

А.А. Хмелев  
В.А. Сидоров

# СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторные  
работы



**А.А. Хмелев, В.А. Сидоров**

# **СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

*Лабораторные работы*

Издание 2-е, исправленное

Допущено Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия  
для студентов машиностроительных и транспортных специальностей  
высших учебных заведений

Минск  
УП "Технопринт"  
2004

*620.1*  
УДК 539.3/.6(076.5)

~~ББК 30.121я73~~

X 65

1-е издание вышло в 2003 г.

Рецензенты:

Кафедра "Сопротивление материалов" Белорусского Государственного Технологического Университета, зав. каф., д.т.н., проф. Ставров В.П. Д.ф.-м.н., проф. Чигарев Ю.В.

**Хмелев А.А., Сидоров В.А..**

X 65 Сопротивление материалов: Лаб. работы / А.А. Хмелев, В.А. Сидоров.  
— Мн.: УП "Технопринт", 2004. — 206 с.

**ISBN 985-464-551-7**

В учебном пособии изложена методика проведения лабораторных работ по сопротивлению материалов при силовом воздействии (деформировании) на них статических и динамических нагрузок.

Представлены наиболее применяемые в учебном процессе лабораторные работы по определению физико—механических характеристик различных материалов и работы по проверке выводов, гипотез и формул сопротивления материалов, а также определению напряжений и деформаций применительно к простейшим элементам конструкций.

Включены описания испытательных машин, а также настольных экспериментальных установок. Включена работа по современным методам измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу с помощью одного портативного прибора. Описаны приборы, позволяющие строить диаграмму твердости, по своим функциям аналогичную диаграмме растяжения.

Предназначено для студентов машиностроительных и транспортных специальностей высших технических учебных заведений, а также для аспирантов и преподавателей.

УДК 539.3/.6(076.5)

ББК 30.121я73

© Хмелев А.А., Сидоров В.А., 2004

© Оформление УП "Технопринт", 2004

**ISBN 985-464-551-7**

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Создание прогрессивных конструкционных материалов для современной техники, проверка их свойств и рациональное применение в различных отраслях успешно осуществимы при хороших фундаментальных знаниях инженерных кадров в области теоретических и экспериментальных методов исследования механических свойств материалов. Подготовка таких кадров — задача высшей школы.

В сопротивлении материалов тесно сочетаются теория и эксперимент. Все отправные положения и гипотезы сопротивления материалов основаны на опытных данных. Для построения теории расчетов на прочность, жесткость и устойчивость нужно знать механические свойства материалов. Необходимо также экспериментально проверять расчеты, основные положения, гипотезы, выводы и формулы сопротивления материалов. Научить студента решать эти задачи, помочь тем, кого интересует методика механических испытаний конструкционных материалов, и призвано настоящее руководство по лабораторным работам. Книга дает также представление об испытаниях простейших деталей машин и элементов конструкций.

Пособие состоит из двух частей: лабораторных работ по испытанию различных материалов и определению их физико—механических характеристик и работ по проверке выводов и формул сопротивления материалов применительно к простейшим элементам конструкций и определению в них напряжений и деформаций. Каждая лабораторная работа содержит краткие теоретические сведения, описание применяемых машин и приборов, их принципиальные схемы, методику и последовательность проведения опытов.

В пособии представлены наиболее применяемые в учебном процессе лабораторные работы в соответствии с программой курса “Сопротивления материалов машиностроительного профиля”, даны примеры их выполнения и оформления.

Включена лабораторная работа по современным методам измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу с помощью простого портативного прибора.

Перед тем как приступить к выполнению той или иной работы, студент должен усвоить краткие теоретические введения, выбрать испытательную машину, подобрать приборы для определения напряжений и деформаций и ознакомиться с порядком проведения работы.

Эскизы образцов, принципиальные схемы машин и приборов, данные предварительных измерений и результаты экспериментов заносят в специально разработанные лабораторные журналы.

Часть лабораторных работ по испытанию бруса проводят на настольных лабораторных установках. Теоретические исследования этого объекта в курсе сопротивления материалов проводят при многочисленных допущениях. Цель этих работ — подтверждение экспериментальным путем справедливости принятых гипотез и допущений, а также установление размеров отклонений теоретических значений величин от опытных. Работа на этих простых установках способствует приобретению навыков по определению основных расчетных параметров — напряжений, прогибов, углов поворота и других результатов.

Некоторые лабораторные работы могут встретить замечания и возражения, в чем авторы вполне отдают себе отчет и с благодарностью примут все критические замечания и пожелания.

При написании учебного пособия использованы некоторые материалы из приведенных в списке литературы, методических пособий и соответствующих стандартов.

Авторы выражают большую благодарность директору УП “Технопринт” А.П. Аношко за помощь и поддержку в подготовке рукописи к изданию.

## ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $a$  — размер стороны квадратного поперечного сечения;  
длина участка балки, рамы
- $b$  — ширина поперечного сечения
- $d$  — диаметр стержня; диаметр отпечатка при измерении  
твердости
- $d_0$  — начальный диаметр деформируемого стержня
- $d_k$  — диаметр образца в шейке после разрушения
- $D$  — диаметр шарика; пружины
- $E$  — модуль продольной упругости
- $F$  — площадь поперечного сечения
- $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца
- $F_k$  — площадь поперечного сечения образца в шейке
- $\Delta$  — прогиб; перемещение
- $\Delta x, \Delta y$  — прогибы балки в направлении осей  $x$  и  $y$
- $G$  — модуль сдвига материала
- $h$  — высота поперечного сечения образца; высота образца;  
глубина внедрения индентора
- $\Delta h$  — абсолютное уменьшение высоты образца
- $\Delta h_{\text{ср}}$  — среднее абсолютное уменьшение (приращение) высоты  
образца
- $I_x, I_y$  — осевые моменты инерции площади фигуры
- $I_{\text{max}}, I_{\text{min}}$  — главные осевые моменты инерции площади фигуры
- $I_p$  — полярный момент инерции площади фигуры
- $l$  — длина стержня (образца), балки
- $l_0$  — расчетная длина образца; база тензометра; расстояние,  
на котором определяется угол закручивания

$L$	— расстояние между опорами
$M$	— изгибающий момент
$M_k$	— крутящий момент
$P$	— сосредоточенная внешняя сила
$\Delta P$	— абсолютное приращение силы
$\Delta P_{\text{ср}}$	— абсолютное среднее приращение силы
$P_x, P_y$	— составляющие силы $P$ по осям инерции $x$ и $y$
$P_{\text{max}}$	— максимальное значение силы
$\tau$	— касательные напряжения
$W_p$	— полярный момент сопротивления площади круглого или кольцевого поперечного сечения
$W_x, W_y$	— осевые моменты сопротивления площади поперечного сечения
$\delta_5$	— относительное удлинение пятикратного образца при растяжении
$\varepsilon$	— относительное удлинение
$\theta$	— угол поворота сечения при изгибе
$\mu$	— коэффициент Пуассона; коэффициент приведения длины
$\sigma$	— нормальное напряжение
$\sigma_{\text{пл}}$	— предел пропорциональности
$\sigma_T$	— предел текучести
$\sigma_B$	— предел прочности
$\sigma_{\text{max}}, \sigma_{\text{min}}$	— максимальное или минимальное нормальное напряжение
$\varphi$	— угол закручивания; угол между направлением действия силы и осью инерции; коэффициент снижения основного допускаемого напряжения
$\lambda$	— осадка пружины; гибкость стержня
$KCU, KCV$	— ударная вязкость
$\psi$	— относительное сужение
$N$	— продольная сила; число циклов напряжений
$Q$	— поперечная сила
$q$	— интенсивность распределенной нагрузки
$R, \rho$	— радиус кривизны
$f$	— частота колебаний балки
$K_d$	— динамический коэффициент

## ВВЕДЕНИЕ

Проектирование машин и сооружений сопровождается расчетом их деталей на прочность, жесткость и устойчивость. Эти расчеты производятся в соответствии с положениями теории сопротивления материалов и с учетом механических свойств материалов, используемых для проектируемой конструкции.

Механические свойства материалов устанавливаются лабораторными испытаниями образцов, изготовленных из этих материалов.

При разработке методов расчета, выводе расчетных формул используют те или иные рабочие гипотезы, вводятся некоторые допущения и ограничения. Вместо реальных конструкций рассматривают их упрощенные расчетные схемы.

Основанием для принятия соответствующей гипотезы, того или иного допущения служит опытное изучение поведения элементов конструкций (образцов соответствующей формы) под нагрузкой. С другой стороны, достоверность всех теоретических выводов сопротивления материалов, пригодность и точность расчетных формул проверяют опытным путем.

В связи с этим лабораторные работы по сопротивлению материалов могут быть разделены на две основные группы. К первой группе относят работы по изучению свойств материалов: прочности, пластичности, способности сопротивляться упругим деформациям и динамическим нагрузкам.

Ко второй группе относят работы по проверке теоретических выводов. Цель этих работ — подтверждение экспериментальным путем справедливости принятых рабочих гипотез и допущений, а также установле-



ние размеров отклонений теоретических значений величин от опытных. К таким работам относятся: исследование напряжений и деформаций, возникающих при изгибе стержня, кручении, внецентренном растяжении или сжатии, исследование устойчивости сжатых стержней.

В современных конструкциях встречаются детали настолько сложной формы, что теоретическое определение напряжений и деформаций оказывается затруднительным или невозможным. В таких случаях используют экспериментальные методы изучения напряженного состояния. Один из таких методов — электротензометрический — применен в лабораторных работах № 4, № 7, № 12, № 17. Применение этого метода подробно изложено в лабораторной работе № 4 параллельно с описанием порядка проведения работы.

При изучении механических свойств материалов обычно возникает необходимость приложения к исследуемым образцам значительных усилий. С этой целью применяют специальные испытательные машины различной конструкции. Их устройство и особенности применения изложены в соответствующих лабораторных работах.

Деформации, наблюдаемые при испытаниях, малы и нередко выражаются в тысячных долях миллиметра. Для их измерения применяются весьма точные приборы (тензометры, индикаторы и т.д.), их применение и устройство даны параллельно с описанием порядка проведения соответствующей работы.

При проведении лабораторных работ имеют место некоторые особенности. В ряде случаев из опыта нельзя получить непосредственно искомую величину. Ее определяют через посредство другой величины, полученной при опыте и связанной с искомой известной зависимостью.

Например, для определения модуля продольной упругости  $E$  при растяжении из опыта (лабораторная работа № 2) находят деформацию образца  $\Delta l$ , соответствующую данной нагрузке  $P$ . Модуль Юнга определяют на основании закона Гука по формуле

$$E = \frac{Pl}{F \cdot \Delta l}$$

При определении напряжений опытным путем находят деформацию  $\Delta l$  на участке  $l$  в соответствующем месте образца. Если модуль продольной упругости известен, искомое напряжение определяют по формуле

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l} E.$$

В подобных случаях при проведении опыта необходимо обеспечить условия, при которых используемые зависимости сохраняют свою силу. Например, при использовании зависимостей, основанных на законе Гука, нагрузки должны быть подобраны так, чтобы напряжения не превышали предел пропорциональности.

Постановка и проведение лабораторных работ удовлетворяют следующим общим требованиям:

- 1) каждая лабораторная работа имеет четкую целевую установку;
- 2) порядок проведения работы позволяет исключить появление ошибок наблюдения;
- 3) запись результатов наблюдений ведется по понятной и удобной для обработки опытных данных форме.

Опытное значение искомых параметров каждой лабораторной работы определяется как среднее значение из числа проведенных опытов. При таком порядке проведения работ нагружение образцов производится ступенями, увеличивая нагрузку каждый раз на одну и ту же величину. Такому увеличению нагрузки должно соответствовать одинаковое приращение деформаций и одинаковое приращение показаний измерительных приборов. Если приращения показаний приборов одинаковы или мало отличаются друг от друга, можно считать, что испытания проведены правильно. Если последующие разности отсчетов значительно отличаются друг от друга, необходимо повторить испытания.

Перед опытом необходимо убедиться в исправности испытательной машины и применяемых приборов. Замеченные недостатки следует устранить, а в случае необходимости произвести тарировку приборов.

Причиной погрешностей при опытах могут быть неточности, допущенные при изготовлении испытуемого образца, и неточности установ-

ки образца и приборов. Полностью устранить эти неточности практически невозможно. Уменьшить их влияние на результаты опыта можно следующим образом. Необходимо следить за тщательностью изготовления образцов. Образцы, применяемые при испытании, следует тщательно обмерить и в дальнейшем учитывать не проектные, а действительные размеры.

Влияние неточностей установки образца в захватах испытательной машины устраняется установкой двух измерительных приборов по обе стороны образца от оси симметрии. В этом случае за результат принимают среднее значение из показаний двух приборов.

## **ЧАСТЬ I**

# **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ИСПЫТАНИЮ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

# I. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

**Цель работы:** изучить поведение стального образца при растяжении вплоть до разрушения; определить механические характеристики прочности (пределы пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$ , текучести  $\sigma_{\text{т}}$ , и прочности  $\sigma_{\text{в}}$ ); пластичности (относительное остаточное удлинение  $\delta$ , относительное остаточное сужение  $\psi$ ); удельную работу  $a$ , затраченную на разрыв образца; допустимое напряжение  $[\sigma]$ . По полученным экспериментальным данным, пользуясь таблицами, приведенными в справочной литературе, установить ориентировочно марку стали.

## Общие сведения

Испытания на растяжение являются основным и наиболее распространенным методом исследования и контроля механических свойств материалов. Использование этого метода для арбитражных и контрольных испытаний регламентируется Государственным стандартом.

В исследовательских целях испытания на растяжение используются значительно шире, чем это предусмотрено ГОСТом.

В настоящее время в действующих технических условиях в практическую оценку и приемку металлических материалов входят следующие механические характеристики: предел текучести, предел прочности, относительное остаточное удлинение, относительное остаточное сужение и ударная вязкость. По указанным характеристикам

производится ежедневный контроль и отбраковка материалов для ответственных конструкций.

Перечисленные характеристики прочности и пластичности могут быть найдены из диаграммы растяжения. Поэтому основной задачей испытания является получение диаграммы растяжения — графика зависимости между растягивающей образец силой и его удлинением.

Испытание производится с помощью испытательных машин, снабженных специальным аппаратом для автоматической записи диаграммы растяжения.

### Испытательная машина

Эту работу удобно проводить на испытательной машине ИМ-4А. Кинематическая и конструктивная схемы машины показаны на рис. 1.1 и рис. 1.2. Она относится к типу испытательных машин-прессов для испытаний на растяжение-сжатие образцов малых размеров при нагрузках, не превышающих 40 кН.

При помощи специальных приспособлений на этой же машине можно производить испытания на срез и изгиб.

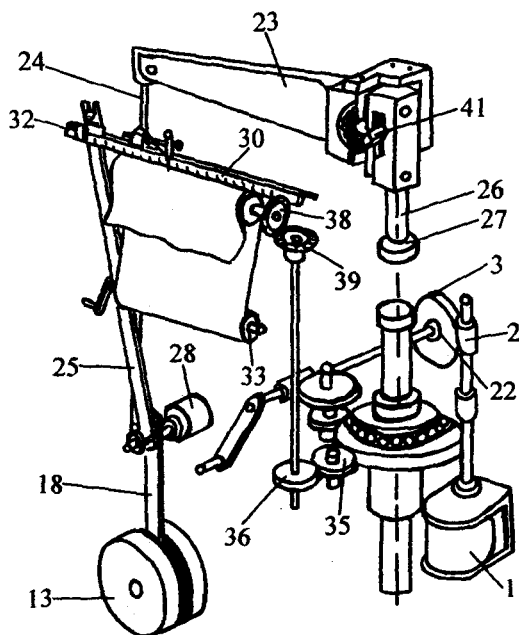


Рис. 1.1.

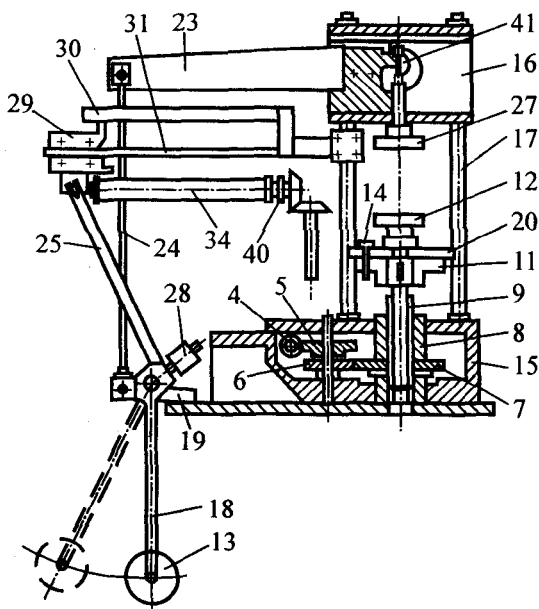


Рис. 1.2.

### Основные данные машины

1. Нагружающий механизм — механический, с приводом от электродвигателя, возможен и ручной привод.
2. Силоизмерительный механизм — механический, рычажно-маятникового типа.
3. Габариты машины 1550 × 1000 × 70 мм.
4. Вес 160 кг.
5. Электродвигатель трехфазного тока 220/380 в, при скорости вращения 1440 оборотов в минуту.
6. Рабочее усилие: от 0 до 40 кН — при двух грузах на маятнике, от 0 до 20 кН — при одном грузе на маятнике.
7. Цена наименьшего деления шкалы: 50 Н — при изменении нагрузки в диапазоне 0 — 20 кН, 100 Н — при изменении нагрузки в диапазоне 0 — 40 кН.

8. Масштаб диаграммы: по оси нагрузки — 50 Н в одном миллиметре в диапазоне от 0 до 20 кН, 100 Н в одном миллиметре в диапазоне от 0 до 40 кН; по оси деформаций — 0,01 мм в 1 мм.
9. Скорость деформации 1 мм/мин.
10. Погрешность силоизмерительного механизма машины при нагружении не более 1,0%, при разгрузении не более 1,5%.

**Машина состоит из следующих четырех основных узлов:**

- 1) станины,
- 2) нагружающего механизма,
- 3) силоизмерительного механизма,
- 4) диаграммного аппарата.

### **Станина машины**

Станина машины состоит из двух основных частей: нижней части — основания, выполненной в виде литой пустотелой чугунной коробки 15 (рис. 1.2) и верхней составной коробки 16. Обе части соединены между собой четырьмя вертикальными стойками 17.

В нижней части основания расположен нагружающий механизм и кронштейны 19, на которых подвешен маятник 18.

В верхней коробке расположены главные шариковые опоры рычага 23 и шпиндель 26 силоизмерительного механизма.

### **Нагружающий механизм**

От электродвигателя 1 (рис. 1.1) через червячные пары 2, 3 и 4, 5 и цилиндрические зубчатые колеса 6 и 7 получает вращательное движение гаечная втулка 8, которая жестко связана с колесом 7 и навинчивается на вертикальный грузовой (тяговый) винт 9 (рис. 1.2).

Гаечная втулка внизу опирается на шаровую пяту и смонтирована в основании станины 15 так, что лишена поступательного движения.

На верхней части винта насажен штурвал 11 и упорная плита 12, на которую устанавливается реверсор с испытуемым образцом.

Штурвал 11 соединяется стопорным штифтом 14 с поперечиной 20, упирающейся концами в неподвижные вертикальные стойки 17. Это устройство исключает вращательное движение грузового винта, и при вращении гаечной втулки он получает поступательное вертикальное



перемещение. Поступательное движение винта 9 вверх соответствует рабочему ходу, т.е. нагружению образца, а движение вниз — холостому ходу, или разгрузке образца.

Образец, помещенный между плитами пресса, передает усилие рычажно-маятниковому силоизмерительному механизму.

Перед очередным испытанием для ускоренного передвижения грузового винта в исходное положение и установки его на необходимую высоту, удаляют стопорный штифт 14 и вращением штурвала 11 от руки быстро перемещают винт в нужное положение. Это положение опять закрепляется стопорным штифтом.

Ручной привод машины осуществляется при помощи специальной рукоятки, которая надевается на горизонтальный вал. При этом необходимо освободить горизонтальный червячный винт 4 от сцепления с осью червячной шестерни 3 путем рассоединения муфты 22.

Как ручной, так и привод от электродвигателя допускают работу машины на прямом (нагрузке) и обратном (разгрузке) ходах.

### **Силоизмерительный механизм**

Силоизмерительный механизм машины представляет собой сочетание двух простейших измерительных механизмов: рычага 2-го рода 23 и маятника 18, связанных между собой тягой 24.

Принцип работы силоизмерительного механизма следующий. При движении грузового винта 9 с образцом, установленным в реверсоре, вверх, последний встречает на своем пути плиту 27, надетую на шпиндель 26, и подвергается деформации сжатия. Сжимающая реверсор сила передается через шпиндель на короткое плечо рычага 23, который поворачивается относительно оси 41, установленной в шариковых подшипниках.

Отклонение левого конца рычага с помощью тяги 24 передается на маятник 18 с грузом 13, вызывая его отклонение от вертикального положения. Контргруз 28 служит для уравнивания собственного веса рычажной системы и приведения маятника в строго вертикальное положение перед началом испытаний. На оси маятника жестко закреплен поводок 25, который получает такое же отклонение, как и

маятник, и своим верхним концом с прорезью передвигает каретку 29 вдоль силоизмерительной шкалы 30 по горизонтальному цилиндрическому стержню 31.

При увеличении нагрузки каретка по шкале перемещается вправо, а при уменьшении — влево.

Угол отклонения маятника и перемещение каретки прямо пропорционально усилию  $P$ , действующему на образец, вследствие этого силоизмерительная шкала является равномерной.

На левом конце каретки имеется стрелка-указатель 32 для производства отсчетов действующих усилий непосредственно по шкале 30.

На правом конце каретки установлено приспособление (перо) для автоматической записи диаграммы растяжения — сжатия.

При испытании образцов на растяжение их помещают в специальное приспособление — реверсор (рис. 1.7). Реверсор состоит из двух одинаковых по форме частей — верхней и нижней. При этом верхняя часть разъемная. Между этими частями при помощи специальных вкладышей закрепляется испытуемый образец. После закрепления образец оказывается подвешенным за головку к рамке нижней части реверсора, в то время как рамка верхней части реверсора сама опирается на нижнюю головку образца.

Реверсор, с установленным в нем образцом, помещают между упорными плитами 12 и 27 испытательной машины. При сжатии реверсора силой  $P$ , образец, очевидно, будет подвергаться растяжению.

Разъемные вкладыши (сухарики), применяемые для закрепления образцов в гнездах верхней и нижней части реверсора, изготавливаются из высокопрочных сталей типа 40Х под размеры гнезд частей реверсора и головок образцов.

### **Диаграммный аппарат**

Диаграммный аппарат служит для автоматической записи всего процесса испытания образца в форме графика зависимости между абсолютными удлинениями и усилиями в образце, который называется диаграммой растяжения.

Автоматическая запись диаграммы производится на миллиметровой бумаге, подаваемой с нижнего барабана 33 на ведущий верхний барабан 34 (рис. 1.1, рис. 1.2). Последний получает вращательное движение от зубчатого колеса 7 с помощью паразитного колеса 35, пары конических зубчатых колес 38 и 39 и горизонтального валика с муфтой 40.

Вертикальное перемещение грузового винта и угловое перемещение ведущего барабана одновременно пропорциональны повороту зубчатого колеса 7; отсюда следует, что угловое перемещение верхнего барабана с натянутой на него бумагой строго пропорционально абсолютной деформации образца.

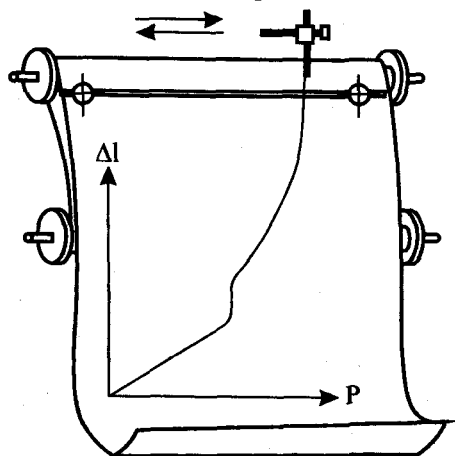


Рис. 1.3.

В результате сложения двух движений: перемещения пера по горизонтали вдоль верхнего барабана и перемещения бумаги по вертикали — перо автоматически вычерчивает диаграмму растяжения в координатах  $(P, \Delta l)$ , показанную на рис. 1.3.

Достоинством рассмотренного диаграммного аппарата является то, что диаграммная бумага не закрепляется на барабане 34, а только проходит по нему в процессе записи кривой результатов испытания.

Это позволяет получить диаграмму большого размера с четко выраженными характерными участками.

Наглядность диаграммы и ее удобства при обработке результатов исследования особенно полезны при применении ее в учебных целях.

## Образец для испытаний

Для испытаний на растяжение применяют стандартные образцы (ГОСТ 1497-73) (рис. 1.4). По концам они снабжены головками для закрепления в захватах испытательной машины. Размеры и предельные отклонения по рабочей части образцов оговорены вышеуказанным ГОСТом, а форма и размеры головок и переходных частей от головок к рабочей части не являются обязательными, а определяются способом крепления образцов в захватах машины и свойствами испытуемого материала.

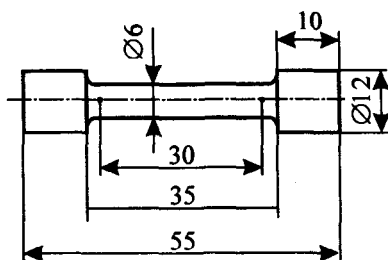


Рис. 1.4.

Для испытаний на растяжение на машине ИМ-4А используется короткий образец диаметром  $d_0 = 6$  мм и расчетной длиной  $l_0 = 30$  мм.

## Подготовка и проведение испытаний

Для записи диаграммы испытания необходимо навернуть миллиметровую бумагу на нижний барабан диаграммного аппарата и заправить ее на верхний записывающий барабан, предварительно выведенный из зацепления с горизонтальным валиком при помощи муфты 40 (рис. 1.2), которая отодвигается по своей оси вправо от барабана.

С помощью шаблона (рис. 1.5) на поверхности рабочей части образца, симметрично по отношению к его середине, с помощью специального приспособления (рис. 1.6) наносятся две неглубокие риски (точки). Расстояние между точками  $l_0$  является расчетной длиной образца и должно быть нанесено с точностью до 0,1 мм.

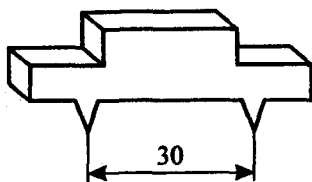


Рис. 1.5.

В соответствии с требованиями ГОСТа 1497-73 диаметр образца измеряется не менее чем в трех местах (в середине и по краям рабочей час-

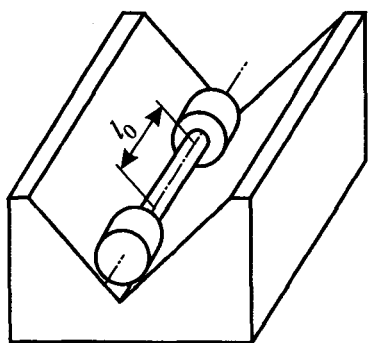


Рис. 1.6.

ти образца), в каждом месте по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Измерение производят с точностью до 0,01 мм, и за величину расчетного диаметра  $d_0$  берется наименьший диаметр.

По результатам произведенного обмера  $l_0$  и  $d_0$  вычисляется площадь поперечного сечения образца  $F_0$  с точностью до 0,1 мм<sup>2</sup> и объем расчетной части образца  $V_0$ .

Результаты измерений и вычислений заносятся в журнал лабораторных работ.

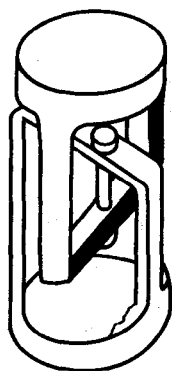


Рис. 1.7.

Затем образец закладывают в реверсор (рис. 1.7) и устанавливают его на нижнюю упорную плиту 12 испытательной машины (рис. 1.2). Вращением штурвала 11 вручную перемещают реверсор так, чтобы его верхняя плоскость касалась плиты шпинделя и указатель каретки находился против нуля силоизмерительной шкалы. После этого машина включается на нагружение. Испытуемый образец, деформируясь, растягивается вплоть до разрушения. При этом диаграммный аппарат автоматически вычерчивает кривую зависимости между нагрузкой  $P$ , действующей на образец, и абсолютным удлинением образца. Эта кривая называется диаграммой растяжения.

Так как разрушающая нагрузка для образцов диаметром  $\leq 6$  мм меньше 20 кН, то для получения более точных отсчетов нагрузки, испытания проводят с одним грузом на маятнике. При этом максимальное усилие, создаваемое машиной, составляет 20 кН при цене наименьшего деления силоизмерительной шкалы 50 Н.

## Диаграмма растяжения

Характер диаграммы растяжения зависит от свойств испытуемого материала, и для различных материалов эти диаграммы значительно отличаются друг от друга.

На рис. 1.8 приведена типичная диаграмма растяжения образца из малоуглеродистой стали за время испытаний, начиная с момента приложения нагрузки и кончая его разрушением. Здесь же на диаграмме показана и форма испытуемого образца при различных значениях растягивавшей его силы  $P$ .

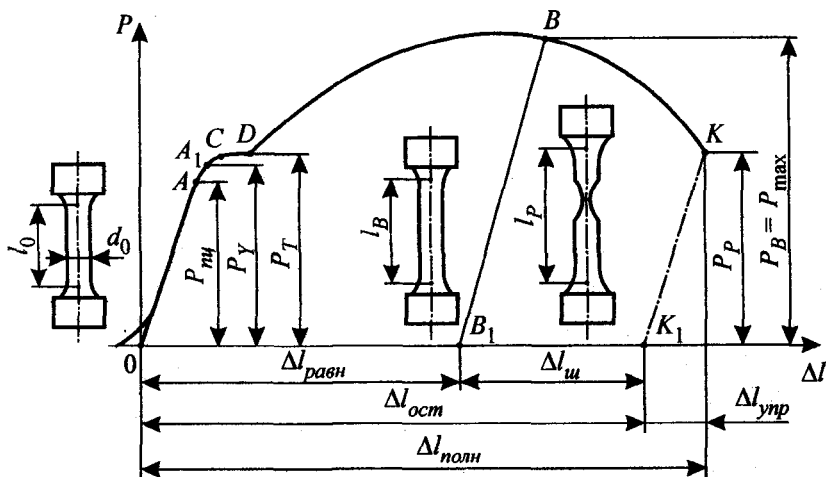


Рис. 1.8.

Начальный горизонтальный и криволинейный участок диаграммы является результатом незначительного смятия головок образца в местах их соприкосновения с реверсором и устранением различных зазоров в механизме машины. Этот участок диаграммы не связан с деформацией самого образца, и его исключают, принимая за начало координат диаграммы точку 0 пересечения продолжения прямолинейного участка диаграммы с осью абсцисс.

Отметим характерные для диаграммы растяжения участки и точки.

Первый участок изображается практически прямой линией  $OA$ . На этом участке связь между растягивающей силой  $P$  и деформацией  $\Delta l$  подчиняется закону Гука, т.е. нагрузка возрастает пропорционально удлинению. При этом деформация является упругой и носит обратимый характер, а удлинения оказываются очень малыми и полностью исчезают после снятия нагрузки, поэтому этот участок работы материала называют упругим.

Нагрузка, определяемая ординатой  $P$  точки  $A$ , называется нагрузкой, соответствующей пределу пропорциональности.

В непосредственной близости к точке  $A$  находится точка  $A_1$ . Нагрузка  $P_y$ , определяемая ординатой точки  $A_1$ , называется нагрузкой, соответствующей пределу упругости.  $P_y$  представляет собой силу, которую может выдержать образец, не давая при разгрузке заметной остаточной деформации.

Исследования показывают, что обе величины  $P_{\text{пл}}$  и  $P_y$  для сталей близки друг к другу и практически можно считать, что  $P_{\text{пл}} = P_y$ .

Второй участок диаграммы изображается кривой  $ACD$ . За точкой  $A$  образец испытывает пластическую деформацию, абсолютные удлинения растут быстрее усилий, в результате на диаграмме получаем участок кривой  $AA_1C$ . За точкой  $C$  абсолютное удлинение возрастает почти без увеличения нагрузки, и получаемый горизонтальный участок диаграммы  $CD$  называют площадкой текучести. Нагрузка, определяемая ординатой  $P$  точки  $C$ , называется нагрузкой, соответствующей пределу текучести.

В начальной стадии пластической деформации гладкая поверхность обработанных образцов становится неровной и тускнеет, иногда отчетливо появляются полосы скольжения, а на плоских необработанных образцах происходит отделение окалина и обнажение поверхности чистого металла. Эти полосы наклонены к оси образца приблизительно под углом  $45^\circ$ , и их направление совпадает с направлением действия наибольших касательных напряжений. Эти полосы (линии) называют полосами текучести или "линиями Чернова", впервые описавшего это явление.

Конец площадки текучести (точка  $D$ ) характеризует момент, когда образец, получив некоторое удлинение, опять восстанавливает способность сопротивляться действию возрастающей нагрузки. Точкой  $D$  заканчивается второй участок диаграммы, который называется участком общей текучести.

Третий участок  $DB$  называется зоной упрочнения. После площадки текучести за точкой  $D$  материал вновь приобретает способность сопротивляться нагрузке, и для дальнейшей деформации образца необходимо новое увеличение нагрузки. Точка  $B$  диаграммы соответствует достижению наибольшего значения нагрузки  $P_{\max}$ . До этого момента образец удлиняется почти равномерно по исследуемой длине, с увеличением длины образца от первоначальной  $l_0$  до  $l_k$ ; диаметр, наоборот, равномерно уменьшается от первоначального  $d_0$  до  $d_k$  (рис. 1.8). Следовательно, при равномерном растяжении по длине, сопротивление деформированию повышается вследствие деформационного упрочнения материала; одновременно происходит уменьшение сечения образца, ослабляющее сопротивление растяжению. Наблюдаемое фактически повышение сопротивления образца растяжению по кривой  $DB$  свидетельствует о том, что деформационное упрочнение материала при равномерном растяжении происходит интенсивнее, чем уменьшение площади поперечного сечения. Возрастание нагрузки прекращается, когда деформационное упрочнение материала перестает возмещать геометрическое ослабление, вызванное уменьшением сечения образца.

В конце этого участка в одном из сечений образца начинает образовываться местное сужение, так называемая “шейка”. Место образования шейки по длине образца заранее предугадать нельзя.

Максимальная нагрузка, определяемая ординатой  $P_{\max}$  точки  $B$  диаграммы, называется нагрузкой, соответствующей пределу прочности.

Четвертый участок диаграммы  $BK$ . После достижения наибольшей нагрузки, дальнейшее пластическое деформирование сосредоточивается на небольшом участке длины образца, вследствие чего образуется шейка с интенсивным сужением площади поперечного сечения.

По причине сужения, сопротивление образца растяжению постепенно уменьшается по кривой  $BK$ , до конечной нагрузки  $P_p$ , при которой



происходит разрыв образца. Ордината точки  $K$  (рис. 1.8) дает величину разрушающей нагрузки  $P_p$ .

После разрушения образца для определения его длины  $l_k$  обе его части тщательно прикладывают друг к другу и измеряют расстояние между точками, определяющими границы расчетной длины  $l_0$ .

Следует отметить, что в этом случае упругие деформации образца полностью исчезли и остались только пластические деформации. Абсолютное удлинение образца

$$\Delta l_{\text{ост}} = l_k - l_0. \quad (1.1)$$

Полученное значение абсолютного удлинения образца должно быть равным  $\Delta l_{\text{ост}}$  измеренным на диаграмме растяжения (рис. 1.8). В свою очередь  $\Delta l_{\text{ост}}$  равно сумме равномерного удлинения образца и удлинения за счет локальной деформации в зоне шейки

$$\Delta l_{\text{ост}} = \Delta l_{\text{равн}} + \Delta l_{\text{ш}}. \quad (1.2)$$

Далее на оси абсцисс диаграммы измеряется полное удлинение образца, как суммы остаточной и упругой деформации

$$\Delta l_{\text{полн}} = \Delta l_{\text{ост}} + \Delta l_{\text{упр}}. \quad (1.3)$$

После разрушения образца его диаметр в шейке измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По среднеарифметическому значению  $d_k$  вычисляют площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (шейке)  $F_k$ .

Измеренные и вычисленные величины  $l_k$ ,  $d_k$  и  $F_k$  заносят в журнал лабораторных работ.

### **Обработка полученной диаграммы растяжения и определение характеристик механических свойств**

По диаграмме растяжения, длине и диаметру образца до и после испытания определяются следующие характеристики механических свойств, свидетельствующие о прочности и пластичности исследуемого материала.

## А. Характеристики прочности материала

В качестве характеристик прочности служат следующие предельные напряжения образца.

### 1. Предел пропорциональности

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0}, \quad (1.4)$$

где  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца,  $\text{мм}^2$ ,  $P_{пц}$  — нагрузка, соответствующая этому напряжению, Н.

Для определения  $P_{пц}$  по диаграмме растяжения (рис. 1.9) необходимо провести прямую  $OB$ , совпадающую с начальным участком  $OA$  диаграммы. Ордината точки  $A$ , в которой кривая растяжения отклоняется от прямой  $OA$ , определяет нагрузку на пределе пропорциональности  $P_{пц}$ .

В связи с тем, что упругие деформации не у всех металлов строго следуют закону Гука, ГОСТу 1497-73, понятие предела пропорциональности трактуют следующим образом.

Предел пропорциональности ( $\sigma_{пц}$ , МПа) — напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой деформации  $P-\Delta l$  в точке  $P_{пц}$ , с осью нагрузок, увеличивается на 50% своего значения на линейном упругом участке.

В этом случае предел пропорциональности определяют графическим способом (рис. 1.10).

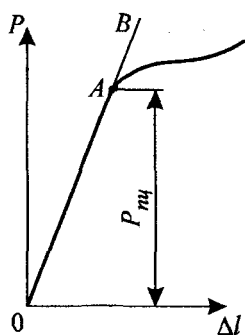


Рис. 1.9.

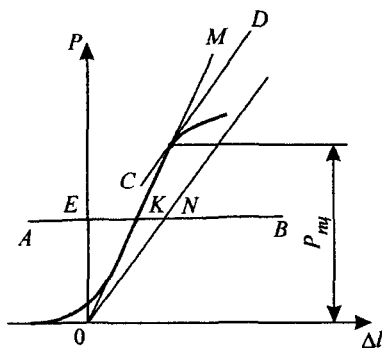


Рис. 1.10.

Проводят прямую  $OM$ , совпадающую с начальным прямолинейным участком кривой растяжения (рис. 1.10). Через точку  $O$  проводят ось ординат  $OP$ , затем проводят прямую  $AB$ , параллельную оси абсцисс на произвольном уровне, и на этой прямой откладывают отрезок  $KN$ , равный половине отрезка  $EK$ . Через точку  $N$  и начало координат проводят прямую  $ON$  и параллельно ей проводят касательную  $CD$  к кривой растяжения. Точка касания кривой растяжения с касательной и определит высоту ординаты, т.е. нагрузку  $P_{\text{пл}}$ .

Значимость точного определения предела пропорциональности заключается в том, что материал в конструкциях нагружается до напряжений, не превышающих значений указанного предела.

## 2. Предел текучести. Различают физический и условный

Предел текучести (физический) ( $\sigma_T$ , МПа) — напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки, и определяется по формуле

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}, \quad (1.5)$$

где  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца,  $\text{мм}^2$ ;  $P_T$  — нагрузка, соответствующая напряжению  $\sigma_T$ , Н. Нагрузку на физическом пределе текучести, если последний выражен площадкой, определяют непосредственно по диаграмме (рис. 1.8).

Для металлов, у которых диаграмма растяжения не имеет площадки текучести, на этой диаграмме определяют условный предел текучести. Это напряжение при остаточном удлинении, равном 0,2% от длины образца, определяемое по формуле

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad (1.6)$$

Значение нагрузки  $P_{0,2}$  определяют графически из диаграммы растяжения. Для чего на оси удлинений диаграммы в масштабе от точки  $O$  откладывают отрезок  $OC = \Delta l_{0,2} = 0,002l_0$  (рис. 1.11). Из точки  $C$  проводят

прямую  $CB$ , параллельную прямой  $OA$  до пересечения с кривой диаграммы растяжения в точке  $B$  [5].

Ордината точки  $B$  в масштабе диаграммы определяет нагрузку  $P_{0,2}$ , соответствующую условному пределу текучести.

