

25.9.201

Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ И ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



Кафедра технической механики
и прочности

**МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ
СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА
ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА**

Методические указания к лабораторным работам
для студентов всех специальностей

Второе издание, исправленное



Санкт-Петербург 2008

УДК 539.3/8 (031)

Деменчук Н.П., Петрова С.Б., Радченко Е.А. Механика материалов и конструкций. Сопротивление материалов. Прикладная физика. Техническая механика: Метод. указания к лабораторным работам для студентов всех спец. 2-е изд., испр. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2008. – 36 с.

Представлены оборудование и приборы, используемые в лабораторной технике. Дано описание основных видов испытаний материалов и методики определения их механических характеристик. Приведены данные о влиянии различных факторов на механические свойства материалов.

Рецензент
Профессор Д.П. Малявко

Рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

© Ленинградский технологический институт холодильной промышленности, 1993

© Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий, 2008

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ, УСТАНОВКИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

В лаборатории сопротивления материалов изучают свойства материалов, проявляющиеся при их нагружении; проверяют гипотезы и теоретические выводы, связанные с расчетом как элементов, так и конструкций в целом; изучают напряженно-деформированное состояние отдельных элементов конструкций.

В связи с их целевым назначением машины и установки, входящие в оборудование лаборатории, можно разделить на следующие виды:

- машины для статических испытаний;
- машины для динамических испытаний;
- комбинированные машины (статические, имеющие приставки – пульсаторы для создания динамических нагрузок);
- специальные стенды и установки для моделирования работы конструкций;
- установки для исследования напряженного состояния элементов конструкций с помощью специальных экспериментальных методов.

Все разнообразные испытательные машины имеют указанные ниже основные устройства:

1. Устройства, создающие усилия; в соответствии с принципом их действия, существует два типа таких устройств:

- а) механические, из них наиболее распространенные – винтовые (шпиндельные). Усилие создается путем вывинчивания (вращения) винта относительно гайки, не имеющей линейного перемещения;
- б) гидравлические, в которых усилие создается в цилиндре (шток поршня связан с образцом).

2. Силоизмерительные устройства для регистрации приложенной нагрузки. В наиболее распространенных схемах нагрузка, прикладываемая к образцу, уравновешивается с помощью маятникового противовеса, угол отклонения которого пропорционален нагрузке, и его можно измерить.

3. Устройства для установки и закрепления образца.

Машины, как правило, имеют диаграммный аппарат, позволяющий записывать усилие на образце и его деформацию в процессе нагружки.

Название машин указывает на способ создания усилия, вид силоизмерительного устройства, деформацию, осуществляемую машиной, и максимальное создаваемое усилие.

Рассмотрим принципы действия основных устройств испытательных машин на примере описания винтовой машины и гидравлической машины для испытания на растяжение.

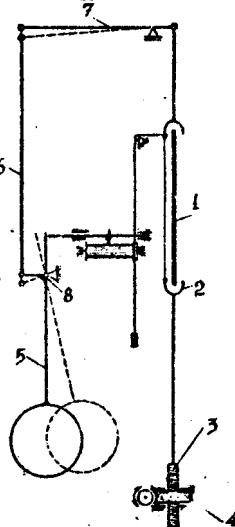


Рис. 1

При испытании материалов на винтовой машине с маятниковым противовесом типа Р-5 (рис. 1) образец I устанавливается в захватах 2, нижний из которых соединен с нагружающим винтом 3, имеющим вертикальное перемещение относительно гайки 4, лишенной поступательного перемещения. Вращение гайки осуществляется через редуктор от электродвигателя. Измерение усилия производится с помощью маятникового противовеса 5, соединенного тягами 6 и 7 с верхним захватом и качающегося вокруг оси 8. Верхний конец рычага маятника соединен рейкой с картой диаграммного аппарата. Деформация образца определяется путем измерения величины перемещения нижнего захвата относительно верхнего. Это достигается с помощью нерастяжимой нити, прикрепленной одним концом к нижнему захвату и перекинутой через блок, укрепленный на верхнем захвате. К другому концу нити подведен груз, создающий постоянное натяжение нити. Перемещение нити приводит во вращение барабан с диаграммной лентой.

Приведем описание наиболее распространенной схемы гидравлической машины для испытаний на растяжение (рис. 2).

Образец I устанавливается в захватах 2, верхний из которых через траверсу 3 и тяги 4 связан с поршнем 5, перемещающимся в цилиндре 6. Насосная станция 7 и силоизмерительное устройство 8 с диаграммным аппаратом объединены в отдельном блоке. Насосная станция нагнетает масло по трубопроводу 9 в цилиндр, заставляя перемещаться вверх поршень и, следовательно, верхний захват, осуществляя растяжение образца.

При определении механических характеристик материала, испытаниях конструкций или моделей необходимо получить значения деформаций, перемещений и напряжений. Следует заметить, что напряжения непосредственно замерить невозможно, поэтому необходимо опытным путем определить деформации и, используя формулы физических соотноше-

ний, рассчитать напряжения. Следовательно, в экспериментальных работах во всех случаях производится измерение деформаций или перемещений. Так, например, при растяжении стержня (рис. 3) точка А (сечение 1-1) и точка В (сечение 2-2) получат перемещения δ_A и δ_B вследствие удлинения образца. Расстояние же между точками А и В (или между сечениями 1-1 и 2-2) увеличится на некоторую величину $\Delta L = L_1 - L$, называемую деформацией на длине L .

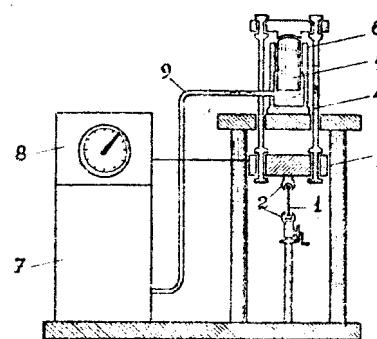


Рис. 2

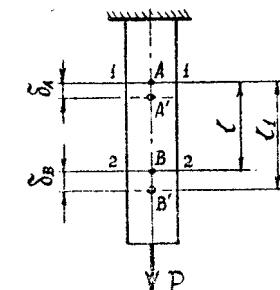


Рис. 3

Все деформации (перемещения) разделяются на линейные и угловые. Назначение измерительных приборов соответствует этому разделению.

Рассмотрим далее приборы, предназначенные для измерения перемещений и деформаций.

ИНДИКАТОРЫ

Линейные перемещения удобно измерять индикатором часового типа (рис. 4, а). Его корпус неподвижно закрепляется таким образом, чтобы штифт I касался поверхности А, перемещение которой (в направлении оси штифта) измеряется. Поступательное перемещение штифта преобразуется во вращательное движение шестерни 2 с помощью зубчатой рейки, нарезанной на штифте.

Вращение шестерни 2 передается через систему шестерен к двум стрелкам – большой 3 (центральной) и малой 4. Число зубьев шестерен подобрано так, что перемещение штифта I, составляющее 1 мм, соответствует одному полному обороту большой стрелки 3 и смещению малой

стрелки 4 на одно деление. В соответствии с этим цена деления шкалы большой стрелки составляет 0,01 мм, а малой - 1 мм. Обе стрелки имеют две шкалы - черную и красную, - позволяющие производить отсчет перемещений в противоположных направлениях. Шкала для большой стрелки может поворачиваться.

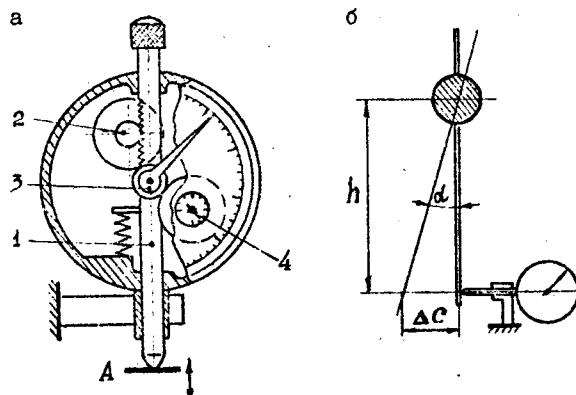


Рис. 4

Индикатор дает возможность измерять с его помощью и угловые перемещения. Для этого в соответствующем сечении стержня закрепляется рычаг длиной h , перпендикулярно которому устанавливается шток индикатора (рис. 4, б). Тогда искомый угол поворота α определяется из выражения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta c}{h},$$

где Δc - перемещение, измеренное индикатором.

