 7
АМ2	18,5—27,5	9,8—25,3	12 —14,5
Мл3	17—18	5,5	5,5
Мл4	19—26	9—12	6 —8
Мл5	15—27	8—12	4 —10
МА1	21—30	12—20	7,5
МА2	26—27	16—18	11
МА3	30—34	22	13 —15
МА5	30—34	19	13

Примечание. База предела выносливости = (2—5) 10⁷

Таблица 6

**Механические свойства конструкционных
неметаллических материалов**

Материал	Марка	Удельный вес, г/см ³	$\sigma_{вр}$	$\tau_{вых}$	σ_{-1}
			КГ/мм ²		
Гетинакс	Б	1,3 — 1,4	10	16	2—4
Текстолит	ПТК	1,3 — 1,4	8—10	15—25	2
Дельта — древесина	ДСП10	1,25— 1,45	22—30	15—18	4—6
Стекло — пластмассы	АГ4С	—	12—16	28—37	9,5
	Р 49С	—	40—46	30	11,5
	ЗЗ18С	—	42—48	36	12,5

Таблица 7

**Значения коэффициентов влияния асимметрии цикла на прочность
для сталей в зависимости от предела прочности**

Коэффициенты ψ	$\sigma_{в}$ в КГ/мм ²				
	35—55	52—75	70—100	100—120	120—140
ψ_{σ} (изгиб и растяжение)	0,0	0,05	0,1	0,2	0,25
ψ_{τ} (кручение)	0,0	0,0	0,05	0,1	0,15