Иногда явление текучести сопровождается уменьшением нагрузки, и на диаграмме образуется так называемый “зуб текучести”, или неявно выраженная площадка текучести. Примеры определения значения  $P_T$  для таких случаев испытаний приведены на рис. 1.12.

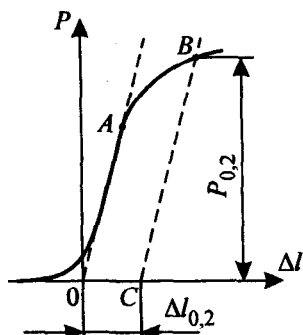


Рис. 1.11.

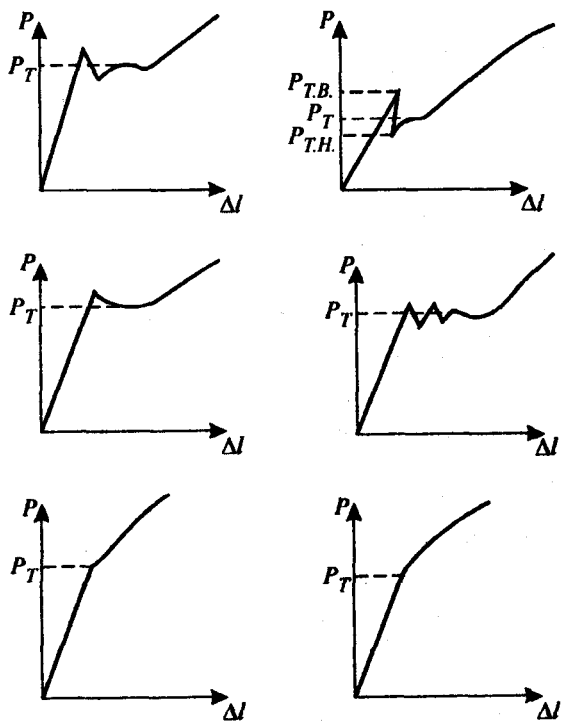


Рис. 1.12.

На диаграммах с “зубом текучести” (рис. 1.12,6) различают верхний предел текучести ( $P_{т.в.}$ ), соответствующий большей нагрузке, и нижний предел текучести ( $P_{т.н.}$ ) для меньшей нагрузки “зуба”.

### 3. Временное сопротивление (предел прочности)

Временное сопротивление ( $\sigma_b$ , МПа) — напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке  $P_{max}$ , предшествующей разрушению образца, определяют по формуле

$$\sigma_b = \frac{P_{max}}{F_0}, \quad (1.7)$$

где  $P_{max}$  — наибольшая нагрузка, Н, предшествующая разрыву образца;  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

На кривой растяжения величина наибольшей нагрузки  $P_{max}$  определяется ординатой наивысшей точки  $B$  диаграммы (рис. 1.8).

Для материалов ограниченной пластичности и хрупких временное сопротивление, будучи разрушающим напряжением, может называться пределом прочности и обозначаться  $\sigma_{лч}$ .

Указанные характеристики прочности выражены в условных напряжениях, без учета сужения образца в процессе растяжения. Сужение мало в случае упругой и в начале пластической деформации, и может не учитываться при определении пределов пропорциональности и текучести. Но при наибольшей нагрузке сужение образца из материалов высокой пластичности иногда достигает 20%. Поэтому с развитием пластической деформации, наряду с условными напряжениями, целесообразно определять истинное напряжение путем деления силы на площадь поперечного сечения, соответствующего данному моменту нагрузки. При этом характеристики прочности материалов высокой пластичности представляются следующими выражениями:

- истинное временное сопротивление

$$S_b = \frac{P_{max}}{F_b}, \quad (1.8)$$

- истинное сопротивление разрыву

$$S_k = \frac{P_p}{F_k}, \quad (1.9)$$

где  $F_0$  — площадь поперечного сечения образца при достижении им максимальной нагрузки  $P_{\max}$  при растяжении,  $\text{мм}^2$ ;  $F_k$  — площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (в шейке),  $\text{мм}^2$ ;  $P_p$  — разрушающая нагрузка, Н.

### Б. Характеристики пластичности материала

Характеристики пластичности свидетельствуют о способности материала пластически деформироваться и обнаруживать остаточные деформации перед разрушением от растяжения. Такими характеристиками являются:

- относительное остаточное удлинение после разрыва

$$\varepsilon = \frac{l_k - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l_0}{l_0} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{\Delta l_0}{l_0} 100\%, \quad (1.10)$$

- относительное остаточное сужение в шейке после разрыва

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%, \quad (1.11)$$

где  $l_0 = l_5$  или  $l_{10}$  — первоначальная длина рабочей части пятикратного или десятикратного образца, мм;  $l_k$  — длина рабочей части образца после разрушения; мм;  $\Delta l$  — остаточное удлинение образца, мм,  $F_0$  — начальная площадь поперечного сечения образца,  $\text{мм}^2$ ;  $F_k$  — конечная площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (в шейке),  $\text{мм}^2$ .

### В. Характеристики статической вязкости материала

На деформирование растягиваемого образца затрачивается некоторая работа. Полная работа, затраченная на разрыв образца, численно равна площади  $OABCD$  (рис. 1.13), заключенной между кривой диаграммы растяжения, осью абсцисс и крайней ординатой, с учетом масштабов нагрузки и деформации.

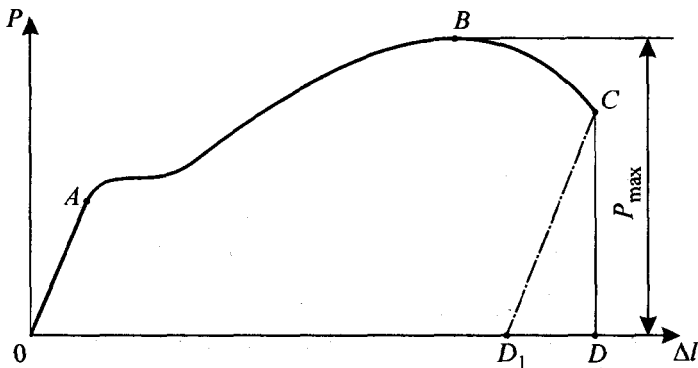


Рис. 1.13.

Удельная работа деформации при разрыве определяется по формуле

$$a = \frac{A}{V_0}, \text{ Дж / м}^3, \quad (1.12)$$

где  $A$  — полная работа деформации, Дж;  $V_0$  — первоначальный объем рабочей части образца, м<sup>3</sup>.

Работа, затраченная только на пластическую деформацию, определяется площадью  $OABCD_1$ , а площадь треугольника  $D_1CD$  характеризует работу упругой деформации при разрыве.

Приближенно полную работу, затраченную на разрыв, определяют по формуле

$$A = \eta P_{\max} \cdot \Delta l_{\text{полн}}, \text{ Дж}, \quad (1.13)$$

где  $\eta$  — коэффициент полноты диаграммы. Для стали значение коэффициента полноты  $\eta = 0,8 + 0,9$ .

Данные наблюдений и результаты вычислений по работе заносят в журнал лабораторных работ.

## **Обработка опытных данных**

Обработка опытных данных производится в соответствии с требованиями формы журнала лабораторных работ для лабораторной работы № 1.

Значение допускаемых напряжений для исследованной стали определяют во формуле

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{n} = \frac{\sigma_T}{n}, \quad (1.14)$$

где  $n = 1,5$  — коэффициент запаса прочности.

В заключение полученную диаграмму растяжения строят в осях  $\sigma, \epsilon$ .



## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ СТАЛИ

**Цель работы:** проверить закон Гука и определить модуль продольной упругости  $E$  (модуль первого рода, модуль Юнга) стали.

### **Краткие теоретические сведения**

В начальный период нагружения образца при растяжении его абсолютная деформация  $\Delta l$  для большинства металлов линейно зависит от действующей нагрузки:

$$\Delta l = \frac{Pl_0}{EF_0}. \quad (2.1)$$

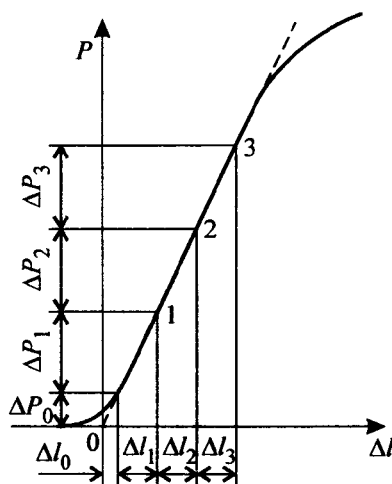


Рис. 2.1.

Чтобы подтвердить справедливость закона Гука для стали, строят диаграмму растяжения (рис. 2.1) только до площадки текучести в координатах “нагрузка — абсолютное удлинение”. На полученном участке диаграммы наблюдается линейная зависимость абсолютного удлинения от нагрузки. Это позволяет определить значение модуля продольной упругости из формулы (2.1), выражающей закон Гука:

$$E = \frac{Pl_0}{F_0 \cdot \Delta l} \quad (2.2)$$

Так как  $\frac{l_0}{F_0} = \text{const}$ , то  $E = f\left(\frac{P}{\Delta l}\right)$ , т.е. для определения  $E$  нужно измерить деформацию образца  $\Delta l$  и вызвавшую ее силу  $\Delta P$ .

Модуль  $E$  характеризует упругие свойства материала, имеет размерность напряжения (МПа) и является одной из физических констант материала.

В геометрическом смысле модуль Юнга представляет собой тангенс угла наклона к оси абсцисс прямолинейного участка диаграммы напряжений. Так как абсолютное удлинение прямо пропорционально относительному удлинению:

$$\Delta l = l_0 \epsilon, \quad (2.3)$$

а сила  $P$  пропорциональна напряжению:

$$P = \sigma F_0, \quad (2.4)$$

то диаграмму  $P-\Delta l$  легко перестроить в диаграмму  $\sigma-\epsilon$ , которая будет отличаться лишь масштабами абсциссы и ординаты. Из диаграммы напряжений (рис. 2.2) видно, что отношение  $\frac{\sigma}{\epsilon} = \text{const}$  на всем протяжении линейного участка

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = \text{tg } \alpha = E.$$

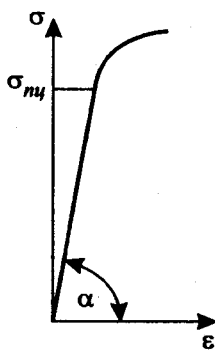


Рис. 2.2.

Модуль  $E$  является основной характеристикой упругости и широко применяется в расчетах.

### Образцы, измерительные приборы и испытательная машина

Для определения модуля продольной упругости используют цилиндрический образец типа IV по ГОСТу 1497-84 (рис. 2.3). В испытательной машине его закрепляют с помощью резьбовых захватов.

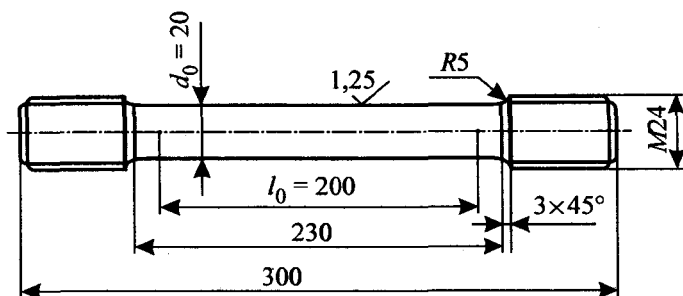


Рис. 2.3.

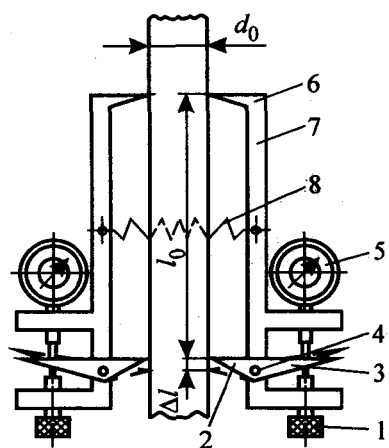


Рис. 2.4.

Для измерения диаметра образца применяют микрометр со шкалой 0...25 мм и ценой деления 0,001 мм, а для измерения продольной деформации — механический тензомер МК-3 (рис. 2.4). Основными деталями МК-3 являются: регулировочный винт 1; подвижная призма 2; ось качания рычага подвижной призмы 3; рычаг 4; индикатор часового типа 5; неподвижная призма 6; струбцина 7 для установки тензомера на образце; пружина 8, обеспечивающая вдавливание острия призмы в образец. Прибор измеряет деформацию образца на длине  $l_0$ , называемой базой тензомера. Под действием растягивающей силы  $P$  длина  $l_0$  увеличивается на величину  $\Delta l$ , в результате чего призма 2 рычага 4 повернется вокруг оси 3 на некоторый угол. Второй конец рычага 4 нажмет на шток индикатора 5, который через систему зубчатых колес передвигает стрелку индикатора на величину, пропорциональную абсолютной деформации  $\Delta l$  образца. Цена деления индикатора 0,01 мм.

В тензомере МК-3 применяют два индикатора, чтобы уменьшить погрешность измерения в условиях незначительного внецентренного растяжения образца.

Для выполнения данной работы применяют универсальную испытательную машину с максимальным растягивающим усилием более 500 кН с обязательной автоматической записью диаграммы растяжения в координатах усилие — деформация.

### **Порядок проведения испытаний**

Порядок выполнения данной работы следующий. На резьбовые головки образца навинтить гайки со сферической опорной поверхностью. На образец установить тензометр МК-3. В рабочий цилиндр испытательной машины закачать масло. На шкале нагрузки рабочую и контрольную стрелки установить на нуль. Образец с гайками и тензометром поместить в захват машины. Нагружать образец ступенчато в 10, 20, 30, 40 и 50 кН. Для каждой ступени нагрузки определить значение деформации по тензометру и отметить ее значение на диаграмме растяжения. Полученные данные занести в журнал лабораторных работ.

При разгрузке запись можно повторить.

### **Обработка опытных данных**

Определение значения модуля продольной упругости производят по результатам испытания на ступень нагрузки  $\Delta P$ .

По результатам таблицы измерений вычисляют разности между каждыми двумя последовательными отсчетами нагрузки и деформации.

$$\Delta n_{i,i+1} = n_{i+1} - n_i.$$

Вычисляют средние значения указанных разностей

$$\Delta n_{cp} = \frac{\sum \Delta n_i}{n},$$

где  $n$  — число разностей.

Значение модуля продольной упругости определить по формуле

$$E = \frac{\Delta P_{cp} l_0}{\Delta l_{cp} F_0}.$$

Это значение можно получить как по результатам обработки диаграммы растяжения (рис. 2.1), так и по результатам отсчета значений  $\Delta P_{cp}$  и  $\Delta l_{cp}$  силоизмерительной шкалы испытательной машины и тензометра МК-3.

### 3. ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### *Цель работы*

Изучение поведения различных материалов при приложении сжимающих нагрузок и определение соответствующих механических характеристик: предела текучести для пластичных и предела прочности для хрупких материалов.

#### *Постановка испытания*

Определение механических свойств при приложении сжимающих нагрузок применяется для малопластичных материалов, например, чугунов, инструментальных сталей, керамики и для определения расчетных характеристик материалов деталей или узлов, работающих на сжатие. Испытание на сжатие имеет характерные особенности, существенно отличающие его от испытания на растяжение, а именно:

- 1) пластичные материалы не разрушаются на конечной стадии испытания; многие металлы и сплавы весьма значительно деформируются, не разрушаясь;
- 2) результаты испытаний образцов на сжатие существенно зависят от отношения высоты образца к диаметру;
- 3) на предел прочности и характеристики пластичности заметно влияют условия трения в опорных торцах образца.

## Образцы для испытаний

При испытании металлов, например, стали и чугуна применяются цилиндрические образцы с отношением высоты к диаметру в пределах 1—2. Наиболее часто применяемые типы образцов приведены на рис. 3.1.

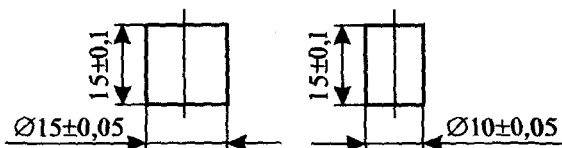


Рис. 3.1.

## Испытательная машина

Испытания проводятся на машинах любой конструкции, работающих на сжатие и соответствующих требованиям ГОСТа 7855-68.

На рис. 3.2 дано устройство и описание работы универсальной гидравлической испытательной машины для испытаний на растяжение, сжатие, изгиб и срез с максимальной нагрузкой на образец 1000 кН.

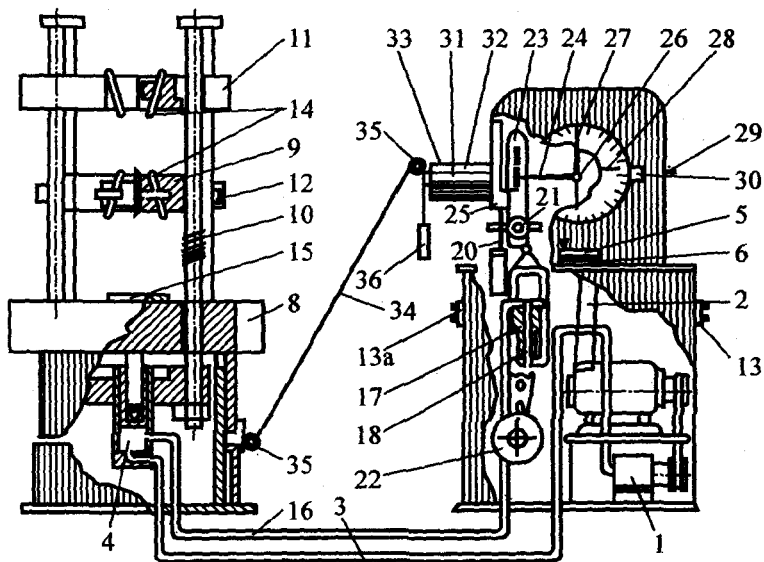


Рис. 3.2.

Машина состоит из двух основных частей: пульта управления и рабочей части.

В качестве нагнетаемой жидкости используется масло. Последнее из масляного бака 1 при помощи шестеренчатого насоса подается в многоступенчатый поршневой насос высокого давления и через перепускную колонку 2 по маслопроводу 3 подается в главный цилиндр 4. Регулировка скорости подачи масла, а следовательно, и скорости нагружения образца, производится поворотом маховичка 5, воздействующего на тройной клапан, который служит для соединения главного цилиндра либо с маслопроводом высокого давления для нагрузки, либо с резервуаром для разгрузки и обратного хода.

Нагрузочные скорости указаны на шкале 6 под маховичком. Шкала градуирована для скорости в миллиметрах в минуту, а регулировка скоростей бесступенчатая.

Один оборот маховичка перекрывает весь диапазон гидравлического действия: регулировочная скорость, нагрузочная скорость, нуль, разгрузка, быстрый обратный ход.

Масло, попав в главный цилиндр, выталкивает плунжер, поднимающий стол 8.

Нижняя траверса 9 укреплена на колоннах 10 и в процессе испытания остается неподвижной. При испытании расстояние между верхней 11 и нижней траверсами регулируется в зависимости от размеров образца опусканием или поднятием нижней траверсы с помощью электродвигателя, укрепленного на нижней траверсе, через цепную и червячную 12 передачи. Пуск электродвигателя осуществляется от кнопочной станции 13, расположенной с правой стороны насосной установки, а перемена хода электродвигателя — от кнопочной станции 13 а, расположенной слева.

Образец, подвергающийся испытанию на растяжение, помещается в клиновых самоосвобождающихся захватах 14, закрепленных в верхней и нижней траверсах. Клиновые захваты на внутренней поверхности имеют насечку и плоский или круглый профиль в зависимости от профиля испытуемого образца. Проскальзывание образца исключается, так

как по мере увеличения растягивающей силы увеличивается и сила обжатия образца захватами.

Для проведения испытаний на сжатие на середине стола устанавливается опорная плита 15, а к нижней плоскости траверсы прикрепляется нажимная плита (на рис. 3.2 не показана). Образец, помещенный между неподвижной траверсой и подвижным столом, подвергается сжатию.

Для проведения испытаний на изгиб на столе устанавливаются специальные опоры, а к нижней плоскости траверсы прикрепляется нож, который обеспечивает приложение поперечной нагрузки к испытуемому образцу.

Аналогично, с помощью специальных приспособлений, производят испытания на срез.

### ***Силоизмерительный механизм***

Контроль за величиной нагрузки и измерение деформации образца производятся следующим образом.

Из главного цилиндра по маслопроводу 16 масло поступает на пульт управления в измерительный цилиндр 17. Давлением масла из цилиндра выталкивается плунжер 18, связанный со стальной лентой. Лента переброшена через блок 20, расположенный на оси маятника 21. К концу маятника подвешиваются съемные грузы 22, условный вес которых определяется в зависимости от требуемой максимальной нагрузки. Натяжение стальной ленты под нагрузкой заставляет маятник отклоняться от положения равновесия. При этом верхнее плечо 23 маятника, входящее в корпус шкалы, перемещает зубчатую рейку 24 индикатора, скользящую по ролику 25 и входящую в зацепление с шестеренкой 26, укрепленной на одной оси с подвижной и неподвижной стрелками 27 и 28. При своем движении рейка поворачивает шестерню, вместе с которой поворачивается подвижная стрелка 27. Движение второй стрелки 28 принудительное и связано с перемещением подвижной стрелки. При разрушении образца и падении нагрузки подвижная стрелка возвращается в исходное нулевое положение, а неподвижная стрелка остается на месте, фиксируя максимальную нагрузку.



В зависимости от величины требуемой или ожидаемой нагрузки для повышения точности отсчетов, индикатор испытательной машины имеет пять шкал, разбитых под одним и тем же градусом. Шкала имеет ряд окошек, через которые видны цифры, расположенные на диске за градуированной шкалой. Для каждого предела шкалы имеется свой ряд цифр, который устанавливается поворотом рычага 29 снаружи шкалы; здесь же находится указатель 30 предела шкалы.

Настройка испытательной машины на определенную нагрузку производится до пуска машины и включает в себя установку грузов на маятнике в соответствии с принятым пределом шкалы.

При подвешивании грузов маятник отклоняется от вертикального положения наружу и опирается на утапливаемую в станине опору. После подвешивания грузов опора утапливается, и маятник возвращается в вертикальное положение.

Установку грузов на маятнике в соответствии с принятым пределом шкалы производят по таблице 1.

Таблица 1

Предел шкалы, кН	Подвешенные грузы (условный вес)	Число делений шкалы	Цена деления шкалы, кН
50	Маятник	500	0,1
100	Маятник + 5000	500	0,2
250	Маятник + 20000	500	0,5
500	Маятник + 45000	500	1,0
1000	Маятник + 95000	500	2,0

### Диаграммное устройство

Испытательная машина позволяет производить автоматическую запись диаграммы испытания.

Самопишущий прибор механического типа вычерчивает кривую усилие — деформация и может быть использован при испытаниях на растяжение, сжатие и изгиб. Приспособление для записи диаграммы работает следующим образом. На хвостовой части зубчатой рейки 31, выходящей из пульта управления, закреплено записывающее перо 32. Здесь же прикреплен барабан 33. Так как движение рейки связано непо-

средственно с движением маятника, то запись величины нагрузки на диаграмме производится весьма точно.

Величина деформации образца связана с поднятием верхней traversы и стола испытательной машины. К столу машины прикреплена нить 34, переброшенная через систему блоков 35 и один шкив барабана. На конце нити подвешен груз 36. При движении стола испытательной машины барабан поворачивается, и записывающее перо отмечает величину деформации образца.

### **Испытание образца из мягкой стали**

Образец цилиндрической формы (рис. 3.1) после обмера устанавливается между плитами испытательной машины, с соблюдением мер по центрированию нагрузки.

Испытание осуществляется путем сжатия образца непрерывно и плавно возрастающей (статической) нагрузкой. При этом пишущий прибор вычерчивает диаграмму сжатия, изображенную на рис. 3.3.

Вначале диаграмма сжатия имеет вид, подобный диаграмме растяжения. Имеется прямолинейный участок  $OA$ , соответствующий упругой деформации. Точка  $A$  соответствует усилию при пределе пропорциональности материала. За точкой  $A$  диаграмма отклоняется от прямой линии, и деформации растут быстрее нагрузок, до появления признаков текучести. Однако площадка текучести на диаграмме отсутствует, и усилие текучести можно определить условно аналогично тому, как это делается на диаграмме растяжения (рис. 1.11) или по кратковременной остановке стрелки силоизмерителя. Фиксируя нагрузку ( $P_T$ ) в этот момент, можно определить предел текучести по формуле

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F}. \quad (3.1)$$

При дальнейшем росте нагрузки кривая диаграммы продолжает идти вверх, что свидетельствует о возрастании сопротивления материа-

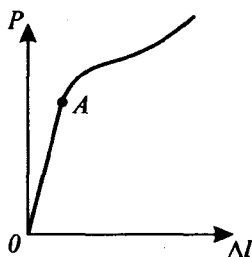


Рис. 3.3.

ла сжатию. Вскоре рост деформаций начинает отставать от роста усилий. На этом участке кривая диаграммы имеет выпуклость, обращенную вниз. Это явление объясняется тем, что с ростом пластических деформаций и укорочения образца возрастают поперечные размеры и соответственно площадь сечения.

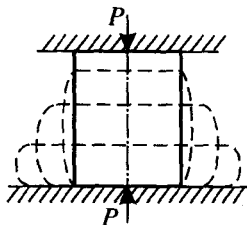


Рис. 3.4.

При увеличении площади поперечного сечения дальнейшая деформация требует все большего возрастания нагрузки. По мере роста нагрузки увеличивается трение по торцевым поверхностям образца, которое затрудняет поперечные деформации торцов, и образец принимает бочкообразную форму (рис. 3.4).

С ростом нагрузки образец расплющивается, не давая следов разрушения материала. Опыт приходится прекращать, не получив величины разрушающей нагрузки.

Таким образом, предел прочности при сжатии для стали и других пластичных материалов определить опытным путем не удастся. Значения предела пропорциональности и предела текучести при испытании на сжатие мало отличаются от полученных их значений при испытании на растяжение. Поэтому считают, что пластичные материалы одинаково сопротивляются растяжению и сжатию, и за основные характеристики прочности принимают характеристики, полученные при растяжении.

### **Испытание образца из хрупкого металла (чугуна)**

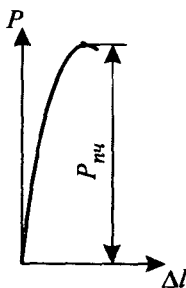


Рис. 3.5.

Опыт производится в том же порядке, как и предыдущий. Вычерчиваемая самописцем испытательной машины диаграмма имеет вид, показанный на рис. 3.5.

От начала координат диаграмма идет почти по прямой линии, с небольшим наклоном к оси сил. Затем, все более искривляясь, достигает значения максимальной нагрузки и резко обрывается. Это свидетельствует о потере способности материала сопротивляться сжимающей нагрузке.

В процессе испытания в образце происходят следующие изменения. В начале опыта под действием сжимающих сил образец, укорачиваясь, принимает бочкообразную форму, что свидетельствует о наличии небольших пластических деформаций. При достижении нагрузкой наибольшей величины происходит разрушение образца, с образованием в нем наклонных трещин. После появления трещин верхняя часть образца сдвигается по отношению к нижней по плоскости трещины. Нагрузка при этом резко падает (рис. 3.6).

В результате испытания можно определить только одну механическую характеристику — предел прочности чугуна при сжатии по формуле

$$\sigma_{пч} = \frac{P_{пч}}{F_0}, \quad (3.2)$$

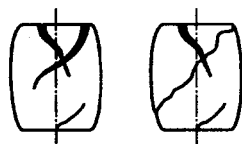


Рис. 3.6.

где  $P_{пч}$  — нагрузка, соответствующая разрушению образца, Н;  $F_0$  — первоначальная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

### Обработка опытных данных

Обработка опытных данных производится в соответствии с требованиями формы журнала лабораторных работ для лабораторной работы № 3.

В журнал лабораторной работы заносят исходные данные размеров образцов и зарисовывают их эскизы до и после испытания. По результатам опытных данных вычисляют значения механических характеристик для обоих образцов и вычерчивают с соблюдением масштаба диаграммы сжатия в координатных осях  $P, \Delta l$ .

Определяют значения допускаемых напряжений применительно к металлу испытанных образцов, приняв для стали значение коэффициента запаса прочности  $n = 1,5$ , а для чугуна —  $n = 3$ .

## 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ ( $E$ ) И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА СТАЛИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

### *Цель работы*

1. Экспериментальное определение модуля продольной упругости стали и коэффициента Пуассона при растяжении.
2. Опытная проверка закона Гука.

### *Постановка испытания*

Рассматривая диаграмму растяжения стали можно заметить, что на начальном ее участке существует прямая пропорциональность между приращением напряжения  $\sigma$  и приращением относительной деформации  $\epsilon$ :

$$\sigma = E\epsilon. \quad (4.1)$$

Коэффициент пропорциональности  $E$ , численно равный тангенсу угла наклона прямолинейного участка диаграммы к оси деформаций, называется модулем продольной упругости. Чем больше модуль упругости  $E$ , тем меньше деформируется (удлинится) материал под действием внешней нагрузки. При растягивающей нагрузке  $P < P_{\text{пл}}$  разгрузка всякий раз приводит к исчезновению деформации, возникшей в нем под действием приложенного усилия. Такая деформация называется упругой.

Модуль упругости при растяжении (модуль Юнга) определяют по формуле

$$E = \frac{\Delta P \cdot l_0}{\Delta l_{cp} \cdot F_0}, \quad (4.2)$$

где  $\Delta P$  — степень нагружения, кН;  $l_0$  — длина образца, мм;  $\Delta l_{cp}$  — среднее приращение расчетной длины при нагружении на  $\Delta P$  мм;  $F_0$  — исходная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Следовательно, первая часть опыта сводится к определению абсолютного удлинения образца на его расчетной длине  $l_0$ .

Степень нагружения  $\Delta P$  выбирается таким образом, чтобы между начальной нагрузкой и  $P = 0,7 P_{пц}$  было не менее пяти ступеней. Первый отсчет по тензорезистору берется при начальной нагрузке, равной 15—20% от предполагаемой  $P_{пц}$ .

Если одновременно с измерением продольной деформации измерять и поперечную, то можно определить и величину коэффициента Пуассона

$$\mu = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right|, \quad (4.3)$$

где  $\epsilon'$  — относительная поперечная деформация;  $\epsilon$  — относительная продольная деформация.

Значение коэффициента Пуассона для большинства металлов близко к 0,3. Для стали среднее его значение, полученное из многочисленных опытов, составляет 0,28 и изменяется в пределах от 0,25 до 0,30, оставаясь одинаковым для деформаций растяжения и сжатия.

### **Образец для испытаний**

Применяемый образец представляет собой полосу сечением 6 × 40 мм. Длина полосы выбирается в 4 + 5 раз больше ширины, с целью исключения влияния напряженного состояния в зажимах образца на измеряемые величины.

На образце приклеивают два тензорезистора  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 4.1) для измерения продольных и поперечных деформаций, их располагают на середине по ширине образца для исключения влияния возможной внецентренности растягивающей силы при растяжении.

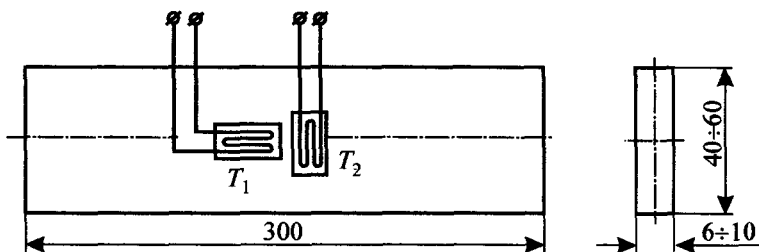


Рис. 4.1.

### Измерение деформаций

Деформации определяют методом электротензометрирования. В основе этого метода лежит зависимость омического сопротивления  $R$  проводника от его геометрических размеров — длины  $l$  и площади поперечного сечения  $F$  [3]

$$R = \rho \frac{l}{F}, \quad (4.4)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление.

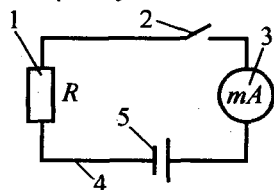


Рис. 4.2.

Рассмотрим электрическую схему (рис. 4.2), состоящую из исследуемого куска проволоки 1 с омическим сопротивлением  $R$ , коммутационных проводов 4, миллиамперметра 3 и источника питания 5. Если включателем 2 замкнуть цепь, то по ней потечет электрический ток, и стрелка прибора 3 отклонится на некоторую величину  $I_1$ . Приложим к проволоке 1 растягивающую силу  $P$ . Под действием этой силы длина проволоки увеличится на величину  $\Delta l$ , следовательно,  $R$  увеличится на величину  $\Delta R$  (см. формулу 4.4), а ток уменьшится на величину  $\Delta I$ , и стрелка миллиамперметра  $mA$  покажет некоторую величину  $I_2 < I_1$ . Таким образом, изменение силы тока линейно зависит от абсолютной деформации  $\Delta l$ :

$$\Delta I = m \cdot \Delta l, \quad (4.5)$$

где  $m$  — градуировочный коэффициент.

Абсолютная деформация в пределах упругости очень мала, поэтому изменение тока также незначительно. Чтобы увеличить величину  $\Delta I$ , применяют проволоку с большим удельным сопротивлением (нихром, константан) диаметром 0,02—0,05 мм, по возможности большей длины.

Если проволочку  $l$  наклеить на растягиваемую деталь так, чтобы она деформировалась вместе с деталью, то по отклонению стрелки миллиамперметра можно определять деформацию детали и возникающие в ней напряжения. Таким образом, проволочка  $l$  становится датчиком информации о деформированном и напряженном состоянии детали.

Такой проволочный датчик называют тензорезистором и на практике он выглядит так: (рис. 4.3) на полоске бумаги наклеена зигзагообразной формы (для увеличения длины) тонкая высокоомная проволока, поверх которой наклеена вторая полоска бумаги, а концы проволоки выведены наружу. Тензорезистор с помощью специальных клеев (БФ-2, БФ-4 и др.) наклеивается на поверхность испытываемого образца и при испытании деформируется вместе с ним. Тензорезисторы могут быть как проволочного, так и фольгового типа.

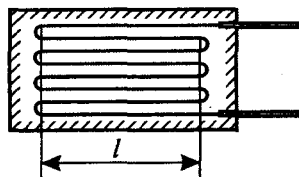


Рис. 4.3.

При деформации тензорезистора изменяется длина и площадь поперечного сечения его проволоки, что приводит к изменению сопротивления, причем

$$\frac{R + \Delta R}{R} = \frac{l + \Delta l}{l} \left( \frac{d}{d + \Delta d} \right)^2, \quad (4.6)$$

где  $d$  — диаметр проволоки тензорезистора.

Отбрасывая малые величины выше первого порядка и учитывая, что  $\frac{\Delta l}{l} = \epsilon$ , а  $\frac{\Delta d}{d} = -\mu\epsilon$ , получим

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon(1 + 2\mu) \quad \text{или} \quad \frac{\Delta R}{R} = C\epsilon, \quad (4.7)$$



Величина  $C$  называется тензочувствительностью тензорезистора и обычно изменяется в пределах от 1,8 до 2,3.

Отношение  $\frac{\Delta R}{R}$  имеет очень малые величины, требующие измерительных схем высокой чувствительности, обеспечивающих очень точное измерение весьма малых изменений сопротивления тензорезистора, вызванных деформацией испытуемой детали.

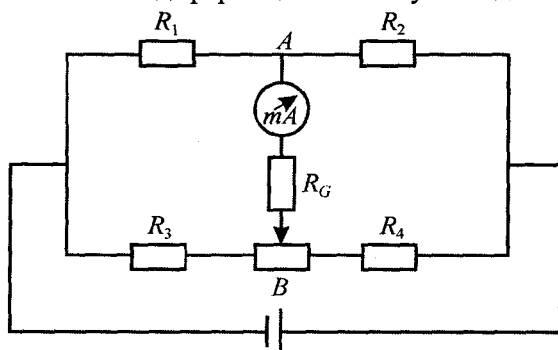


Рис. 4.4.

Простейшей схемой с применением тензорезисторов, дающей удовлетворительный результат при измерении статических деформаций, является мостовая схема включения тензорезисторов с чувствительным миллиамперметром в измерительную диагональ (рис. 4.4).

Плечи моста представляют собой четыре одинаковых тензорезистора, один из них называется “рабочим”. Он наклеен на исследуемую деталь и деформируется вместе с ней. Сопротивление этого тензорезистора изменяется не только в связи с деформацией детали, но и при изменении температуры.

Для исключения влияния температуры на изменение омического сопротивления рабочего тензорезистора применяется температурный компенсационный тензорезистор, наклеенный на вспомогательную пластину из того же материала, но не подвергающуюся деформации. Эти тензорезисторы  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 4.4), находясь в одинаковом тепловом режиме, дают одинаковые приращения сопротивлений, и, следовательно, изменение температуры не повлияет на показания миллиамперметра. Два других тензорезистора моста  $R_3$  и  $R_4$  — балластные (помещены в измерительном приборе).

Перед началом измерения деформаций стрелка миллиамперметра устанавливается на нуль. При этом мост будет сбалансирован, т.е. на измерительной диагонали напряжение отсутствует, и выполняется условие

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \quad (4.8)$$

Наиболее употребительный способ балансировки моста заключается в том, что между тензорезисторами  $R_3$  и  $R_4$  вводится регулировочное сопротивление  $R_G$  с хорошо пригнанными скользящими контактами. В случае изменения величины сопротивления рабочего тензорезистора баланс моста нарушается, в ветви  $AB$  (рис. 4.4) с миллиамперметром появляется ток, и стрелка прибора отклоняется от нулевого положения.

Обычно мост составляется из тензорезисторов равного сопротивления  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ ; тогда ток в измерительной диагонали при изменении сопротивления тензорезистора  $R_1$  на величину  $\Delta R$  будет

$$i_2 = I \frac{\Delta R}{4(r_2 + R)}. \quad (4.9)$$

Из сочетания формул (4.7) и (4.9) имеем

$$\varepsilon = \frac{4(r_2 + R)}{CR} \cdot \frac{i_2}{I}. \quad (4.10)$$

Знаменатель в формуле (4.10) можно представить в виде

$$CIR = CU, \quad (4.11)$$

где  $U$  — напряжение в цепи.

Ток  $i_2$  в миллиамперметре можно выразить формулой

$$i_2 = \alpha_2 \cdot n, \quad (4.12)$$

где  $\alpha_2$  — цена деления шкалы миллиамперметра;  $n$  — число его делений, на которые отклоняется стрелка.

Формулы (4.10), (4.11) и (4.12) дают зависимость

$$\varepsilon = n \frac{4\alpha_2 (r_2 + R)}{CU}. \quad (4.13)$$

Формулу (4.13) можно представить в виде

$$\varepsilon = nk. \quad (4.14)$$

Параметр  $K$  называют ценой деления шкалы прибора, который является постоянной величиной при обеспечении постоянства напряжения  $U$  в цепи.

Из формул (4.13) и (4.14) цена деления шкалы прибора определяется по формуле

$$k = \frac{4\alpha_z (r_z + R)}{CU}. \quad (4.15)$$

При отсутствии возможности получить значения  $\alpha_z$ ,  $r_z$ ,  $R$  и  $C$  можно производить определение величины  $K$  непосредственно из опыта (тарировкой) на основе использования формулы (4.13) в виде

$$K = \frac{\varepsilon}{n}. \quad (4.16)$$

Таким образом, величина относительной деформации испытываемой детали прямо пропорциональна  $n$  — числу делений шкалы измерительного прибора, на которое отклоняется его стрелка от своего начального положения в зависимости от знака деформации.

Следует отметить, что малая величина тока в измерительной диагонали моста заставляет применять гальванометры (миллиамперметры) с высокой чувствительностью или использовать усилительную аппаратуру с высокой стабильностью коэффициента усиления.

### **Электрическая схема измерений**

Электрическая схема измерения деформаций при определении коэффициента Пуассона приведена на рис. 4.5 [4].

Рабочий  $R_p$  и компенсационный  $R_k$  тензорезисторы включены в два плеча сбалансированного моста. Вторая часть полумоста расположена в усилителе. При изменении сопротивления рабочего тензорезистора, вызванного деформацией образца, балансировка моста нарушается и в его диагонали появляется ток. Этот сигнал очень мал. Для его увеличения применяют усилитель типа ПЭТ-3В-М.