ТЕНЗОМЕТРЫ

Приборы, предназначенные для измерения малых деформаций, называются тензометрами.

В соответствии с принципом действия существуют механические, электрические, оптические, электронные, гидравлические и другие тензометры.

Расстояние (l) между двумя точками, изменение которого измеряется с помощью тензометра, называется базой прибора.

Тензометр состоит из трех основных частей: I - устройство, воспринимающее деформацию; 2 - устройство, служащее для увеличения деформации; 3 - устройство для отсчета и регистрации показаний.

Рассмотрим основные типы тензометров более подробно.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ТЕНЗОМЕТРЫ

Из механических используются тензометры Гугенбергера, тензометр МИЛ, оптические, зеркальные и другие тензометры.

Принцип действия механических тензометров основан на использовании двухшарнирных рычагов, позволяющих небольшие перемещения или деформации, которые необходимо замерить, увеличить до величин, по которым можно снять отсчет по шкале визуально, без дополнительных приспособлений. Шкала имеет зеркальную подложку для исключения ошибки от параллакса. При снятии отсчета наблюдателем стрелка должна совпадать с ее зеркальным изображением. Все механические тензометры имеют свою цену деления шкалы K , т.е. величину абсолютной деформации, соответствующую одному делению шкалы, тогда $\Delta l = K \Delta A$, где ΔA - разность начального и конечного отсчетов по шкале прибора.

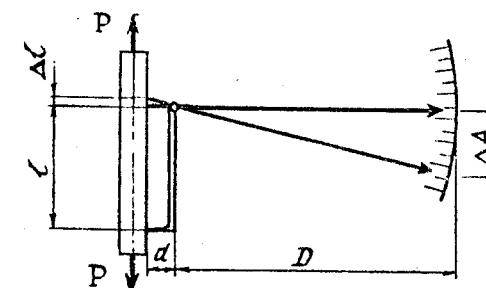


Рис. 5

Коэффициент увеличения прибора n зависит от соотношения плеч рычага d и D . Так, перемещение стрелки на ΔA (рис. 5) дает увеличение деформации Δl в $n = \frac{\Delta A}{\Delta l} = \frac{D}{d}$ раз. Зная K и измерив ΔA , можно вычислить деформацию

$$\Delta l = \frac{\Delta A}{n} = k \Delta A$$

Тензометр Гугенбергера

Схема прибора показана на рис. 6. Обычно база прибора ℓ составляет 20 мм. Однако применение специального удлинителя позволяет увеличить базу до 1000 мм.

Деформацию воспринимает призма 1, к которой жестко крепится рычаг 2, соединенный тягой 3 со стрелкой 4, качающейся вокруг шарнира 5. Увеличение деформации происходит за счет соотношения плеч рычагов 1, 2 и 4. Коэффициент увеличения прибора составляет $n = 1000+1200$.

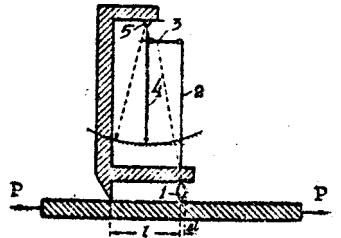


Рис. 6

ТЕНЗОМЕТР МИЛ

В названии прибора – начальные буквы фамилий его конструкторов Морозова Ю.Н. и Ильина А.П.

База прибора $\ell = 100$ мм. Коэффициент увеличения составляет 500.

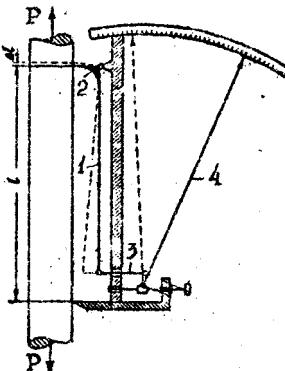


Рис. 7

Недостатки механических тензометров очевидны: их не всегда можно установить, чувствительность данных тензометров иногда недостаточна. Повысить чувствительность таких тензометров можно, например, введя дополнительные рычаги, но это значительно увеличивает рабочий диапазон прибора.

Существенно повысить рабочий диапазон, воспринимающим

деформацию, и шкалой без нарушения линейной характеристики прибора (пропорциональность между измеряемым перемещением и отсчетом по шкале) можно с помощью светового луча. Для этого используются оптические (зеркальные) тензометры.

ОПТИЧЕСКИЕ (ЗЕРКАЛЬНЫЕ) ТЕНЗОМЕТРЫ

Принцип измерения перемещений с помощью оптических тензометров показан на схеме (рис. 8).

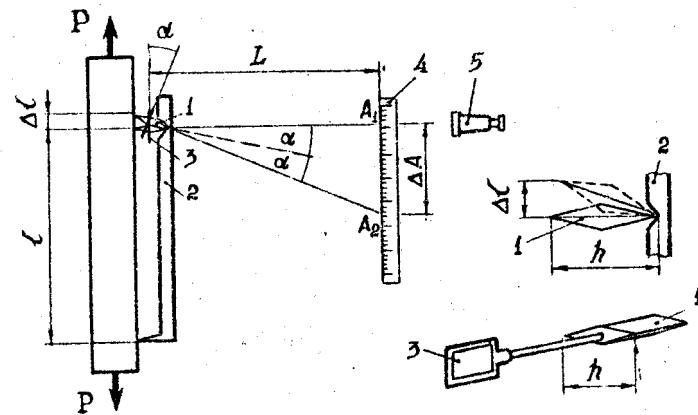


Рис. 8

Деформация образца воспринимается призмой 1, качающейся в углублении основания тензометра 2. К призме жестко прикреплено зеркало 3, поворачивающееся вместе с призмой на угол при деформации образца. На расстоянии L от зеркала устанавливается шкала 4 и зрительная труба 5. В исходном положении зеркала деление A_1 шкалы (проецируется на зеркало и отражается в зрительную трубу по нормали) фиксируется наблюдателем. При деформации образца на $\Delta\ell$ призма вместе с зеркалом повернется на малый угол α . Наблюдатель зафиксирует деление A_2 . Так как между падающим лучом A_1 и отраженным лучом A_2 угол составляет 2α , то

$$\tan 2\alpha \approx 2\alpha = \frac{A_2 - A_1}{L} = \frac{\Delta A}{L}. \quad (I)$$

С другой стороны, перемещение конца призмы соответствует деформации

$$\Delta l = h \operatorname{tg} \alpha \approx h \alpha, \quad (2)$$

где h — высота призмы (дана в паспорте прибора).

Тогда из (1) и (2)

$$\Delta l = k \Delta A,$$

где цена деления k составляет $k = \frac{h}{2L}$.

Тензометр Мартенса

Самым простым и распространенным прибором для измерения угловых деформаций является зеркальный прибор Мартенса. Измерения с помощью этого прибора осуществляются следующим образом (рис. 9).

В сечении I вала с помощью струбцины 2 закрепляется зеркало 3 на расстоянии L от шкалы 4. Зрительная труба 5 устанавливается рядом со шкалой и направляется на зеркало. В исходном положении через зеркало наблюдатель фиксирует отсчет A_1 по шкале.