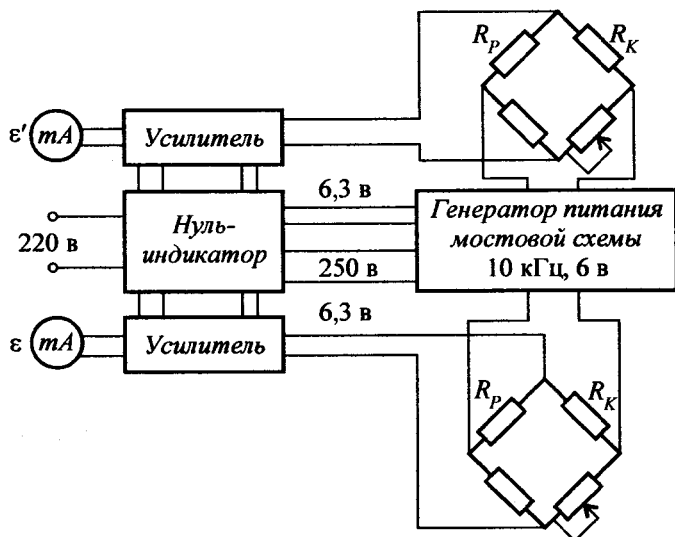


Рис. 4.5.

С усилителя сигнал поступает на миллиамперметр  $mA$  и отклоняет его стрелку на величину, пропорциональную продольной  $\epsilon$  или поперечной  $\epsilon'$  деформации. Тензомосты измерительной цепи отрегулированы так, чтобы коэффициенты усиления были одинаковыми. Это позволяет определять коэффициент Пуассона как отношение показаний миллиамперметров поперечной и продольной деформаций

$$\mu = \frac{\Delta n_{2cp} \cdot \alpha_2}{\Delta n_{1cp} \cdot \alpha_1} = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right|, \quad (4.17)$$

где  $\Delta n_{cp}$  — среднее значение показаний миллиамперметра из четырех ступеней нагружения образца.

### Испытательная машина

Настоящая работа проводится на универсальной гидравлической испытательной машине с максимальным растягивающим усилием в 50 кН. Конструктивной особенностью указанной машины в отличие от аналогичной машины с растягивающим усилием в 1000 кН является раз-

мещение рабочего цилиндра с плунжером сверху. Принцип работы машины описан в лабораторной работе по испытанию материалов на сжатие (нумерация частей машины сохранена).

Для проведения испытаний на растяжение образец зажимается в клиновых захватах подвижной траверсы 11 (рис. 3.2) и нижней неподвижной траверсы 9.

Шкала силоизмерителя имеет пять пределов максимальной нагрузки, требующих соответствующей подвески грузов на маятнике. В соответствии с выбранным пределом нагрузки производится подвеска грузов на маятнике машины (см. табл. 2).

*Таблица 2*

Предел шкалы, кН	Условный вес подвешиваемых грузов, кг	Число делений шкалы	Цена деления шкалы, кН
2,5	Вес маятника	500	5
5,0	Вес маятника + 250	500	10
10,0	Вес маятника + 250 + 500	500	20
25,0	Вес маятника + 250 + 500 + 1500	500	50
50,0	Вес маятника + 250 + 500 + 1500 + 2500	500	100

### ***Проведение испытания***

Перед испытанием измеряют размеры поперечного сечения растягиваемого образца и определяется площадь сечения.

Определяется величина максимальной допускаемой нагрузки с таким расчетом, чтобы испытание было проведено в пределах упругих деформаций.

В соответствии с принятой максимальной нагрузкой настраивается испытательная машина. Настройка ее к работе заключается в установке клиновых захватов, соответствующих профилю образца, подвеске грузов на маятнике и установке соответствующего предела шкалы. Нижняя траверса устанавливается в зависимости от длины образца.

На вход каналов измерителя деформаций подключаются рабочие и компенсационные тензорезисторы.

Подключается измеритель деформаций, устанавливается нужная чувствительность усилителя, и уравнивается тензометрический мост, устанавливая на ноль стрелку миллиамперметра.

Образец зажимается в верхнем клиновом захвате, и производится включение испытательной машины. Маховиком плавно открывается впускной клапан, и стрелка индикатора силоизмерителя устанавливается на ноль, после чего зажимается и нижний клиновой захват. При выбранной скорости нагружения дается предварительная нагрузка с целью исключения возможных неточностей, связанных с обжатием образца и выбором зазоров в самой машине.

При достижении установленной величины предварительной нагрузки снимаются первые показания тензорезисторов. Дальнейшее нагружение образца осуществляется ступенями в  $\Delta P$  кН. Величина нагрузки на образец при каждой ступени нагружения и соответствующие отсчеты по тензорезисторам заносятся в журнал лабораторных работ.

### **Обработка опытных данных**

При обработке результатов испытаний производят следующие вычисления.

1. Подсчитывают среднюю разность отсчетов на ступень нагрузки для каждого тензорезистора и для величины нагружающей силы

$$\Delta n_{i_{cp}} = \frac{\sum \Delta i}{n}, \quad \Delta P_{cp} = \frac{\sum \Delta P}{n}$$

где  $n$  — число ступеней нагрузки;  $\Delta P$  — разность отсчетов.

2. Определяют среднее значение приращений относительных поперечных и продольных деформаций

$$\varepsilon' = \Delta n_{2cp} \cdot \alpha_2, \quad \varepsilon = \Delta n_{1cp} \cdot \alpha_1.$$

3. Определяют значение коэффициента Пуассона и модуля Юнга.

$$\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{\Delta n_{2cp} \cdot \alpha_2}{\Delta n_{1cp} \cdot \alpha_1}, \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\Delta P_{cp}}{F \cdot \varepsilon}.$$

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ВДАВЛИВАНИЯ. ТВЕРДОСТЬ ПО БРИНЕЛЛЮ

**Цель работы:** ознакомиться с существующими методами определения твердости и получить практические навыки в определении твердости стали и других металлов.

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

Под твердостью понимают свойство поверхностного слоя материала оказывать сопротивление упругой и пластической деформациям или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) определенной формы и размеров.

Испытание на твердость методами вдавливания можно рассматривать как одну из разновидностей механических испытаний. При этом в результате постепенного увеличения нагрузки на индентор металл ведет себя так же, как и при другом любом виде механических испытаний, и в общем случае последовательно претерпевает три стадии: упругую, пластическую и разрушение. Это позволяет строить диаграммы твердости (вдавливания) в тех же координатах, что и при других видах нагружения, т. е. в координатах деформация-напряжение. На построенных таким образом диаграммах, которые охватывают упругую и пластическую область, имеются такие же характерные точки, что и на диаграммах растяжения. Это повышает значимость испытания на твердость и дает воз-

возможность получить почти такую же информацию о свойствах металла, что и при растяжении.

Метод твердости является незаменимым при оценке механических свойств металлов в процессе эксплуатации; для металлов, из которых трудно изготовить образцы резанием; при оценке свойств поверхностного слоя; при аварийных исследованиях и разработке новых сплавов на лабораторных плавках, когда не представляется возможным вырезать образцы; при стопроцентном контроле и отбраковке качества металла и изделий. Кроме того, этот метод наиболее легко поддается дистанционному управлению, что имеет большое значение для постоянного контроля качества изделий в труднодоступных местах.

## Твердость по Бринеллю

При стандартном (ГОСТ 9012-59) измерении твердости по Бринеллю (рис. 5.1) стальной шарик диаметром  $D$  вдавливается в испытываемый образец нагрузкой  $P$ , приложенной в течение определенного времени. После снятия нагрузки измеряют размер  $d$  оставшегося на поверхности образца отпечатка. Число твердости по Бринеллю определяют как отношение нагрузки  $P$ , приложенной к шаровому индентору, к площади  $F$  шаровой поверхности отпечатка.

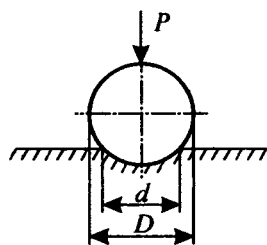


Рис. 5.1.

$$HB = \frac{P}{F}. \quad (5.1)$$

Площадь шаровой поверхности отпечатка можно определить по глубине  $h$  отпечатка:

$$F = \pi D h, \quad (5.2)$$

или по диаметру отпечатка  $d$ :

$$F = \frac{\pi D}{2} \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right). \quad (5.3)$$



Практически числа твердости по Бринеллю не вычисляют, а берут из таблиц, помещенных в приложении к ГОСТу 9012-80, где заранее подсчитаны значения *HV* для различных диаметров отпечатков при разных диаметрах вдавливаемых шариков. Это значительно сокращает продолжительность испытаний.

Определяя твердость по Бринеллю, используют стальные шаровые инденторы твердостью 8500 МПа одного из трех диаметров — 2,5; 5 или 10 мм.

Число твердости по Бринеллю измеряют в единицах напряжения МПа, однако в соответствии со стандартом их не пишут. Если твердость по Бринеллю определяют шариком с  $D = 10$  мм под нагрузкой  $P = 30$  кН со временем выдержки  $\tau = 10$  с, полученное число твердости (900, 950 и др.) записывают так: 900 HB, 950 HB и т.п.

Если же использованы другие условия (диаметр шарика, нагрузка и время выдержки), то в записи указывают все эти изменения. Например: HB 2,5 (7,5) 30-910, что означает число твердости по Бринеллю (910), полученное при вдавливании шарика диаметром 2,5 мм нагрузкой  $P = 7,5$  кН в течение  $\tau = 30$  с.

Минимальная толщина испытываемого образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

Поверхность испытываемого образца обрабатывается в виде плоскости так, чтобы края отпечатка были достаточно отчетливы для измерения его диаметра с требуемой точностью, и должна быть свободна от окалины и других посторонних веществ.

Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее чем  $2,5d$ , а расстояние между центрами двух соседних отпечатков — не менее  $4,0d$ .

При измерении твердости на образцах или деталях с криволинейной поверхностью длина и ширина подготовленной плоской поверхности должна составлять не менее двух диаметров применяемого шарика.

Диаметр отпечатка измеряется с помощью отсчетных микроскопов, погрешность которых не должна превышать  $\pm 0,01$  мм на одно наименьшее деление шкалы и  $\pm 0,02$  мм на всю длину шкалы.

Диаметр отпечатка измеряется в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяется как среднее арифметическое из двух измерений. Разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 2% от меньшего из них.

При известной твердости по Бринеллю примерная глубина отпечатка  $h$  может быть определена по формуле:

$$h = \frac{P}{\pi D \cdot HB} \quad (5.4)$$

На обратной стороне испытуемого образца после измерения твердости не должно быть заметно следов деформации.

При выборе диаметра шарика  $D$ , нагрузки  $P$ , продолжительности выдержки под нагрузкой и минимальной толщины испытуемого образца следует руководствоваться таблицей 5.1, взятой из ГОСТа 9012-59.

**Таблица 5.1**  
**Выбор диаметра шарика и величины нагрузки**  
**в зависимости от твердости и толщины испытуемого образца**

Материалы	Интервал твердости в числах Бринелля	Минимальная толщина испытуемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой $P$ и диаметром шарика $D$	Диаметр шарика $D$ , мм	Нагрузка $P$ , кН	Выдержка под нагрузкой, сек
Черные металлы	1400 — 4500	От 6 до 3	$P = 30D^2$	10,0	29,4	10
		От 4 до 2		5,0	7,35	
		Менее 2		2,5	1,84	
	< 1400	Более 6	$P = 10D^2$	10,0	9,8	10
		От 6 до 3		5,0	2,45	
		Менее 3		2,5	0,613	
Цветные металлы	> 1300	От 6 до 3	$P = 30D^2$	10,0	29,4	30
		"4" 2		5,0	7,35	
		Менее 2		2,5	1,84	
	350 — 1300	От 9 до 3	$P = 10D^2$	10,0	9,8	30
		"6" 3		5,0	2,45	
		Менее 3		2,5	0,613	
80 — 350	Более 6	$P = 2,5D^2$	10,0	2,45	60	
	От 6 до 3		5,0	0,613		
	Менее 3		2,5	0,15		

Метод Бринелля является наиболее распространенным и наиболее изученным методом измерения твердости.

### Образцы, испытательная машина и измерительные приборы

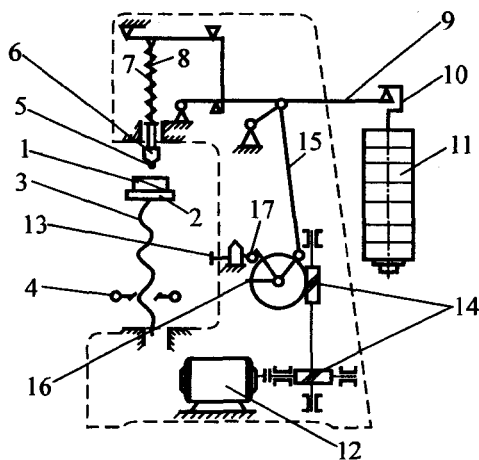


Рис. 5.2.

Для определения твердости по Бринеллю применяют прибор ТШ-2 (рис. 5.2). При проведении испытаний прибор работает следующим образом.

Испытуемый образец 1 помещается на подъемный столик 2, расположенный на подъемном винте 3. Подъемный винт при помощи маховика 4 поднимает столик с образцом до соприкосновения с шариком 5, находящимся в сменном наконечнике 6. В головке станины помещена пружина 7, на которую опирается шпиндель 8. Пружина создает предварительную нагрузку на образец, что исключает его перемещение во время испытания. Нагрузка прилагается к образцу посредством рычажной системы. На длинном плече основного рычага 9 имеется подвеска 10, на которую накладываются съемные грузы 11. Комбинацией грузов можно осуществить нагрузку 1,84; 2,45; 7,35; 9,8 и 29,4 кН. Наложение нагрузки происходит автоматически от электродвигателя 12, включение которого производится нажатием кнопки 13. Вращение вала электродвигателя при помощи червячных передач 14 передается шатуну 15, при опускании которого нагрузка передается на шпиндель пресса. Продолжительность испытания регулируется соответствующей установкой подвижного упора 16, устанавливаемого до испытания. Упор, достигнув переключателя 17, переключает вращение электродвигателя в обратную сторону, шатун вновь поднимается, и по-

сле возвращения шатуна в первоначальное положение электродвигатель автоматически выключается.

### **Проведение испытания**

В зависимости от заданных условий выбирается один из размеров прилагаемых к прибору шариков диаметром 2,5; 5,0; 10,0 мм и закрепляется в шпинделе. Упор устанавливается, исходя из требуемой продолжительности выдержки под нагрузкой. Накладывается на подвеску требуемое количество грузов в соответствии с таблицей 5.2.

**Таблица 5.2**

**Грузы, применяемые при стандартных испытаниях**

Нагрузка $P$ , кН	Подвешиваемые грузы (условный вес)			
	Рычаги с подвеской без гирь (1,83 кН)	Гиря		
		Малая (0,613 кН)	Средняя (2,45 кН)	Большая (4,9 кН)
1,83	1	—	—	—
2,45	1	1	—	—
7,35	1	1	—	1
9,80	1	1	1	1
29,4	1	1	1	5

Примечание. Соотношение между нагрузкой  $P$  и диаметром шарика  $D$  дано в таблице 5.1.

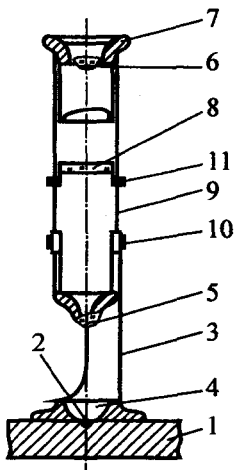
Образец помещается на подъемный столик и приводится в соприкосновение с шариком. Включается электродвигатель, приводящий в движение механизм шатуна, и нагрузка плавно передается на образец. Выдержка нагрузки на образце, освобождение образца от нагрузки и выключение электродвигателя происходят автоматически.

После получения первого отпечатка вращением маховика опускают столик, передвигают образец и при той же нагрузке делают на поверхности образца еще один-два отпечатка.

Центр каждого отпечатка должен находиться от края образца на расстоянии не менее диаметра шарика, а от центра соседнего отпечатка — на расстоянии не менее двух диаметров шарика.

Диаметры отпечатков измеряют при помощи специального прибора — микроскопа Бринелля.

### **Микроскоп Бринелля**



**Рис. 5.3.**

Схема микроскопа Бринелля приведена на рис. 5.3.

Для измерения диаметра отпечатка (лунки) микроскоп берут за колонку 3 и устанавливают основанием на испытуемый образец 1 таким образом, чтобы отверстие в основании 4 было по возможности концентрично с отпечатком 2, а окно в колонке приходилось бы против источника света.

Для получения четкого изображения следует установить окуляр 6 по глазам, вращая его за окулярное кольцо с накаткой 7 до тех пор, пока изображение сетки шкалы 8 не станет совершенно отчетливым.

Если при этом изображение отпечатка не получится также отчетливым, то следует привести в резкость изображение отпечатка, перемещая тубус 9 микроскопа по высоте вращением наружного кольца с накаткой 10.

При вращении кольца окуляра и наружного кольца с накаткой винты, входящие в винтовые пазы, заставят перемещаться окуляр и тубус по высоте.

Шкала микроскопа имеет цену малого деления 0,1 мм, цифры шкалы соответствуют целым миллиметрам. Оценка сотых производится на глаз. Вся шкала дает возможность измерять отпечатки диаметром до 6,5 мм.

В процессе испытания каждый отпечаток измеряют в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Установка шкалы в нужном направлении производится поворотом кольца шкалы 11 или поворотом самого образца.

Диаметр отпечатка измеряется с точностью до 0,05 мм при испытаниях шариками диаметром 5 и 10 мм и с точностью до 0,01 мм при испытаниях шариком диаметром 2,5 мм.

## Обработка опытных данных

Диаметр каждого отпечатка определяется как среднее арифметическое из двух его измерений во взаимно перпендикулярных направлениях.

После определения таким способом диаметров всех отпечатков, сделанных на испытуемом образце, вычисляется расчетный диаметр как среднее арифметическое из всех полученных значений.

В случае, если одно из измерений резко отличается от остальных, его следует исключить из суммирования или заменить новым, выдавив заново отпечаток на образце.

Зная величину диаметра отпечатка, число твердости определяют, пользуясь таблицами ГОСТа 9012-80, где даны значения чисел твердости в зависимости от диаметра отпечатка и условий проведения испытаний.

По полученному значению числа твердости можно определить значение предела прочности испытанного материала по формуле

$$\sigma_g = C \cdot HB, \quad (5.5)$$

где  $C$  — коэффициент, зависящий от испытуемого материала.

Значения коэффициента  $C$  для различных металлов приведены в таблице 5.3.

Существуют устойчивые зависимости между числом твердости по Бринеллю и другими характеристиками механических свойств материалов: пределом пропорциональности, пределом текучести и др.

Таблица 5.3

Значения коэффициентов  $C$  для различных материалов

Материалы	$C = \frac{\sigma_g}{H_g}$
Чугуны	0,15
Сплавы:	
литейные алюминиевые	0,25
деформируемые алюминиевые	0,38
титановые	0,30
Стали:	
высокопрочные	0,333
малоуглеродистые	0,36
Аустенитные стали и латуни	0,45

## 6. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ

**Цель работы:** ознакомиться с существующими методами определения твердости и получить практические навыки в определении твердости стали одним из описанных методов.

### 6.1. Твердость по Виккерсу

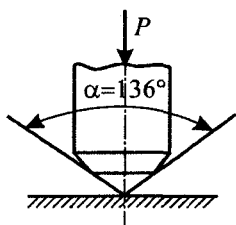
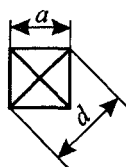


Рис. 6.1.



Этот метод — второй по распространенности после метода Бринелля. При стандартном измерении твердости по Виккерсу в поверхность образца вдавливается алмазный индентор в форме четырехгранной пирамиды с углом в вершине  $\alpha = 136^\circ$  (ГОСТ 2999-74). После удаления нагрузки  $P$ , действовавшей определенное время (10...15 с для черных и 30 с для цветных металлов), измеряют диагональ  $d$  отпечатка (рис. 6.1), оставшегося на поверхности образца. Число твердости  $HV$  (записывается без единицы измерения, например: 450HV) определяют делением нагрузки в килограмм-силах на площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка в квадратных миллиметрах:

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}. \quad (6.1)$$

Относительно небольшие нагрузки и малая глубина вдавливания индентора обуславливают необходимость более тщательно подготавливать поверхность, чем в случае измерения твердости по Бринеллю. Поверхность образцов для измерения твердости  $HV$  должна быть, как правило, отполирована и свободна от наклепа. Минимальная толщина испытываемого образца должна превышать диагональ отпечатка в 1,2 для сталей и в 1,5 раза для цветных металлов и сплавов. Чтобы получить достоверные средние значения  $HV$ , на каждом образце делают не менее 5...10 измерений.

Числа  $HV$  и  $HB$  близки по абсолютной величине. Это обусловлено равенством углов при вершине пирамиды и между касательными к шару для случая “идеального” отпечатка  $d = 0,375D$ . Однако  $HB \approx HV$  только до 400...450HV. Выше этих значений метод Бринелля дает искаженные результаты из-за остаточной деформации шарика.

## 6.2. Твердость по Роквеллу

При измерении твердости по Роквеллу (рис. 6.2) индентором служит алмазный конус с углом в вершине  $120^\circ$  и радиусом закругления 0,2 мм или стальной шарик диаметром 1,587 мм,

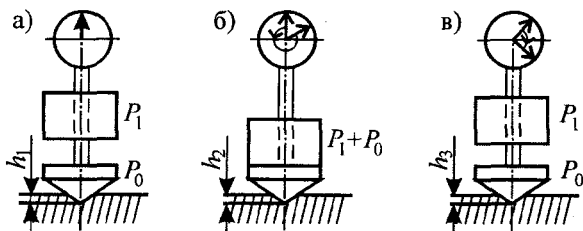


Рис. 6.2.

которые вдавливаются в образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок — предварительной  $P_0$  и общей  $P$ . [5]

$$P = P_0 + P_1, \quad (6.2)$$

где  $P_1$  — основная нагрузка.

Число твердости по Роквеллу определяют в условных единицах: оно является мерой глубины вдавливания индентора под определенной нагрузкой. Определяя твердость по Роквеллу, сначала вдавливают в поверхность образца индентор под предварительной нагрузкой  $P_0 = 100$  Н,



которая не снимается до конца испытаний. Это способствует повышению точности испытаний, так как исключает влияние вибрации тонкого поверхностного слоя. Под нагрузкой  $P_0$  индентор погружается в образец на глубину  $h_1$  (рис. 6.2, а). Затем на образец подается полная нагрузка  $P = P_0 + P_1$ , и глубина вдавливания  $h_2$  увеличивается (рис. 6.2, б). Глубина вдавливания  $h_3$  после снятия основной нагрузки  $P_1$ , когда на индентор действует только предварительная нагрузка  $P_0$ , определяет число твердости по Роквеллу ( $HR$ ). Чем больше глубина вдавливания  $h_3$  (рис. 6.2, в), тем меньше число твердости  $HR$ .

Числа твердости по Роквеллу записывают так же, как  $HB$ . Требования к поверхности образца такие же, как и при определении твердости по Виккерсу. Минимальная толщина образцов зависит от твердости материала и должна быть не меньше восьмикратной глубины вдавливания  $h_3$ . Широкое применение этого метода в заводских условиях обусловлено его простотой.

### **6.3. Диаграммы твердости при вдавливании шара в плоскую поверхность**

Испытания на твердость могут дать наиболее полную информацию о свойствах металлов в том случае, если результаты испытаний представить в виде диаграммы твердости, построенной в координатах напряжение — деформация в лунке. Построение такой диаграммы по результатам вдавливания шара в испытуемый материал сводится к следующему. При постоянно возрастающей нагрузке на шар, в поверхностном слое лунки возникают сначала упругие, затем малые пластические деформации, которые, увеличиваясь, достигают предельной величины, в результате чего в лунке может наступить разрушение. Напряжения в лунке, в определенные моменты, когда в ней возникают упругие деформации, пластические деформации и разрушение, будут характеризовать соответственно сопротивление материала упругому деформированию, пластическому деформированию и разрушению.

Такую диаграмму можно получить визуальным или автоматическим способом. При визуальном способе измеряют нагрузку и соответ-

ствующие этой нагрузке диаметр или глубину лунки. По этим данным определяют напряжение в лунке для соответствующей точки диаграммы

$$H_B = \frac{P}{\pi D h}. \quad (6.3)$$

Деформацию в лунке определяют по формуле

$$\psi_H = \frac{h}{D}. \quad (6.4)$$

По полученным данным строят диаграмму вдавливания по точкам в координатах  $H_B - \psi$  (рис. 6.3).

Автоматическая запись диаграммы в указанных координатах облегчается тем, что напряжение  $H_B$  согласно (6.3) является функцией  $P$  и  $h$ , поэтому, измеряя в каждый момент нагрузку  $P$  и соответствующую ей глубину вдавливания  $h$  и произведя автоматически деление  $P$  на  $h$ , записывают диаграмму в координатах  $H_B - h$ .

Согласно (6.4) глубина лунки  $h$  прямо пропорциональна  $\psi$ , поэтому  $h$  можно отождествлять с  $\psi$ .

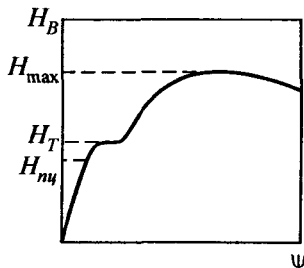


Рис. 6.3.

### **Приборы для получения диаграмм твердости по способу статического вдавливания шара в испытуемый металл**

Диаграмму твердости наиболее просто получают при помощи статического вдавливания шара, так как по мере возрастания нагрузки на шар увеличивается угол вдавливания, а следовательно, увеличивается степень деформации в лунке, и поэтому по результатам одного эксперимента можно получить диаграмму твердости [7].

Существующие приборы для испытания на твердость по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу, где нагрузки меняются ступенчато, для получения диаграмм твердости непригодны.

Для испытания материалов на твердость в упругой и пластической области и для построения диаграмм твердости применяют приборы типа

МЭИ-Т10 и МЭИ-Т10А. Первый из них применяют для определения модуля продольной упругости материалов  $E$  и построения диаграмм твердости в упругой и пластической области по результатам измерения глубины лунки. Второй прибор (МЭИ-Т10А) применяют для автоматической записи указанной диаграммы.

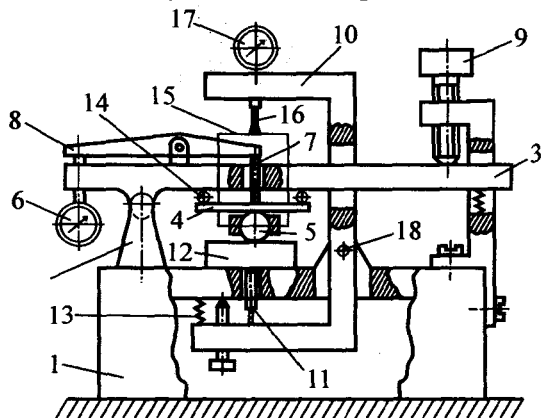


Рис. 6.4.

Кинематическая схема прибора МЭИ-Т10 приведена на рис. 6.4. Исследуемый образец 12 закрепляется на столе 1 прижимами и касается нижней поверхностью упора 11, выступающего над поверхностью стола на 0,1 мм. Пружина 13 создает постоянное контактное усилие между недеформируемой опорной поверхностью образца и упором. К исследуемой поверхности образца

подводится шар 5, при этом стрелка измерителя глубины 17 должна показывать максимальное значение измеряемой величины. Далее вращением грузового винта 9 по часовой стрелке опускается силовой рычаг 3. С момента касания с пружиной 4 верхней точки шара начинается процесс нагружения. Силовой рычаг 3 действует через опоры 14 на пружину 4, которая прогибаясь, создает усилие на шар. Величина прогиба пружины передается через толкатель 7 и коромысло 8 с соотношением плеч 1:5 на подвижной шток индикатора часового типа 6 с ценой деления 0,01 мм, протарированного в единицах силы. Под действием силы шар вдавливаются в испытываемый материал. Центр шара перемещается, увлекая за собой измерительную рамку. Перемещение центра шара, равное глубине вдавливания, измеряется индикатором часового типа с ценой деления 0,001 мм.

В процессе вдавливания шероховатости между образцом 12 и столом 1 сминаются. Образец относительно стола перемещается вниз, да-

вит на упор 11, перемещая его тоже вниз. Поскольку упор и скоба 10 жестко соединены между собой, то скоба, укрепленная шарнирно на столе, поворачивается. Это приводит к тому, что верхняя часть скобы с укрепленным на ней измерителем глубины также опускается вниз. Но так как подвижный шток 16 измерителя глубины 17 и упор 11 соосны, то перемещение корпуса измерителя глубины в результате поворота на шарнире 18 равно перемещению образца и упора относительно стола. Вследствие этого измеритель глубины 17 показывает только глубину вдавливания шара в образец относительно его исследуемой поверхности.

Силоизмерительное устройство проверяют и тарируют с помощью образцового динамометра ДОСМЗ-1. Характеристика силоизмерительного механизма линейная.

### **Техническая характеристика прибора МЭИ-Т10**

Характер изменения нагрузки — плавный. Предельная нагрузка на индентор 7000 Н. Погрешность силоизмерительного устройства не более 1%. Предельная глубина вдавливания индентора 1 мм. Точность измерения глубины вдавливания 0,5 мкм. Масса прибора 10 кг.

Прибор МЭИ-Т10А для автоматической записи диаграмм твердости выполнен в виде двух блоков. В качестве первого блока принят собственно прибор МЭИ-Т10, выполняющий задачу нагружения образца и измерения результатов испытания.

К этому блоку добавлен блок программного управления, контроля и регистрации результатов испытания. Основные элементы управления и настройки прибора вынесены на лицевую панель этого блока. Диаграмма записывается на бумажной ленте с помощью двухкоординатного самописца. Увеличение масштаба записи при измерении глубины отпечатка — в 2650 раз.

## **6.4. Портативные приборы для измерения твердости**

Из серии портативных твердомеров, применяемых для измерения твердости изделий из любых металлических материалов, наиболее удобен в применении цифровой твердомер ТПЦ-4.

Принцип действия прибора основан на измерении временного интервала между двумя последовательными соударениями свободно падающего индентора на контролируруемую поверхность.

Прибор обладает широким диапазоном применения, позволяя производить измерение твердости на изделиях с плоскими, цилиндрическими и сферическими поверхностями в единицах Бринелля (*HB*), Роквелла (*HR*) или в относительных единицах. По точности измерения он не уступает статическим приборам Бринелля, Роквелла и Виккерса. Время одного замера твердости не более 2 секунд.

Источник питания автономный (батарея "Крона"). Габаритные размеры: 120×85×45 мм, масса 0,3 кг.

### Устройство и принцип работы прибора

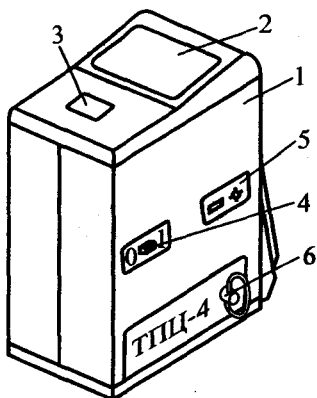


Рис. 6.5.

Малогабаритный портативный твердомер ТПЦ-4 (рис. 6.5) состоит из корпуса 1, в верхней части которого находится индикатор 2 и пусковая кнопка 3. На правой боковой панели прибора расположены переключатель питания 4 и переключатель каналов регистрации 5. Ниже переключателей расположена заводная головка 6. На опорной поверхности прибора имеется съемная крышка отсека питания, закрывающая место расположения элемента питания типа "Крона" или "Корунд".

Сущность используемого в приборе метода измерения твердости заключается в нанесении удара индентором по испытуемой поверхности и регистрации времени свободного движения индентора между двумя последовательными соударениями. В процессе удара происходит сначала упруго-пластическое внедрение индентора, а затем упругий отскок. По времени между двумя последовательными соударениями судят о величине энергии, затраченной на пластическое деформирование, или о твердости.

## **Подготовка прибора к работе и порядок работы**

1. Завести прибор вращением заводной головки 6 (рис. 6.5) по часовой стрелке.
2. Включить питание прибора перемещением переключателя 4 в сторону, обозначенную цифрой 1.
3. Нажимая кнопку переключателя каналов регистрации 5 выбрать нужный канал: *HB* (твердость в единицах Бринелля для сталей), *HRC* (твердость по Роквеллу для сталей), *HV* (дополнительный канал, программируемый по желанию заказчика для измерения твердости нестандартных деталей по массе, модулю упругости или пространственному положению).

Обозначение выбранного канала измерения твердости при нажатии кнопки 5 высвечивается в нижней части индикатора 2.

4. Установить прибор опорной частью на контролируемую поверхность изделия так, чтобы она была горизонтальна.
5. Нажать пусковую кнопку 3 и, услышав характерный щелчок, вызванный ударом индентора об испытуемое изделие, отпустить кнопку.

Результат измерения (число твердости) высвечивается на индикаторе 2 и остается на табло до следующего измерения.

Производить повторное измерение следует не ранее 4 сек. после предыдущего удара. При измерениях следует каждый раз перемещать прибор относительно предыдущего положения на расстояние не менее 1,5—2 мм. При повторном измерении в одной и той же точке изделия на показания прибора окажет влияние упрочнение металла, вследствие чего результаты измерений будут завышены.

Для определения твердости необходимо сделать не менее трех измерений и взять среднее.

При превышении твердости изделий верхнего предела соответствующей шкалы, на табло прибора после измерения высвечивается значение 999. При значении твердости ниже предела соответствующей шкалы на табло после измерения высвечивается значение 000.

Одна заводка прибора обеспечивает энергией работу механической части прибора на 35 измерений.

## **Проверка работоспособности**

Прежде, чем приступить к работе по измерению твердости, следует провести контрольные измерения твердости на образцовой мере твердости 2-го разряда, притертой к массивному основанию с помощью консистентной смазки. Если отличие измеренного значения твердости от номинального значения меры не превышает  $\pm 1,5$  единиц *HRC* или  $\pm 15$  единиц *HB*, прибор готов к работе.

Пределы измерения твердости: *HRC* от 20 до 68 единиц, *HB* — от 90 до 450 единиц по ГОСТу 9012-59 и 9013-59.

## 7.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СЕЧЕНИЯХ БАЛКИ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

### *Цель работы:*

- 1) исследование распределения нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балки и сравнение экспериментальных данных с теоретическими;
- 2) определение экспериментальным путем величин главных напряжений на уровне нейтрального слоя и сопоставление их с теоретическими;
- 3) проверка справедливости гипотезы плоских сечений и закона Гука при изгибе.

### *Описание испытательной установки*

Изгиб балки производится на гидравлическом балочном испытателе, нагружающем балку сосредоточенной силой до 50 кН. Общий вид испытателя приведен на рис. 7.1, а схема — на рис. 7.2 [8].

Нагружающий и силоизмерительный механизмы установки гидравлические. Станина состоит из двух швеллерных балок 1, установленных жестко на подставках 2. На станине закреплен электродвигатель (на рисунках он не показан), бак 4 и цилиндр гидравлического домкрата 5. Образцом для испытания служит двутавровая балка, лежащая на двух опорах: шарнирно-подвижной 7 и шарнирно-неподвижной 8, укрепленных на станине. Шестеренчатый насос 9, находящийся в баке 4 с маслом, при включении электродвигателя нагнетает масло с помощью распределительной коробки 10 по трубопроводу 11 в цилиндр 5.



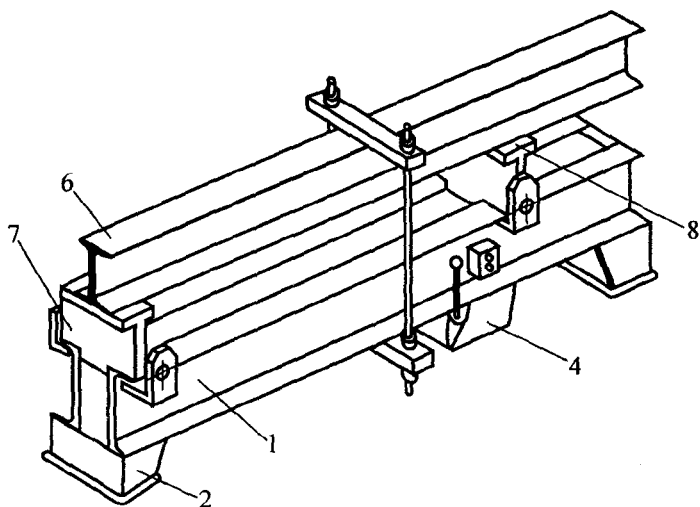


Рис. 7.1.

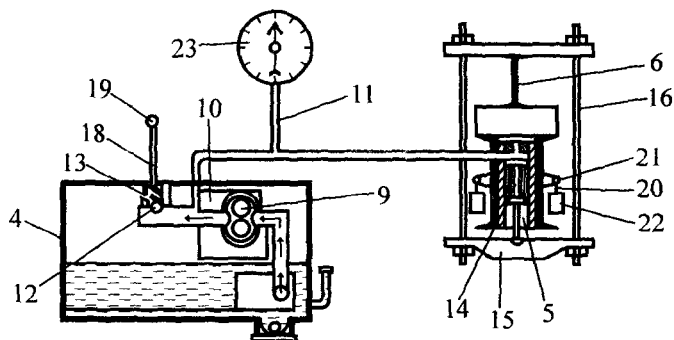


Рис. 7.2.

В распределительной коробке находится пришлифованный поршень 12, положение которого регулируется винтом 18 с ручкой 19. Подача масла из бака в цилиндр 5 и снова в бак через отверстие 13 регулируется положением поршня 12.

Вращением ручки 19 по часовой стрелке винт 18 перемещает поршень 12 вниз, и масло, поступая в цилиндр 5, давит на поршень 14. Давление масла, воспринимаемое поршнем через нижнюю поперечину 15, два длинных болта 16 и верхнюю нагружающую поперечину передается

на испытываемую балку 6. Усилие, действующее на балку, измеряется гидравлическим манометром 23. При вывинчивании винта 18 вращением рукоятки 19 против часовой стрелки испытываемая балка разгружается.

Тросики 20, перекинутые через ролики 21, связывают грузы 22 с нижней поперечиной 15 и служат для подъема поршня 14 в верхнее исходное положение.

### **Размеры испытываемой балки и расположение на ней измерительных приборов**

Изгибу подвергается двутавровая балка, установленная на балочном испытателе. Схема ее нагружения и расположение на ней тензорезисторов приведены на рис. 7.3.

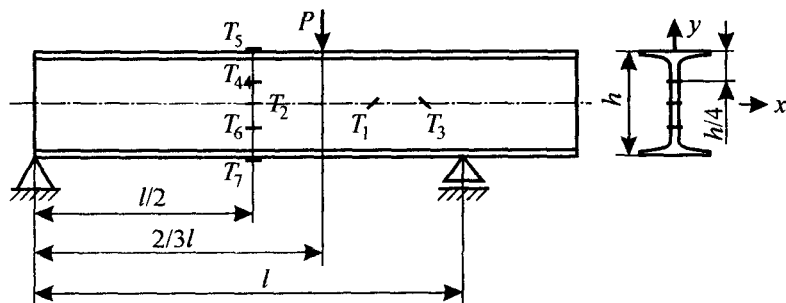


Рис. 7.3.

Измерение напряжений в сечениях балки производится методом электротензометрии. Нормальные напряжения измеряются с помощью тензорезисторов  $T$  (рис. 7.3) № 2, 4, 5, 6 и 7, приклеенных по высоте сечения балки на середине длины ее пролета, а касательные напряжения — с помощью тензорезисторов № 1 и 3, которые приклеены на уровне нейтрального слоя на участке длины балки, где действует максимальная поперечная сила. С помощью этих же тензорезисторов (№ 1 и 3) измеряются и главные напряжения на уровне нейтрального слоя. Так как главные напряжения в этом слое направлены под углом  $45^\circ$  к поперечному сечению балки, то и направление базы этих тензорезисторов совпадает с направлением главных напряжений.

## **Проведение испытания**

После ознакомления с опытной установкой и ее расчетной схемой в журнал лабораторных работ заносят исходные данные для опыта. Куда входят размеры нагружаемой балки, геометрические характеристики ее сечения и цена делений тензорезисторов, наклеенных на балку.

К измерителю деформаций подключают все семь рабочих и компенсационный тензорезисторы. В качестве измерителя деформаций может применяться любой прибор, построенный по принципу нулевого отсчета, в котором изменение сопротивления тензорезистора преобразуется в изменение электрического тока. Простейшим из них является прибор типа ИД-70.