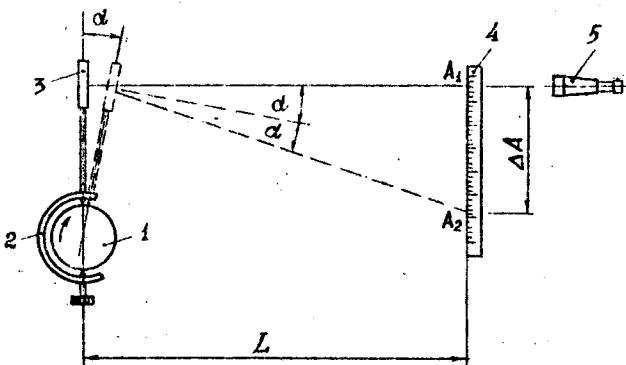


Рис. 9

После поворота сечения вместе с зеркалом на угол α наблюдатель зафиксирован отсчет A_2 . Угол поворота сечения α определяется

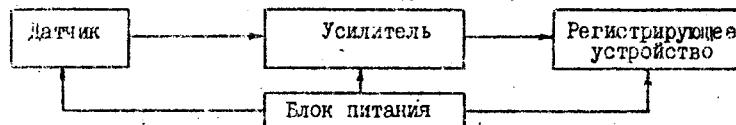
из выражения

$$\operatorname{tg} 2\alpha \approx 2\alpha = \frac{A_2 - A_1}{L}.$$

Откуда $\alpha = \frac{\Delta A}{2L}$.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕНЗОМЕТРЫ

Структура большинства электрических тензометров может быть представлена схемой



Усилитель не является неотъемлемой частью прибора, так как в некоторых случаях величина сигнала, выдаваемого датчиком, достаточно для регистрации.

Принцип действия электрических тензометров зависит от датчика, который может быть полупроводникового, резисторного, электронного, пьезоэлектрического, емкостного, электромагнитного и других типов.

Наибольшее распространение на практике получили схемы на основе датчиков сопротивления (тензорезисторов). Широкому использованию тензорезисторов способствуют в первую очередь их малые размеры и масса, возможность определения статических и динамических деформаций, простота конструкции, низкая стоимость и др. В настоящее время в практике измерений используются проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. Рассмотрим устройство и использование основных типов электрических тензометров подробнее.

Проволочные тензорезисторы

В наиболее простом случае проволочный тензорезистор представляет собой отрезок проволоки длиной ℓ , жестко закрепляемый на деформируемой детали. Сжатие или растяжение детали вызывает соответствующую деформацию проволоки, в результате чего изменяются ее длина и поперечное сечение, что приводит к изменению электрического сопротивления проволоки.

Частное от деления относительного изменения сопротивления на относительное изменение длины проводника характеризуется постоянной величиной, называемой коэффициентом тензочувствительности (K)

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta \ell/\ell} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon},$$

где R - сопротивление проволоки, ℓ - первоначальная длина проволоки, ΔR - изменение сопротивления проволоки, $\Delta \ell$ - изменение длины проволоки, ε - линейная деформация.

Для изготовления проволочных тензорезисторов применяют материал с высоким коэффициентом тензочувствительности ($2^{\pm}0,2$). В наибольшей степени этому требованию отвечает проволока из константана (сплав меди - 60 % и никеля - 40 %) диаметром 20–30 мкм. Конструктивно тензорезисторы выполняются в виде решетки, состоящей из нескольких петель проволоки, наклеенной на тонкую бумажную или лаковую (пленочную) основу. К концам проволоки подпаиваются более толстые проводники, позволяющие подключать датчик к измерительной схеме. Сверху решетка заливается такой же бумагой (пленкой), рис. 10. Такие датчики позволяют измерять деформацию до значения $\varepsilon = 0,01$.

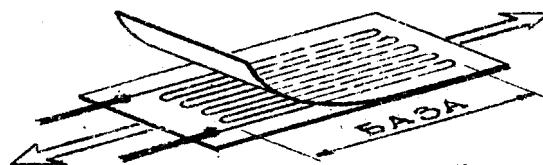


Рис. 10

Фольговые тензорезисторы

Фольговые тензорезисторы имеют решетку не из круглого провода, как у проволочных тензорезисторов, а из тонких полосок фольги прямоугольного сечения толщиной 4–12 мкм. Преимущество этих тензорезисторов состоит в том, что большая площадь контакта полосок фольги с деталью способствует интенсивному теплоотводу, позволяя увеличить силу тока и повысить чувствительность датчиков.

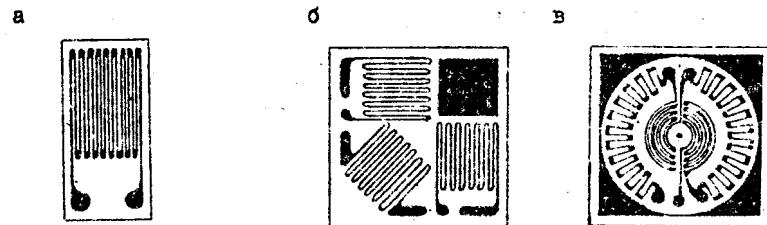


Рис. II

Тензометры почти не обладают поперечной чувствительностью и позволяют измерять деформацию до значения $\varepsilon = 0,03$. Технология изготовления фольговых тензорезисторов позволяет получать решетки сложной формы. На рис. II представлены прямоугольная (а), розеточная (б) и мембранные (в) решетки.

Полупроводниковые тензорезисторы

Основное отличие полупроводниковых тензорезисторов от проволочных состоит в большом (до 50 %) изменении сопротивления датчика при деформации. Их чувствительность в 50–60 раз выше, чем у проволочных. Высокий уровень выходного сигнала измерительных схем не требует применения сложных усилителей.

К недостаткам данных тензорезисторов следует отнести их малую механическую прочность и нелинейность характеристики. В настоящее время ведутся работы по созданию гибких пленочных тензорезисторов.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Тензорезисторы наклеиваются по специальной технологии на изучаемый материал базой в направлении измеряемой деформации. Изменение сопротивления тензорезисторов, вызываемое деформацией, весьма мало (от нескольких миллионов до десятых долей ома), поэтому для его измерения, как правило, используют мостовую схему (рис. 12).

Условием равновесия моста (через гальванометр ток не проходит) является соотношение

$$R_1 R_3 = R_2 R_4.$$

При выполнении этого условия разность потенциалов на вершинах измерительной диагонали АВ равна нулю. В качестве R_1 подключается тензорезистор, наклеенный на изучаемый материал (рабочий датчик).

Деформация материала приводит к деформации тензорезистора, изменению его сопротивления и разбалансу моста. В измерительной диагонали появляется пропорциональный деформации ток (разность потенциалов в точках А и В), который можно зафиксировать гальванометром. Следовательно, о деформации материала можно судить по показаниям шкалы гальванометра. Это прямой метод измерения.

Изменение температурного поля в зоне измерения приводит к тепловой деформации образца и тензорезистора. В этом случае к деформациям от действия нагрузки добавляется температурная деформация. Разделить их трудно. Поэтому для исключения влияния температуры на измерения в качестве R_2 подключают идентичный рабочему компенсационный датчик, который наклеивается на недеформируемую нагрузкой пластинку из исследуемого материала и помещается в одну температурную зону с рабочим датчиком. Так как R_1 и R_2 включены в соседние плечи моста, то однинаковое изменение их сопротивления от действия температуры не скажется на равновесии моста и произойдет термокомпенсация.

Применение прямого метода измерения с использованием гальванометра не всегда удобно, особенно в полевых условиях, поэтому чаще всего используются схемы мостов (рис. 13), в которых в измерительной диагонали имеется нуль-прибор, показывающий только наличие тока в диагонали. Между сопротивлениями R_1 и R_4 включают реохорд, сопро-

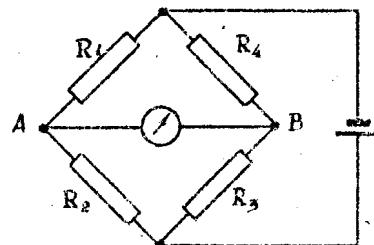


Рис. 12

тивление которого делится между соседними плечами моста. Когда образец не находится в непряженном состоянии, мост уравновешивают, изменяя сопротивление плеч реохордом так, чтобы в диагонали ток отсутствовал (чул-прайор показывает нуль), и фиксируют по шкале положение движение реохорда. После нагружения образца мост балансируют снова и считывают отсчет по шкале. Разность отсчетов будет пропорциональна измеряемой деформации.

Промышленность выпускает готовые схемы для измерения статических деформаций, называемых тензостанциями. На рис. 13 пунктиром обведены элементы, входящие в тензостанцию. В так называемых "ручных" тензостанциях балансировка моста производится экспериментатором.