Включают первый тензорезистор и уравнивают мост, устанавливая на ноль стрелку миллиамперметра измерителя деформаций.

После включения электродвигателя балочного испытателя, медленным вращением ручки 19 по часовой стрелке нагружают балку усилием в 10 кН. При этом стрелка миллиамперметра на измерителе деформаций отклоняется от нулевого положения на несколько делений. Вращением рукоятки под шкалой “настройка” прибора отклонившуюся стрелку миллиамперметра возвращают в исходное нулевое положение. После чего делают отсчет на шкале “настройка” измерителя деформаций и заносят соответствующую запись в журнал наблюдений. За весь промежуток времени снятия отсчета с прибора нагрузка на балке должна оставаться без изменений.

Дальнейшее нагружение производится аналогично изложенному, добавляя нагрузку равными ступенями по 10 кН, и при каждой фиксированной ступени нагрузки делаются отсчеты по шкале “настройка”. Каждый тензорезистор нагружается четыре раза равными приращениями нагрузки. При этом приращения отсчетов, снимаемых со шкалы прибора, для каждого последующего приращения нагрузки должны быть примерно одинаковыми, что служит первичным контролем правильности проведения опыта.

Наибольшее значение сосредоточенной силы в конце опыта не должно вызывать напряжений, превышающих значение предела про-

порциональности. Расчет показывает, что для принятой схемы нагружения балки (рис. 7.3), при максимальном значении сосредоточенной силы  $P = 40$  кН, максимальные напряжения в сечении двутавра № 22 достигают 114,9 МПа, что составляет 57,4% от предела пропорциональности для Ст3, из которой изготовлена балка. Очевидно, что в сечении аналогичной балки из двутавра № 24 максимальные напряжения от той же нагрузки будут меньшими.

Другим критерием контроля за правильностью проведения опыта является возвращение стрелок контрольных приборов в исходное нулевое положение после снятия нагрузки, поскольку максимальные нагрузки не превышают значений нагрузки, соответствующей пределу пропорциональности.

### Обработка опытных данных

Обработка результатов испытаний состоит в следующем.

1. Определяют среднюю разность значений нагружающей силы, приходящуюся на ступень нагрузки

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum \Delta P_i}{n}$$

2. Подсчитывают среднюю разность отсчетов на ступень нагрузки по каждому тензорезистору

$$\Delta n_{i\text{cp}} = \frac{\sum \Delta n_i}{n}$$

где  $n$  — число ступеней нагрузки.

3. Относительные удлинения волокон по высоте сечения балки на уровнях, где приклеены контрольные тензорезисторы, определяют по формуле

$$\varepsilon_i = \Delta n_{i\text{cp}} \cdot \alpha_i, \quad (7.1)$$

где  $\alpha_i$  — цена деления шкалы “настройка” измерителя деформаций.

4. Зная относительные деформации, вычисленные по формуле (7.1), по закону Гука определяют напряжения для исследованных точек сечения

$$\sigma_i = E \varepsilon_i = E \Delta n_{icp} \cdot \alpha_i. \quad (7.2)$$

5. Главные напряжения на уровне нейтрального слоя определяют с помощью тензорезисторов  $T_1$  и  $T_3$  (рис. 7.3).

Эти напряжения направлены под углом  $45^\circ$  к поперечному сечению балки и их величины равны

$$\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{\max}; \quad \sigma_2 = 0. \quad (7.3)$$

Относительные удлинения по главным направлениям связаны с главными напряжениями следующими зависимостями

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} (\sigma_1 - \mu \sigma_3) = \frac{1 + \mu}{E} \sigma_1; \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} (\sigma_3 - \mu \sigma_1) = \frac{1 + \mu}{E} \sigma_3, \end{aligned} \quad (7.4)$$

откуда величины главных напряжений определяем по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1 + \mu} \varepsilon_1; \\ \sigma_3 &= \frac{E}{1 + \mu} \varepsilon_3, \end{aligned} \quad (7.5)$$

где  $\varepsilon_1 = \Delta n_{1cp} \cdot \alpha_1, \quad \varepsilon_3 = \Delta n_{3cp} \cdot \alpha_3. \quad (7.6)$

### **Теоретический расчет**

Для сравнения полученных экспериментальных результатов с теоретическими необходимо по формулам сопротивления материалов определить значения напряжений в исследуемых точках сечения балки, где приклеены контрольные тензорезисторы. Для чего изображают расчетную схему балки и для нее строят эпюры поперечных сил и изгибающих моментов. Определяют значение изгибающего момента в сечении балки  $Z = \frac{l}{2}$ , так как в этом сечении приклеены тензорезисторы, измеряющие нормальные напряжения.

Нормальные напряжения в заданной точке данного сечения определяем по формуле

$$\sigma_i = \frac{M}{I_x} y_i, \quad (7.7)$$

где  $M = R_A \frac{l}{2}$  — изгибающий момент в исследуемом сечении;  $R_A$  — опорная реакция на левой опоре балки;  $y_i$  — расстояние от нейтральной оси сечения до точки, в которой определяется напряжение;  $I_x$  — осевой момент инерции поперечного сечения балки.

Главные напряжения на уровне нейтрального слоя

$$\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{\max}. \quad (7.8)$$

Определяем по формуле Журавского

$$\tau_{\max} = \frac{QS_x^{omc}}{d \cdot I_x}. \quad (7.9)$$

где  $Q = R_B$  — поперечная сила на участке длины балки, где приклеены тензорезисторы  $T_1$  и  $T_3$ ;  $R_B$  — значение опорной реакции на правой опоре балки,  $S_x^{omc}$  — статический момент части площади сечения, лежащей выше или ниже нейтральной оси сечения, относительно этой оси;  $d$  — ширина поперечного сечения (толщина стенки балки) на том уровне, на котором определяются касательные напряжения.

Полученные значения опытных и теоретических напряжений заносят в таблицу для их сравнения. По значениям отклонений сравнимых величин судят о достоверности гипотез, принятых в теории плоского изгиба.

В заключение, по полученным результатам строят эпюры распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки для опытных и теоретических значений.

## 8.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРЯМОГО БРУСА ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

### *Цель работы:*

1. Определить экспериментально прогибы и углы поворота заданных сечений двухопорной балки с консольной частью.
2. Определить те же величины теоретическим путем.
3. Сравнить полученные результаты.

### *Краткие теоретические сведения*

При изгибе деформация бруса характеризуется следующими параметрами:

- 1) перемещением  $Y$  точки  $O$  (центра тяжести сечения) по направлению, перпендикулярному к оси балки, называемым прогибом;
- 2) углом  $\theta$  поворота сечения балки, измеряемым углом наклона касательной к изогнутой оси балки (упругой линии).

Одним из наиболее употребительных методов машинного и аналитического определения деформаций при изгибе балок является метод начальных параметров.

Рассмотрим некоторую часть балки (рис. 8.1), нагруженной сосредоточенным моментом, сосредоточенной силой и участком распределенной нагрузки. Рассмотрим ее участок в пределах сечения  $Z$ .

Метод начальных параметров основан на следующих исходных положениях [6].

1. Начало координат выбирают в крайней левой точке рассматриваемой части балки и оно является общим для всех ее участков.

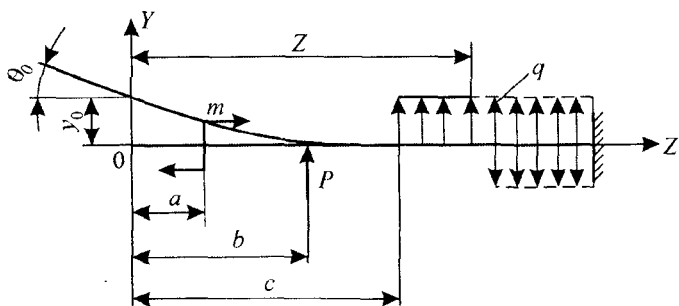


Рис. 8.1.

2. Выражения для изгибающего момента  $M(Z)$  составляются путем вычисления моментов сил, расположенных слева от рассматриваемого сечения, взятого на расстоянии  $Z$  от начала координат.
3. При включении в уравнения внешнего сосредоточенного момента  $m$ , приложенного на некотором расстоянии  $a$  от начала координат, его умножают на множитель  $(Z-a)^0$ , равный единице.
4. В случае обрыва распределенной нагрузки ее продлевают до конца рассматриваемого участка (рис. 8.1), а для восстановления фактически действующей на балку нагрузки вводят компенсирующую нагрузку обратного направления. Добавленную нагрузку принято показывать штрихами.
5. Интегрирование уравнений на всех участках производят без раскрытия скобок.

Изгибающий момент в сечении балки (рис. 8.1) на расстоянии  $Z$  от начала координат будет равен

$$M_z = m(Z-a)^0 + P(Z-b) + q \frac{(Z-c)^2}{2}. \quad (8.1)$$

Подставляем значение  $M_z$  в дифференциальное уравнение изогнутой оси балки (упругой линии)

$$EIy'' = M_z = m(Z-a)^0 + P(Z-b) + q \frac{(Z-c)^2}{2}. \quad (8.2)$$

После двукратного интегрирования уравнения (8.2) и определения постоянных интегрирования, которыми оказываются начальные параметры



$$C_1 = \theta_0 \quad \text{и} \quad C_2 = y_0, \quad (8.3)$$

уравнения для определения углов поворота и прогибов в искомом сечении записывают так:

$$\theta_{(z)} = \theta_0 + \frac{1}{EI} \left[ \sum M(Z-a) + \sum P \frac{(Z-b)^2}{2} + \sum q \frac{(Z-c)^3}{6} \right], \quad (8.4)$$

$$Y_{(z)} = Y_0 + \theta_0 Z + \frac{1}{EI} \left[ \sum M \frac{(Z-a)^2}{2} + \sum P \frac{(Z-b)^3}{6} + \sum q \frac{(Z-c)^4}{24} \right], \quad (8.5)$$

где  $\theta_0, Y_0$  — начальные параметры, т.е. угол поворота и прогиб в начале координат (рис. 8.1).

Полученные уравнения (8.4) и (8.5) называют универсальными уравнениями упругой линии, имея в виду, что они могут быть применены при любых расчетных схемах балок.

В уравнения (8.4) и (8.5) подставляют нагрузки, расположенные слева от рассматриваемого сечения; знаки слагаемых определяются знаком соответствующих силовых факторов.

### **Образцы, измерительные приборы и установка**

Исследуют деформации стального бруса с прямоугольным поперечным сечением  $h \times b = 7 \times 38$  мм. Материал бруса — Ст3, для которого модуль продольной упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа. Прогибы и углы поворота определяют с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм,

Исследуемый брус 1 шарнирно закрепляют в специальной настольной установке (рис. 8.2), которая состоит из следующих основных частей: основания 2, установленного на четырех регулируемых опорах 3, подвижной 4 и неподвижной 5 стоек, двух индикаторных стоек 6, гиревого подвеса с набором грузов 7.

Подвижная стойка 4 имеет возможность перемещаться по направляющей планке 8, жестко прикрепленной к основанию установки. Передвигая стойку вдоль основания, можно регулировать длину пролета отно-

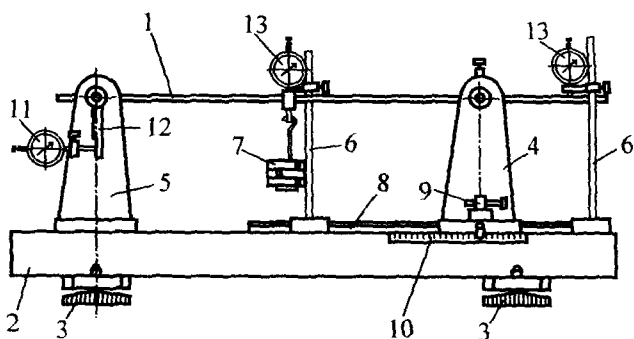


Рис. 8.2.

сительно неподвижной стойки 5 в пределах до одного метра, а также получать балку с консольной частью. Чтобы исключить самопроизвольное перемещение подвижной стойки вдоль основания, ее фиксируют на планке 8 стопором 9. Настранивая установку по заранее выбранной схеме, контролируют перемещение стойки по шкале 10, неподвижно прикрепленной к основанию установки. Закрепление исследуемого бруса на подвижной стойке выполнено по схеме шарнирно-подвижной опоры, которая может совершать поступательное движение относительно стойки.

Неподвижная стойка 5 жестко прикреплена винтами к основанию установки. Крепление исследуемого бруса к стойке выполнено по схеме шарнирно-неподвижной опоры.

Нагружающее устройство состоит из гиревого подвеса с набором грузов. Гиревой подвес можно перемещать по длине исследуемой балки, изменяя тем самым точки приложения сил. Фиксируется гиревой подвес зацепами, входящими в небольшие пазы на брус. Положение гиревого подвеса, т.е. расстояние от опоры до точки приложения нагрузки, определяют по шкале, нанесенной на поверхность исследуемого бруса.

Углы поворота опорных сечений измеряют при помощи индикаторов 11, которые можно закреплять как на подвижной, так и на неподвижной стойках. Своими подвижными штоками индикаторы упираются в опорные пятки стержней 12, жестко соединенных с шарнирными устройствами опор подвижной и неподвижной стоек. Очевидно, что углы

поворота опорных сечений определяются по значениям соответствующих шкал индикаторов благодаря угловым перемещениям стержней, расчетная длина которых, измеренная от оси бруса до оси индикатора,  $l_1 = 150$  мм. Цена деления шкалы индикатора в радианах

$$C = \frac{a}{l_1} = \frac{0,01}{150} = 0,000066 \text{ рад}, \quad (8.6)$$

где  $a$  — цена деления шкалы индикатора в миллиметрах.

Предусмотрена также возможность измерения индикатором горизонтального перемещения шарнирно-подвижной опоры.

Прогибы измеряются индикаторами 13, закрепленными в зажимных устройствах индикаторных стоек 6. Стойки можно перемещать вдоль основания установки по направляющим. Фиксируются стойки относительно направляющих стопорами.

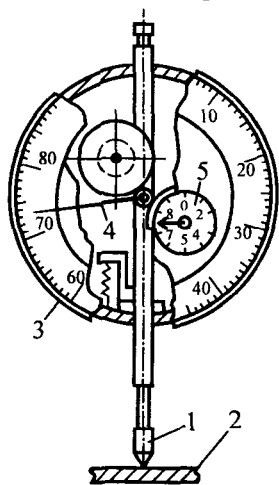


Рис. 8.3.

Устройство индикатора часового типа для линейных измерений показано схематически на рис. 8.3. Штифт 1 прижимается пружиной к поверхности 2, перемещения которой в направлении штифта требуется измерить. Круглая коробка 3 индикатора с укрепленной в ней системой шестерен и циферблатом поддерживается неподвижно особым штативом. Перемещения упорной поверхности 2 вызывают перемещения штифта 1, который вращает при этом стрелку 4 посредством зубчатых передач. Одно деление циферблата соответствует 0,01 мм перемещения штифта. Перемещение штифта непосредственно отсчитывают в миллиметрах по шкале маленького циферблата 5 от 0 до 10 мм.

Существуют индикаторы описанного типа, имеющие точность 0,001 мм.

## Порядок проведения испытаний

Согласно указанной преподавателем схеме настроить установку в следующем порядке:

1. Установить расстояние между опорами.
2. Переместить гиревые подвесы в точки нагружения, указанные в схеме.
3. Передвигая индикаторные стойки 6 по направляющим основания установки, совместить подвижные штоки индикаторов с точками измерения прогибов бруса.
4. Отпустить винты крепления индикаторов на индикаторных стойках 6, опустить индикаторы так, чтобы их подвижные штоки переместились вверх на 7...9 мм. При этом подвижные штоки индикаторов должны упираться в исследуемый брус. Индикатор 11 закрепить в зажимном приспособлении так, чтобы его подвижный шток упирался в опорную пятку нажимного стержня.
5. Установить стрелки всех индикаторов на "0".
6. Установить ступень нагрузки  $\Delta P$ . Давая одинаковые приращения  $\Delta P$ , произвести 3...4 нагружения исследуемого бруса. После каждой ступени  $\Delta P$  по индикаторам фиксировать, соответственно, прогибы и угол поворота сечений. Наибольшая нагрузка на гиревой подвес не должна превышать 39,2 Н (4 кгс).
7. Разгрузить брус в обратной последовательности и сравнить показания индикаторов с первоначальными.
8. Подсчитать средние арифметические приращения прогибов  $\Delta Y_{\text{ср}}$  и углов поворота сечения  $\Delta \theta_{\text{ср}}$ . По формуле (8.6) показания индикаторов в миллиметрах перевести в радианы.
9. По формулам (8.4) и (8.5) определить теоретические значения прогибов и угла поворота сечений при нагрузке, равной  $\Delta P$ .
10. Определить расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями прогибов и угла поворота сечений по формулам:

$$\frac{\Delta Y_{\text{э}} - \Delta Y_{\text{т}}}{\Delta Y_{\text{э}}} 100\%; \quad \frac{\Delta \theta_{\text{э}} - \Delta \theta_{\text{т}}}{\Delta \theta_{\text{э}}} 100\%$$

Допускаемое отклонение не должно превышать  $\pm 5\%$ .

11. Результаты испытаний занести в журнал лабораторных работ.

## 9. ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА

**Цель работы:** изучить характер разрушения, определить предел прочности стали при сдвиге и сравнить его с пределом прочности при растяжении.

### **Краткие теоретические сведения**

Характер разрушения стали при сдвиге и растяжении различный. При сдвиге плоскость разрушения гладкая. Объем образца, подвергнутый пластическим деформациям, незначителен. При разрыве плоскость разрушения имеет кристаллический вид, весь объем образца, особенно в зоне шейки, подвергается значительной пластической деформации. Условно считают, что в зоне среза действуют только касательные напряжения, равномерно распределенные по сечению  $F$ , и при достижении ими предела прочности происходит разрушение

$$\tau_s = \frac{P_s}{F}. \quad (9.1)$$

В действительности в зоне разрушения действуют еще нормальные напряжения от изгиба и смятия, что подтверждается формой образца после разрушения. Предел прочности при сдвиге всегда меньше, чем при растяжении, а для стали

$$\tau_s = (0,6 + 0,8)\sigma_s. \quad (9.2)$$

## Образцы, измерительные приборы и испытательная машина

Прочность при сдвиге обычно определяют по схеме двойного среза (рис. 9.1) на цилиндрических образцах диаметром  $6 \pm 20$  мм. Для измерения размеров образцов применяют штангенциркуль с ценой деления 0,1 мм.

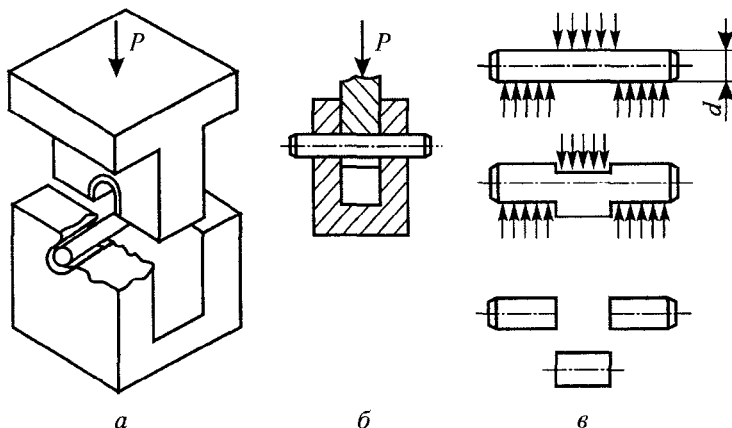


Рис. 9.1.

Испытания проводят в приспособлении, показанном на рис. 9.1, а. В верхнюю и нижнюю части приспособления запрессованы стальные закаленные втулки, чтобы избежать смятия его элементов при испытании. Приспособление обеспечивает разрушение образца по двум плоскостям среза (рис. 9.1, б, в).

Испытание на сдвиг (срез) стального образца производят на любой универсальной испытательной машине, устройство и работа которых описаны в работе № 3.

### Порядок проведения испытаний

Перед установкой образца в приспособление измеряется штангенциркулем его диаметр, который должен быть подобран так, чтобы обеспечить плотную посадку в отверстие нижней части приспособления (рис. 9.1, б).

Приспособление с образцом установить на опоры испытательной машины и, плавно нагружая образец, разрушить его. После разрушения включить машину на обратный ход, обеспечив возможность снятия приспособления и частей образца.

Результаты замеров и значение максимальной нагрузки, соответствующей разрушению образца, заносят в журнал лабораторных работ.

### **Обработка опытных данных**

Значение предела прочности при срезе определяем по формуле

$$\tau_a = \frac{P_a}{2F}, \quad (9.3)$$

где  $P_a$  — разрушающая для образца нагрузка.

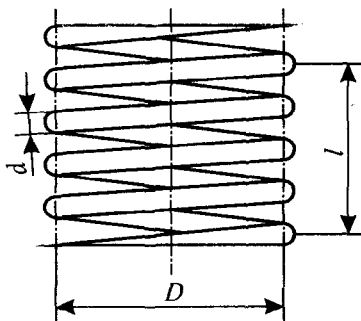
Определив значение  $\tau_a$ , считаем, что испытанный на срез образец изготовлен из той же стали, что и образец, испытанный на растяжение в лабораторной работе № 1. Зная  $\tau_a$  и  $\sigma_a$  для исследованной стали, находят соотношение между этими величинами. Оно всегда меньше единицы, т.е. сопротивление малоуглеродистой стали срезу меньше чем разрыву. Кроме того, по величине отношения  $\tau_a/\sigma_a$  можно судить, насколько согласуется с опытом установленное нормами отношение допускаемых напряжений на срез и растяжение.

## 10. ИСПЫТАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ ПРУЖИНЫ НА СЖАТИЕ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА

**Цель работы:** построить экспериментально характеристики пружины (зависимость деформации пружины от осевой нагрузки); определить модуль сдвига и сопоставить полученную осадку пружины с расчетной.

### **Краткие теоретические сведения**

В различных машинах и конструкциях применяют винтовые цилиндрические пружины (рис. 10.1) с малым шагом витков (угол подъема витков  $\alpha < 10 + 12^\circ$ ), подвергающиеся воздействию растягивающих или сжимающих сил. При проектировании таких пружин необходимо вычислить наибольшие напряжения (для оценки прочности) и деформации (для регулировки нагрузки). Материал пружин под действием сжимающих или растягивающих сил в основном испытывает кручение.



**Рис. 10.1.**

Осадку такой винтовой цилиндрической пружины под действием осевой растягивающей или сжимающей нагрузки  $P$  определяют по формуле



$$\lambda = \frac{8PD^3 n}{Gd^4}, \quad (10.1)$$

где  $D$  — средний диаметр витка пружины;  $n$  — число рабочих витков;  $d$  — диаметр проволоки пружины;  $G$  — модуль сдвига материала пружины.

При выводе формулы (10.1) учитывалось только действие крутящего момента; не принимались во внимание такие факторы, как кривизна скручиваемого стержня пружины, наклон витков, наличие поперечной силы и др. Поэтому формула (10.1) приближенная. Результаты опыта должны показать степень справедливости принятых гипотез и пригодности данной формулы для практических расчетов.

Из этой же формулы после экспериментального определения осадки  $\lambda$  определяем значение модуля сдвига

$$G = \frac{8\Delta P_{cp} D^3 n}{\Delta \lambda_{cp} d^4}. \quad (10.2)$$

### **Образец, измерительные приборы и испытательная машина**

Испытаниям подвергают цилиндрическую пружину приблизительно следующих размеров:  $D = 138$  мм,  $d = 12,5$  мм, число рабочих витков  $n = 5$  (рис. 10.1). На ней при помощи кернов отмечается расчетная длина  $l$ , включающая  $n$  витков. Измерение геометрических размеров пружины и ее осадки производят штангенциркулем с диапазоном 0...300 мм.

Опыт производится на любой универсальной испытательной машине с растягивающим усилием от 50 кН и выше. Пружина устанавливается между траверсой и нижней плитой машины в специальное приспособление, исключающее перекося пружины при сжатии.

### **Порядок проведения испытания**

Работа проводится в следующей последовательности:

1. Измерить и занести в журнал лабораторных работ необходимые размеры пружины.

2. Установить пружину на соответствующие опоры между траверсой и нижней плитой машины.
3. Определить величину ступени нагрузки  $\Delta P$ . Затем, давая одинаковые приращения нагрузки, произвести четыре нагружения.
4. После каждого нагружения значение нагрузки определять по шкале на пульте управления испытательной машины, а величину осадки измерять штангенциркулем и дополнительно линейкой, закрепленной на стойке подвижной рамы машины.
5. Убедиться в линейной зависимости осадки от нагрузки.
6. По окончании опыта пружину разгрузить.

### **Обработка опытных данных**

Определение величины осадки пружины производится на ступень нагрузки  $\Delta P$ .

По результатам таблицы измерений вычислить разности между каждыми двумя последовательными отсчетами осадки

$$\Delta n_{i+1} = n_{i+1} - n_i.$$

Вычислить среднее значение указанных разностей из всех измерений

$$\Delta n_{cp} = \frac{\sum \Delta n_i}{n}$$

где  $n$  — число разностей.

По полученным данным построить график в координатах  $P - \lambda$ , называемый характеристикой пружины.

Из формулы (10.2) определить значение модуля сдвига.

## **ЧАСТЬ II**

# **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ПРОВЕРКЕ ВЫВОДОВ И ФОРМУЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

## 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ

**Цель работы:** проверить экспериментально применимость формул для определения деформаций при косом изгибе.

### **Краткие теоретические сведения**

Косой изгиб наблюдается в том случае, когда плоскость действия изгибающего момента, возникающего в поперечном сечении бруса, не совпадает ни с одной из его главных плоскостей (плоскостей, проведенных через ось бруса и главные оси  $x$  и  $y$  поперечного сечения). При косом изгибе в поперечных сечениях бруса возникают два изгибающих момента  $M_x$  и  $M_y$  относительно упомянутых осей  $x$  и  $y$ . Следовательно, косой изгиб можно рассматривать как сочетание двух прямых изгибов. На основании принципа независимости действия сил прогиб при косом изгибе определяют геометрическим суммированием прогибов в направлении главных осей поперечного сечения бруса.

$$\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}. \quad (11.1)$$

Наибольшую нагрузку при исследовании деформаций консольных балок (рис. 11.1) определяют из условия прочности при косом изгибе по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max} \cos \varphi \cdot l}{W_x} + \frac{P_{\max} \sin \varphi \cdot l}{W_y} \leq [\sigma] \quad (11.1)$$

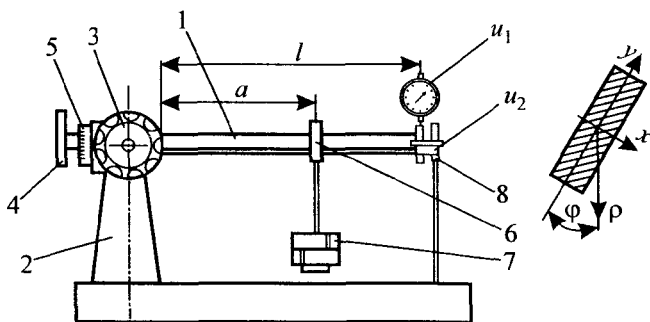


Рис. 11.1.

### Образец и установка для проведения испытаний

Исследуемый образец 1 (рис. 11.1) представляет собой консольную балку длиной 0,5 м прямоугольного сечения 7×32 мм, изготовленную из стали марки Ст3. Левый конец балки защемлен в неподвижной опоре 2 при помощи зажима, управление которым осуществляется рукояткой 3. Поворот балки на заданный угол  $\varphi$  производится вращением рукоятки 4 при отстопоренном зажиме. Значение угла  $\varphi$  устанавливается по шкале 5. Вдоль балки свободно перемещается грузовая подвеска 6, на которую в процессе опыта помещаются грузы 7.

Измерение перемещений свободного конца балки осуществляется двумя индикаторами часового типа  $U_1$  и  $U_2$  с ценой деления  $\alpha_U = 0,01$  мм. Величина вертикального перемещения измеряется индикатором  $U_1$ , горизонтального — индикатором  $U_2$ .

Полный прогиб свободного конца балки приближенно может быть оценен по шкале 8, которая выполнена из органического стекла с горизонтальными и вертикальными делениями, с ценой одного деления 2 мм.

### Проведение лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется в следующей последовательности.

1. Согласно исходным данным, указанным преподавателем, задается величина плеча нагрузки “ $a$ ” и угла поворота балки “ $\varphi$ ”.

Для чего необходимо рукояткой 3 отпустить стопорный винт и вращением рукоятки 4 установить балку на заданный угол и надежно ее закрепить, плотно завернув рукоятку 3.

2. Установить стрелки индикаторов на “0”.
3. Определить величину ступени нагрузки  $\Delta P$ . Затем, давая одинаковые приращения нагрузки, произвести 4÷5 нагружений балки. Наибольшая нагрузка не должна превышать 49 Н (5 кгс).
4. После каждого нагружения регистрировать по шкалам индикаторов число делений, соответствующих вертикальному и горизонтальному перемещению свободного конца балки —  $n_1$  и  $n_2$ . Данные опыта занести в соответствующую таблицу журнала лабораторных работ.
5. Убедиться в линейной зависимости перемещений от нагрузки.
6. После окончания опыта установку разгрузить.

### **Обработка опытных данных**

Для определения опытных значений перемещений концевого сечения балки необходимо:

1. Вычислить средние арифметические значения приращений ступени нагрузки  $\Delta P$  и приращений показаний индикаторов  $\Delta n_{1cp}$  и  $\Delta n_{2cp}$ .
2. Определить значения вертикального  $\Delta_z$  и горизонтального  $\Delta_x$  перемещения свободного конца балки по формулам:

$$\Delta_z = \Delta n_{1cp} \cdot \alpha_u.$$

$$\Delta_x = \Delta n_{2cp} \cdot \alpha_u.$$

3. Определить значение полного прогиба

$$\Delta = \sqrt{\Delta_z^2 + \Delta_x^2}.$$

4. Занести полученные результаты в таблицу для сравнения опытных и теоретических величин.

## Теоретический расчет

При проведении теоретического расчета по определению значений горизонтального  $\Delta_x$  и вертикального  $\Delta_y$  перемещений концевое сечение консольной балки, расчет, как и в опыте, ведется на ступень нагрузки  $\Delta P$ . При этом деформацию косоуго изгиба рассматривают как одновременный изгиб балки в двух главных плоскостях, а сила  $P$  раскладывается на составляющие силы по направлению главных центральных осей инерции поперечного сечения балки (рис. 11.2):

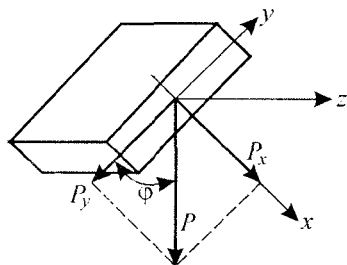


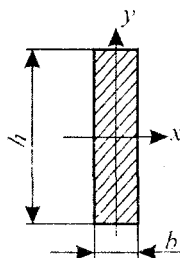
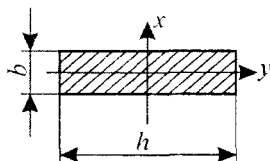
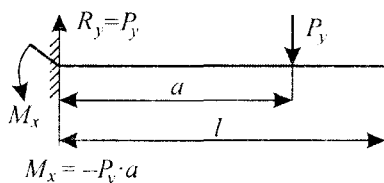
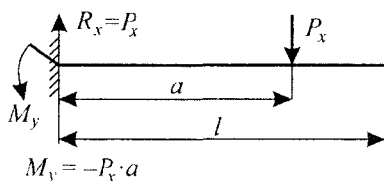
Рис. 11.2.

$$P_x = \Delta P \cdot \sin \varphi$$

$$P_y = \Delta P \cdot \cos \varphi$$

Далее, руководствуясь принципом независимости действия сил, применяются теоретические формулы для определения прогибов при плоском поперечном изгибе.

Определение перемещения концевое сечение балки по направлению осей  $x$  и  $y$  производится при помощи универсального уравнения упругой линии балки (метода начальных параметров).



$$EI_y \Delta x = \frac{R_x \cdot l^3}{6} - \frac{M_y \cdot l^2}{2} - \frac{P_x \cdot (l-a)^3}{6} = K_x.$$

$$\Delta x = \frac{K_x}{EI_y}.$$

$$EI_x \Delta y = \frac{R_y \cdot l^3}{6} - \frac{M_x \cdot l^2}{2} - \frac{P \cdot (l-a)^3}{6} = K_y.$$

$$\Delta y = \frac{K_y}{EI_x}.$$

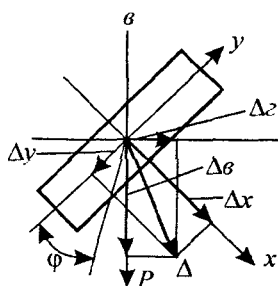


Рис. 11.3.

Горизонтальные  $\Delta_z$  и вертикальные  $\Delta_b$  перемещения определяются как алгебраическая сумма проекций величин  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  соответственно на горизонтальную и вертикальную оси (рис. 11.3).

$$\Delta_z = \Delta_x \cos \varphi - \Delta_y \sin \varphi$$

$$\Delta_b = \Delta_x \sin \varphi + \Delta_y \cos \varphi$$

Полное перемещение

$$\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}$$

Полученные таким путем величины  $\Delta_z$ ,  $\Delta_b$  и  $\Delta$  сравниваются с этими же величинами, полученными в опыте, а их расхождение выражается в %. При этом, это расхождение выражается в процентах по отношению к опытным данным.

Сопоставление опытных и теоретических значений исследованных перемещений даст возможность судить о степени достоверности соответствующих формул сопротивления материалов.



## 12. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВНЕЦЕНТРОМ РАСТЯЖЕНИИ

**Цель работы:** опытное определение значений нормальных напряжений при внецентренном растяжении и сравнение их с теоретическими.

### *Краткие теоретические сведения*

Внецентренное растяжение обусловлено внецентренным приложением нагрузки, параллельной продольной оси стержня, когда равнодействующая  $P$  не совпадает с этой осью (рис. 12.1). Обозначим координаты точки приложения равнодействующей  $x_p$  и  $y_p$ , а расстояние от этой точки до оси  $Z$ , называемое эксцентриситетом,  $-e$ .

Внецентренное растяжение является сложным сопротивлением и в общем случае рассматривается, как растяжение под действием продольной силы, приложенной по оси стержня  $z$ , и изгиб относительно двух главных осей сечения  $x$  и  $y$ .

Нормальные напряжения от каждого силового фактора параллельны продольной

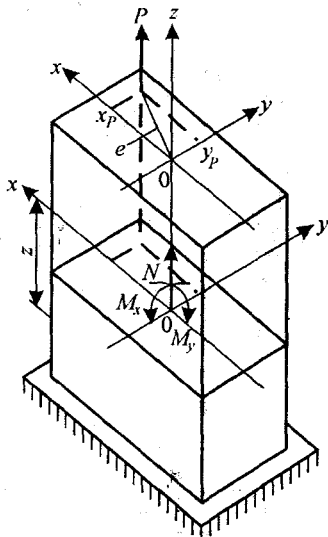


Рис. 12.1.

оси стержня и при их определении в рассматриваемой точке суммируются.

При теоретическом определении напряжений, приняв за первый квадрант, квадрант в котором расположен полюс растягивающей силы, и напряжения от всех силовых факторов положительны, напряжение в любой точке сечения можно определить из выражения

$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{M_x y}{I_x} + \frac{M_y x}{I_y}, \quad (12.1)$$

где  $P$  — действующая сила;  $F$  — площадь сечения образца;  $M_x = P \cdot y_p$  — изгибающий момент относительно оси  $x$ ;  $M_y = P \cdot x_p$  — изгибающий момент относительно оси  $y$ ;  $x$  и  $y$  — координаты рассматриваемой точки сечения;  $I_x$  и  $I_y$  — главные центральные моменты инерции сечения;  $x_p$  и  $y_p$  — координаты полюса растягивающей силы.

### Образец, измерительные приборы и испытательная машина

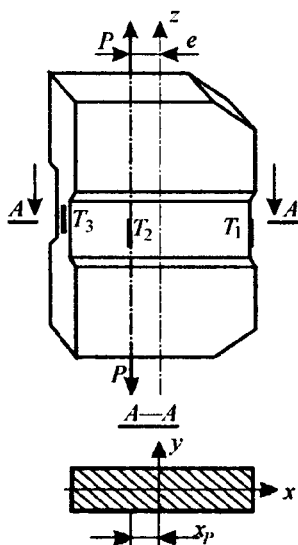


Рис. 12.2.

В данной работе используется образец с прямоугольным поперечным сечением (рис. 12.2)  $b \times h = 12 \times 150$  мм. Эксцентриситет  $e = 25$  мм. Напряжения в образце измеряют методом тензометрирования с использованием прибора ИД-70. Тензорезисторы  $T_1$  и  $T_3$  наклеены на крайних точках сечения, а тензорезистор  $T_2$  — на линии действия внецентренно приложенной растягивающей силы.

Испытания проводят на универсальных гидравлических испытательных машинах с максимальным растягивающим усилием в 500 или 1000 кН.

## Порядок проведения испытаний

Включить блок питания прибора ИД-70. Подключить тензорезисторы к прибору. Установить образец в захваты испытательной машины. Провести пробное нагружение с установкой на ноль стрелки миллиамперметра. Дальнейшее нагружение производится одинаковыми приращениями нагрузки  $\Delta P$  по четыре нагружения для каждого тензорезистора.

Значение относительных деформаций в рассматриваемых точках, измеряемых с помощью тензорезисторов, снимается со шкалы "настройка" прибора ИД-70.

Значение нагрузки принимается по показаниям силоизмерителя испытательной машины.

## Обработка опытных данных

Для определения опытных значений измеряемых напряжений растягиваемого образца необходимо:

1. Вычислить среднее значение приращения растягивающей силы на ступень нагрузки

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum \Delta P}{n}$$

2. Вычислить среднее значение приращения числа делений шкалы "настройка" измерителя деформаций

$$\Delta n_{cp} = \frac{\sum \Delta n}{n}$$

где  $\Delta n$  — разность числа делений последующего и предыдущего отсчета;  $n$  — число разностей.

3. Вычислить значения относительных деформаций в рассматриваемых точках сечения

$$\varepsilon_i = \Delta n_{cpi} \cdot \alpha_u.$$

4. Вычислить значения напряжений в исследуемых точках сечения по закону Гука

$$\sigma_i = E \varepsilon_i = E \cdot \Delta n_{cpi} \cdot \alpha_u.$$

## Теоретический расчет

Теоретическое определение напряжений в исследуемых точках сечения, как и в опыте, ведется на ступень нагрузки.

Учитывая то, что полюс растягивающей силы лежит на главной оси сечения  $x$ , и эксцентриситет приложения нагрузки относительно главных центральных осей  $x_p = x_2$  и  $y_p = 0$  (рис. 12.3), общее выражение для определения напряжений в исследуемых точках принимает вид

Расчетная схема

$$\sigma_i = \frac{\Delta P}{F} + \frac{M_y x_i}{I_y} = \frac{\Delta P}{F} \left( 1 + \frac{x_p x_i}{i_y^2} \right). \quad (12.2)$$

Вычислим значение отношения квадрата радиуса инерции  $i_y^2$  к  $x_p$

Рис. 12.3.

$$\frac{i_y^2}{x_p} = \frac{I_y}{x_p F} = \frac{bh^3}{12bhx_p} = \frac{h^2}{12 \cdot 25} = -75 \text{ мм}. \quad (12.3)$$

Подставив последнее значение в формулу (12.2), получим окончательное выражение для определения напряжений в исследуемых точках

$$\sigma_i = \frac{\Delta P}{F} \left( 1 - \frac{x_i}{75} \right). \quad (12.4)$$

## 13. ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ О ВЗАИМНОСТИ РАБОТ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**Цель работы:** проверка опытным путем правильности теоремы о взаимности перемещений и применение теоремы для построения изогнутой оси балки.

### *Краткие теоретические сведения*

Упругие системы, к которым относятся сооружения и их составные части, под действием внешних сил деформируются, а при разгрузке вновь возвращаются в исходное состояние. Внешние силы при этом совершают работу, превращающуюся в потенциальную энергию системы. Работа внешних сил считается равной суммарной работе внутренних сил, деформирующих элементарные объемы тела. Работа внутренних сил численно равна работе внешних сил и противоположна по знаку. Таким образом, задача определения энергии деформации сводится к вычислению работы внешних сил.