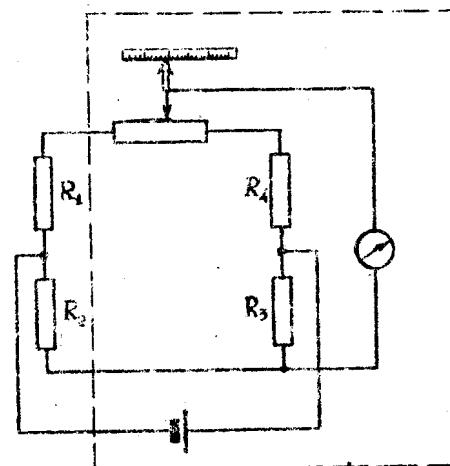


Рис. 13

Существуют автоматические тензостанции (рис. 14), в которых в измерительную диагональ включается усилитель, передающий сигнал к электродвигателю, имеющему связь с реохордом. Сигнал разбаланса после усилителя включает электродвигатель, который, перемещая движок реохорда, уравновешивает мост.

Особенно удобны в работе приборы, называемые многоканальными тензометрическими усилителями, в которых смонтирован блок питания датчиков переменным током и блок усиления сигнала разбаланса. Они позво-

позволяют измерять как статические, так и динамические процессы и использовать для регистрации осциллографы, самопищущие и показывающие приборы.

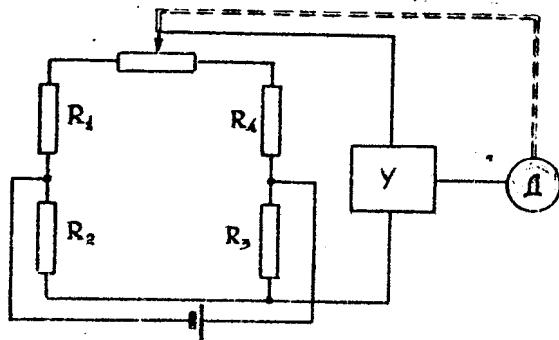


Рис. 14

К многоканальным приборам относятся и тензостанции, позволяющие одновременно измерять деформации (перемещения) по 100 и более каналам с автоматической записью результатов измерений.

В практике лабораторных работ ЛТИХП используется тензостанция "ИДД" с цифровой индикацией деформаций.

ИЗМЕРЕНИЕ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

При исследовании напряженного состояния в элементах сложной конфигурации часто бывает неизвестна не только величина, но и направление главных напряжений (и, соответственно, главных деформаций). В таком случае практикуется установка в исследуемой области сразу трех датчиков в направлениях, составляющих углы в 45° , так называемой розетки датчиков. По трем замеренным деформациям ε_1 , ε_{\perp} , ε_2 могут быть вычислены главные деформации ε_1 , ε_2 и угол φ_0 , определяющий положение главных осей. Формулы для их вычисления вытекают из следующих соображений.

Пусть x и y — главные оси деформированного состояния (рис. 15). Ось I одного из датчиков расположена под углом φ_0 к направлению главной оси x . Величина φ_0 и деформации ε_1 и ε_2 в направлении главных осей пока неизвестны. Пусть база датчика равна длине отрезка dS . После приложения нагрузки точки A и B

переместятся в новое положение A' и B' . Компоненты полного перемещения точки A будут u и v , а точки B соответственно

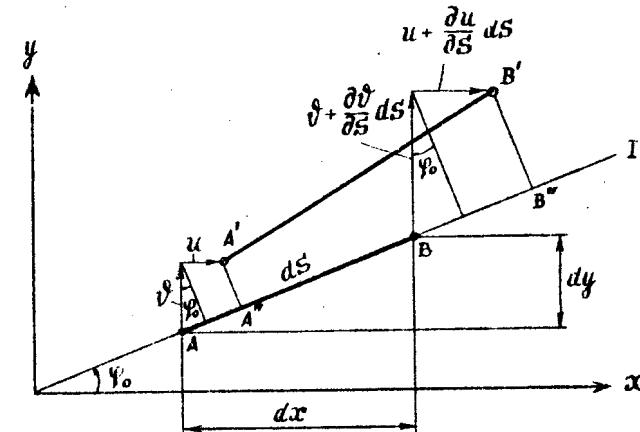


Рис. 15

$u + \frac{\partial u}{\partial S} dS$ и $v + \frac{\partial v}{\partial S} dS$. Из рис. 15 видно, что полное изменение длины AB по направлению I будет равно

$$\Delta S = A''B'' - AB = BB'' - AA'' = [(u + \frac{\partial u}{\partial S} dS) \cos \varphi_0 + (v + \frac{\partial v}{\partial S} dS) \sin \varphi_0] - [u \cos \varphi_0 + v \sin \varphi_0] = \frac{\partial u}{\partial S} dS \cos \varphi_0 + \frac{\partial v}{\partial S} dS \sin \varphi_0.$$

Линейная деформация по направлению I составит

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta S}{dS} = \frac{\partial u}{\partial S} \cos \varphi_0 + \frac{\partial v}{\partial S} \sin \varphi_0.$$

Учитывая, что $dS = \frac{dx}{\cos \varphi_0} = \frac{dy}{\sin \varphi_0}$,

$$\text{получаем } \varepsilon_I = \frac{\partial u}{\partial x} \cos^2 \varphi_0 + \frac{\partial v}{\partial y} \sin^2 \varphi_0 = \varepsilon_1 \cos^2 \varphi_0 + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi_0.$$

Для трех осей, совпадающих с осями датчиков в розетке

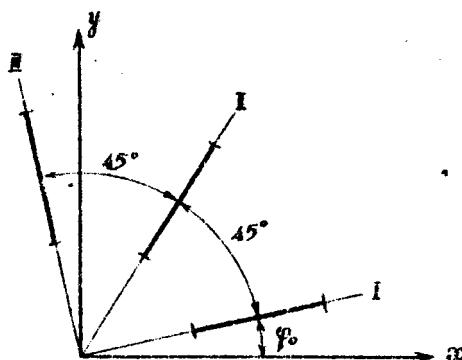


Рис. 16

(рис. 16), получаем соответственно

$$\epsilon_1 = \epsilon_1 \cos^2 \varphi_0 + \epsilon_2 \sin^2 \varphi_0 ;$$

$$\epsilon_{II} = \epsilon_1 \cos^2 (\varphi_0 + 45^\circ) + \epsilon_2 \sin^2 (\varphi_0 + 45^\circ) ;$$

$$\epsilon_{III} = \epsilon_1 \cos^2 (\varphi_0 + 90^\circ) + \epsilon_2 \sin^2 (\varphi_0 + 90^\circ) .$$

Решая эти уравнения относительно главных деформаций ϵ_1 и ϵ_2 и угла φ_0 , получаем

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_I + \epsilon_{III}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_I - \epsilon_{II})^2 + (\epsilon_I - 2\epsilon_{II} + \epsilon_{III})^2} ;$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_I + \epsilon_{III}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_I - \epsilon_{II})^2 + (\epsilon_I - 2\epsilon_{II} + \epsilon_{III})^2} ;$$

$$\operatorname{tg} 2\varphi_0 = \frac{\epsilon_I - 2\epsilon_{II} + \epsilon_{III}}{\epsilon_I - \epsilon_{II}} .$$

ДИАГРАММА РАСТЯЖЕНИЯ МАЛОУГЛЕРОДСТОЙ СТАЛИ

Сталь является основным материалом в машиностроении. Поэтому изучение ее поведения при нагружении имеет большое значение.

Для суждения о прочности, вычисления упругих деформаций, оценки способности материала к образованию остаточных деформаций необходимы числовые показатели, называемые характеристиками материала. Так как речь идет о поведении материала под нагрузкой, т.е. под механическим воздействием, то эти характеристики называются механическими. Различают прочностные характеристики, упругие и характеристики пластичности материала. Очевидно, что все они могут быть получены только из эксперимента. Основным видом эксперимента является статическое испытание материала на растяжение до разрыва (рис. 17).