Используя понятие работы, затраченной на деформацию, получают весьма удобный общий метод определения перемещений стержней и стержневых систем при любых нагрузках. Этот метод основан на теоремах о взаимности работ и перемещений, которые относятся к числу общих теорем сопротивления материалов и вытекают из принципа независимости действия сил.

Теорема о взаимности перемещений (теорема Максвелла) формулируется следующим образом:

“При численно равных силовых воздействиях перемещение, производимое силами первого состояния по направлению сил второго состояния, численно равно перемещению, вызванному силами второго состояния по направлению сил первого состояния”.

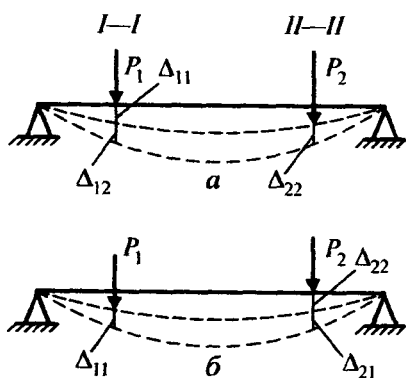


Рис. 13.1.

Рассмотрим линейно деформируемую систему в виде простой балки, к которой последовательно статически приложены две обобщенные силы  $P_1$  и  $P_2$  (рис. 13.1, а). Определим работу, которую совершают силы  $P_1$  и  $P_2$  при прямом и обратном порядке их приложения. Применим следующий порядок нагружения. Сначала в сечении  $I-I$  приложим силу  $P_1$  (рис. 13.1, а). Она совершит работу

$$A_{11} = \frac{1}{2} P_1 \cdot \Delta_{11}. \quad (13.1)$$

Цифры индекса в обозначениях указывают: первая указывает направление перемещения, вторая — причину, вызвавшую его.

Таким образом,  $\Delta_{11}$  — перемещение по направлению силы  $P_1$ , вызванное этой же силой.

После этого в сечении  $II-II$  приложим силу  $P_2$  (рис. 13.1, а). Она совершит работу

$$A_{22} = \frac{1}{2} P_2 \cdot \Delta_{22}. \quad (13.2)$$

При этом сечение  $I-I$  в результате действия силы  $P_2$  также переместится. Одновременно совершит работу и сила  $P_1$ , так как под действием силы  $P_2$  сечение  $I-I$  переместилось. Работа силы  $P_1$  в этом случае

$$A_{12} = P_1 \cdot \Delta_{12}, \quad (13.3)$$

где  $\Delta_{12}$  — перемещение сечения  $I-I$  по направлению силы  $P_1$ , вызванное силой  $P_2$ , приложенной в сечении  $II-II$ . Сила  $P_1$  при совершении работы

$A_{12}$  имеет полное свое значение, поэтому в ее выражении множитель  $1/2$  отсутствует. Такую работу внешних и внутренних сил на возможном перемещении называют возможной работой.

В итоге получим сумму работ при прямом порядке приложения сил, которая выражает потенциальную энергию  $U_1$  деформации системы:

$$A_1 = U_1 = A_{11} + A_{22} + A_{12} = \frac{1}{2} P_1 \cdot \Delta_{11} + \frac{1}{2} P_2 \cdot \Delta_{22} + P_1 \cdot \Delta_{12}. \quad (13.4)$$

Теперь изменим порядок приложения сил, т.е. сначала приложим силу  $P_2$ , а затем  $P_1$  (рис. 13.1,б). Тогда полная работа, произведенная ими,

$$A_2 = U_2 = A_{22} + A_{11} + A_{21} = \frac{1}{2} P_2 \cdot \Delta_{22} + \frac{1}{2} P_1 \cdot \Delta_{11} + P_2 \cdot \Delta_{21}. \quad (13.5)$$

Приравняв выражения (13.4) и (13.5), находим, что

$$P_1 \cdot \Delta_{12} = P_2 \cdot \Delta_{21}. \quad (13.6)$$

Выражение (13.6) формулируется так: работа первой силы на перемещении, вызванном второй силой, равна работе второй силы на перемещении, вызванном первой силой. Оно отражает теорему о взаимности работ внешних сил (теорему Бетти), причем остается справедливым и для тех случаев, когда к балке последовательно приложены не две силы, а система сил. Теорема о взаимности работ справедлива и для другой внешней нагрузки — распределенной, внешних моментов. Следует иметь в виду, что работа моментов вычисляется не на линейных, а на угловых перемещениях.

Из теоремы о взаимности работ, как частный случай, следует другая важная теорема — о взаимности перемещений (теорема Максвелла). Принимая  $P_1 = P_2 = 1$ , получим из теоремы Бетти по формуле (13.6):

$$\delta_{12} = \delta_{21}, \quad (13.7)$$

здесь перемещения, вызываемые силами, равными единице (единичными силами), обозначают  $\delta_{11}$ ,  $\delta_{12}$  и т.д. взамен  $\Delta_{11}$ ,  $\Delta_{12}$  и т.д., принятых для перемещений от сил любой величины.

Теорема о взаимности перемещений читается так: перемещение точки приложения первой единичной силы по ее направлению, вызванное действием второй единичной силы, равно перемещению точки приложения второй единичной силы по ее направлению, вызванному действием первой единичной силы.

Теоремы о взаимности работ и перемещений весьма полезны, так как во многих случаях позволяют значительно упростить решение многих задач сопротивления материалов, в частности, там, где рассматриваются общие вопросы раскрытия статической неопределимости систем.

### **Образец, измерительные приборы и установка**

Работа проводится на настольной лабораторной установке, применяемой для исследования деформаций при изгибе балок (см. лабораторную работу № 8). Прогибы балки определяют с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Исследуемый брус 1 (рис. 13.2) прямоугольного сечения  $h \times b = 7 \times 38$  мм закрепляют на двух стойках: неподвижной 3 и подвижной 4. Материал бруса — Ст3, для которого модуль продольной упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

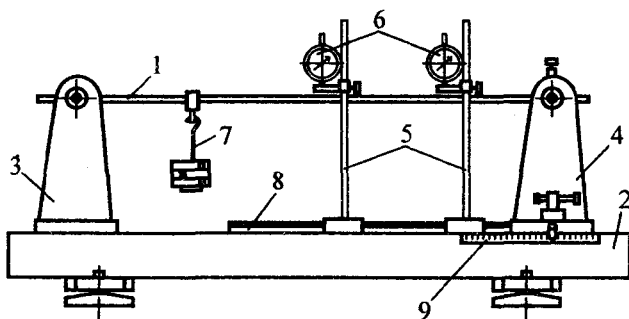


Рис. 13.2.

Для измерения деформаций установка оснащается двумя индикаторными стойками 5 с закрепленными на них индикаторами 6. Нагрузку производят с помощью гириевой подвесы 7 с набором грузов. Гире-



вой подвес можно перемещать по длине исследуемой балки, изменяя тем самым точки приложения сил. Фиксируется гиревой подвес зацепами, входящими в небольшие пазы в балке. Расстояние от опоры до точки приложения нагрузки определяют по шкале, нанесенной на поверхность исследуемой балки.

Подвижная стойка 4 имеет возможность перемещаться по направляющей планке 8, жестко прикрепленной к основанию установки 2. Передвигая стойку вдоль основания, можно регулировать длину пролета относительно неподвижной стойки 3 в пределах до одного метра. При проведении настоящей работы длину пролета удобно принять равной 900 мм. Настраивая установку по заранее выбранной схеме, контролируют перемещение стойки по шкале 9, неподвижно прикрепленной к основанию установки. Закрепление исследуемой балки на подвижной стойке выполнено по схеме шарнирно-подвижной опоры, которая может совершать поступательное движение относительно стойки.

Неподвижная стойка 3 жестко прикреплена винтами к основанию установки. Крепление исследуемого бруса к стойке выполнено по схеме шарнирно-неподвижной опоры.

### ***Порядок проведения испытаний***

Согласно указанной преподавателем схеме настроить установку в следующем порядке:

1. Установить расстояние между опорами.
2. Переместить гиревой подвес в точку нагружения, указанную в схеме.
3. Передвигая индикаторные стойки 6 по направляющим основания установки, совместить подвижные штоки индикаторов с точками измерения прогибов балки.
4. Отпустить винты крепления индикаторов на индикаторных стойках 5, опустить индикаторы так, чтобы их подвижные штоки переместились вверх на 7...9 мм. При этом подвижные штоки индикаторов должны упираться в исследуемый брус.
5. Установить стрелки индикаторов на "0".

6. Установить ступень нагрузки  $\Delta P$ . Давая одинаковые приращения  $\Delta P$ , произвести 3...4 нагружения исследуемого бруса. После каждой ступени  $\Delta P$  по индикаторам фиксировать значения прогибов в исследуемых точках. Наибольшая нагрузка на гиревой подвес не должна превышать 39,2 Н (4 кгс).
7. Разгрузить балку в обратной последовательности и сравнить показания индикаторов с первоначальными.
8. Гиревой подвес и индикаторную стойку с индикатором, расположенную рядом с подвижной стойкой, поменять местами.
9. Испытания повторить.
10. Полученные результаты занести в журнал лабораторных работ.

### **Обработка опытных данных**

Определение прогибов в исследуемых точках производят на ступень нагрузки  $\Delta P$ .

По результатам таблицы измерений вычисляют разности между каждыми двумя последовательными отсчетами нагрузки и значения прогибов в точках измерения.

$$\Delta n_{i,i+1} = n_{i+1} - n_i$$

Вычисляют средние значения указанных разностей

$$\Delta n_{cp} = \frac{\sum \Delta n_i}{n}$$

где  $n$  — число разностей.

Значения прогибов в исследуемых точках определяют по формуле

$$\Delta n_i = \Delta n_{cp} \cdot \alpha_u$$

где  $\alpha_u$  — цена деления шкалы индикатора.

### **Теоретический расчет**

Для расчетной схемы (рис. 13.3) определить значение прогибов в точках  $C$ ,  $D$  и  $K$ .

Угол поворота сечения над опорой  $A$ .

$$EI\theta_{z=0,8} = -\frac{R_A(Z-0)^3}{0,8 \cdot 6} + \frac{P(Z-0,6)^3}{0,8 \cdot 6}$$

Прогиб в точке *C*

$$EIy_{z=0,2} = EI\theta_0 Z + \frac{R_A(Z-0)^3}{6}$$

Прогиб в точке *D*

$$EIy_{z=0,4} = EI\theta_0 Z + \frac{R_A(Z-0)^3}{6}$$

Прогиб в точке *K*

$$EIy_{z=0,6} = EI\theta_0 Z + \frac{R_A(Z-0)^3}{6}$$

Для сравнения результатов определяют прогибы в тех же точках при нагружении балки той же силой в точке *C* (рис. 13.4).

Угол поворота сечения над опорой *A*

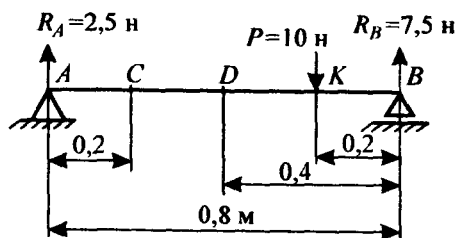


Рис. 13.3.

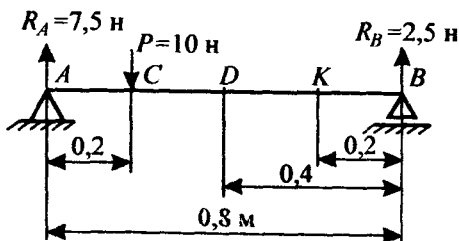


Рис. 13.4.

$$EI\theta_{z=0,8} = -\frac{R_A(Z-0)^3}{0,8 \cdot 6} + \frac{P(Z-0,2)^3}{0,8 \cdot 6}$$

Прогиб в точке *C*

$$EIy_{z=0,2} = EI\theta_0 Z + \frac{R_A(Z-0)^3}{6}$$

Прогиб в точке *D*

$$EIy_{z=0,4} = EI\theta_0 Z + \frac{R_A(Z-0)^3}{6} - \frac{P(Z-0,2)^3}{6}$$

Прогиб в точке  $K$

$$EIy_{z=0,6} = EI\theta_0 Z + \frac{R_A(Z-0)^3}{6} - \frac{P(Z-0,2)^3}{6}$$

По полученным результатам, как опытным, так и теоретическим, проверить теорему о взаимности работ и перемещений, убедившись в справедливости равенства (13.6).

Определить в процентах расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями искомых прогибов:

$$\Delta = \frac{\Delta_T - \Delta_э}{\Delta_T}$$

Допустимое расхождение  $\Delta$  не должно превышать  $\pm 5\%$ .

## 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ ОПОРЫ СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЫ

**Цель работы:** проверить применимость правила Верещагина для определения перемещений в статически определимых системах.

### *Краткие теоретические сведения*

Правило Верещагина — графо-аналитический прием вычисления интегралов Мора по определению перемещений. Правило применимо, если ось участка прямолинейна, и удобно применимо, если жесткость поперечных сечений по длине участка балки или рамы постоянна.

При постоянной жесткости по длине участков упруго деформируемой системы аналитическая запись правила Верещагина, как вариант решения интеграла Мора, записывается так:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \frac{1}{EI} \int M_p \bar{M}_i dZ = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i \bar{M}_c}{EI}. \quad (14.1)$$

Определение перемещений по формуле (14.1) осуществляется в следующей последовательности:

1. Для заданной упругой системы (балки или рамы) строится эпюра изгибающих моментов,  $M_p$ .
2. Упругая система условно освобождается от заданной нагрузки, и в сечении, перемещение которого определяется, нагружается еди-

ничной силой или моментом, и отдельно строится эпюра изгибающих моментов  $\bar{M}$  от единичной нагрузки.

3. Обе эпюры попарно разбиваются на участки так, чтобы в пределах каждого участка одна из эпюр была ограничена прямой линией.
4. Эпюры на каждом участке перемножаются, т.е. площадь участка  $\omega_i$  любого очертания умножается на расположенную под ее центром тяжести ординату  $\bar{M}_c$  прямолинейной эпюры. Их произведение делится на жесткость  $EI$  данного участка.
5. Полученные результаты суммируются, и сумма является искомым перемещением.
6. При определении линейных перемещений в заданном направлении вспомогательной балки или рамы прикладывается единичная сила, а при определении угловых перемещений — единичный момент.

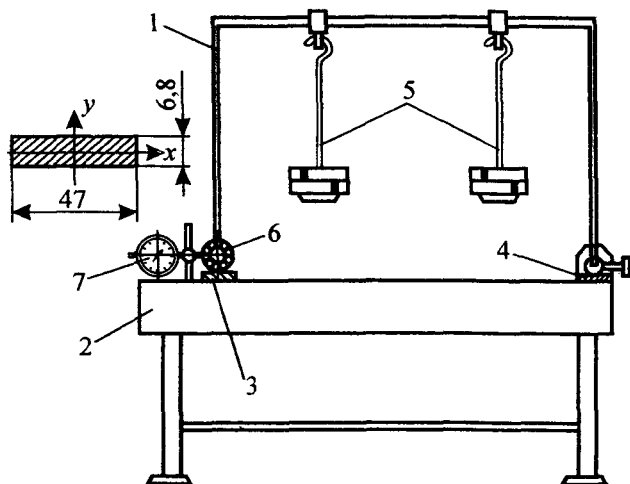
Нужно отметить, что ордината  $\bar{M}_c$  должна быть обязательно взята из прямолинейной эпюры. Если обе эпюры линейны, то указанную ординату можно брать на любой из них.

### **Образец, измерительные приборы и установка**

Исследуемый образец 1 (рис. 14.1) представляет собой порталную раму, изготовленную из стального стержня прямоугольного сечения  $h \times b = 6,8 \times 47$  мм. Марка стали — Ст3, модуль продольной упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

Образец является составной частью лабораторной установки и крепится к ее основанию 2 двумя опорами, шарнирно-неподвижной 4 и шарнирно-подвижной 3. Вдоль образца могут перемещаться подвесы 5, на которые в процессе опыта помещаются грузы. Подвесы фиксируются в выбранных точках пролета рамы при помощи стопорных винтов. Для удобства отсчета плеч нагрузки при перемещении подвесов на верхней стороне горизонтальной части рамы нанесена шкала.

Опорная часть шарнирно-подвижной опоры рамы выполнена в виде подшипника качения 6, жестко связанного с вертикальной стойкой. Последняя перемещается горизонтально при нагружении рамы. Величину этого перемещения измеряют индикатором часового типа 7.



*Рис. 14.1.*

### **Проведение лабораторной работы**

Работа проводится в следующей последовательности:

1. Ознакомиться с конструкцией установки.
2. В журнал лабораторных работ записать необходимые размеры элементов рамы и установки, используемые в работе.
3. Установить и зафиксировать подвесы в указанных преподавателем точках рамы.
4. Закрепить индикатор часового типа и установить его стрелку на ноль.
5. Определить величину ступени нагрузки  $\Delta P$ . Затем, давая одинаковые приращения нагрузки, произвести 4 нагружения рамы в пределах ее упругих деформаций. Наибольшая нагрузка не должна превышать 39,2 Н (4 кгс) на один подвес.
6. После каждого нагружения регистрировать по шкале индикатора число делений, соответствующих горизонтальному перемещению опоры.
7. Убедиться в линейной зависимости перемещений от нагрузки.
8. По окончании опыта образец разгрузить.

## Обработка опытных данных

Определение величины горизонтального перемещения производится на ступень нагрузки  $\Delta P$ .

По результатам таблицы измерений вычислить разности между каждыми двумя последовательными отсчетами горизонтального перемещения по шкале индикатора

$$\Delta n_{i,i+1} = n_{i+1} - n_i \quad (14.2)$$

Вычислить среднее значение указанных разностей из всех измерений

$$\Delta n_{cp} = \frac{\sum \Delta n_i}{n} \quad (14.3)$$

где  $n$  — число разностей.

Определить величину горизонтального перемещения

$$\Delta_z = \Delta n_{cp} \cdot \alpha_u \quad (14.4)$$

где  $\alpha_u$  — цена деления шкалы индикатора.

### Теоретический расчет

Изображаем расчетную схему рамы (рис. 14.2) и строим эпюры изгибающих моментов от заданной нагрузки (рис. 14.2, а) и единичной силы (рис. 14.2, б).

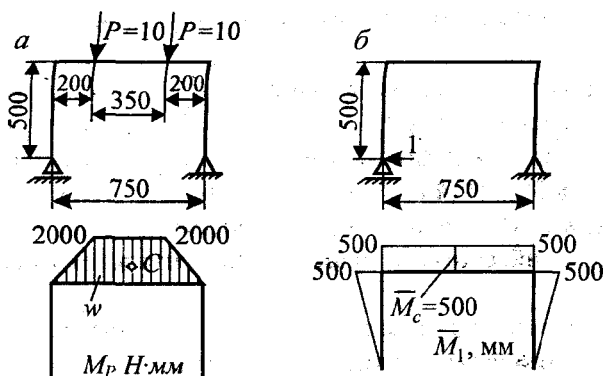


Рис. 14.2.



Осевой момент инерции прямоугольного сечения рамы (рис. 14.1)

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{47 \cdot 7^3}{12} = 1343 \text{ мм}^4$$

Определяем горизонтальное перемещение по формуле (14.1)

$$\Delta_{\varepsilon} = \frac{1}{EI_x} \sum (\omega_i \bar{M}_c) = \frac{1}{2 \cdot 10^5 \cdot 1343} \left( \frac{750 + 350}{2} \cdot 2000 \cdot 500 \right) = 2,04 \text{ мм.}$$

Определить расхождение между опытным и теоретическим значением горизонтального перемещения по формуле

$$\Delta = \frac{\Delta_{\text{теор}} - \Delta_{\text{оп}}}{\Delta_{\text{теор}}} 100\%.$$

## 15.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РЕАКЦИИ ОПОРЫ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЫ

**Цель работы:** проверить применимость метода сил к раскрытию статической неопределимости рам.

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

Статически неопределимыми называют такие системы, в которых влиянием деформаций на распределение усилий в системе пренебречь нельзя. В жестких статически неопределимых системах степень их статической неопределимости соответствует числу лишних неизвестных, т.е. тому числу неизвестных, которое превышает число уравнений равновесия. Для раскрытия статической неопределимости системы необходимо в дополнение к независимым уравнениям равновесия составить уравнения перемещений в количестве, равном степени статической неопределимости системы.

В конструкциях часто встречаются статически неопределимые балки с прямолинейной осью (валы, оси) и с ломаной осью (рамы).

Статически неопределимые системы, встречающиеся в машиностроении, чаще всего рассчитывают по методу сил. Здесь в качестве неизвестных выбирают силы, действующие по направлению удаленных связей. Уравнения перемещений записывают в определенной (канонической) форме. Если заданная статически неопределимая система имеет

и лишних неизвестных, то систему  $n$  канонических уравнений для определения этих неизвестных в общем виде записывают так:

$$\begin{aligned}
 X_1\delta_{11} + X_2\delta_{12} + \dots + X_n\delta_{1n} + \Delta_{1p} &= 0; \\
 X_1\delta_{21} + X_2\delta_{22} + \dots + X_n\delta_{2n} + \Delta_{2p} &= 0; \\
 \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots & \\
 X_1\delta_{n1} + X_2\delta_{n2} + \dots + X_n\delta_{nn} + \Delta_{np} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{15.1}$$

В первом уравнении  $\delta_{11}$  — перемещение точки приложения первого лишнего неизвестного по собственному направлению, вызванное действием единичного значения этого неизвестного. Произведение  $X_1\delta_{11}$  представляет собой перемещение той же точки по тому же направлению, вызванное силой  $X_1$ . Второй член  $X_2\delta_{12}$  есть перемещение той же точки по тому же направлению, вызванное силой  $X_2$  и т.д. Член  $\Delta_{1p}$  — перемещение в том же месте и по тому же направлению, вызванное нагрузкой  $P$ . В целом вся левая часть первого уравнения представляет собой суммарное перемещение точки приложения силы  $X_1$  по направлению этой силы, вызванное всеми силами. Это перемещение приравняют к нулю, так как в заданной системе его нет.

Второе уравнение выражает то условие, что суммарное перемещение точки приложения силы  $X_2$  по направлению этой силы от всех воздействий равно нулю. Смысл остальных уравнений аналогичен.

При раскрытии статической неопределимости систем в первую очередь определяют значения перемещений  $\delta$  и  $\Delta$ . Для систем, состоящих из прямолинейных элементов, их удобно вычислять по способу Верещагина.

Рассмотрим пример расчета один раз статически неопределимой рамы (рис. 15.1, а). Чтобы получить основную систему, нужно удалить одну связь. Для этого шарнирно-неподвижную опору  $A$  заменяем на шарнирно-подвижную. Действие отброшенной связи заменяем силой  $X_1$  (рис. 15.1, б).

Уравнение перемещений в канонической форме для заданной системы примет вид

$$X_1\delta_{11} + \Delta_{1p} = 0. \tag{15.2}$$

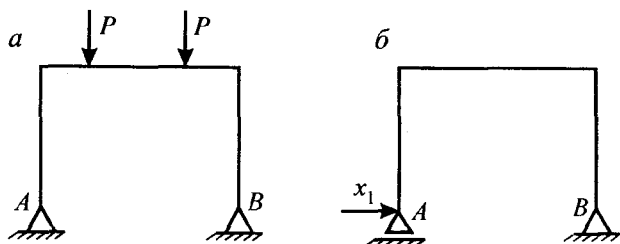


Рис. 15.1.

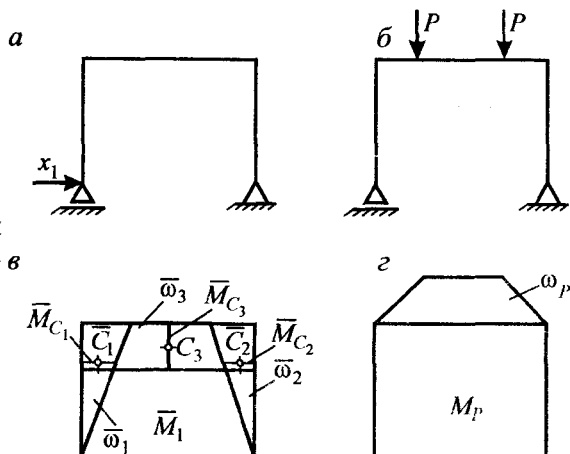


Рис. 15.2.

площадь эпюры  $\bar{M}_1$  разбиваем на три участка: два треугольника и прямоугольник, и обозначим их  $\bar{\omega}_1$ ,  $\bar{\omega}_2$  и  $\bar{\omega}_3$  соответственно.

Перемещение  $\delta_{11}$  равно сумме произведений площадей  $\bar{\omega}_i$  на ординаты  $\bar{M}_{C_i}$ , проходящие через центры тяжести площади каждого участка

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} (\bar{\omega}_1 \bar{M}_{C_1} + \bar{\omega}_2 \bar{M}_{C_2} + \bar{\omega}_3 \bar{M}_{C_3}). \quad (15.3)$$

Для определения  $\Delta_{1p}$  нужно эпюру  $M_p$  перемножить с эпюрой  $\bar{M}_1$ . По участкам площадь эпюры  $M_p$  умножаем на ординаты эпюры  $\bar{M}_1$  под центрами тяжести участков эпюры  $M_p$ :

Для определения коэффициентов  $\delta_{11}$  и  $\Delta_{1p}$  изобразим основную систему в виде двух рам: одной с единичной нагрузкой  $X_1 = 1$ , действующей по направлению отброшенной связи (рис. 15.2, а), а другой — с заданной нагрузкой (рис. 15.2, б).

Построим эпюры изгибающих моментов от единичной силы  $X_1 = 1$  (рис. 15.2, в) и от заданной нагрузки ( $M_p$ ) (рис. 15.2, г).

Перемещения определяем по методу Верещагина. Для определения  $\delta_{11}$  площадь

$$\Delta_{1P} = -\frac{1}{EI} (\bar{\omega}_p \bar{M}_{c_3}). \quad (15.4)$$

Из канонического уравнения (15.2) с учетом (15.3) и (15.4) находим лишнюю неизвестную  $X_1$ , которая и является горизонтальной реакцией

$$x_1 = H = -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11}}. \quad (15.5)$$

### Образец, измерительные приборы и установка

Исследуемый образец 1 представляет собой порталную раму, изготовленную из стального стержня прямоугольного сечения  $h \times b = 6,8 \times 47$  мм. Марка стали — Ст3, модуль продольной упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

Образец является составной частью лабораторной установки (рис. 15.3) и крепится к ее основанию 2 двумя опорами, шарнирно-неподвижной 3 и шарнирно-подвижной 4. Вдоль образца могут перемещаться подвесы 5, на которые в процессе опыта помещаются грузы. Подвесы фиксируются в выбранных точках пролета рамы при помощи стопорных винтов. Для удобства отсчета плеч нагрузки при перемещении подвесов на верхней стороне горизонтальной части рамы нанесена шкала.

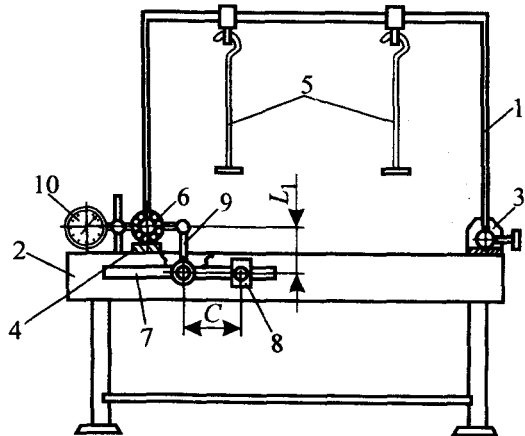


Рис. 15.3.

Опорная часть шарнирно-подвижной опоры рамы выполнена в виде подшипника качения 6, связанного жестко с вертикальной стойкой. Последняя перемещается горизонтально при нагружении рамы. Эта же опора снабжена устройством, позволяющим превращать ее в шарнирно-неподвижную. Это устройство состоит из горизонтально рас-

положенного рычага 7 с противовесом 8. Рычаг с противовесом уравновешены относительно оси качания. Эта же ось соединена вертикальным стержнем 9 с исследуемым образцом. При нагружении рамы шарикоподшипник ее левой подвижной опоры горизонтально перемещается. Величину этого перемещения измеряют индикатором часового типа 10. Перемещая противовес по горизонтальному рычагу, переместившуюся стойку рамы возвращают в исходное положение. Это положение имитирует условие шарнирно-неподвижного закрепления стойки и характеризуется возвращением стрелки индикатора в исходное нулевое положение.

Величина горизонтальной реакции при таком закреплении опоры определяется из условия равенства моментов сил относительно оси горизонтального рычага:

$$H = \frac{Q \cdot C}{L_1}, \quad (15.6)$$

где  $Q$  — вес противовеса;  $C$  — расстояние от нулевого деления шкалы горизонтального рычага до противовеса (рис. 15.3);  $L_1$  — длина стержня, соединяющего горизонтальный рычаг с образцом.

В момент первого нагружения образца противовес 8 должен быть расположен на оси качания горизонтального рычага, т. е. против нулевого деления его шкалы.

### **Порядок проведения испытаний**

Лабораторная работа проводится в следующей последовательности:

1. Ознакомиться с конструкцией установки. В журнал лабораторных работ записать необходимые размеры сечения рамы и другие данные для рамы и установки, используемые при выполнении лабораторной работы.
2. Установить и зафиксировать подвесы в указанных преподавателем точках рамы.
3. Установить противовес на нулевом делении шкалы горизонтального рычага.
4. Установить стрелку индикатора часового типа на ноль.

5. Определить величину ступени нагрузки  $\Delta P$ . Затем, давая одинаковые приращения нагрузки, произвести 4 нагружения в пределах упругих деформаций рамы. Наибольшая величина нагрузки не должна превышать 39,2 Н (4 кгс) на один подвес.
6. После каждого нагружения перемещением противовеса по горизонтальному рычагу добиться возвращения стрелки индикатора на ноль. Занести в таблицу результатов измерений соответствующее этому положению противовеса значение расстояния "С", снимаемое со шкалы горизонтального рычага.
7. По окончании опыта образец разгрузить, а противовес установить в исходное положение.

### **Обработка опытных данных**

Определение величины горизонтальной реакции рамы производится на ступень нагрузки  $P$ .

По результатам таблицы измерений вычислить разности между каждыми двумя последовательными отсчетами плеча горизонтального рычага

$$\Delta C_{i,i+1} = C_{i+1} - C_i. \quad (15.7)$$

Вычислить среднее значение указанных разностей из всех измерений

$$\Delta C_{cp} = \frac{\sum \Delta C_i}{n}, \quad (15.8)$$

где  $n$  — число разностей.

Определить величину горизонтальной реакции опоры

$$H = \frac{Q \cdot \Delta C_{cp}}{L_1}. \quad (15.9)$$

### **Теоретический расчет**

Степень статической неопределимости для расчетной схемы рамы

$$L = C_0 + C_a - 3D = 4 + 6 - 3 \cdot 3 = 1.$$

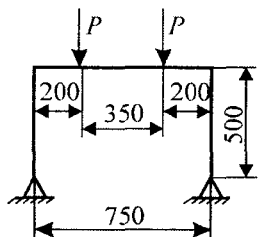


Рис. 15.4.

Каноническое уравнение метода сил приведено в формуле (15.2), а основная система — на рис. 15.5, а.

Для определения коэффициентов  $\delta_{11}$  и  $\Delta_{1P}$  канонического уравнения поочередно нагружаем основную систему заданной нагрузкой (рис. 15.5, а) и единичной силой  $X_1 = 1$  (рис. 15.5, б) и строим эпюры изгибающих моментов для обоих случаев нагружения.

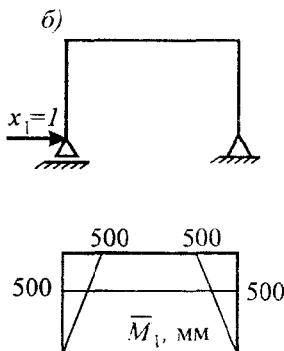
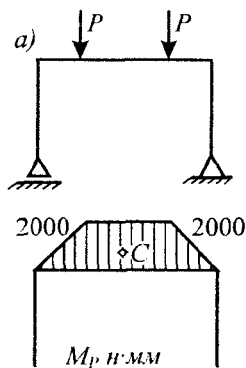


Рис. 15.5.

Для определения коэффициента  $\delta_{11}$  умножают площади участков единичной эпюры  $\bar{M}_1$  на ординаты, проходящие через центры тяжести этих же участков

Для определения коэффициента  $\delta_{11}$  умножают площади участков единичной эпюры  $\bar{M}_1$  на ординаты, проходящие через центры тяжести этих же участков

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI_x} (\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_1) =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 10^5 \cdot 1343} \left( \frac{1}{2} \cdot 500 \cdot 500 \cdot \frac{2}{3} \cdot 500 \cdot 2 + 750 \cdot 500 \cdot 500 \right) = 1,0$$

Для определения  $\Delta_{1P}$  эпюру  $M_p$  перемножают с эпюрой  $\bar{M}_1$ . Для чего площадь трапеции эпюры  $M_p$  (рис. 15.5, а) умножаем на ординату из эпюры  $\bar{M}_1$ , взятую под центром тяжести первой эпюры.

$$\Delta_{1P} = -\frac{1}{EI_x} (M_p \cdot \bar{M}_1) = -\frac{1}{2 \cdot 10^5 \cdot 1343} \left( \frac{750 + 350}{2} \cdot 2000 \cdot 500 \right) = -2,05$$

Значение горизонтальной реакции  $H_2$  определяем из канонического уравнения

$$X_1 \cdot 1,0 - 2,05 = 0,$$



$$X_1 = H_z = \frac{2,05}{1,0} = 2,05 \text{ н.}$$

Знак “плюс”, полученный в результате расчета, указывает на то, что истинное направление горизонтальной реакции  $H_z$  совпадает с выбранным.

Полученные результаты опытных и теоретических исследований заносят в таблицу журнала лабораторных работ для сравнения и определения расхождений между ними по формуле

$$\frac{H_{z_{\text{теор}}} - H_{z_{\text{оп}}}}{H_{z_{\text{теор}}}} 100\%.$$

## 16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ЗАЩЕМЛЕНИЯ ОДНОПРОЛЕТНОЙ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ БАЛКИ

**Цель работы:** проверить применение уравнения трех моментов к раскрытию статической неопределимости балок.

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

Балки, внутренние усилия в которых не могут быть найдены из одних только уравнений равновесия, называются статически неопределимыми.

Для расчета таких балок кроме уравнений статики необходимо составлять дополнительные уравнения, называемые уравнениями перемещений. В жестких статически неопределимых системах степень их статической неопределимости соответствует числу лишних неизвестных, т.е. тому числу неизвестных, которое превышает число уравнений равновесия. Для раскрытия статической неопределимости системы необходимо в дополнение к независимым уравнениям равновесия составить уравнения перемещений в количестве, равном степени статической неопределимости системы.

Статически неопределимые балки, встречающиеся в машиностроении, удобно рассчитывать применяя уравнение трех моментов.

В этом случае за неизвестные принимают изгибающие моменты в сечениях над опорами (опорные моменты). В качестве основной системы принимается балка с шарнирами, установленными над всеми проме-

жуточными опорами. В качестве эквивалентной системы получают систему разрезных шарнирно-опертых по концам балок, работающих независимо друг от друга и нагруженных заданной в пролетах нагрузкой и неизвестными опорными моментами.

Если неразрезная балка имеет защемленный конец (жесткую заделку) (рис. 16.1, а), то в этом случае защемление заменяют вспомогательным пролетом с шарнирными опорами, расположенными на бесконечно близком расстоянии одна от другой. При составлении уравнения трех моментов длину вспомогательного пролета  $l_0$  считают равной нулю.

Раскрытие статической неопределимости однопролетной балки производят в следующей последовательности: (рис. 16.1, а, б, в, г).

1. Определяем число лишних связей по формуле

$$L = C_0 - 3 = 4 - 3 = 1,$$

т.е. балка один раз статически неопределима. Здесь  $C_0$  — число опорных связей в балке (рис. 16.1, а).

2. Изображаем основную систему (рис. 16.1, б), для чего:

- заменяем заделку вспомогательным пролетом  $l_0$ ;
- нумеруем опоры балки слева направо и обозначаем длины пролетов  $l_0$  и  $l_1$ ;
- врезаем шарниры на опорах и прикладываем неизвестные опорные моменты  $M_0$ ,  $M_1$  и  $M_2$ .

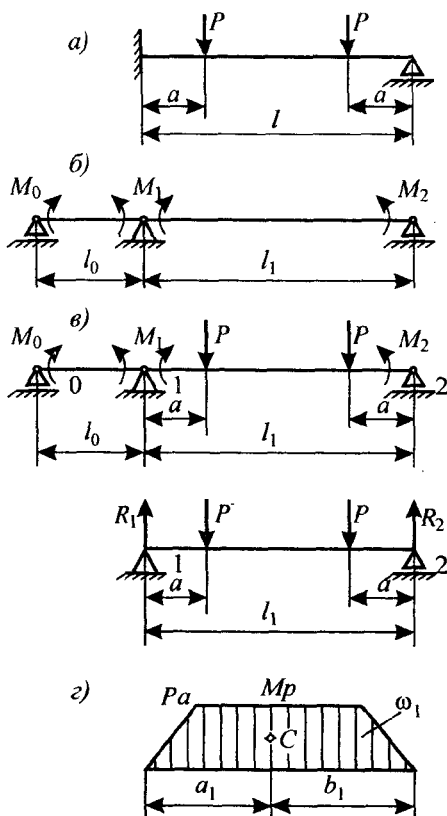


Рис. 16.1.

3. Нагружаем основную систему заданной нагрузкой (рис. 16.1, в) и получаем эквивалентную систему.
4. Для эквивалентной системы составляем уравнение трех моментов

$$M_0 l_0 + 2M_1 (l_0 + l_1) + M_2 l_1 = -6 \left( \frac{\omega_0 a_0}{l_0} - \frac{\omega_1 b_1}{l_1} \right), \quad (16.1)$$

где  $\omega_1$  — площадь эпюры изгибающих моментов от заданной нагрузки для статически определимой балки с пролетом  $l_1$ ;  $a_1, b_1$  — расстояния от центра тяжести этой эпюры до левой и правой опоры пролетной балки соответственно (рис. 16.1, г).

Учитывая то, что в (16.1)  $M_0 = 0$ ;  $l_0 = 0$ ;  $M_2 = 0$ ;  $\omega_0 = 0$  и  $a_0 = 0$ , получаем расчетную формулу для определения значения момента в защемлении  $M_1$  заданной балки

$$2M_1 l_1 = -6 \frac{\omega_1 b_1}{l_1}. \quad (16.2)$$

### **Образец, измерительные приборы и установка**

Исследуемый образец 1 представляет собой балку прямоугольного сечения  $3 \times 40$  мм, изготовленную из стали Ст3, и является составной частью установки СМ-11А (рис. 16.2). Образец закреплен в двух шарнирно-неподвижных опорах, выполненных в виде осей, установленных в шарикоподшипниках. Размещен образец в специальных вырезах на осях и крепится к ним при помощи прижимных планок. На лицевой стороне образца нанесена шкала для удобства отсчета плеч нагрузки.

Нагружается образец с помощью двух подвесок 2, на которые накладываются грузы 3. Подвески перемещают вдоль образца вручную и при необходимости фиксируют на образце винтом в любой точке пролета балки.

Опытная установка состоит из следующих основных частей: основания 4, установленного на четырех регулируемых винтах-ножках 5, подвижной 6 и неподвижной 7 стоек, устройства для имитации жесткого защемления балки.

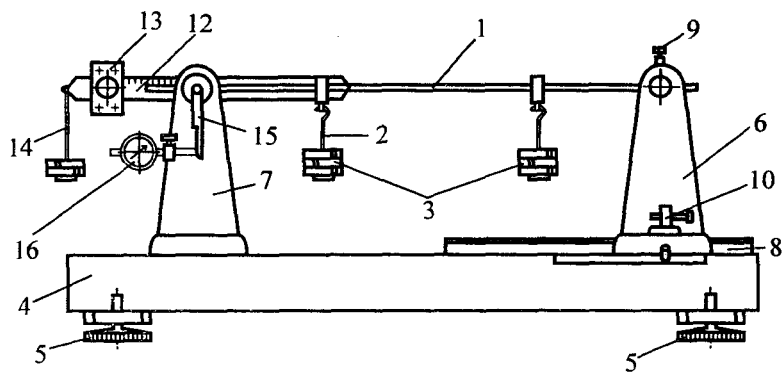


Рис. 16.2.