Рис. 17

Для обеспечения возможности сравнения результатов испытаний образцы должны быть геометрически подобны, т.е. (применительно к цилиндрическим образцам) отношение длины образца к его диаметру должно быть одним и тем же. Обычно принимают $l_0 = 5 d_0$ и $l_0 = 10 d_0$. Задача состоит в том, чтобы проследить поведение растягиваемого образца от начала нагружения до разрыва. Процесс испытания сопровождается вычерчиванием на диаграммном аппарате кривой, отображающей зависимость между нагрузкой P и деформацией Δl . Эта зависимость называется диаграммой растяжения. На рис. 18 показана типичная для малоуглеродистой стали диаграмма $P = f(\Delta l)$.

Отметим механический смысл площади диаграммы. Пусть в некоторый момент испытания t сила, растягивающая образец, и его удлинение имеют значение соответственно P_t и Δl_t . Предположим, что образец получил дополнительное дифференциальное малое удлинение $d(\Delta l_t)$, на протяжении которого силу P можно считать постоянной. Удлинение $d(\Delta l_t)$ потребует работы $dA = P_t d(\Delta l_t)$. Эта работа выражается площадью заштрихованной полоски (см. рис. 18). Значит, вся площадь, ограниченная диаграммой $\Omega = \int_0^{\Delta l_f} P_t d(\Delta l_t) = A$, представляет собой

работу, затраченную на разрыв образца.

На рис. 19 показана характерная диаграмма растяжения для отожженной малоуглеродистой стали.

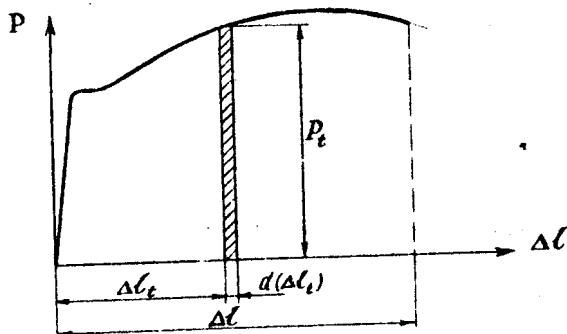


Рис. 18

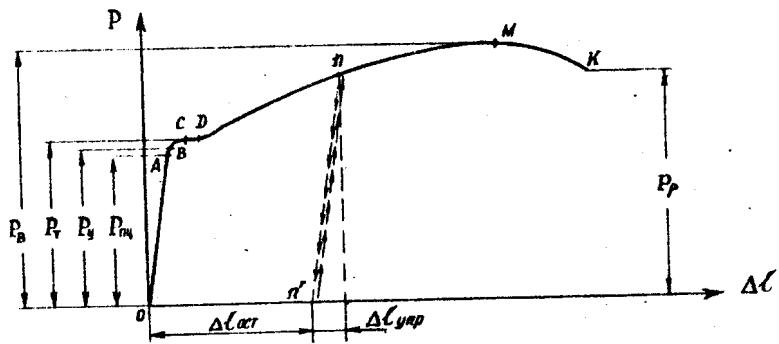


Рис. 19

OA - участок пропорциональности (материал следует закону Гука). На участке CD - материал "течет". CD - участок текучести. Участок DM называется участком упрочнения материала. В точке M кривая достигает максимального значения. Сила $P_{max} = P_p$ соответствует макси-

мальной нагрузке, которую может выдержать образец.

На участке диаграммы от начала координат и до точки M образец деформируется равномерно по всей длине. В точке M при $P_{max} = P_p$ на образце появляется местное сужение - шейка (рис. 20, а). Начиная с этого момента, деформация (удлинение) концентрируется в районе шейки, причем для роста деформации в связи с быстрым утоньшением (развитием) шейки требуется все меньшее усилие, чем и объясняется спад нагрузки на участке MK . В точке K происходит разрыв образца по шейке при $P_p < P_{max}$ (рис. 20, б).

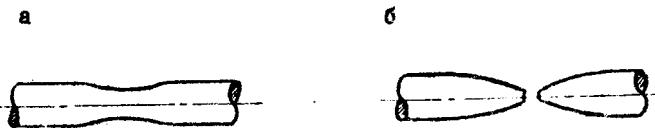


Рис. 20

Разгрузка. Понятие о наклепе

Если образец нагрузить силой, превышающей величину P_t , а затем начать разгружать, то линия разгрузки, как показывает опыт, будет параллельна участку OA диаграммы (прямая $n'n'$ на рис. 19).

После разгрузки в образце сохранится некоторая остаточная деформация $\Delta l_{ост}$, а упругая $\Delta l_{упр}$ полной деформации исчезнет. Значит, упругие деформации возникают в образце и за пределом упругости, причем они подчиняются закону Гука. При повторном нагружении линия нагрузки практически совпадает с линией разгрузки, а часть диаграммы, расположенная левее точки n , не вновь возобновляется. Одновременно уменьшаются пластические свойства, материал становится более хрупким. Повышение предела пропорциональности и уменьшение пластичности материала вследствие предварительной вытяжки за предел упругости называется НАКЛЕПОМ (нагартовкой). Это явление используется в технике для повышения упругих свойств материала. Наклеп можно снять путем отжига материала. Механические свойства металла при этом восстанавливаются.

Условная диаграмма $\sigma - \epsilon$. Характеристики прочности

Ординаты диаграммы, представленной на рис. 19, не могут служить

характеристиками материала, так как растягивающая сила зависит от площади сечения образца. Поэтому диаграмму $P - \Delta l$ перестраивают в диаграмму $\sigma - \epsilon$ (рис. 21). При растяжении образца меняются не только его продольные, но и поперечные размеры, а следовательно, и площадь сечения F . Однако это изменения до начала образования шейки невелико. Поэтому условно принимают, что площадь сечения образца постоянна. Все ординаты диаграммы $P - \Delta l$ делят на эту начальную площадь F . Вычисленные напряжения называют условными. Аналогично поступают и с абсциссами диаграммы $P - \Delta l$, деля удлинения образца, соответствующие точкам A, B, C, D, M, K , на начальную длину l_0 . В результате получают условную диаграмму $\sigma - \epsilon$, которая отличается от диаграммы $P - \Delta l$ только масштабом (см. рис. 21) и где $\sigma_{uc}, \sigma_y, \sigma_t, \sigma_a, \sigma_p$ — механические характеристики прочности:

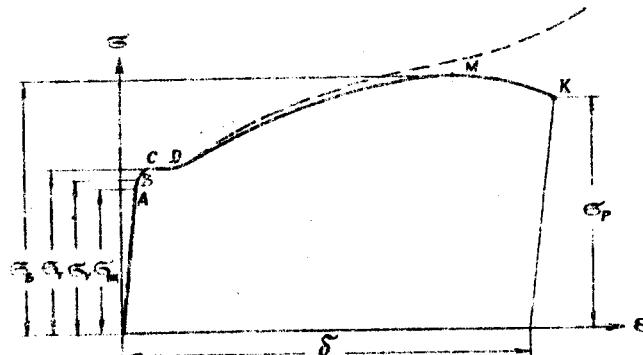


Рис. 21

- $\sigma_u = \frac{P_{uc}}{F_0}$ — предел пропорциональности — наибольшее напряжение, до которого применим закон Гука;
- $\sigma_y = \frac{P_y}{F_0}$ — предел упругости материала — наибольшее напряжение, до которого в материале наблюдаются только упругие деформации;
- $\sigma_t = \frac{P_t}{F_0}$ — предел текучести — напряжение, при котором наблюдается текучесть материала;
- $\sigma_a = \frac{P_a}{F_0}$ — предел прочности (временное сопротивление) — наибольшее напряжение для данного материала;
- $\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}$ — условное напряжение разрыва.

Точки A, B и C располагаются очень близко и для инженерных целей ограничиваются обычно значением предела текучести σ_t . Принимая во внимание, что диаграмма $\sigma - \epsilon$ не всегда имеет четко выраженную площадку текучести, условно принимают, что предел текучести σ_t — это напряжение, при котором остаточная (пластическая) деформация достигает 0,2 % от начальной длины образца, т.е. $\epsilon_t = 0,002$. На рис. 22 показано, что, проводя из точки K_1 с абсолютной $\epsilon = 0,002$ прямую, параллельную участку OA , можно получить в пересечении с кривой точку K_2 , ордината которой дает значение условного предела текучести $\sigma_t = \sigma_{ad}$.