Подвижная стойка 6 имеет возможность перемещаться по направляющей планке 8, закрепленной на основании установки, что позволяет изменять длину пролета в пределах 650—800 мм, а также получать балку с консольным вылетом. Для перемещения подвижной стойки нужно ослабить стопорный винт 9, фиксирующий образец относительно шарнирной оси. При необходимости подвижную стойку можно жестко зафиксировать на направляющей планке стопором 10.

Неподвижная стойка прикреплена винтами к основанию и снабжена устройством, позволяющим имитировать жесткое защемление балки. Устройство состоит из горизонтально расположенного рычага 12 с противовесом 13 (1 кгс) и гиревого подвеса 14, на который накладывают съемные грузы. Слева на оси размещен стержень 15 для измерения углов поворота опорного сечения балки. В нижней части стержень имеет пятаку, в которую упирается ножка индикатора часового типа 16. Накладывая груз на гиревой подвес рычага и перемещая противовес вдоль рычага, можно уравновесить балку, т.е. добиться такого ее состояния, при котором угол поворота опорного сечения будет равен нулю.

Полученное таким образом жесткое защемление опорного конца балки характеризуется моментом защемления, который определяется суммой моментов, создаваемых противовесом и грузом на гиревом подвесе рычага относительно оси опорного сечения балки.

Для измерения угловых деформаций в установке применен индикатор часового типа ИЧ 10 МН с ценой деления 0,01 мм.

### Порядок проведения испытаний

Согласно указанной преподавателем расчетной схеме подготовить установку для проведения опыта. Особое внимание уделить фиксации исследуемой пластины к осям и индикатора — к стойке.

Стрелку индикатора 16 (рис. 16.2) для регистрации угла поворота опорного сечения установить на ноль. Навесить гиревые подвесы в точках балки согласно заданной схеме. При этом стрелка индикатора отклонится на некоторый угол, показывая, что опорное сечение повернулось. Перемещая противовес 13 по рычагу 12, найти его положение, при котором стрелка индикатора вновь возвратится в исходное нулевое положение. По шкале рычага отсчитать начальную координату  $C_1$  противовеса относительно оси опорного сечения образца (рис. 16.3; позиции 12...14 — то же, что и на рис. 16.2).

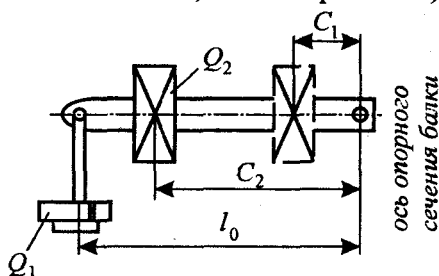


Рис. 16.3. Схема отсчета начальной координаты противовеса

Задавая одинаковые ступени приращения нагрузок, провести 2—3 нагружения исследуемого образца в упругой стадии деформаций. Наибольшая нагрузка не должна превышать 29,4 Н (3 кгс) на один гиревой подвес. По показаниям индикатора убедиться в линейности зависимости перемещений от нагрузки.

На каждой последующей ступени нагружения противовес смещается от начального положения  $C_1$  в положение  $C_2$  (рис. 16.3), которое соответствует возвращению стрелки индикатора в нулевое положение. При необходимости воспользоваться съемными грузами  $Q_1 = 0,5$  кгс, накладная их на гиревой подвес, надетый на конец рычага.

По окончании опыта балку разгрузить.

## Обработка опытных данных

Определение величины момента  $m_A$  в защемлении производят на ступень нагрузки  $\Delta P$  и соответствующие ей значения плеч уравнивающих грузов  $Q_1$  и  $Q_2$ .

По результатам таблицы измерений вычисляют разности между каждыми двумя последовательными отсчетами плеч рычага и величины уравнивающих грузов.

$$\Delta n_{i, i+1} = n_{i+1} - n_i.$$

Вычисляют средние значения указанных разностей

$$\Delta n_{cp} = \frac{\sum \Delta n_i}{n},$$

где  $n$  — число разностей.

Значение момента в защемлении вычисляют по формуле

$$m_{A, cp} = \Delta Q_{1, cp} l_0 + Q_2 \Delta C_{cp}.$$

Определяют расхождение между опытными и теоретическими данными

$$\frac{m_{A, теор} - m_{A, оп}}{m_{A, теор}} 100\% \leq 5\%.$$

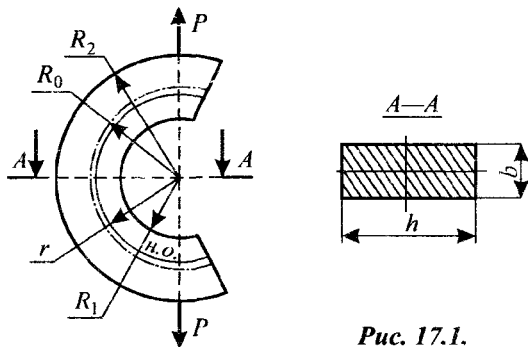
## 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИЗГИБЕ КРИВОГО БРУСА

**Цель работы:** проверить экспериментально расчетные формулы для определения напряжений, возникающих при изгибе кривого бруса.

### *Краткие теоретические сведения*

Кривыми называют брусья, у которых ось, проходящая через центры тяжести поперечных сечений, — плоская кривая (звенья цепей, проушины, крюки и др.). Различают брусья большой кривизны, у которых  $\frac{h}{R} > \frac{1}{5}$ , и брусья малой кривизны, у которых  $\frac{h}{R} < \frac{1}{5}$ , где  $h$  — высота поперечного сечения бруса,  $R$  — радиус кривизны его оси.

Расчетные формулы, применяемые для определения напряжений в сечениях прямого бруса, применимы также и к брусу малой кривизны.



**Рис. 17.1.**

При растяжении бруса большой кривизны силой  $P$ , приложенной вдоль вертикальной оси, проходящей через центр кривизны, в его опасном сечении  $A-A$  (рис. 17.1) возникает продольная сила  $N = P$  и изгибающий момент  $M = P \cdot R_0$ .



Нормальные напряжения в сечении кривого бруса изменяются по гиперболическому закону. Их определяют по формуле

$$\sigma = \frac{N}{F} \pm \frac{M}{S_{н.о.}} \cdot \frac{y}{r + y}, \quad (17.1)$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения бруса;  $S_{н.о.} = F(R_0 - r)$  — статический момент площади сечения относительно нейтральной оси;  $r$  — радиус кривизны нейтрального слоя;  $y$  — расстояние от нейтральной оси до рассматриваемого волокна в сечении;  $R_1, R_2$  — внутренний и наружный радиусы бруса соответственно;  $R_0 = \frac{R_1 + R_2}{2}$  — радиус центральной оси бруса.

Радиус кривизны нейтрального слоя для бруса прямоугольного сечения определяют по формулам

$$r = \frac{h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (17.2)$$

где  $h$  — высота сечения.

В точках 1 и 2 опасного сечения (рис. 17.2) действуют максимальные напряжения растяжения и сжатия. Их абсолютные значения удобнее определять по формулам

$$\sigma_1 = \frac{P}{F} + \frac{P \cdot R_0}{F \cdot e} \frac{h_1}{R_1}, \quad \sigma_2 = \frac{P}{F} - \frac{P \cdot R_0}{F \cdot e} \frac{h_2}{R_2}, \quad (17.3)$$

где  $e = R_0 - r$  — расстояние от нейтральной оси до центра тяжести сечения;  $h_1 = \frac{h}{2} - e$ ;  $h_2 = \frac{h}{2} + e$  — расстояние от нейтральной оси до точек 1 и 2 сечения соответственно.

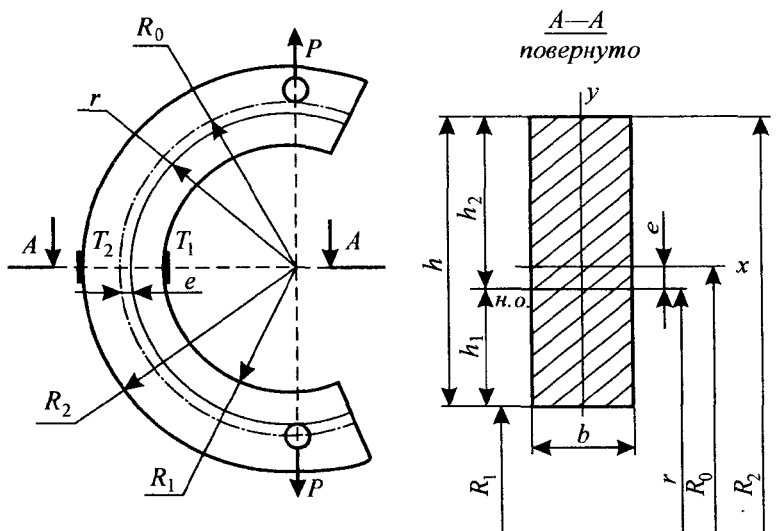


Рис. 17.2.

### Образец, измерительные приборы и испытательная машина

Для экспериментального определения напряжений в кривом бруске используется образец в виде неполного разрезного кольца с прямоугольным сечением (рис. 17.2)  $b \times h = 20 \times 40$  мм;  $R_1 = 40$  мм,  $R_2 = 80$  мм,  $R_0 = 60$  мм. Материал бруса — Ст3, модуль продольной упругости для которой  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

Напряжения в горизонтальном сечении образца измеряют методом электротензометрирования, для чего на внутренней и наружной поверхностях образца наклеены тензорезисторы  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 17.2).

Тензорезисторы соединяют по мостовой схеме, включают в соответствующие каналы измерителя деформаций типа ИД-70 или электронного усилителя ПЭТ-3В-М.

Для растяжения образца используют любую универсальную испытательную машину, пригодную для испытаний на растяжение — сжатие.

Крепление образца в захватах испытательной машины осуществляется с помощью двух стержней с проушинами (рис. 17.3).

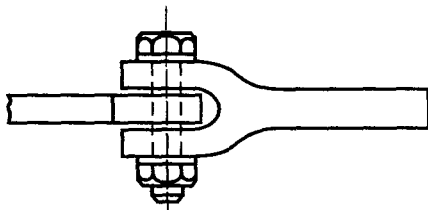


Рис. 17.3.

### **Порядок проведения испытания**

Внимательно ознакомиться с устройством испытательной машины и схемой измерения напряжений методом тензометрирования. Включить измеритель деформаций и прогреть его, после чего отбалансировать тензометрические мосты согласно руководству по эксплуатации прибора. Шкалу миллиамперметра установить на нуль.

Ступенчато нагружая образец, через каждые  $\Delta P = 2$  кН отсчитывать показания шкалы “настройка” измерителя деформаций последовательно для первого и второго тензорезисторов.

Увеличение нагрузки на одну и ту же величину  $P$  следует производить не менее 3—4 раз в целях контроля за правильностью наблюдений. Изменение отсчетов по обоим тензорезисторам должно быть каждый раз примерно одинаковым, так как опыт проводится в пределах пропорциональности между нагрузками и деформациями.

Закончив испытание, разгрузить образец.

### **Обработка опытных данных**

Определение напряжений в исследованных точках производится на ступень нагрузки  $\Delta P$ .

В журнал лабораторных работ заносят последовательно по ступеням нагружения показания шкалы “настройка” измерителя деформаций для первого и второго тензорезисторов  $n_1$  и  $n_2$ . Затем для этих точек определяют разности между каждыми двумя последовательными отсчетами, т.е.

$$\Delta n_{i,i+1} = n_{i+1} - n_i,$$

и вычисляют средние разности из всех измерений

$$\Delta n_{i_{cp}} = \frac{\sum \Delta n_i}{n},$$

где  $n$  — число разностей.

Напряжения в исследуемых точках определяют по формулам:

$$\sigma_1 = E \cdot \Delta n_{1cp} \cdot \alpha_1, \quad \sigma_2 = E \cdot \Delta n_{2cp} \cdot \alpha_2,$$

где  $\alpha_i$  — цена деления шкалы “настройка” измерителя деформаций.

По найденным величинам строят эпюру распределения нормальных напряжений в сечении кривого бруса и сравнивают ее с эпюрой, полученной на основании теоретического расчета.

### Теоретический расчет

Кривой брус (рис. 17.2) растягивается силой  $P = 2$  кН. Определить напряжения в точках  $T_1$  и  $T_2$  сечения  $A-A$ .

Для применения формулы (17.3) используем исходные данные и вычисляем геометрические элементы кривого бруса.

Высота сечения  $h = 40$  мм.

Ширина сечения  $b = 20$  мм.

Площадь сечения  $F = 20 \times 40 = 800$  мм<sup>2</sup>.

Радиус кривизны внутреннего волокна  $R_1 = 40$  мм.

Радиус кривизны наружного волокна  $R_2 = 80$  мм.

Радиус кривизны центрального волокна  $R_0 = \frac{(40 + 80)}{2} = 60$  мм.

Радиус кривизны нейтрального волокна

$$r = \frac{h}{\ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{40}{\ln \frac{80}{40}} = 57,7 \text{ мм.}$$

Расстояние от центра тяжести сечения до нейтральной оси

$$e = R_0 - r = 60 - 57,7 = 2,3 \text{ мм.}$$

Расстояние от нейтральной оси до наиболее удаленных точек в растянутой и сжатой зонах

$$h_1 = \frac{h}{2} - e = \frac{40}{2} - 2,3 = 17,7 \text{ мм}, \quad h_2 = \frac{h}{2} + e = \frac{40}{2} + 2,3 = 22,3 \text{ мм}.$$

Значения продольной силы и изгибающего момента в сечении

$$N = P = 2 \text{ кН}; \quad M = P \cdot R_0 = 2 \cdot 10^3 \cdot 60 = 120 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Напряжение в растянутой зоне

$$\sigma_1 = \frac{N}{F} + \frac{M h_1}{F \cdot e \cdot R_1} = \frac{2 \cdot 10^3}{800} + \frac{120 \cdot 10^3 \cdot 17,7}{800 \cdot 2,3 \cdot 40} = 31,36 \text{ МПа}.$$

Напряжение в сжатой зоне

$$\sigma_2 = \frac{N}{F} - \frac{M \cdot h_2}{F \cdot e \cdot R_2} = \frac{2 \cdot 10^3}{800} - \frac{120 \cdot 10^3 \cdot 22,3}{800 \cdot 2,3 \cdot 80} = -15,68 \text{ МПа}.$$

## 18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ ПРИ СЖАТИИ СТЕРЖНЯ БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ

**Цель работы:** воспроизвести простейший случай потери устойчивости прямолинейной формы стержня при осевом сжатии и экспериментально установить значение критической силы.

### *Краткие теоретические сведения*

Испытание на устойчивость дает возможность определить несущую способность тонкостенных элементов (стоек, профилей, труб) при сжатии их продольной силой. Метод позволяет производить оценку материалов, предназначенных для элементов конструкций, работающих на продольный изгиб, путем испытания тонкостенных стержней с различной формой поперечного сечения и различной длины. Испытания проводятся с учетом предполагаемых условий эксплуатации при однократном и длительном нагружениях, до разрушения (до потери устойчивости) или прекращаются при достижении определенной степени деформации.

Если прямолинейный стержень сжимать центрально приложенной силой  $P$ , то с возрастанием этой силы стержень вначале упруго укорачивается, сохраняя свою прямолинейную форму, а затем наступает явление потери устойчивости — стержень изгибается.

Критической силой  $P_k$  называется наименьшая по величине сжимающая стержень сила, при которой прямолинейная форма стержня перестает быть устойчивой.

Даже при незначительном превышении силы  $P$  над величиной  $P_k$  происходит быстрое нарастание прогибов, т.е. стержень подвергается возрастающей деформации продольного изгиба.

Для стержней большой гибкости критическая сила определяется по формуле Эйлера

$$P_k = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu l)^2}, \quad (18.1)$$

где  $E$  — модуль продольной упругости;  $I_{\min}$  — наименьший главный центральный момент инерции поперечного сечения стержня;  $l$  — длина стержня;  $\mu$  — коэффициент приведения длины, зависящий от способов закрепления концов стержня.

Критическое напряжение, возникающее в момент потери устойчивости

$$\sigma_k = \frac{P_k}{F} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu l)^2 F} = \frac{\pi^2 E}{(\mu l)^2} \cdot i_{\min}^2 = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}, \quad (18.2)$$

где  $i_{\min}^2 = \frac{I_{\min}}{F}$  — минимальный радиус инерции стержня;  $\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}$  — гибкость стержня.

Формула Эйлера справедлива для случаев, когда критическое напряжение не превышает предела пропорциональности  $\sigma_{\text{пц}}$

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \leq \sigma_{\text{пц}}. \quad (18.3)$$

Из формулы (18.3) следует, что формулой Эйлера можно пользоваться только при значениях гибкости, превышающих определенную для каждого материала величину

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{\text{пц}}}}. \quad (18.4)$$

Например для стали Ст3 или другой, близкой к ней по механическим свойствам,  $\lambda \geq 100$ ; для чугуна  $\lambda \geq 80$ ; для древесины (сосна)  $\lambda \geq 110$ .

Коэффициент приведения длины  $\mu$  представляет собой отношение длины полуволны изогнутой оси стержня к длине стержня. Значения этого коэффициента для различных способов закрепления концов стержня приведены на рис. 18.1.

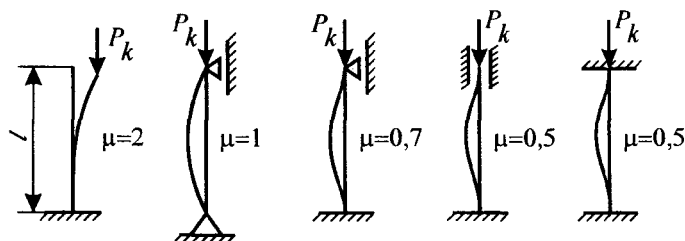


Рис. 18.1.

### Образец, измерительные приборы и испытательная установка

Для испытаний применяют стальной призматический образец прямоугольного сечения  $b \times h = 6,5 \times 29,5$  мм, длиной один метр.

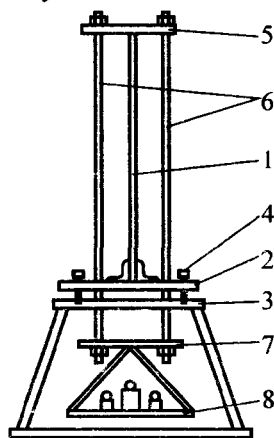


Рис. 18.2.

Стержень нагружают на специальной установке (рис. 18.2), в которой нижний конец испытуемого стержня 1 жестко закреплен в пяте 2, опирающейся на станину 3 при помощи винтов 4. Винты служат для установки стержня в вертикальное положение, которое проверяется по отвесу, подвешенному на коромысло 5. Коромысло 5 с двумя тягами 6 служат для передачи нагрузки на стержень. К тягам с помощью перекладки 7 крепится поддон 8 для укладки гирь. Верхний конец стержня вместе с коромыслом может отклоняться вправо или влево от вертикального положения.

Тяги пропущены сквозь овальные прорези в пяте и станине и могут перемещаться вместе со свободным концом стержня.



## Порядок проведения испытаний

Опыт проводят в следующем порядке. Стержень после обмера устанавливается по отвесу в вертикальное положение с помощью установочных винтов. Затем на поддон помещается гиря, и проверяется устойчивость стержня. Для этого слегка отклоняют верхний конец стержня от вертикали и отпускают его. Если стержень после нескольких колебаний около вертикального положения вернется в первоначальное состояние, значит прямолинейная форма стержня является устойчивой, и критическое значение нагрузки еще не достигнуто.

Увеличивая нагрузку путем добавления гирь на поддон, снова проверяют устойчивость прямолинейной формы стержня. Эту операцию повторяют до тех пор, пока стержень не потеряет способность возвращаться в исходное положение после отклонения от вертикали. Нагрузка, при которой обнаруживается такое явление (потеря устойчивости), представляет собой критическую силу. Она складывается из веса гирь и поддона с тягами и коромыслом.

### Теоретический расчет

Стальной стержень сжимается осевой нагрузкой  $P$  (рис. 18.3). Определить величину критической силы  $P_k$  при длине стержня один метр, сечение прямоугольное  $b \times h = 6,5 \times 29,5$  мм.

Определяем геометрические характеристики сечения.

Из двух главных центральных осевых моментов инерции меньшим будет  $I_y$ , значение которого принимаем за  $I_{\min}$ .

$$I_y = I_{\min} = \frac{hb^3}{12} = \frac{29,5 \cdot 6,5^3}{12} = 675,12 \text{ мм}^4.$$

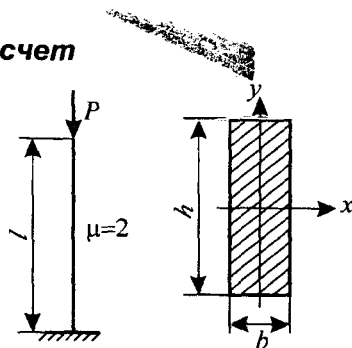


Рис. 18.3.

Минимальный радиус инерции

$$i_{\min} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{F}} = \sqrt{\frac{hb^3}{12hb}} = \frac{b}{\sqrt{12}} = \frac{6,5}{3,464} = 1,87 \text{ мм.}$$

Гибкость стержня

$$\lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}} = \frac{2 \cdot 1000}{1,87} = 1069,5 > 100.$$

Гибкость стержня  $\lambda > 100$ , поэтому для определения  $P_k$  применяем формулу Эйлера

$$P_k = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu l)^2} = \frac{3,14^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 675,12}{(2 \cdot 1000)^2} = 332,8 \text{ Н.}$$

## 19.

# ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛОВ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

**Цель работы:** определить ударную вязкость стали и чугуна.

### Краткие теоретические сведения

Испытание на ударный изгиб надрезанных образцов имеет важное практическое значение как самостоятельное средство проверки способности стали, как хладноломкого материала, деформироваться пластически в условиях, неблагоприятствующих развитию пластической деформации. Такая проверка невозможна в условиях испытания гладких образцов на осевое растяжение. Снижение пластичности стали при таких испытаниях вызывается

следующими причинами. При изгибе образца силой, приложенной со стороны, противоположной надрезу (рис. 19.1, а), возбуждается концентрация напряжений вблизи надреза и возникает объемное напряженное состояние (объемное растяжение) при главных напряжениях  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > 0$ , (рис. 19.1, б).

Указанное отрицательное влияние объемной напряженности на пластичность стали обнаруживается при объемном растяжении и не имеет места при объемном сжатии. Второй причиной, снижающей пла-

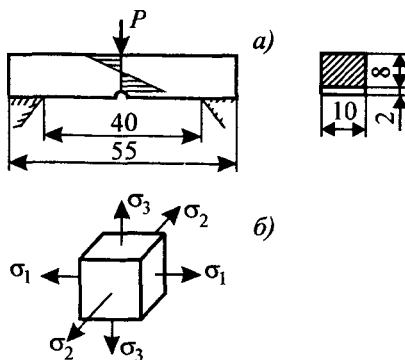


Рис. 19.1.

стичность стали, является повышение предела текучести в связи с динамическим приложением силы и вследствие охлаждения образца, испытываемого при отрицательных температурах.

Оценка сопротивляемости металла ударному изгибу производится по величине ударной вязкости, которая равна отношению работы  $A$ , затраченной на разрушение образца, к площади  $F$  поперечного сечения образца в месте надреза

$$KC = \frac{A}{F}, \text{ Дж/м}^2, \quad (19.1)$$

где  $KC$  — обозначение ударной вязкости в соответствии с требованием ГОСТа 9454-78.

С целью сравнения полезно провести испытания на ударный изгиб образцов из вязкой стали и чугуна. Ударная вязкость последнего почти в сто раз меньше ударной вязкости стали. Представляет интерес сопоставление характера излома: для вязкой стали характерен волокнистый излом при достаточно большой пластической деформации в зоне излома, для чугуна — зернистый излом при полном отсутствии пластически деформированной зоны.

Условия испытаний на ударную вязкость при нормальной и пониженной температуре регламентированы ГОСТом 9454-78. Этот стандарт распространяется на сталь и другие металлы и сплавы, склонные к переходу в хрупкое состояние под влиянием целого ряда факторов. Важнейшими из них являются: снижение температуры, наличие предварительной пластической деформации в металле, наличие концентраторов напряжений, увеличение абсолютных размеров деталей и скорости деформации.

Чем выше ударная вязкость металла, тем лучше он сопротивляется ударным нагрузкам. Поэтому нормирование значений ударной вязкости для конкретной марки стали производят по результатам ее испытаний в температурном режиме, соответствующем ее эксплуатационным условиям. Сталь, получившая при испытаниях значение ударной вязкости ниже значений, нормируемых ГОСТом, к эксплуатации в соответствующих конструкциях не допускается.

Теоретическое определение и нормирование значений ударной вязкости встречает большие затруднения. Это связано с тем, что принятые в сопротивлении материалов теории прочности сплошной среды оказываются не вполне удовлетворительными.

### Образцы для испытаний

В качестве образцов применяют бруски с надрезами посередине (рис. 19.2, табл. 3). По виду надреза (концентратора) они подразделяются на три вида: с U-образным, V-образным концентраторами и с усталостной трещиной, их типоразмеры приведены в таблице (ГОСТ 9454-78).

Заготовки для образцов вырезают на металлорежущих станках при условиях, исключающих наклеп и нагрев, которые изменяют свойства образцов.

Окончательную обработку проводят на плоскошлифовальных станках. Надрез выполняют сверлением или фрезерованием. На поверхности надреза не должно быть рисок, видимых без оптических приборов. Образцы со следами обработки на поверхности надреза в виде поперечных рисок, с искривлениями, заусенцами на ребрах, закалочными и другими трещинами не испытывают. Маркируют образцы не далее 15 мм от края на торцах, на боковых сторонах или на стороне, противоположной надрезу, но не на опорной поверхности.

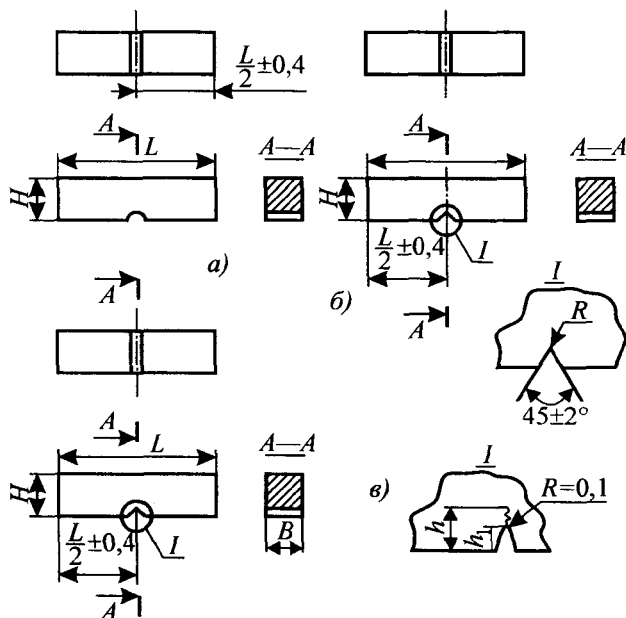


Рис. 19.2.

Таблица 3

Размеры образцов для испытаний на ударную вязкость, мм

Вид концентратора	Радиус концентратора, R	Тип образца	Длина, L	Ширина, B	Глубина надреза, h <sub>1</sub>	Глубина концентратора, h	Высота рабочего сечения, H <sub>1</sub>	Высота, H
U	1±0,07	1	55	10±0,1			8±0,1	10
		2		7,5±0,1				
		3		5±0,05				
		4		2±0,05				
		5		10			7±0,1	10
		6		7,5				
		7		5				
		8		10				
		9		7,5				
		10		5				
V	0,25±0,025	11		10			8±0,05	10
		12		7,5				
		13		5			6±0,05	8
		14		2				
T	Трещина	15		10	1,5	3 0	—	11
		16		7,5				
		17		5				
		18		2	3,5	5,0		9
		19		10				
		20		140				

### Измерительные приборы и испытательная машина

Определение ударной вязкости металлов производят на маятниковых копрах (рис. 19.3) с запасом энергии 300 Дж, так как большой избыток энергии, остающейся после удара, отрицательно влияет на точность измерения. Копер состоит из чугунной станины 1, выполненной в виде массивной фундаментной плиты с двумя вертикальными колоннами, маятника 2 и измерительного устройства 3. Вверху на колоннах станины помещена горизонтальная ось 4, свободно вращающаяся в шариковых

подшипниках. На этой оси в промежутке между колоннами насажен маятник 2, состоящий из стержня подвеса и тяжелого молота в виде плоского диска. Молот имеет глубокий вырез, на дне которого закреплен нож 5 из закаленной стали, являющийся бойком маятника. Ударная грань ножа точно совпадает с прямой, проходящей через центр оси 4 и центр тяжести маятника.

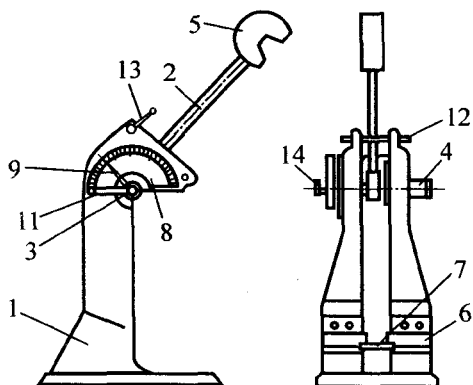


Рис. 19.3.

В нерабочем состоянии маятник свободно висит, и прямая, соединяющая его центр тяжести с центром оси 4, строго вертикальна.

Внизу, на уровне ножа вертикально висящего маятника, к колоннам станины прикреплены две опоры 6. Опоры — передвижные, что позволяет устанавливать нужное расстояние между ними применительно к размерам намеченного к испытанию образца 7.

Измерительное приспособление копра представляет собой неподвижный полукруглый диск 8, укрепленный на одной из колонн станины concentрично с осью 4 маятника. На диске имеется шкала с делениями в единицах работы. Стрелка 9 измерительного устройства плотно надета на ось 4, вследствие чего она вращается вместе с осью и маятником. На эту же ось посажен и упор 11, перемещающий стрелку 9 по шкале измерения работы при разрушении образца при испытании.

Для испытания маятник поднимают на исходную высоту и удерживают во взведенном состоянии при помощи специальных защелок 12. Затем на опорах 6 свободно размещают надрезанный образец 7, не закрепляя его. Надрез располагают в сторону по направлению удара и строго по центру опор с тем, чтобы удар ножа маятника пришелся по грани образца, противоположной надрезу. Для быстрого и точного размещения образца на опорах следует пользоваться специальным шаблоном, обеспечивающим симметричное расположение надреза относительно опор с погрешностью не более  $\pm 0,5$  мм.

## **Порядок проведения испытания**

Порядок работы на копре следующий. Упор 11 совмещают со стрелкой 9, устанавливая ее на деление 30 измерительной шкалы. При этом упор должен находиться под стрелкой. Поднимают маятник 2 и опирают его на деревянную рейку, прижимаемую маятником к колоннам станины. После этого укладывают испытуемый образец на опоры 6. Маятник поднимают в верхнее положение до зацепления с защелкой 12. Затем с помощью рукоятки 13 защелки освобождают маятник, который, падая, наносит удар по образцу, разрушая его.

После разрушения образца диск маятника поднимается на некоторую высоту. При этом упор 11, поворачиваясь вместе с маятником, отводит стрелку снизу вверх до положения, соответствующего подъему маятника; в этом положении стрелка остается и при обратном движении маятника. Отсчет по шкале от нулевого деления до деления, против которого остановилась стрелка, дает величину энергии, затраченной на разрушение образца, а отсчет от стрелки до конца шкалы — избыточный запас энергии маятника.

Для остановки качающегося маятника необходимо нажать рукой на выступ 14, который другим концом входит в отверстие тормозного диска. Торможение рекомендуется производить тогда, когда маятник находится в вертикальном положении.

## **Обработка результатов испытаний**

После остановки качания маятника записать значение работы разрушения образца по показаниям стрелки на измерительной шкале.

Запись и обработку опытных данных удобнее производить в табличной форме. Вычислить значение ударной вязкости для стального и чугунного образцов по формуле 19.1.

$$КСУ(КСВ) = \frac{A}{F}, \text{ Дж/м}^2,$$

где  $КС$  — обозначает символ ударной вязкости, третья буква в обозначении — вид концентратора.

Для образцов с концентратором вида  $T$  ударную вязкость обозначают символами  $КСТ$ .



## 20. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ НА БАЛКУ, ЛЕЖАЩУЮ НА ДВУХ ОПОРАХ

**Цель работы:** определить характеристики колебательного процесса, возникающего в результате действия изгибающего удара на балку, лежащую на двух опорах.

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

Расчет деталей машин и сооружений на динамическую нагрузку более сложен, чем на статическую. Трудность заключается в большой сложности методов определения внутренних усилий и напряжений, возникающих от действия динамической нагрузки, и методов определения механических свойств материалов при динамической нагрузке. Например, при действии ударной нагрузки многие материалы, которые при статической нагрузке были пластичными, работают как хрупкие; при действии многократно повторяющейся переменной нагрузки прочность материалов резко снижается.

Метод расчета на динамическую нагрузку основан на известном из теоретической механики принципе д'Аламбера. Согласно этому принципу, движущееся тело рассматривается как находящееся в равновесии, если к действующим на него силам добавить силу инерции, равную произведению массы тела на его ускорение и направленную в противоположную ему сторону. Поэтому, если известны силы инерции, можно применить метод сечений и, используя уравнения статики, определить внутренние усилия в сечении тела.

В большинстве случаев порядок расчета элементов конструкций в случае динамической нагрузки принимают следующим:

- 1) вычисляют ускорения точек элемента;
- 2) определяют силы инерции, соответствующие полученным ускорениям;
- 3) загружают элемент вычисленными силами инерции в дополнение к действующим внешним силам;
- 4) последующий расчет ведут так же, как и в случае загрузки элемента статической нагрузкой.

Рассмотрим случай удара груза по неподвижному телу. Скорость груза в момент удара определяется известной формулой свободного падения

$$V = \sqrt{2gh}. \quad (20.1)$$

Эта скорость за очень короткий промежуток времени удара, исчисляемый тысячными или сотыми долями секунды, падает до нуля.

Благодаря большому ускорению (замедлению) возникает значительная сила инерции, которой и определяется действие удара. Теоретически трудно установить закон изменения скорости, а следовательно, и силу инерции. Поэтому применяют метод, основанный на законе сохранения энергии, используя следующие допущения:

- 1) напряжения при ударе не превосходят предела пропорциональности (справедлив закон Гука);
- 2) тела после удара не отделяются друг от друга;
- 3) масса ударяемого тела считается малой по сравнению с массой ударяющего тела, поэтому в расчет не принимается;
- 4) потерей части энергии, перешедшей в теплоту и в энергию колебательного движения соударяющихся тел, пренебрегаем.

Пусть сила, приложенная посередине балки, свободно лежащей на двух опорах, возрастает постепенно от нуля до значения  $P$ . Изгибаемая балка, она совершит работу

$$A = \frac{P \cdot \Delta}{2}, \quad (20.2)$$

вследствие чего балка получит запас потенциальной энергии, который мы обозначим  $U$ . Прогиб в рассматриваемом случае

$$\Delta = \frac{Pl^3}{48EI}. \quad (20.3)$$

Откуда

$$P = \frac{48EI \cdot \Delta}{l^3}. \quad (20.4)$$

Подставляя это в выражение потенциальной энергии балки, получим

$$U = \frac{P \cdot \Delta}{2} = \frac{48EI \cdot \Delta^2}{2l^3}. \quad (20.5)$$

Воспользуемся полученным выражением потенциальной энергии для изучения изгибающего удара, считая явление протекающим в пределах упругих деформаций. Пусть груз  $P$  (рис. 20.1) падает на балку с высоты  $h$ . Под действием удара балка деформируется и получит посредине прогиб  $\Delta_0$  (индекс “0” указывает на динамическое происхождение этого прогиба). При этом груз совершит работу

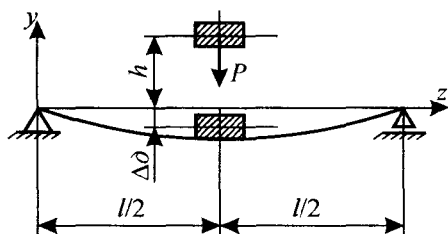


Рис. 20.1.

$$A = P(h + \Delta_0).$$

Эта работа равна потенциальной энергии балки. Воспользовавшись полученным выражением потенциальной энергии через стрелу прогиба, будем иметь

$$P(h + \Delta_0) = \frac{48EI \cdot \Delta_0^2}{2l^3}.$$

Отсюда после преобразований получим

$$\Delta_0^2 - \frac{2Pl^3}{48EI} \Delta_0 - \frac{2Pl^3}{48EI} h = 0. \quad (20.6)$$

Поскольку статический прогиб посредине балки  $\Delta = \frac{Pl^3}{48EI}$ , то

$$\Delta_{\partial}^2 - 2\Delta\Delta_{\partial} - 2h\Delta = 0. \quad (20.7)$$

Решая уравнение (20.7), получим формулу

$$\Delta_{\partial} = \Delta \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta}} \right) \quad (20.8)$$

или

$$\Delta_{\partial} = \Delta \cdot K_{\partial}, \quad (20.9)$$

где  $K_{\partial}$  — динамический коэффициент, в данном случае равный

$$K_{\partial} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta}}. \quad (20.10)$$

Или, с учетом (20.1)

$$K_{\partial} = 1 + \sqrt{1 + \frac{V^2}{\Delta g}}. \quad (20.11)$$

Для случая внезапного приложения нагрузки (при  $h = 0$  или  $V = 0$ )  $\Delta_{\partial} = 2\Delta$ . Таким образом, внезапно приложенная нагрузка вызывает вдвое большие деформации, а соответственно и напряжения, чем статическая.

Коэффициент динамичности  $K_{\partial}$ , полученный по формулам (20.10 и 20.11), не учитывает веса балки. Статический прогиб  $\Delta'$  от нагрузки  $P$  приведенного веса балки

$$\Delta' = \Delta + \Delta n_n \frac{Q}{P} = \frac{\Delta}{P} \left( \frac{1}{P} + n_n Q \right). \quad (20.12)$$

Здесь  $n_n$  — коэффициент приведения веса (для простой балки с нагрузкой посередине пролета  $n_n = 17/35$ );  $Q$  — вес балки;  $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{P}$ ;  $\bar{\Delta}$  — статический прогиб от единичной нагрузки ( $\bar{P} = 1$  Н). Тогда выражение для  $K_{\partial}$  примет окончательный вид

$$K_{\partial} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta'}}. \quad (20.12)$$

Основную секундную частоту свободных (собственных) колебаний балки и груза, которые начинаются после удара, можно приближенно оценить по формуле

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta'}}. \quad (20.13)$$

Колебания действительных упругих систем быстро затухают. Скорость затухания зависит от демпфирующих свойств материала (внутреннего трения). Обычно ее характеризуют логарифмическим декрементом затухания  $d$  или коэффициентом затухания  $\alpha$ . Логарифмический декремент затухания за один период  $T$  можно определить, измерив в эксперименте две последовательные амплитуды  $a_m$  и  $a_{m-1}$ :

$$d = \ln \frac{a_m}{a_{m-1}} = -\alpha T. \quad (20.14)$$

Более точным значение величины  $d$  будет, если измерить амплитуды через  $m$  периодов колебаний. Тогда  $\ln\left(\frac{a_m}{a_0}\right) = -\alpha m T = md$ . Отсюда

$$d = \frac{1}{m} \ln\left(\frac{a_m}{a_0}\right). \text{ Коэффициент затухания (сопротивления)}$$

$$\alpha = -\frac{d}{T}. \quad (20.15)$$

Круговая частота собственных колебаний с учетом затухания

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \alpha^2} = \sqrt{\frac{g}{\Delta'} - \alpha^2}, \quad (20.16)$$

а секундная частота

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta'} - \alpha^2}. \quad (20.17)$$

## Образцы, измерительные приборы и испытательная установка

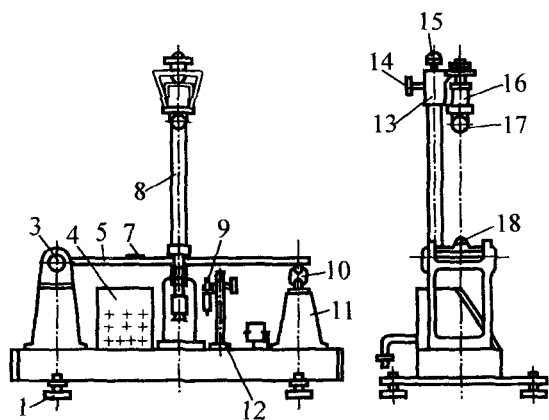


Рис. 20.2. Схема установки СМ-21М

Исследуемый образец — балка 5 (рис. 20.2) прямоугольного сечения  $3 \times 40$  мм из пружинной стали 65Г является составной частью установки СМ-21М для исследования действия ударной нагрузки. Балка шарнирно опирается на две опоры 3 и 11, которые крепятся к основанию с регулирующими винтами-ножками 1. Статическая определенность балки реализуется за счет шарнирно-подвижной опоры в виде серьги 10.

Чтобы иметь возможность определить статический прогиб, необходимый для установки масштаба осциллограмм (для градуировки), на стойке 12 установлен индикатор часового типа 9 с ценой деления 0,01 мм. Перед ударом индикатор отводят в сторону. Для удержания падающего на балку груза-шарика 17 в исходном положении служит электромагнит 16, установленный на кронштейне 13, перемещением которого по штанге 8 можно устанавливать заданную высоту падающего груза. Стопорный винт 14 надежно фиксирует кронштейн на штанге. Ограничителем высоты установки кронштейна является стопор 15. Для предупреждения возможного отскока шарика балка снабжена специальным ловителем 18, внутренняя поверхность которого выполнена конусной, чем обеспечивается заклинивание упавшего шарика. Гармонические затухающие колебания балки записываются шлейфовым осциллографом от двух тензорезисторов сопротивления типа 2ПКБ-20-200, наклеенных на балку. Динамический прогиб определяют при помощи микрометри-

ческого винта с ценой деления 0,01 мм по моменту контакта торца винта с колеблющейся балкой.

Пульт управления выполнен в виде отдельного блока 4 и смонтирован на основании установки. На лицевую панель пульта выведены следующие органы управления и сигнализации:

- 1) тумблер “220 В” — для включения электропитания пульта;
- 2) лампа “сеть” — для сигнализации включения установки;
- 3) предохранитель “1” — для защиты цепей питания от перегрузок;
- 4) лампа “контакт” — для сигнализации момента контакта колеблющейся балки с микрометрическим винтом;
- 5) тумблер “электромагнит — запись” — для подачи питания на обмотку электромагнита (положение “электромагнит”), а также для обесточивания электромагнита и подключения цепи питания осциллографа (положение “запись”);
- 6) кнопка “сброс” — для возврата схемы в исходное положение перед повторением опыта;
- 7) выводы “датчики” — для подключения тензорезисторов сопротивления на вход тензоусилителя;
- 8) выводы “осциллограф” — для подключения питания двигателя кассеты осциллографа;
- 9) тумблер “0,25 ... 0,5 с” — для задержки обесточивания электромагнита на 0,25 или 0,5 с, чтобы обеспечить разгон кассеты осциллографа от нуля до нормальной скорости вращения.

Установка СМ-21М позволяет выполнять лабораторную работу по упрощенной методике (без применения осциллографа). В этом случае определяют только динамический коэффициент при ударе.

### ***Порядок проведения испытаний***

Перед началом испытаний тщательно проверить разъемные соединения всех электрических приборов. Включить тензоусилитель АНЧ-8М и дать ему возможность прогреться в течение 30 мин. Ознакомиться с органами управления светолучевого осциллографа Н-700.

Испытания делят на два этапа:

- 1) определение масштаба статического прогиба (статическое градуирование);

- 2) приложение ударной нагрузки с последующей обработкой проявленной осциллограммы (определение динамических параметров колебательного процесса).

Статическое градуирование проводят в следующем порядке. После включения тензоусилителя и блока питания на экране осциллографа должен появиться световой зайчик, который специальным ключом (поворотом соответствующего гальванометра) необходимо сместить на середину экрана для визуального наблюдения. При включении развертки на экране появится прямая линия, которую кратковременным включением кассеты со светочувствительной бумагой фотографируют. Полученная прямая будет началом градуировочного графика (нулевая линия). Установить индикатор 9 (рис. 20.2) так, чтобы его шток касался балки посередине пролета, стрелку индикатора поставить на ноль. Затем посередине пролета статически нагрузить балку силой 1 кгс и отсчитать прогиб по шкале индикатора. Соответственно этому единичному прогибу  $\bar{\Delta}$  деформируются тензорезисторы (изменяется их сопротивление), что в конечном счете вызывает перемещение светового зайчика на  $a$  мм пропорционально статическому прогибу (рис. 20.3).

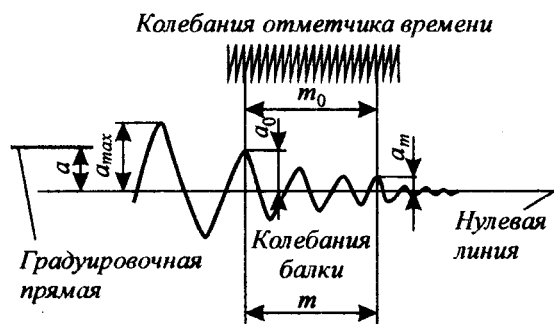


Рис. 20.3.

Записать новое положение “зайчика”. Тогда масштаб осциллограммы

$$\mu = \frac{\bar{\Delta}}{a}. \quad (20.18)$$

Балку разгрузить. При этом световой “зайчик” должен возвратиться в первоначальную сторону.

Установив требуемое время задержки при помо-

щи соответствующего тумблера, расположить падающий груз (шарик массой 0,067 кг) на заданной высоте  $h$  и, поставив тумблер “электромагнит-запись” в положение “запись”, сфотографировать коле-



бательный процесс. Нажав на кнопку “сброс”, вернуть схему в исходное положение.

Проявленную осциллограмму обработать в следующем порядке. Измерить расстояние между градуировочными прямыми и определить масштаб осциллограммы. Затем определить максимальную амплитуду  $a_{\max}$  колебательного процесса и две произвольные амплитуды  $a_0$  и  $a_m$  через  $m$  периодов колебаний. При этом возможно совпадение амплитуд  $a_{\max}$  и  $a_0$ . Частоту колебаний балки определить сравнением с эталоном — колебаниями отметчика времени, который световым лучом воспроизводит колебания тока промышленной частоты  $f_0 = 50$  Гц, т.е. на участке  $m_0$  отметчик времени за 1 с выполнит 50 колебаний. Начало отсчета рекомендуется помещать на вертикали, где совпадают вершины амплитуд колебаний балки и отметчика времени. Если в пределах записи имеется совпадение двух амплитуд, как показано на рис. 20.3, то, подсчитав количество колебаний  $m_0$  и  $m$  между этими точками, частоту колебаний балки  $f$  можно определить из соотношения

$$\frac{f}{f_0} = \frac{m}{m_0}. \quad (20.19)$$

Имея полученный по индикатору прогиб  $\bar{\Delta}$ , а следовательно, и статический прогиб  $\Delta' = P\bar{\Delta}$  груза (веса шарика) и зная величины  $a$ ,  $a_{\max}$ ,  $a_0$ ,  $a_m$  и  $f$ , находим динамический прогиб балки

$$\Delta_d = \mu a_{\max} \quad (20.20)$$

и динамический коэффициент  $K_d$ . Определяем также значения логарифмического декремента затухания

$$d = \frac{2,3}{m} \lg \frac{a_m}{a_0}, \quad (20.21)$$

периода колебаний  $T = \frac{1}{f}$  и коэффициента затухания  $\alpha = \frac{d}{T}$ .

Величины  $K_d$  и  $f$ , определенные опытным путем, сравнить с их теоретическими значениями, вычисленными по формулам (20.12) и (20.17) с учетом веса балки. При этом для вычисления  $f$  можно использовать ве-

личину  $\alpha$ , найденную экспериментально. Для нахождения прогиба  $\Delta$  можно воспользоваться  $\bar{\Delta}$ , измеренным по индикатору.

Если нет осциллографа, лабораторную работу можно выполнить по упрощенной методике. В этом случае определяют только динамический коэффициент при ударе:

$$K_{\partial} = \frac{\Delta_{\partial}}{\Delta}.$$

Статический прогиб  $\Delta$  находят при помощи индикатора. Динамический прогиб  $\Delta_{\partial}$  определяют при помощи микрометрического винта с ценой деления 0,01 мм как разность отсчетов по лимбу в начальном (до удара) и конечном (при ударе) положениях винта в момент касания его с балкой. Этот момент определяют по лампе “контакт” на пульте управления установкой. После проведения эксперимента лампу “контакт” выключить, нажав на кнопку “сброс”.

## 21. ИСПЫТАНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЯХ

**Цель работы:** ознакомиться с методом определения предела выносливости для металлических материалов и определить экспериментально циклическую долговечность гладких образцов стали при заданных напряжениях, с построением наклонного участка кривой усталости.

### **Общие сведения**

Многие детали машин в процессе работы подвергаются воздействию напряжений, циклически меняющихся во времени. Многократное возникновение таких быстроменяющихся напряжений приводит к внезапному излому детали при напряжениях, меньших предела упругости.

Эти изломы называют изломами усталости, а явление потери прочности, связанное с действием переменных нагрузок, — усталостью материала.

Усталостью называют процесс постепенного накопления повреждений материала под воздействием переменных напряжений, приводящий к изменению его свойств, образованию и развитию трещин и к разрушению.

Способность материалов сопротивляться разрушению под действием циклически изменяющихся напряжений называют выносливостью.

Усталостное разрушение происходит обычно внезапно, после большого числа повторных нагружений и при напряжениях, значительно

меньших предела прочности материала, соответствующего однократному статическому нагружению.

Усталостному разрушению подвергаются такие важные детали, как коленчатые валы, поршневые пальцы и клапанные пружины двигателей, оси железнодорожных вагонов, лопатки турбин, судовые гребные винты.

В настоящее время принято считать, что усталостные повреждения на начальной стадии их развития связаны с пластическими деформациями в отдельных зернах поликристаллического агрегата металла или сплава. Эти зерна ориентированы таким образом, что их плоскости наименьшего сопротивления деформациям скольжения совпадают с плоскостями действия максимальных касательных напряжений. Эти, неблагоприятно ориентированные зерна, пластически деформируются еще на ранней стадии нагружения, на которой весь массив кристаллов в целом ведет себя как упругое тело. Полагают, что соответствующий уровень напряжений составляет примерно 0,6...0,7 от условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ . Пластическое деформирование сначала в прямом, а затем в обратном направлении сопровождается некоторыми разрушениями в микроскопических объемах материала. Возникающие при этом микротрещины постепенно растут и частично сливаются от цикла к циклу. Более длинные трещины растут быстрее, а значительная часть наиболее мелких микротрещин прекращает свой рост вскоре после своего зарождения.

В итоге слияния нескольких микротрещин раньше или позже возникает магистральная трещина, которая вначале видна под оптическим микроскопом, а затем по мере развития — и невооруженным глазом.

Иногда при высоких уровнях напряжений образуется сразу несколько магистральных трещин.

Относительная длительность стадии развития магистральной трещины зависит от ряда обстоятельств — характера нагружения, вида напряженного состояния и некоторых других.

На рис. 21.1 представлен усталостный излом цилиндрического образца, на котором можно указать три основные зоны: фокус излома и очаг разрушения 1; зону развития трещины усталости 2; зону долома 3.

Подчеркнем, что фронт развивающейся усталостной магистральной трещины с течением времени последовательно и необратимо перемещается из очага разрушения в сторону будущей зоны долома.

Фокусом излома называют малую зону вокруг места возникновения начальной микроскопической трещины усталости. Чаще всего фокус излома располагается на поверхности изделия в местах концентрации напряжений. Концентраторы напряжений могут быть как конструктивные, так и в виде поверхностных дефектов (царапины, трещины, неметаллические включения и т.п.). При наличии сквозных внутренних дефектов или при поверхностном упрочнении (цементация, азотирование, наклеп и т.д.) фокус излома может располагаться и под поверхностью детали.

Очаг разрушения — малая зона, прилегающая к фокусу излома и соответствующая начальной магистральной трещине усталости. Здесь в очаге разрушения поверхность усталостной трещины имеет наименьшую шероховатость.

В зоне развития трещины усталости поверхность последней является относительно гладкой. Области, образовавшиеся позднее, имеют увеличивающуюся шероховатость. В этом проявляется следующая закономерность: чем меньше уровень нагрузки и чем медленнее распространяется трещина, тем более гладкой получается поверхность трещины. Овальная форма трещины в плане и ее расположение приблизительно в одной плоскости определяется условием равного сопротивления движению в различных точках контура. Гладкость поверхности трещины связана с тем, что разрушение носит в основном внутрикристаллический характер и никак не связано с силами трения.

В зоне развития трещины усталости обычно видны характерные усталостные линии 4 (рис. 21.1). Картина расположения этих линий отчасти напоминает мгновенную фотографию волн, распространяющихся на поверхности водоема из точки, аналогичной очагу разрушения. Усталостные линии — это следы продвижения фронта трещины. Появление

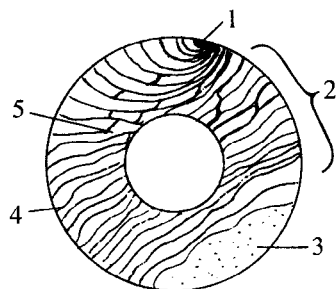


Рис. 21.1.

этих линий связано с переменной скоростью движения трещины. Это движение периодически замедляется, а затем снова ускоряется. Замедлению или ускорению движения трещины способствуют изменения нагрузки в процессе эксплуатации.

В случае зарождения в изделии нескольких трещин все первоначальные трещины располагаются примерно параллельно. В результате их последующего слияния образуются ступеньки и рубцы 5 (рис. 21.1), заметные на поверхности излома. Ступеньки и рубцы образуются также еще и от слияния так называемых пасынковых трещин, которые появляются иногда из зародышей, лежащих на основной магистральной трещине, и развиваются в другом направлении. Чем выше уровень действующих напряжений, тем больше вероятность возникновения очагов разрушения, тем больше на поверхности излома заметно ступенек и рубцов.

Зона долома образуется, как правило, внезапно на некотором цикле, на последней стадии усталостного разрушения, когда длина трещины достигает критической величины при действующей нагрузке.

Поверхность разрушения в зоне долома является весьма шероховатой, что характерно для вязкого разрушения, протекающего при развитии значительных остаточных деформаций.

Анализ усталостных изломов дает ценную информацию о работе металла в эксплуатационных условиях. По виду определенных областей и характеру излома, видимых невооруженным глазом или под микроскопом при небольшом увеличении, можно приблизительно оценить вид и распределение напряжений, которые действовали в эксплуатируемой детали. Путем анализа изломов можно сделать вывод о причинах усталостного разрушения: эксплуатационных (условия работы, влияние окружающей среды, воздействие активных сред), конструктивных (форма и размеры), технологических (материал, вид обработки и др.) [10].

Во времени напряжения могут изменяться периодически и непериодически.

Изменение напряжений во времени изображают графиком, по оси абсцисс которого откладывают время ( $t$ ), а по оси ординат — значения переменных нормальных ( $\sigma$ ) или касательных ( $\tau$ ) напряжений.

Рассмотрим наиболее простой закон периодического изменения напряжений (рис. 21.2).

Совокупность всех последовательных значений переменных напряжений за один период изменения называют циклом напряжений;

время  $T$ , в течение которого протекает один цикл, — периодом, а число циклов в одну секунду  $n = \frac{1}{T}$  — частотой цикла.

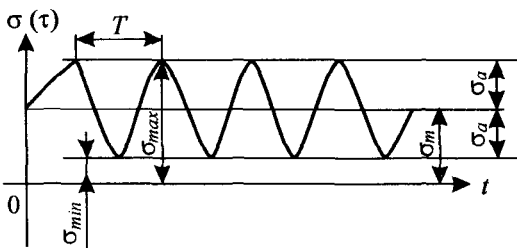


Рис. 21.2.

Цикл нормальных напряжений характеризуют следующие параметры: наибольшее  $\sigma_{\max}$  и наименьшее  $\sigma_{\min}$  напряжения цикла; среднее напряжение цикла (статическая составляющая цикла)

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad (21.1)$$

амплитуда (переменное напряжение) цикла

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \quad (21.2)$$

коэффициент асимметрии цикла

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}. \quad (21.3)$$

Среднее напряжение цикла может быть как положительным, так и отрицательным. Амплитуда цикла всегда положительна. Максимальное и минимальное напряжение можно выразить через среднее напряжение и амплитуду цикла:

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \quad \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a. \quad (21.4)$$

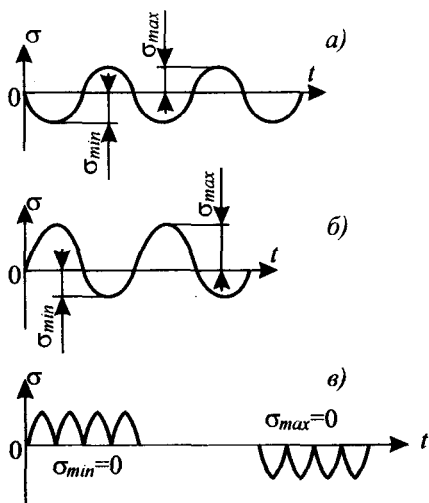


Рис. 21.3.

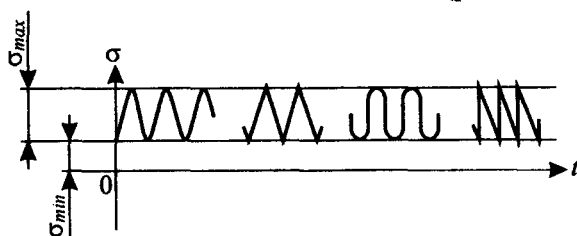


Рис. 21.4.

Циклы могут быть симметричными (наибольшее и наименьшее напряжения равны по значению и противоположны по знаку (рис. 21.3, а) и асимметричными (неодинаковые по значению наибольшее и наименьшее напряжение (рис. 21.3, б, в).

Циклы с одинаковыми коэффициентами асимметрии  $R_\sigma$  называются подобными, а циклы, у которых максимальное и минимальное напряжения равны нулю, называются отнулевыми или пульсационными (рис. 21.3, в).

Процесс образования трещины при переменных напряжениях связан с накоплением пластических деформаций. Поэтому усталостная прочность определяется только наибольшим

и наименьшим напряжениями цикла и не зависит от закона изменения напряжений внутри интервала  $\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ , следовательно, циклы, показанные на рис. 21.4, являются равноценными. Точно так же, несущественным является влияние частоты изменения напряжений.

В итоге для оценки усталостной прочности в условиях заданного цикла достаточно знать только величины  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  или  $\sigma_m$  и  $\sigma_a$ .

Для определения механических характеристик материалов, необходимых для расчетов на прочность в случае действия циклически действующих напряжений, выполняются специальные экспериментальные исследования на выносливость. Исследования проводят в соответствии с требованиями ГОСТа 25.502 — 79 [11].



Следует заметить, что пределы выносливости материалов при определенной характеристике циклов зависят от вида деформации, т.е. в каких условиях испытываются образцы при переменных напряжениях: растяжения — сжатия, переменном кручении, изгибе или в условиях сложного напряженного состояния. Исходя из этого и ставится задача выбора соответствующего типа испытательной машины и вычисления определенного предела выносливости.

В лабораторных условиях проще всего осуществить симметричный цикл.

Основные характеристики сопротивления усталости получают построением кривой усталости. Полная кривая усталости — это графическое изображение зависимости между уровнем действующих напряжений  $\sigma$  и числом циклов до разрушения  $N$  в предельных интервалах возможных изменений указанных величин.

В первом образце с помощью специальных машин создают симметричные циклы переменных напряжений с целью разрушения образца при сравнительно небольшом числе циклов. Для этого необходимо, чтобы максимальное и минимальное напряжения цикла были немного меньше предела прочности материала  $\sigma_s$  (обычно  $0,5+0,7\sigma_s$ ). При этом следует помнить, что  $\sigma_{\min}$  сравнивается с принятым напряжением по абсолютной величине. С помощью полученных экспериментальных исследований отмечается на графике первая точка. На горизонтальной оси откладывается число циклов, при котором произошло разрушение  $N_{(1)}$ , а на вертикальной — значение принятого напряжения  $\sigma_{(1)} = 0,7\sigma_s$  (рис. 21.5). Для построения следующей точки принимается напряжение  $\sigma_{(2)}$ , которое меньше ранее принятого, т.е.  $\sigma_{(2)} < \sigma_{(1)}$ , и снова такой же образец испытывается до разрушения. По результатам испытаний получают очередную точку и т.д.

Соединяя точки, получают диаграмму испытаний на выносливость (усталость), соответствующую симметричным циклам ( $R_\sigma = -1$ ), (кривая Веллера).

Анализ кривой усталости показывает, что с уменьшением максимального напряжения возрастает число циклов, при котором происхо-

дит разрушение материала. При этом кривая выносливости для сталей асимптотически стремится к какой-то горизонтальной прямой, которая и определяет предел выносливости заданного цикла напряжений (нагрузений).

Ордината точки кривой, которая практически совпадает с вышеуказанной асимптотой и будет определять величину предельного напряжения, при котором образец не разрушится при сколь угодно большом числе циклических напряжений. Предельное напряжение (предел выносливости) обозначается  $\sigma_{R\sigma}$ , в соответствии с циклом нагружения. Однако следует отметить, что при испытании образцов невозможно их нагрузить бесконечным числом циклов, а потому ограничиваются некоторым предельным числом — базой циклов.

Базой циклов ( $N_\sigma$ ) называется наибольшее число повторно-переменных нагрузок, при значительном превышении которого не происходит усталостного разрушения образца.

Для черных металлов и сплавов за базу циклов принимается  $N_\sigma = 10^7$  циклов, а для цветных металлов и сплавов —  $N_\sigma = 5 \cdot 10^7 + 10^8$  циклов. Это объясняется тем, что кривая усталости для цветных металлов на большом участке медленно стремится к асимптотической прямой. При испытании цветных металлов трудно установить конкретное увеличение значения предела выносливости, а поэтому такие материалы можно характеризовать некоторым условным пределом выносливости. В некоторых случаях по кривой выносливости (рис. 21.5) трудно определить

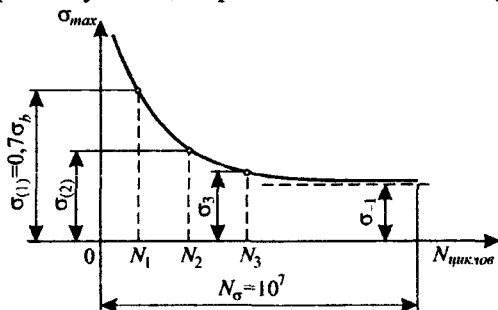


Рис. 21.5.

предел усталости материала, поэтому результаты испытаний представляют в виде кривых  $\sigma_{\max} = f(\lg N)$  (полулогарифмические координаты) и  $\lg \sigma_{\max} = f(\lg N)$  (двойные логарифмические координаты).

Предложен целый ряд эмпирических уравнений кривой выносливости (рис. 21.5). Наиболее популярная аппроксимация — степенная

$$\sigma_{\max} = A \cdot N^m. \quad (21.5)$$

В логарифмических координатах  $\lg \sigma_{\max} - \lg N$  кривая усталости, согласно этому уравнению, превращается в прямую

$$\lg \sigma_{\max} = \lg A - m \lg N, \quad (21.6)$$

где  $\lg A$  — отрезок, отсекающий продолжение этой прямой на оси ординат (рис. 21.6). Число  $m$  — тангенс угла наклона указанной прямой к оси абсцисс.

Выбор аппроксимирующей зависимости типа (21.6) обусловлен во многом тем, что в указанных логарифмических координатах коэффициенты  $A$  и  $m$  легко подбираются экспериментальным путем с использованием способа наименьших квадратов [12].

Кривую усталости можно аппроксимировать в полулогарифмических координатах  $\sigma_{\max} - \lg N$  отрезком прямой (рис. 21.7). Уравнение кривой усталости приобретает при этом вид:

$$\lg N = a + b \sigma_{\max}, \quad (21.7)$$

где коэффициенты  $a$  и  $b$  подбираются аналогично предыдущему по экспериментальным данным с использованием способа наименьших квадратов.

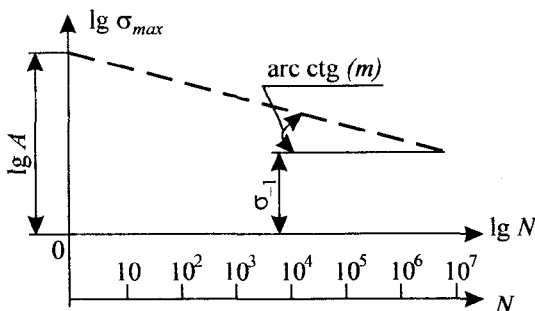


Рис. 21.6.

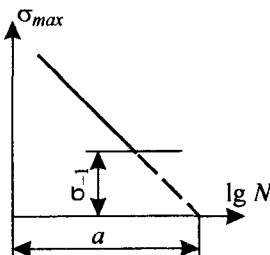


Рис. 21.7.

### Испытательная машина, образцы, приборы

Для определения предела выносливости материалов в настоящее время наиболее часто применяют испытательные машины МУИ-6000 и УКИ-10М. В них вращающиеся образцы испытывают на изгиб при сим-

метричном цикле изменения напряжений. На машине МУИ-6000 проводят испытания при двухопорном симметричном изгибе (чистый изгиб), а на машине УКИ -ЮМ — при консольном изгибе.

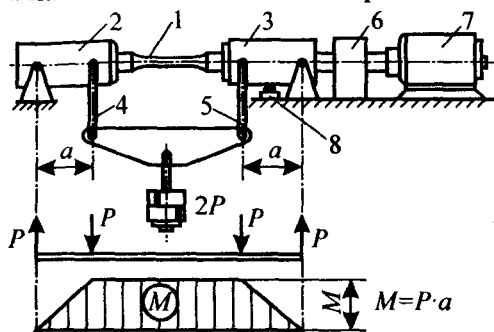


Рис. 21.8.

На рис. 21.8 показана схема машины для испытания образцов при чистом изгибе.

Образец 1 зажат во вращающихся цапгах 2 и 3. Усилие передается от груза, подвешенного на серьгах 4 и 5. Счетчик 6 фиксирует число оборотов образца. Когда образец ломается, происходит автоматическое отключение двигателя 7 выключателем 8.

В данной работе используется испытательная машина УКИ-10М, которая предназначена для стандартных испытаний на усталость в соответствии с требованиями ГОСТа 25.502-79.

Техническая характеристика машины УКИ-10М приведена в таблице 21.1.

Таблица 21.1

**Техническая характеристика машины УКИ-10М**

Диаметр рабочего участка образца, мм	10
Расчетная длина образца, мм	100
Предельные значения нагрузки, прикладываемой к образцу, Н	10-600
Погрешность грузов и подвески (от номинального значения каждого груза), %	не более 0,1
Количество ступеней изменения частоты испытательной нагрузки	2
Частота изменения цикла испытательной нагрузки по ступеням, об/мин	3000 и 6000
Количество одновременно испытываемых образцов	2
Отключение соответствующего электропривода в случае разрушения одного образца	автоматическое
Счетчик числа циклов электроимпульсный, редуктором датчика	1:100
Питание от сети переменного тока, В	220/380

Общая мощность электродвигателей, кВт	1,2
Габаритные размеры машины, мм:	
длина	745
ширина	780
высота	1230
Масса машины, кг	490

Режим испытания — мягкий. Схема испытаний — консольный изгиб вращающегося образца по симметричному циклу напряжений (рис. 21.9). Машина представляет собой двухсекционную установку с отдельным управлением каждой секции, что позволяет одновременно проводить испытание двух образцов в независимых условиях нагружения.

Машина состоит из следующих основных узлов (рис. 21.10 и 21.11):

- а) устройство для закрепления образца;
- б) устройство для приведения образца во вращательное движение;
- в) счетчик регистрации числа циклов нагружения;
- г) механизм нагружения с грузовой подвеской;
- д) панель управления электроприводами;
- е) устройство для автоматического отключения привода в случае разрушения образца;
- ж) электрооборудование.

На плоскости стола станины 1, представляющей собой жесткую пустотелую чугунную отливку, установлены шпиндельные бабки для приведения образцов во вращательное движение.

В корпусе шпиндельной бабки 6 на подшипниках качения покоится пустотелый шпиндель 32, свободный конец которого является захватом 8. На другом конце шпинделя закреплен шкив 4. Внутри шпинделя помещена тяга 2, служащая винтом, закрепляющим испытуемый образец в

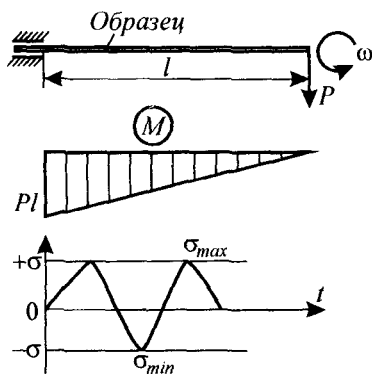
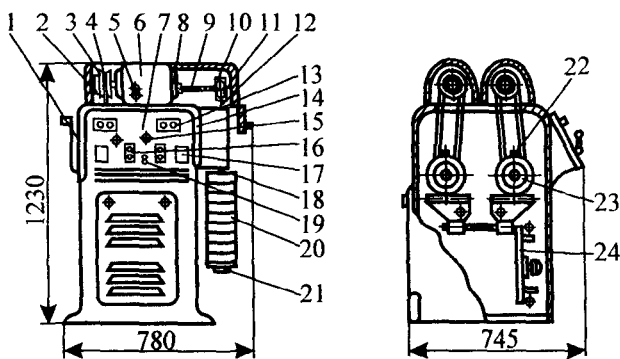
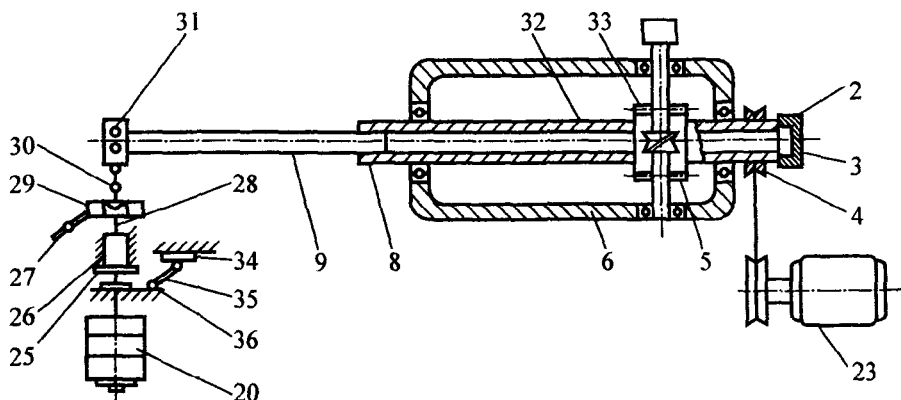


Рис. 21.9.

Схема испытаний на усталость на машине УКИ-10М



**Рис. 21.10. Общий вид машины УКИ-10М**



**Рис. 21.11. Кинетическая схема машины УКИ-10М**

захвате шпинделя. Шпиндель приводится во вращательное движение двухскоростным электродвигателем 23 через клиноременную передачу 22. Управление электродвигателем привода соответствующей секции машины осуществляется с панели управления переключателем скоростей 17 и кнопочной станцией 16. Положение "1" рукоятки переключателя соответствует 3000, а положение "11" — 6000 об/мин. При положении "0" двигатель отключен. Применение двухскоростного электродвигателя позволяет настраивать машину на два различных режима частоты изменения испытательной нагрузки, воздействующей на образец.

Червячная пара 33 и ротор датчика импульсов 5 механически связаны между собой. Передаточное отношение “Шпиндель 32 — датчик импульсов” — 1:100. Число циклов фиксируется счетчиком 13, на который ротор датчика импульсов подает электрический сигнал. Таким образом, каждому делению счетчика соответствует 100 оборотов шпинделя или 100 циклов изменения испытательной нагрузки.

Испытательную нагрузку прикладывают к свободному концу образца 9, используя специальную грузовую подвеску с набором сменных грузов 20. Грузовая подвеска состоит из двух частей. Верхняя представляет собой корпус 10 с подшипником 31, шарнирно соединенный с серьгой 11, на которой укреплена тяга 12. Нижняя часть подвески состоит из штанги 18 с поддоном 21.

Для соединения штанги с верхней частью подвески, а также для создания плавного приложения к образцу испытательной нагрузки служит механизм нагружения 24, отдельный для каждой секции. Он состоит из червячной пары 29 и ходового винта 28, который перемещается прямолинейно. При вращении маховика 27 против часовой стрелки (для первой секции; для второй секции направление вращения — по часовой стрелке) ходовой винт поднимает штангу с установленными на поддоне грузами до такого положения, когда в захват 30 можно свободно вводить тягу верхней части подвески. При обратном движении ходового винта штанга заплечиками захвата садится на головку тяги 12, а винт отводится до упора.

В комплект машины входит набор сменных грузов, дающих возможность осуществлять нагрузки на образец от 10 до 600 Н. Нагружать образец можно ступенями, промежуточные нагрузки получают наложением грузов.

В момент разрушения испытуемого образца грузовая подвеска падает, упором 25 нажимает на малое плечо рычага 35, заставляя его повернуться на некоторый угол, и садится на амортизатор 36. При повороте рычаг 35 воздействует на конечный выключатель 34, который выключает электродвигатель привода и включает сигнальную лампу 15 на панели управления.

Вся электроаппаратура, обслуживающая машину (предохранители промежуточных цепей, магнитные пускатели и др.), смонтирована на специальной панели 24, помещенной внутри станины.

Чертеж образца для испытания на усталость приведен на рис. 21.12.

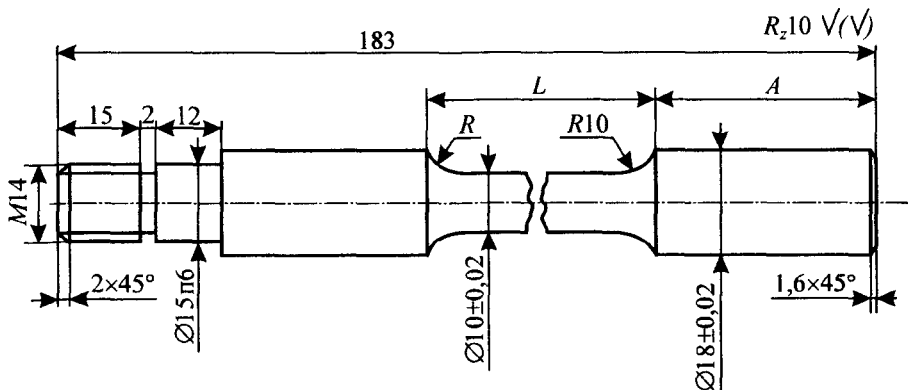


Рис. 21.12. Образец для испытаний на усталость

R, мм	A, мм	L, мм
10	50	66
2	57	58,8
1,25	58,75	57,25
0,9	59,1	56,9
0,5	59,5	56,5

При выборе материала для испытания следят за тем, чтобы образец для испытаний по химическому составу и твердости соответствовал исследуемой марке стали. Для лабораторной работы образцы изготавливают из прутка диаметром 20—26 мм; обычно выбирают углеродистую сталь марки 45; могут быть приняты для исследования и другие марки сталей или другие материалы. Образцы могут быть подвергнуты термической обработке (в заготовках). Сведения о материале образцов и его состоянии дает преподаватель.

Эксцентрисность оси головки ( $\varnothing 18$ ) и проточки ( $\varnothing 15$ пб) по отношению к оси рабочей части ( $\varnothing 10$ ) не более 0,01 мм



После окончательной отделки образцов визуально контролируют их рабочие поверхности, не допуская к испытанию образцы с царапинами, прижогами после шлифования и другими дефектами.

### Порядок проведения испытаний

1. Образец вставляют в цангу захвата и вращением тяги 2 предварительно затягивают его. Индикатором часового типа проверяют его биение, выверяют его положение в захвате и закрепляют окончательно.
2. Преподаватель задает уровень напряжений, при которых должны быть испытаны образцы. Напряжение  $\sigma$  и вес груза  $P$ , устанавливаемого на поддон штанги 18, связаны зависимостью

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{32Pl}{\pi d^3}, \quad (21.8)$$

где  $W = \frac{\pi d^3}{32}$  — момент сопротивления,  $\text{мм}^3$ ;  $M$  — изгибающий момент в опасном сечении, Н.м;  $P$  — вес гирь, установленных на поддон, Н;  $l$  — расстояние точки приложения силы  $P$  до опасного сечения образца, м;  $d$  — диаметр рабочей части образца, м.

При  $d = 10$  мм и  $l = 100$  мм (гладкие образцы с радиусом галтели  $R = 10$  мм) имеем

$$\sigma = 1,02P. \quad (21.9)$$

Последняя зависимость приведена на рис. 21.13 в виде тарировочного графика, из которого находят вес необходимого груза  $P$  (Н) по заданному напряжению  $\sigma$  (МПа).

3. На свободный конец образца устанавливают подшипник верхней части

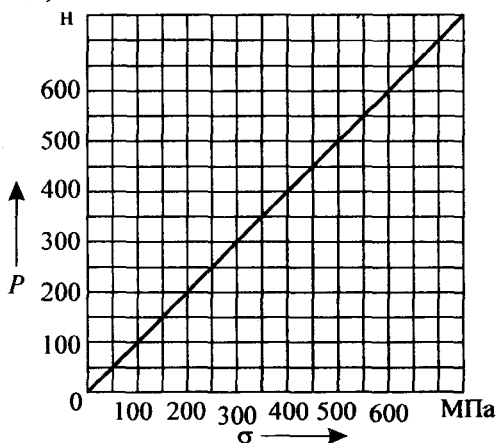


Рис. 21.13. Тарировочный график

грузовой подвески и закрепляют внутреннее кольцо подшипника гайкой.

4. Вращением маховика 27 поднимают грузовую штангу и подсоединяют к ней тягу верхней части подвески.
5. Поворотом переключателя скорости устанавливают выбранное число оборотов шпинделя (образца). Показания со счетчика импульсов сбрасываются.
6. Нажимая на кнопку “Пуск”, включают электропривод соответствующей шпиндельной бабки. Необходимо убедиться, что счетчик импульсов работает.
7. Вращением маховичка 27 опускают грузовую штангу до упора и прикладывают тем самым заданную испытательную нагрузку.
8. Испытания ведут до окончательного разрушения (излома) образца. В момент разрушения образца привод автоматически отключается, а на пульте управления машины загорается сигнальная лампа.
9. По окончании испытаний рукоятку переключателя следует поставить в положение “0”, а затем кнопкой “Стоп” отключить электропривод.
10. Если необходимо прекратить испытания, не доводя образец до разрушения, то вращением маховика 27 снимают испытательную нагрузку при вращающемся образце, затем нажатием кнопки “Стоп” отключают электродвигатель привода.

Величина приложенной к образцу нагрузки  $P$  и число циклов нагружения  $N$  за период от начала испытаний до разрушения испытуемого образца служат исходными данными для обработки результатов испытаний.

Необходимо помнить, что показания счетчика импульсов следует умножить на 100, чтобы получить число циклов  $N$  до разрушения.

Исходные данные и результаты испытания каждого образца записывают в протоколе испытания (табл.21.2), а результаты испытаний серии одинаковых образцов — в сводном протоколе (табл.21.3) согласно ГОСТу 25.502-79 [11].

Число испытываемых образцов, так же, как и уровень действующих циклических напряжений, указывает преподаватель. Обычно испытыва-

ют 6—8 образцов, чтобы получить кривую усталости как в малоцикло-  
вой, так и многоцикловой области.