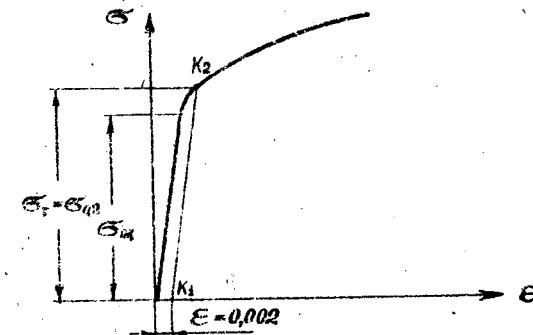


Рис. 22

Характеристика пластичности

Способность материала к пластической деформации определяется тем, насколько изменились размеры образца к моменту его разрыва. При этом различают

- относительное удлинение при разрыве δ , %

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

где l_k — конечная длина образца после разрыва;

- относительное сужение площади сечения при разрыве ψ , %

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100,$$

где F_k — площадь сечения в месте разрыва.

Величина δ представляет собой величину средней остаточной деформации на всей длине образца. Между тем, к моменту разгрузения деформации по длине образца распределены неравномерно. В районе шейки действительные значения деформации ε значительно превосходят величину деформации на цилиндрической части образца.

Для того чтобы определить истинную величину $\varepsilon_{ист}$ и ее распределение по длине образца, на его боковой поверхности до испытания наносится ряд рисок, делящих рабочую часть образца на равные части (рис. 23, а). После того, как образец испытан и разорван, обе его части составляются по месту разрыва и производится обмер отрезков между соседними рисками (рис. 23, б). Для каждого из отрезков можно вычислить величину ε_i :

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_{oi}}$$

По этим данным строят диаграмму деформаций (рис. 23, в)

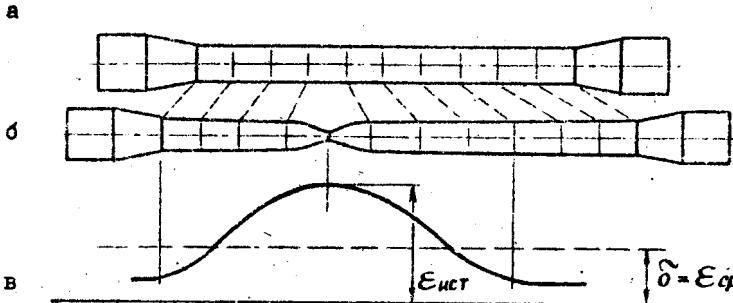


Рис. 23

Наибольшая деформация возникает в месте разрыва. Ее называют истинной деформацией при разрыве.

Истинная диаграмма растяжения

Кроме условной диаграммы $\sigma - \varepsilon$, представленной на рис. 21, можно построить и истинную диаграмму $\sigma - \varepsilon$, если делить величину силы на действительную площадь поперечного сечения в наиболее суженном месте, а соответствующие значения абсцисс ε также вычислять в наиболее суженном месте. Такая диаграмма показана на том же рис. 21 пунктирной линией. На участке диаграммы до точки M истинная диаграмма практически совпадает с условной. С образованием шейки резко увеличиваются местные напряжения и деформации в шейке. Поэтому истинная диаграмма на последнем участке существенно отличается от условной.

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

Целью испытаний является изучение поведения различных материалов и определение их механических характеристик при статическом сжатии.

Испытанию на сжатие подвергаются пластичные материалы (сталь, медь, алюминий и др.), у которых, как правило, предел пропорциональности при растяжении и сжатии примерно одинаков, поэтому испытание на сжатие является дополнением к испытанию на растяжение.

Испытывают также хрупкие материалы (чугун, бетон, камень и др.), для которых данный вид испытания является основным, поскольку при сжатии они выдерживают значительно большие напряжения, чем при растяжении.

Испытанию подвергается и древесина как материал неоднородный и анизотропный.

Испытание проводится на любом прессе, имеющем диаграммный аппарат.

Образцы материалов изготавливаются в виде цилиндров высотой h и диаметром d . Отношение $\frac{h}{d}$ должно быть в пределах $1,5 < \frac{h}{d} < 2$. При $\frac{h}{d} > 2$ оказывается влияние продольного изгиба. При $\frac{h}{d} < 1$ сила трения между образцом и опорными плитами пресса тормозят развитие деформации у торцов образца, поэтому испытание происходит в условиях сложного напряженного состояния, а не простого сжатия.

Деревянные образцы изготавливаются в виде прямоугольных призм.

Обмеренный образец устанавливается между опорными плитами пресса и подвергается статическому нагружению, в процессе которого на диагностическом аппарате получают диаграмму сжатия.

Испытание пластичного материала

Диаграмма сжатия меди показана на рис. 24, а. Участок пропорциональности переходит в небольшой участок, где наблюдается более быстрое возрастание деформаций. Однако площадки текучести не наблюдается, и нагрузка начинает интенсивно возрастать.

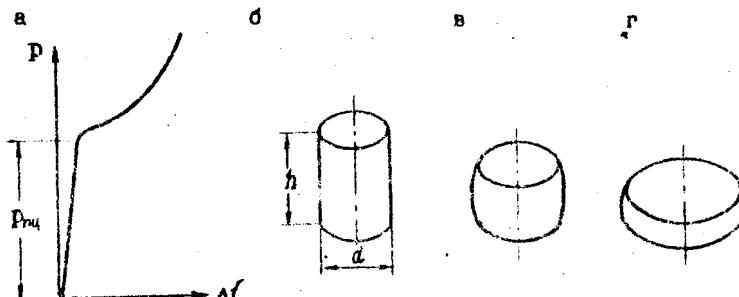


Рис. 24

Это объясняется тем, что при переходе за предел пропорциональности, с быстрым ростом пластических деформаций, происходит увеличение поперечного сечения образца, которое становится способным выдерживать все большую нагрузку. Образец принимает бочкообразную форму и может быть сплющен (рис. 24, б, в, г), не обнаруживая признаков разрушения. Таким образом, величина предела прочности при сжатии не может быть вычислена. Единственная характеристика, определяемая из опыта, - предел пропорциональности.

Испытание хрупкого материала

Диаграмма сжатия чугуна (рис. 25, а) имеет малую кривизну, которая несколько увеличивается перед внезапным разрушением образца. Слегка бочкообразная форма образца (рис. 25, в) свидетельствует о небольших пластических деформациях чугуна. Разрушению предшествует образование трещин, развивающихся параллельно оси образца или под некоторым углом к направлению сжимающей нагрузки, что объясняется наличием в материале сложного напряженного состояния.

Таким образом, опытной механической характеристикой является предел прочности.

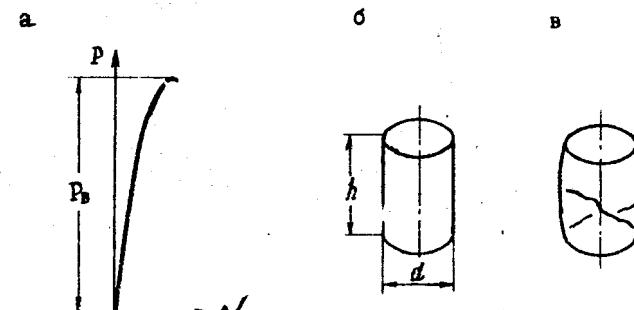


Рис. 25

Испытание древесины

Древесина является анизотропным материалом, т.е. ее механические свойства в разных направлениях различны. Согласно стандартам, испытание на сжатие древесины производится вдоль и поперек волокон при ее влажности, равной 15 % и температуре 20 °C.

Диаграмма сжатия древесины вдоль волокон показана на рис. 26, а (кривая I). Образец до разрушения претерпевает сравнительно небольшие остаточные деформации (рис. 26, б). Разрушение происходит с образованием поперечных складок и обмятием торцов. Характеристикой сжатия является предел прочности.

При сжатии древесины поперек волокон (рис. 26, а, кривая 2) наблюдается предел пропорциональности, после достижения которого происходит быстрый рост остаточных деформаций. Образец деформируется при незначительном увеличении нагрузки, однако разрушения не наблюдается. Происходит лишь спрессовывание волокон (см. рис. 26, в), и грузоподъемность образца исчерпывается. Поэтому в таких случаях условно считают, что образец достиг предела прочности при уменьшении его высоты на одну треть.

Прочность дерева при сжатии его вдоль волокон примерно в 8-10 раз выше, чем поперек. Анизотропию древесины приходится учитывать при применении дерева в сооружениях, располагая его, по возможности, так, чтобы сжимающие (растягивающие) усилия действовали по направлению наибольшего сопротивления, т.е. вдоль волокон.

а

б

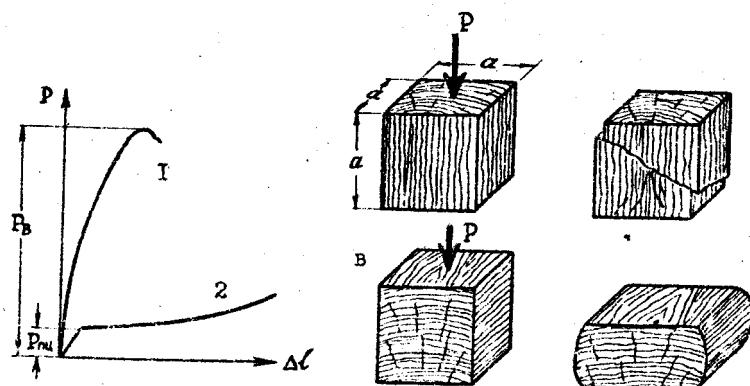


Рис. 26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ СТАЛИ

Модуль упругости E в законе Гука является коэффициентом пропорциональности между напряжением и деформацией

$$\sigma = E \epsilon.$$

Для его определения из опытов на растяжение необходимо знать напряжение и деформацию образца при определенной нагрузке

$$\sigma = \frac{P}{F}, \quad \epsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell}, \quad \text{откуда} \quad E = \frac{P \ell}{F \Delta \ell}.$$

Поэтому задача сводится к измерению деформации $\Delta \ell$ на длине ℓ при заданной нагрузке P на образец площадью поперечного сечения F .

Для измерения деформаций применяются любые приборы, предназначенные для этой цели.

Достоверные результаты получают при многократных измерениях деформаций в процессе нагружения образца равными ступенями нагрузки $\Delta P = \text{const}$, которым должны соответствовать равные деформации образца (рис. 27). Отсчет нагрузки начинают с некоторого значения P_0 , чтобы исключить нелинейность в области нуля, возникающую при

выборе зазоров между отдельными частями машины и образцом в первоначальный момент нагружения.

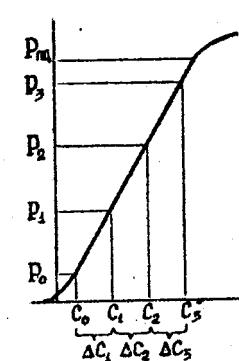


Рис. 27

P	ΔP	Показания прибора, измеряющего деформацию	
		Отсчет	Разность отсчетов
P_0		C_0	$C_1 - C_0 = \Delta C_1$
P_1	$P_1 - P_0$	C_1	$C_2 - C_1 = \Delta C_2$
P_2	$P_2 - P_1$	C_2	$C_3 - C_2 = \Delta C_3$
P_3	$P_3 - P_2$	C_3	
			$\Delta C_{\text{среднее}}$

При нагрузке P_0 прибор, измеряющий деформацию, дает показание C_0 . При последующей нагрузке, равной $P_1 = P_0 + \Delta P$, прибор показывает C_1 . Следовательно, деформация образца, соответствующая нагрузке ΔP , вычисляется как $\Delta C_1 = C_1 - C_0$.

Количество ступеней нагружения зависит от предела пропорциональности материала, чувствительности приборов и требуемой точности результата. Для исключения влияния на результат измерения неточности центрирования образца (сила должна быть приложена строго по оси образца) измерение деформаций производится с помощью двух приборов, расположенных с противоположных сторон образца. Данные измерений заносятся в таблицу. Одновременно строится диаграмма, позволяющая следить за пропорциональностью процесса.

Статистическая обработка в самом простом случае сводится к нахождению средней деформации $\Delta C_{\text{ср}}$ (в делениях шкалы прибора), соответствующей ΔP . После этого вычисляются напряжение $\sigma = \frac{\Delta P}{F}$ и деформация $\epsilon = \frac{\Delta \ell}{\ell} = \frac{\Delta C_{\text{ср}} K}{\ell}$, где K — цена одного деления прибора, ℓ — база прибора, F — начальная площадь поперечного сечения образца. Далее окончательно вычисляется модуль упругости E .

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА

Выше рассматривались свойства материалов при нормальных условиях (температура $\sim 20^{\circ}\text{C}$ и скорость нагружения $d\varepsilon/dt = 0,01 \dots 3 \text{ мин}^{-1}$). Однако на практике конструкционные материалы работают в широком диапазоне изменения температур и скоростей нагружения.

Имеются конструкции, где материал находится под действием высоких (ракетные двигатели) или низких (элементы холодильных установок и резервуары, содержащие жидкие газы) температур. В широких пределах изменяются также скорости нагружения и время действия внешних сил.

Температурные зависимости механических свойств для однофазных металлов связаны с типом их кристаллической решетки. Так, если в металлах с объемоцентрированной решеткой (железо, молибден, хром, ванадий, вольфрам) при низких температурах предел текучести заметно изменяется, то у металлов с гранецентрированной кубической решеткой (медь, алюминий, серебро, никель, свинец, золото, платина) это изменение почти отсутствует. Влияние температуры на свойства металлов с гексагональной решеткой (цинк, кадмий, магний, титан, цирконий, бериллий) не имеет общих закономерностей.

Для большинства машиностроительных материалов с повышением температуры предел текучести, предел прочности и модуль упругости уменьшаются, а относительное удлинение и коэффициент поперечной деформации увеличиваются.

В качестве примера на рис. 28 приведена температурная зависимость механических характеристик легированной стали 30ХГСА.

При понижении температуры наблюдается, как правило, повышение прочностных характеристик материала и повышение хрупкости. Многие материалы при криогенных температурах становятся настолько хрупкими, что их использование практически невозможно. Для работы в таких условиях применяются специальные легированные стали с высоким содержанием никеля (например, сталь Х12Н20Т3Р) или цветные металлы и сплавы, которые сохраняют значительную пластичность ($\delta = 10 \dots 15\%$) в условиях криогенных температур.

Напряженно-деформированное состояние, возникающее в нагруженной детали, зависит не только от температуры, но и от длительности действия приложенной нагрузки, так как даже при нормальных и низких температурах в материале наблюдаются реологические процессы. Зависимость механических свойств от времени рассматривается в двух процессах: ползучести и релаксации.

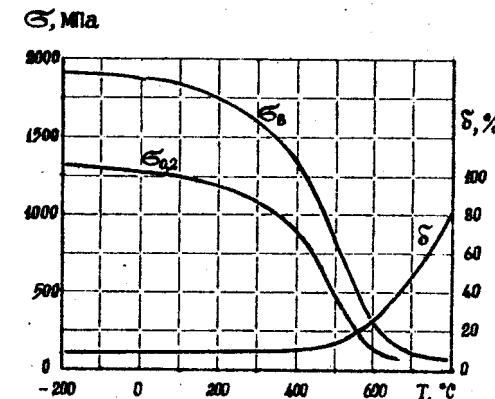


Рис. 28

Под ползучестью понимают изменение во времени деформации, протекающее при постоянном напряжении. На рис. 29, а показана типичная "кривая ползучести".

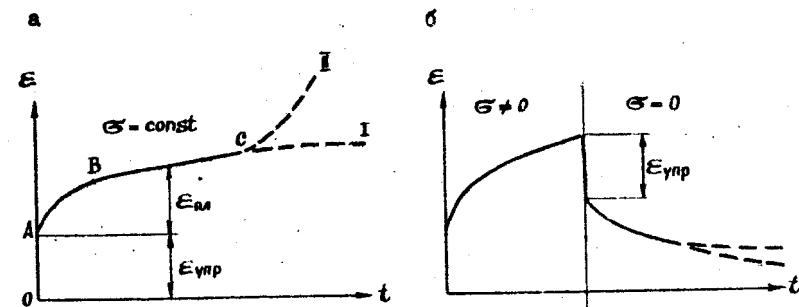


Рис. 29

При нагружении образец получает начальную деформацию OA , которая в зависимости от величины напряжения может быть упругой или

упруго-пластической. Затем, с течением времени, развиваются деформации ползучести. На участке AB развиваются деформации с убывающей скоростью (неустановившаяся ползучесть), на BC - с постоянной скоростью (установившаяся ползучесть), которая переходит в один из двух процессов: при небольших напряжениях - в затухающую ползучесть (I), при больших - в развивающуюся ползучесть (II), заканчивающуюся разрушением.

При разгрузке образца в какой-либо момент времени (рис. 29, б) мгновенно исчезает упругая деформация и далее развивается во времени процесс восстановления или "обратной ползучести", в котором деформации, в зависимости от величины действовавшего напряжения, могут исчезать полностью либо достигнут постоянной величины.

Основными характеристиками материала в условиях ползучести являются предел длительной прочности и предел ползучести.

Пределом длительной прочности называется напряжение, при котором разрушение растянутого образца происходит через заданный промежуток времени.

Пределом ползучести называется напряжение, при котором деформация за заданный промежуток времени достигает заданной величины. Интервал времени определяется сроком службы детали, а интервал допустимых деформаций - условиями эксплуатации детали.

С явлением ползучести связано явление релаксации напряжений. В процессе релаксации происходит уменьшение напряжений с течением времени при неизменной деформации. Например, напряжение σ_0 в уплотнении, которое было получено в момент сборки, с течением времени уменьшается, что может привести к протечкам (рис. 30). Поэтому уплотнение необходимо периодически подтягивать (как показано пунктиром на графике).

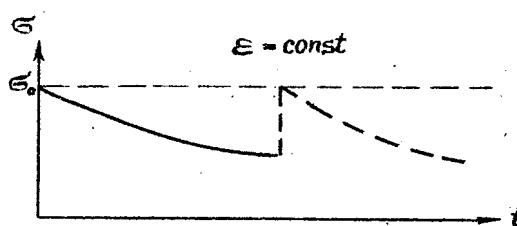


Рис. 30

Рассмотрим теперь изменение свойств материала при действии быстроизменяющихся (динамических) нагрузок. При оценке этих нагрузок существуют два критерия.

Первый критерий - нагрузка считается быстро изменяющейся, если за время нагружения пластические деформации не успевают образоваться полностью. Этот критерий применяется при изучении механических свойств материалов. Он позволяет учитывать изменение характера наблюдаемых зависимостей между напряжениями и деформациями (рис. 31)

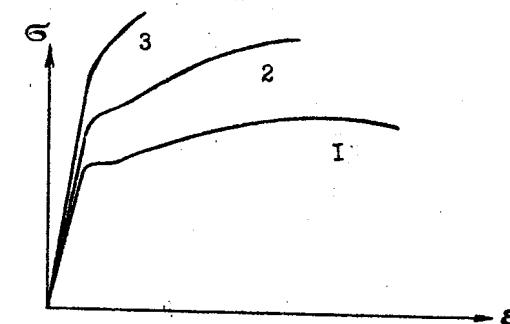


Рис. 31

С увеличением скорости нагружения вид диаграммы $\sigma - \varepsilon$ (кривая I) резко изменяется, принимая вид, аналогичный диаграмме $\sigma - \varepsilon$ для хрупких материалов (кривые 2 и 3). При этом прочностные характеристики σ_t и σ_a возрастают, а пластические (δ , ψ) уменьшаются. В результате разрушение пластичных материалов может происходить без образования "шейки", при очень малых значениях δ и ψ , как у хрупких материалов.

Поскольку при быстром нагружении развитие пластических деформаций затруднено, основной причиной разрушения является образование и развитие трещин, когда материал становится особенно чувствительным к концентрации напряжений. Это позволяет создать специальный метод испытания материалов на чувствительность к хрупкому разрушению при ударных нагрузках в условиях, когда присутствует концентратор напряжений - специальный надрез образца (рис. 32).

Удар по образцу производится с помощью маятникового копра. Разность высот маятника до и после удара позволяет определить энергию,

затраченную на разрушение образца. Зная эту энергию, вычисляют ударную вязкость материала при данной температуре. Эта характеристика представляет собой энергию, затраченную на разрушение образца, отнесенную к площади ослабленного сечения. Ударная вязкость с уменьшением температуры монотонно падает. Однако есть много материалов, для которых существуют "критические" низкие температуры, при переходе через которые вязкость скачком уменьшается в несколько раз. На это приходится обращать внимание при выборе материалов для сооружений и машин, работающих в арктических условиях или в условиях искусственного холода.

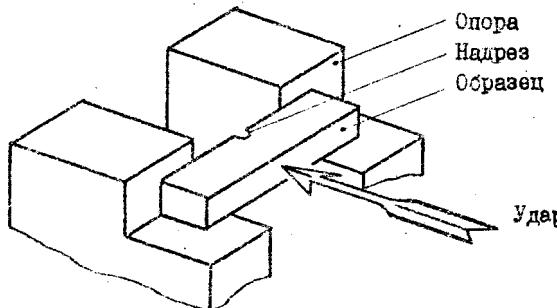


Рис. 32

Второй критерий - нагрузка - считается быстро изменяющейся, если она вызывает заметные скорости частиц деформируемого тела, причем настолько большие, что суммарная кинетическая энергия движущихся частиц тела составляет значительную долю от общей работы внешних сил. Этот критерий используется при анализе вопросов колебаний упругих тел.

Среди различных типов внешних нагрузок особое место занимают периодически изменяющиеся или циклические нагрузки. Вопросы прочности материалов при действии таких нагрузок будут рассмотрены в специальном разделе курса сопротивления материалов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

В содержание отчета о лабораторной работе входят:

- название работы;
- постановка задачи;

- схема испытания;
- теоретический расчет (решение поставленной задачи);
- краткое описание методики проведения опыта;
- результаты измерений (при многократных измерениях результаты представляются в виде габариты);
- обработка опытных данных;
- результат;
- оценка полученного результата, путем сравнения его опытного и теоретического значений;
- общий вывод по работе.

Требования, предъявляемые к студенту при проведении лабораторных работ, следующие:

1. Студент допускается к выполнению лабораторных работ лишь при условии успешной защиты предшествовавшей работы и необходимой подготовки к предстоящей.

2. Обязательно наличие подготовленного отчета, в который вносятся все наблюдения, записи, расчеты, сделанные во время выполнения лабораторной работы. Если теоретическая часть работы связана со значительным объемом вычислений, то данные для их выполнения выдаются заранее. В этом случае аккуратно оформленные теоретические расчеты должны быть обязательно предъявлены преподавателю при допуске к лабораторной работе. Отчет о выполненной работе, как правило, полностью оформляется здесь же в лаборатории.

3. Лабораторный отчет должен заполняться аккуратно чернилами. Вычисления выполняются с точностью до трех значащих цифр. При вычислениях по формулам необходимо полностью произвести подстановку числовых значений с учетом единиц измерения размерностей и лишь затем написать окончательный результат.

4. Диаграммы и графики выполняются в целесообразно выбранных соответствующих ГОСТам масштабах. По осм координат должны быть обозначены величины и их единицы измерений, а также занесены деления в соответствии с выбранным масштабом.

5. При защите отчетов студент должен показать знание основ теории, понимание физической сущности изученных в лаборатории явлений, знакомство с устройством испытательных машин и приборов, а также о постановкой и методикой лабораторных работ.

Деменчук Николай Павлович
Петрова Светлана Борисовна
Радченко Евгений Александрович

**МЕХАНИКА МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ
СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА
ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА**

Методические указания к лабораторным работам
для студентов всех специальностей

Второе издание, исправленное

Редакторы
Т.В. Белянкина, Т.Г. Смирнова

Корректор
Н.И. Михайлова

Подписано в печать 03.07.08. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,09. Печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 2,06
Тираж 700 экз. Заказ № 236 С 130

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
НИК СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9