### ПРОТОКОЛ

#### испытания образца (приложение к сводному протоколу № \_\_\_\_\_)

Назначение испытания \_\_\_\_\_  
 Образец: шифр \_\_\_\_\_, поперечные размеры \_\_\_\_\_  
 Машина: тип \_\_\_\_\_, № \_\_\_\_\_  
 Напряжение цикла:  
 максимальное \_\_\_\_\_, среднее \_\_\_\_\_, амплитудное \_\_\_\_\_  
 Нагрузки (число делений по шкале нагрузок):  
 максимальная \_\_\_\_\_, средняя \_\_\_\_\_, амплитудная \_\_\_\_\_  
 Показания приборов, регистрирующих аксиальность нагрузки или биение образца:  
 прибор № 1 \_\_\_\_\_, прибор № 2 \_\_\_\_\_, прибор № 3 \_\_\_\_\_  
 Показания счетчика (дата и время):  
 в начале испытания \_\_\_\_\_  
 в конце испытания \_\_\_\_\_  
 Число пройденных циклов \_\_\_\_\_  
 Частота нагружения \_\_\_\_\_  
 Критерий разрушения \_\_\_\_\_

Таблица 21.2

Показания счетчика (время)		Число циклов (время) нагружения образца за смену	Подпись и дата		Примечание
в начале смены	в конце смены		сдавшего смену	принявшего смену	

СВОДНЫЙ ПРОТОКОЛ № \_\_\_\_\_

Цель испытаний \_\_\_\_\_

Материал: \_\_\_\_\_

Марка и состояние \_\_\_\_\_

Тип заготовки (при сложной форме прилагается план вырезки образца) \_\_\_\_\_

Условия испытаний: \_\_\_\_\_

вид деформации \_\_\_\_\_

частота циклов нагружений \_\_\_\_\_

база испытаний \_\_\_\_\_

частота нагружения \_\_\_\_\_

Критерий разрушения \_\_\_\_\_

Образцы: \_\_\_\_\_

тип образцов и номинальные размеры их поперечного сечения \_\_\_\_\_  
 Состояние поверхности \_\_\_\_\_  
 Испытательная машина : тип \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_  
 Дата испытаний:  
 начало испытаний первого образца \_\_\_\_\_  
 конец испытаний последнего образца \_\_\_\_\_

Таблица 21.3

Шифр образца	Поперечные размеры образца	Напряжения цикла			Пройденное число циклов	Отметка о разрушении образца (да, нет)	Примечание
		средние	амплитудные	максимальные			

### Обработка и анализ экспериментальных данных

Методика обработки и анализа экспериментальных данных иллюстрируется конкретным примером.

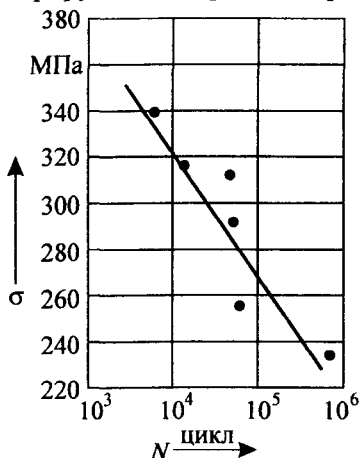


Рис. 21.14. Экспериментальная кривая усталости гладких образцов

Серия из шести гладких образцов малоуглеродистой стали Ст3, изготовленных согласно чертежу (рис. 21.12), подвергнута испытаниям на усталость на испытательной машине УКИ-10М с частотой 3000 об/мин. Результаты испытаний в виде точек представлены в двойных логарифмических координатах на рис. 21.14. Экспериментальные точки аппроксимированы сплошной линией методом графической интерполяции.

Выполним анализ экспериментальных данных по методу наименьших квадратов. Будем описывать опытные данные линейной зависимостью вида

$$y = ax + b, \quad (21.10)$$

где  $x = \lg N$  и  $y = \lg b$ .

Коэффициенты  $a$  и  $b$  находят из системы

$$\begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}, \quad (21.11)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  — порядковый номер результатов испытаний.

Решение этой системы имеет вид

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (21.12)$$

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (21.13)$$

В таблице 21.4 по экспериментальным данным вычислены коэффициенты  $a$  и  $b$  и записано уравнение (21.10). Следует отметить, что коэффициент  $a$  обратно пропорционален показателю наклона кривой усталости  $m_N$ . Коэффициент  $a$  представляет собой тангенс угла наклона кривой усталости к оси абсцисс, а показатель  $m_N$  — котангенс того же угла.

**Таблица 21.4**  
**Результаты эксперимента и порядок их обработки**  
**методом наименьших квадратов**

Номер образца	$\sigma$ , МПа	$N$ , циклов	$y_i = \lg \sigma$	$x_i = \lg N$	$x_i^2$	$x_i y_i$	$y_i^2$
1	342	900	2,5340	3,8389	14,7372	9,7278	6,4212
2	321	11300	2,5065	4,0531	16,4276	10,1591	6,2825
3	310	41500	2,4914	4,6181	21,3268	11,5065	6,2071
4	289	45200	2,4609	4,6551	21,6700	11,4557	6,0560
5	257	75100	2,4099	4,8756	23,7715	11,7497	5,8076
6	235	525300	2,3714	5,7204	32,7230	13,8654	5,6235
		$\Sigma$	14,7741	27,7612	130,6561	68,1632	36,3979

$$b = \frac{14,7741 \cdot 130,6561 - 68,1632 \cdot 27,7612}{6 \cdot 130,6461 - (27,7612)^2} = 2,8700;$$

$$a = \frac{6 \cdot 68,1632 - 27,7612 \cdot 14,7741}{6 \cdot 130,6561 - (27,7612)^2} = -0,0881.$$

Уравнение кривой усталости

$$\lg \sigma = 2,87 - 0,0881 \lg N; \quad m_N = \frac{1}{0,0881} \approx 11,4. \quad (21.14)$$

Определим погрешность расчетной оценки усталостной долговечности по уравнению

$$\Delta N = \frac{N_{\text{экс}} - N_{\text{рас}}}{N_{\text{экс}}} 100\%. \quad (21.15)$$

Например, для образца № 2 ( $\sigma = 321$  МПа) будем иметь с учетом табл. 21.4:

$$\lg N_{\text{рас}} = \frac{2,87 - \lg 321}{0,0881} = 4,1260.$$

Отсюда  $N_{\text{рас}} = 13366$  циклов.

Тогда получим  $\Delta N = \frac{11300 - 13366}{11300} 100\% = -18,3\%$ .

В таблице 21.5 приведены результаты аналогичных расчетов для всех образцов, из которых видно, что разброс значений усталостной долговечности может быть весьма значительным.

**Таблица 21.5**  
**Погрешность расчетной оценки усталостной долговечности**

Номер образца	$\sigma$ , МПа	$N_{\text{экс}}$ , циклов	$N_{\text{рас}}$ , циклов	$\Delta N = \frac{N_{\text{экс}} - N_{\text{рас}}}{N_{\text{экс}}} 100\%$
1	342	6900	7754	-12,4
2	321	11300	13366	-18,3
3	310	41500	21292	48,7
4	289	45200	43886	2,9
5	257	75100	147080	-95,8
6	235	525300	369090	29,7

## **Содержание отчета**

В отчете о выполнении лабораторной работы № 21 должны быть представлены:

1. Результаты испытаний в виде протоколов в соответствии с требованиями ГОСТа 25.502-79.
2. Результаты испытаний в виде графиков.
3. Определение погрешности расчетной оценки усталостной долговечности образцов.
4. Результаты отчета представляются в форме “Журнала лабораторной работы”.

## **Техника безопасности при выполнении лабораторных работ на испытательной машине УКИ-10М**

При эксплуатации машины соблюдают следующие правила техники безопасности.

1. Машину надежно заземляют.
2. Следят, чтобы направление вращения электродвигателя совпадало со стрелкой, нанесенной на шкале.
3. Образцы испытывают только при закрытых кожухах.
4. Не запускают машину в работу при погнутых образцах или контрольных валиках.
5. Не определяют направление вращения шпинделя рукой.
6. Не испытывают образцы, требующие большей нагрузки, чем указано в технической характеристике машины.
7. При осмотре и ремонте машины ее отключают от питающей электросети.
8. Категорически запрещается работа на машине с неисправными механизмами и электрооборудованием.

## 22. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИИ

**Цель работы:** проверить экспериментально зависимости между напряжениями и деформациями при чистом сдвиге и изгибе с кручением.

### **Краткие теоретические сведения**

Экспериментальное изучение деформаций и напряжений в деталях машин или элементах сооружений сложно и требует иногда больших временных затрат и материальных средств (измерительная аппаратура, установки, модели и т.п.). Потребность в исследованиях вызывается различными причинами. Одна из них — необходимость проверки расчетных формул, которые получены на основании различных гипотез и допущений. Иногда из-за сложности конфигурации детали теоретически решить задачу не представляется возможным. В этих случаях изготавливают модель или сам объект в натуральную величину и испытывают его в лаборатории или в эксплуатационных условиях с длительным наблюдением за его поведением. Чаще всего в этих случаях для определения напряжений применяют метод тензометрии — измеряют малые деформации в отдельных точках сооружения, а затем переходят от деформаций к напряжениям с использованием закона Гука.

Угловые деформации непосредственно определить затруднительно, поэтому находят только линейные деформации. Если же для какой-либо точки заранее известно положение главных площадок, то, определив главные деформации  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_3$ , легко найти главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , которые полностью характеризуют напряженное состояние в точке.



В большинстве случаев, когда положение главных площадок не известно, применяют специальные приемы, которые позволяют установить напряженное состояние на основании измерения одних только линейных деформаций.

В точках на поверхности тела, где нет нагрузки, всегда имеет место плоское напряженное состояние. Если на поверхности тела выделить элементарный кубик так, чтобы одна его грань совпала с поверхностью тела, то эта грань и ей параллельная будут свободны от напряжений. Следовательно, только два главных напряжения на гранях кубика, перпендикулярных к поверхности, будут отличны от нуля. Эти напряжения и можно определить, измеряя деформации.

Рассмотрим некоторые случаи исследования плоского напряженного состояния при чистом сдвиге и одновременном действии кручения и изгиба.

Математическое выражение обобщенного закона Гука имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \right\} \quad (22.1)$$

Предположим, что  $\sigma_2 = 0$  (случай плоского напряженного состояния). Тогда выражение (22.1) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} (\sigma_1 - \mu\sigma_3) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [-\mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} (\sigma_3 - \mu\sigma_1) \end{aligned} \right\} \quad (22.2)$$

Отсюда следует, что при известных напряжениях  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  можно определить деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_3$ . Нужно отметить, что равенство нулю напряжения  $\sigma_2$  не означает, что  $\varepsilon_2$  также равно нулю.

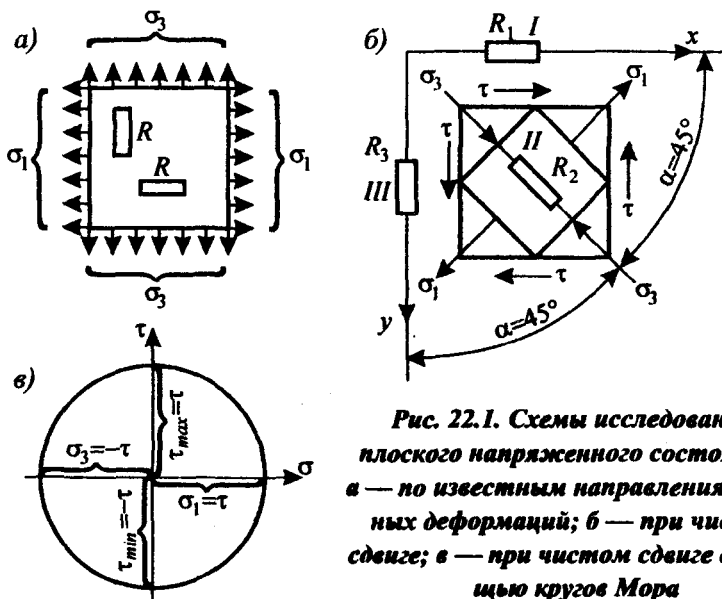
В некоторых случаях необходимо решать обратную задачу: по известным  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_3$  определять  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Умножая третью формулу системы (22.2) на  $\mu$  и складывая с первой, получим

$$\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_3 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu^2\sigma_1) = \frac{\sigma_1}{E}(1 - \mu^2).$$

Отсюда находим  $\sigma_1$  и аналогично определяем  $\sigma_3$ :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_3) \\ \sigma_3 &= \frac{E}{1 - \mu^2}(\varepsilon_3 + \mu\varepsilon_1) \end{aligned} \right\} \quad (22.3)$$

Определить  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  по формуле (22.3) можно только в том случае, если известны направления главных деформаций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_3$ . Тензорезисторы для измерения деформаций при этом наклеивают так, как показано на рис. 22.1, а.



**Рис. 22.1.** Схемы исследования плоского напряженного состояния: а — по известным направлениям главных деформаций; б — при чистом сдвиге; в — при чистом сдвиге с помощью кругов Мора

В частном случае плоского напряженного состояния, когда на главных площадках действуют одинаковые по значению и противоположные по знаку главные напряжения  $\sigma_1 = -\sigma_3 = \sigma$  (рис. 22.1, б), экстремальные касательные напряжения численно равны главным напряжениям:  $\tau_{\max} = \pm\sigma$ , а нормальные напряжения на площадках с экстремальными напряжениями равны нулю. Такой случай плоского напряженного состояния называют чистым сдвигом, а площадки, на которых действуют только касательные напряжения, — площадками чистого сдвига.

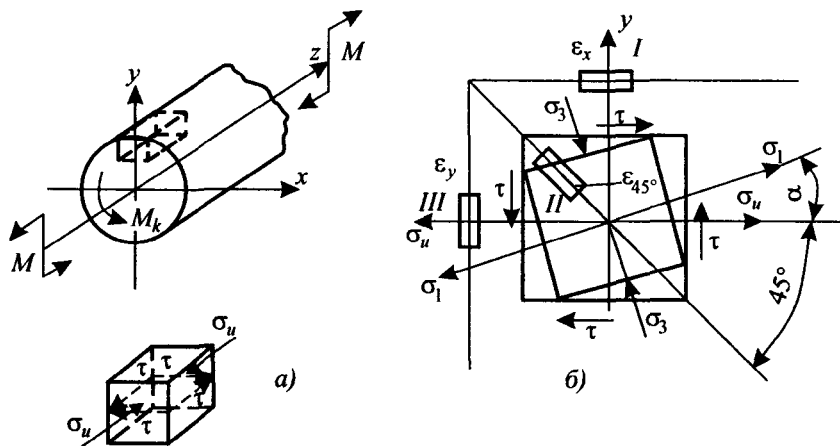
Главные напряжения при чистом сдвиге действуют по площадкам, наклоненным под углом  $45^\circ$  к площадкам сдвига. При этом  $\sigma_1 = \tau$ ,  $\sigma_3 = -\tau$  (рис. 22.1, в).

Явление чистого сдвига наглядно можно произвести при кручении образца в виде тонкостенной трубы. В его поперечных и продольных сечениях действуют только касательные напряжения. Напряженное состояние элемента, соответствующее чистому сдвигу, с наклеенной розеткой тензорезисторов изображено на рис. 22.1, б. Тензорезистор I предназначен для измерения продольных деформаций  $\epsilon_1$ , тензорезистор II — для деформаций  $\epsilon_2$  под углом  $\alpha = 45^\circ$  к продольной оси образца, тензорезистор III — для поперечных деформаций  $\epsilon_3$ . В данном случае  $\epsilon_1 = \epsilon_3 = 0$ . По показаниям тензорезистора II рассчитывают главные напряжения  $\sigma_{1,3}$ .

Рассмотрим пример исследования плоского напряженного состояния при одновременном действии изгиба с кручением.

Изгиб с кручением представляет собой такой частный случай сложного сопротивления, когда брус находится под действием изгибающего  $M$  и крутящего  $M_k$  моментов. Выделим у наиболее опасной точки элемента материал в виде кубика (рис. 22.2, а). По четырем граням выделенного элемента действуют касательные напряжения  $\tau$ , вызванные крутящим моментом, а по двум из этих четырех граней — нормальные напряжения  $\sigma_n$ , вызванные изгибающим моментом.

Следовательно, точка бруса находится в условиях плоского напряженного состояния, которое можно рассматривать как напряженное со-



**Рис. 22.2. Схемы исследования плоского напряженного состояния:**  
**а) при одновременном действии изгиба и кручения;**  
**б) то же, размещение тензорезисторов**

стояние чистого сдвига с наложением нормальных напряжений изгиба. Действием поперечной силы от изгиба пренебрегаем, расчетная схема такого напряженного состояния с указанием размещения тензорезисторов для измерения относительных деформаций  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  и  $\epsilon_{45^\circ}$  показаны на рис. 22.2, б.

Зная  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  и  $\epsilon_{45^\circ}$ , можно вычислить главные деформации  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_3$  и угол  $\alpha$ , под которым расположены главные площадки

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y - 2\epsilon_{45^\circ}}{\epsilon_x - \epsilon_y}, \quad (22.4)$$

$$\epsilon_{1,3} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_{45^\circ})^2 + (\epsilon_y - \epsilon_{45^\circ})^2}, \quad (22.5)$$

а главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  по формулам (22.3).

## Образцы, измерительные приборы и установка

Исследуемый образец представляет собой консольную балку, изготовленную из трубы с наружным диаметром  $D = 60$  мм и толщиной стенки 3 мм, материал образца — алюминиевый сплав Д16Т.

Исследования проводят на установке СМ-18М, которая состоит из следующих основных частей (рис. 22.3): исследуемого образца 10 с рычагом 3, кронштейна 7 с роликом 14, основания 4, гиревых подвесов 2, 5, 8 и набора грузов 1.

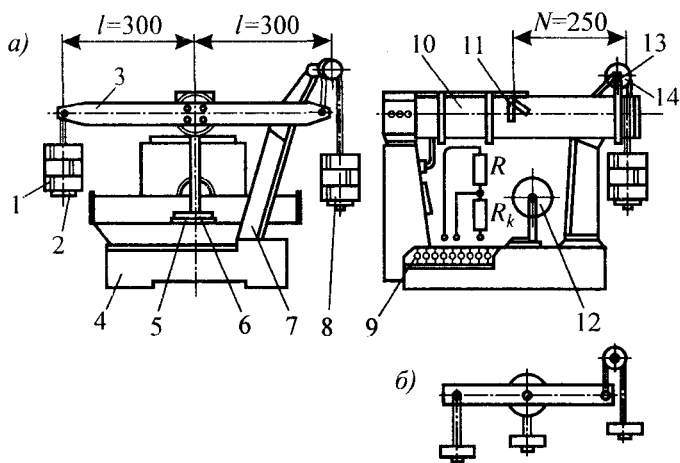


Рис. 22.3. Схема установки СМ-18М (а) и схема ее нагружения для случая изгиба с кручением (б)

Левый конец образца зашпемлен в основании установки. К другому концу образца прикреплен двуплечий рычаг. Отношение плеч рычага 1:1, а длина плеч равна 300 мм.

Нагружают образец, накладывая грузы на гиревые подвесы, соединенные с рычагом. Выбирая соответствующую схему нагружения (рис. 22.3, б), создают условие деформирования образца совместным действием кручения и изгиба. При этом в стенке образца создается плоское напряженное состояние.

Для измерения главных напряжений и определения положения главных площадок в сечении посередине образца наклеена розетка тензо-

резисторов 11 2ПКБ-10-100ХА, решетки которых расположены под углом  $45^\circ$  друг к другу. Компенсационные тензорезисторы размещены в специальном приливе 6 основания. На основании же размещена панель 9 с выводами для подключения тензорезисторов к регистрирующему прибору. Схема соединения тензорезисторов показана на рис. 22.3 ( $R$  — рабочий тензорезистор,  $R_k$  — компенсационный тензорезистор). По окончании работы грузы размещают на подставке 12.

В качестве приборов для регистрации относительных деформаций используют тензостанцию ПЭТ-ЗВ-М. Устройство тензостанции и подготовка ее к проведению испытаний приведены в лабораторной работе № 4.

### **Порядок проведения испытаний**

#### **1. Исследование напряженного состояния при чистом сдвиге**

Согласно исходным данным, указанным преподавателем, составить расчетную схему и нагрузить образец по указанной схеме.

Используя данные электротензометрической установки, найти цену деления шкалы миллиамперметра в единицах относительной деформации  $m$  (градуировочный коэффициент). Определить степень нагрузки  $\Delta P$ . Затем, давая одинаковые приращения нагрузки, провести 3—4 нагружения образца в зоне упругих деформаций. Наибольшая нагрузка на плечо рычага не должна превышать 98,1 Н (10 кгс). Показания измерительных приборов (миллиамперметров), включенных для регистрации продольных  $\epsilon_1$  и поперечных  $\epsilon_3$  деформаций (рис. 22.1, б), должны отсутствовать. После каждого нагружения регистрировать деформации исследуемого образца в направлении  $R_2$  по шкале соответствующего миллиамперметра. После окончания испытаний установку разгрузить.

Определить среднее значение приращений деформации в направлении  $R_2$  тензодатчика по формуле

$$\Delta T_{ср//} = \frac{\sum \Delta T_{i//}}{n}, \quad (22.6)$$

где  $\Delta T_{ср//}$  — приращение деформации в делениях шкалы миллиамперметра, соответствующее приращению нагрузки  $\Delta P$ ;  $n$  — число ступеней нагружения. Тогда приращения главных деформаций

$$\Delta \epsilon_{1,3} = \Delta T_{ср} / l \cdot m. \quad (22.7)$$

Затем по формуле (22.3) определить приращения главных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ .

Произвести теоретический расчет приращений главных напряжений в исследуемой точке образца по формуле

$$\Delta \sigma_{1,3} = \Delta \tau = \frac{\Delta M_k}{W_p} = \frac{2 \cdot 16 \cdot \Delta P \cdot l}{\pi D^3 (1 - c^4)}, \quad (22.8)$$

где  $c = \frac{d}{D}$ ,  $D = 60$  мм — наружный диаметр;  $d = 54$  мм — внутренний диаметр.

Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными определить по формуле

$$\frac{|\Delta \sigma_{1,3}^T| - |\Delta \sigma_{1,3}^{\sigma}|}{\Delta \sigma_{1,3}^T} \cdot 100\%, \quad (22.9)$$

где  $\Delta \sigma_{1,3}$  — приращения главных напряжений.

Поскольку направления главных деформаций  $\epsilon_{1,3}$  заранее известны, то можно сначала определить главные напряжения  $\sigma_{1,3}$ , а затем — главные деформации  $\epsilon_{1,3}$ . Для этого необходимо вычислить теоретические значения главных напряжений для принятой ступени нагрузки  $\Delta P$ . Так как  $\sigma_{1,3} = \pm \tau$ , то

$$\Delta \tau = \frac{M_k}{W_p} = \frac{16 \Delta P \cdot l}{\pi D^3 (1 - c^4)}, \quad (22.10)$$

где  $l$  — плечо исследуемого бруса.

Нагрузить образец нагрузкой  $\Delta P$  и отметить количество делений миллиамперметра, на которые отклонилась стрелка при заданной нагрузке  $\Delta P$ . Тогда градуировочный коэффициент,  $m$ , при этой нагрузке

$$m = \frac{\Delta \tau}{\Delta A}$$

Значение градуировочного коэффициента определить как среднее значение нескольких пробных нагружений для выбранной ступени нагрузки  $\Delta P$ .

Затем, давая одинаковые приращения нагрузки, провести 3—4 нагружения образца в области упругих деформаций. После каждого нагружения регистрировать деформации исследуемого образца в направлении  $R_2$  по шкале соответствующего миллиамперметра. После окончания испытаний установку разгрузить.

Определить среднее приращение деформации в направлении  $R_2$  тензорезистора по формуле

$$\Delta A_{cp} = \frac{\sum \Delta A}{n},$$

где  $\Delta A$  — приращение деформации в делениях шкалы миллиамперметра, соответствующее приращению нагрузки  $\Delta P$ ;  $n$  — число ступеней нагружения.

Приращения главных напряжений

$$\Delta \sigma_{1,3} = \pm m \Delta A_{cp}.$$

Приращения главных деформаций определить по формулам (22.2)

$$\Delta \epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} (1 + \mu) = \frac{m \Delta A_{cp}}{E} (1 + \mu), \quad \Delta \epsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} (1 + \mu) = -\frac{m \Delta A_{cp}}{E} (1 + \mu).$$

Расхождение между экспериментальными данными и теоретическими вычислить по формуле

$$\frac{\Delta \sigma_1^3 - \Delta \sigma_1^T}{\Delta \sigma_1^T} 100\%.$$

Теоретическое значение главных напряжений вычислено по формуле (22.10).

## 2. Исследование напряженного состояния при изгибе с кручением

Для определения трех искомых величин — главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  и угла наклона главных площадок  $\alpha$  — необходимо измерить деформации образца по направлениям баз тензорезисторов 1, 11 и 111 ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  и  $\epsilon_{45^\circ}$ ).



Согласно указаниям преподавателя, выбрать схему нагружения образца, изображенную на рис. 22.3, б. Дальнейшая последовательность выполнения лабораторной работы аналогична выполнению работы “Исследование напряженного состояния при чистом сдвиге”.

Зная градуировочные коэффициенты  $m_1, m_2, m_3$ , определить приращения деформаций в направлениях  $\epsilon_{x'}$ ,  $\epsilon_{y'}$  и  $\epsilon_{45^\circ}$  по соответствующим показаниям миллиамперметров:

$$\Delta\epsilon_{x'} = \Delta T_{cp'} \cdot m_1; \quad \Delta\epsilon_{y'} = \Delta T_{cp''} \cdot m_3; \quad \Delta\epsilon_{45^\circ} = \Delta T_{cp'''} \cdot m_2; \quad (22.11)$$

Приращения главных деформаций  $\epsilon_{1,3}$  подсчитываем по формуле 22.5, а приращения главных напряжений — по формуле 22.3. Положение главных площадок определяют по формуле 22.4.

Расчет приращений главных напряжений производят по формуле

$$\Delta\sigma_{1,3} = \frac{\Delta\sigma}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta\sigma}{2}\right)^2 + \Delta\tau^2}, \quad (22.12)$$

где  $\Delta\sigma = \frac{\Delta M}{W}$ ;  $W = \frac{\pi D^3}{32(1-c^4)}$ .

Приращение изгибающего момента в исследуемой точке сечения при выбранной ступени нагрузки  $\Delta P$  запишется как

$$M = \Delta P \cdot N \text{ (см. рис. 22.3, а)}. \quad (22.13)$$

Тогда 
$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P \cdot N}{W}. \quad (22.14)$$

Приращение  $\Delta\tau$  вычисляют по формуле (22.8) Угол наклона главных площадок вычисляют по формуле

$$\operatorname{tg}2\alpha = -\frac{2\Delta\tau}{\Delta\sigma}. \quad (22.15)$$

Определяют расхождение между экспериментальными и теоретическими вычислениями по формуле (22.9).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев А.М., Марьин В.А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. — М.: Наука, 1975. — 287 с.
2. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов. Т. 11. — М.: Машиностроение, 1974.
3. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии. — Мн.: Вышэйшая школа, 1975. — 352 с.
4. Дайчик М.Д., Пригоровский Н.И., Хуршудов Г.Х. Методы и средства натурной тензометрии. Справочник. — М.: Машиностроение, 1989. — 240 с.
5. Методы испытания материалов. В сб. Государственные стандарты. Часть 5. — М.: Из-во стандартов, 1979. — 376 с.
6. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наукова думка, 1988. — 735 с.
7. Марковец М.П. Определение механических свойств материалов по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 190 с.
8. Жданович Г.М., Балыкин М.К., Бондарик Э.А. и др. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов для студентов всех специальностей. — Минск: БПИ, 1981. — 112 с.
9. Болтуць Ю.К., Бондарик Э.А., Шунько Н.И. Журнал лабораторных работ по курсу “Сопротивление материалов”. — Минск, БПИ, 1990. — 30 с.
10. Троценко В.Т., Сосновский Д.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Т1. — Киев: Наукова думка, 1987. — 514 с.
11. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
12. Обработка результатов измерений. — Л.: ЛПИ, 1976.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

**Приложение 1**  
**Механические характеристики некоторых сталей**

Материал	Марка	Механические характеристики								Ударная вязкость, $\times 10$ Дж/мм <sup>2</sup>	Примечание
		Предел			Относительное		Твердость по Бринеллю, МПа	Удлинение, %	Сужение, %		
		текучести $\sigma_t$	прочности $\sigma_s$ , МПа	выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа	удлинение, %	сужение, %					
Сталь углеродистая обыкновенного качества	Ст 2	190—220	320—400	170—220	26	—	1160	—	—	горячекатанная	
	Ст 3	210—240	380—470	170—220	21—23	—	1310	—	7—10		
	Ст 4	240—260	420—520	190—250	19—21	—	1430	—	6—8		
	Ст 5	260—280	500—620	220—300	15—17	—	1700	—	—		
	20	250	420—500	170—220	25	55	—	—	—		
Сталь углеродистая качественная конструкционная	30	300	500—600	200—270	21	50	1790	—	8	нормализованная горячекатанная	
	40	340	580—700	230—320	19	45	2170	—	6		
	45	360	610—750	250—340	16	40	2410	—	5		
	50	380	640—800	270—350	14	40	2410	—	4		
Сталь хромистая	40X	650—900	730—1050	320—480	—	—	—	—	—	закалка при 850°C, отпуск при 500°C	
	45X	700—950	850—1050	400—500	9	45	1870—2190	—	5—7		
Нержавеющая сталь	1X18H9T	240	580	200—240	70	80	—	—	28		

**Приложение 2**  
**Механические характеристики некоторых чугунов**

Материал	Марка	Предел прочности (МПа) при,				Твердость по Бринеллю, НВ	Ударная вязкость КС, кДж/м <sup>2</sup>	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа	Предел выносливости $\tau_{-1}$ , МПа
		растяжении	сжатии	изгибе	срезе				
Модифицированный чугун	СЧ 21	210	750	400	220	280	90	100	80
	СЧ 24	240	850	440	260	300	90	120	100
	СЧ 28	280	1000	480	330	350	100	140	110
Ковкий чугун	КЧ 30—3	200	—	490	280	340	80	120	110
	КЧ 33—8	210	—	530	290	345	130	130	120
	КЧ 35—10	220	—	570	300	350	140	140	130

**Приложение 3**  
**Механические характеристики некоторых цветных металлов**

Сплавы	Материал	Марка	Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю, МПа	Ударная вязкость, $\times 10$ Дж/мм <sup>2</sup>
	Латунь	Л68 мягкая	320	$\sigma_{0,1} = 91$	120	55	550	17
		твердая	660	$\sigma_{0,2} = 520$	150	3	1500	—
	Латунь алюминиевая	ЛА77—2 мягкая	400	140	—	55	600	20
		твердая	650	—	—	12	1700	—
Медные	Латунь марганцовистая	ЛМц58—2 мягкая	400	156	—	40	850	12
		твердая	700	—	—	10	1750	—
	Бронза оловянистая	Бр. 0—10	250	—	—	11	800	—
		Бр А5 мягкая	380	160	—	65	600	11
	Бронза алюминиевая	твердая	800	500	134	4	2000	—

Продолжение приложения 3  
Механические характеристики некоторых цветных металлов

Сплавы	Материал	Марка	Предел прочности $\sigma_{0.2}$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю, МПа	Ударная вязкость, $\times 10$ Дж/мм <sup>2</sup>
Алюминиевые деформируемые	Алюминно-магнийевый сплав	АМг2М	190	80	120	23	450	—
	Нормальный дуралюмин	Д1 (0)	210	110	75	18	450	—
	Дуралюмин повышенной прочности	Д6 (3 и ЕС)	460	360	—	—	1050	—
Титановые		BT3—1	950—1200	850—1100	480	10—16	—	3—6
		BT8—1	1050—1800	950—1100	500	9—15	330	3—6

**Приложение 4**  
**Механические характеристики некоторых материалов**

Материал	Предел прочности (МПа) при		Ударная вязкость КС, кДж/м <sup>2</sup>
	растяжении	сжатии	
Бетон	—	5—35	—
Сосна:			
вдоль волокон	80	40	—
поперек волокон	—	50	—
Ель:			
вдоль волокон	65	35	—
поперек волокон	—	4	—
Дуб:			
вдоль волокон	95	50	—
поперек волокон	—	15	—
Гетинакс	150—170	150—180	88—140
Текстолит	85—100	130—250	100—160
Эбонит	60	58	70
Стекло оконное листовое	67	99	—
Стекло кварцевое	12	197	—
Гранит	3	190	—
Песчаник	2	95	—



**Приложение 5**

**Модули упругости и коэффициенты Пуассона  
некоторых материалов**

Материал	Модуль упругости, МПа		Коэффициент Пуассона,
	$E$	$G$	
Чугун серый, белый	$(1,15 \div 1,60)10^5$	$4,5 \cdot 10^4$	0,23—0,27
Чугун ковкий	$1,55 \cdot 10^5$	—	—
Стали углеродистые	$(2,0 \div 2,1)10^5$	$(8,0 \div 8,1)10^4$	0,24
Стали легированные	$(2,1 \div 2,2)10^5$	$(8,0 \div 8,1)10^4$	0,28
Медь прокатная	$1,1 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^4$	0,25—0,30
Медь холодноотянутая	$1,3 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^4$	0,31—0,34
Медь литая	$0,84 \cdot 10^5$	—	—
Бронза фосфористая катаная	$1,15 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$	—
Бронза марганцовистая катаная	$1,1 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^4$	0,32—0,35
Бронза алюминиевая литая	$1,05 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^4$	0,35
Латунь холодноотянутая	$(0,91 \div 0,99)10^5$	$(3,5 \div 3,7)10^4$	—
Латунь корабельная катаная	$1,0 \cdot 10^5$	—	0,32—0,42
Алюминий катаный	$0,69 \cdot 10^5$	$(2,6 \div 2,7)10^4$	0,36
Проволока алюминиевая тянутая	$0,7 \cdot 10^5$	—	0,32—0,36
Дуралюмин катаный	$0,71 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^4$	—
Цинк катаный	$0,84 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^4$	—
Свинец	$0,17 \cdot 10^5$	$0,70 \cdot 10^4$	0,27
Лед	$0,1 \cdot 10^5$	$(0,28 \div 0,3)10^4$	0,42
Стекло	$0,56 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^4$	—
Гранит	$0,49 \cdot 10^5$	—	0,25
Известняк	$0,42 \cdot 10^5$	—	—
Мрамор	$0,56 \cdot 10^5$	—	—
Песчаник	$0,18 \cdot 10^5$	—	—
Каменная кладка из гранита	$(0,09 \div 0,1)10^5$	—	—

Продолжение приложения 5  
 Модули упругости и коэффициенты Пуассона  
 некоторых материалов

Материал	Модуль упругости, МПа		Коэффициент Пуассона, $\mu$
	$E$	$G$	
Каменная кладка из известняка	$0,06 \cdot 10^5$	—	—
Каменная кладка из кирпича	$(0,027+0,030)10^5$	$6,3 \cdot 10^4$	0,23—0,27
Бетон при пределе прочности, кгс/см <sup>2</sup> :			
100	$(0,146+0,196)10^5$	—	0,16—0,18
150	$(0,164+0,214)10^5$	—	0,16—0,18
200	$(0,182+0,232)10^5$	—	0,16—0,18
Дерево вдоль волокон	$(0,1+0,12)10^5$	$0,55 \cdot 10^4$	$(0,41+0,44)$
Дерево поперек волокон	$(0,005+0,01)10^5$	—	—
Каучук	$0,8 \cdot 10^4$	—	0,47
Текстолит	$(0,06+0,1)10^5$	—	—
Гетинакс	$(0,1+0,17)10^5$	$0,08 \cdot 10^4$	—
Бакелит	$43 \cdot 10^4$	—	0,36
Вискомлит (ИМ-44)	$(40+42)10^2$	—	0,37
Целлулоид	$(14,3+27,5)10^4$	—	0,33—0,38

**Приложение 6**

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

Материал	Допускаемое напряжение, МПа на	
	растяжение	сжатие
Чугун серый в отливках	28—80	120—150
Сталь Ст2	140	
Сталь Ст3	160	
Сталь Ст3 в мостах	60—250	
Сталь машиностроительная (конструкционная) легированная	100—400 и выше	
Медь	30—120	
Латунь	70—140	
Бронза	60—120	
Алюминий	30—80	
Алюминиевая бронза	80—120	
Дуралюмин	80—150	
Текстолит	30—40	
Гетинакс	50—70	
Бакелизованная фанера	40—50	
Сосна вдоль волокон	7—10	10—12
Сосна поперек волокон	—	1,5—2,0
Дуб вдоль волокон	9—13	13—15
Дуб поперек волокон	—	2,0—3,5
Каменная кладка	до 0,3	0,4—4,0
Кирпичная кладка	до 0,2	0,6—2,5
Бетон	0,1—0,7	1—9

**Приложение 7**  
**Единицы измерения механических величин в Международной системе (СИ)**

Наименование величины	Наименование единицы	Обозначения	Соотношения единиц
Сила, груз	ньютон	Н	$1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс}$
Давление, механическое напряжение, модуль упругости	паскаль	Па	$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ кгс/см}^2$
	килопаскаль	кПа	$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$
	мегапаскаль (кратные единицы)	МПа	$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$
Момент силы		Н · м	$1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м}$
Работа, энергия	джоуль	Дж	$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м}$
Мощность	ватт (джоуль в секунду)	Вт	$1 \text{ Вт} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м/с}$
	киловатт (кратная единица)	кВт	$1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$
Длина	метр	м	$1 \text{ м} = 100 \text{ см} = 1000 \text{ мм}$
Масса	килограмм	кг	$1 \text{ кг} = 0,001 \text{ т}$
Плотность (удельная масса)		кг/м <sup>3</sup>	
Удельный вес		кгс/м <sup>3</sup>	

**Кратные и дольные единицы**

Наименование	Кратные единицы					Дольные единицы						
	Тера	Гига	Мега	Кило	Гекто	Дека	Деци	Санти	Милли	Микро	Нано	Пико
Обозначения	Т	Г	М	к	г	да	д	с	м	мк	н	п
Множители	$10^{12}$	$10^9$	$10^6$	$10^3$	$10^2$	10	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$10^{-12}$

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>ЧАСТЬ I</b>	
<b>ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ИСПЫТАНИЮ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЮ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>I.</b>	
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ . . . . .</b>	<b>12</b>
<i>Общие сведения . . . . .</i>	12
<i>Испытательная машина . . . . .</i>	13
<i>Основные данные машины . . . . .</i>	14
Станина машины . . . . .	15
Нагружающий механизм . . . . .	15
Силоизмерительный механизм . . . . .	16
Диаграммный аппарат . . . . .	17
<i>Образец для испытаний . . . . .</i>	19

<i>Подготовка и проведение испытаний</i> . . . . .	19
<i>Диаграмма растяжения</i> . . . . .	21
<i>Обработка полученной диаграммы растяжения и определение характеристик механических свойств</i> . . . . .	24
А. Характеристики прочности материала . . . . .	25
1. Предел пропорциональности . . . . .	25
2. Предел текучести. Различают физический и условный. . . . .	26
3. Временное сопротивление (предел прочности) . . . . .	28
Б. Характеристики пластичности материала . . . . .	29
В. Характеристики статической вязкости материала . . . . .	29
<i>Обработка опытных данных</i> . . . . .	31

## 2.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ**

#### **ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ СТАЛИ . . . . . 32**

*Краткие теоретические сведения* . . . . . 32

    Образцы, измерительные приборы  
    и испытательная машина . . . . . 33

*Порядок проведения испытаний* . . . . . 35

*Обработка опытных данных* . . . . . 35

## 3.

### **ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ ОБРАЗЦОВ**

#### **ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ . . . . . 36**

*Постановка испытания* . . . . . 36

*Образцы для испытаний* . . . . . 37

*Испытательная машина* . . . . . 37

*Силоизмерительный механизм* . . . . . 39

*Диаграммное устройство* . . . . . 40

*Испытание образца из мягкой стали* . . . . . 41

*Испытание образца из хрупкого металла (чугуна)* . . . . . 42

*Обработка опытных данных* . . . . . 43

<b>4.</b>		
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ (E) И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА СТАЛИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ . . . . .</b>	<b>44</b>
	<i>Постановка испытания . . . . .</i>	<i>44</i>
	<i>Образец для испытаний . . . . .</i>	<i>45</i>
	<i>Измерение деформаций . . . . .</i>	<i>46</i>
	<i>Электрическая схема измерений . . . . .</i>	<i>50</i>
	<i>Испытательная машина . . . . .</i>	<i>51</i>
	<i>Проведение испытания . . . . .</i>	<i>52</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>53</i>
<b>5.</b>		
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ВДАВЛИВАНИЯ. ТВЕРДОСТЬ ПО БРИНЕЛЛЮ . . . . .</b>	<b>54</b>
	<i>Краткие теоретические сведения . . . . .</i>	<i>54</i>
	<i>Твердость по Бринеллю . . . . .</i>	<i>55</i>
	<i>Образцы, испытательная машина и измерительные приборы . . . . .</i>	<i>58</i>
	<i>Проведение испытания . . . . .</i>	<i>59</i>
	<i>Микроскоп Бринелля . . . . .</i>	<i>60</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>61</i>
<b>6.</b>		
	<b>ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ . . . . .</b>	<b>62</b>
	<i>6.1. Твердость по Виккерсу . . . . .</i>	<i>62</i>
	<i>6.2. Твердость по Роквеллу . . . . .</i>	<i>63</i>
	<i>6.3. Диаграммы твердости при вдавливании шара в плоскую поверхность . . . . .</i>	<i>64</i>
	<i>Приборы для получения диаграмм твердости по способу статического вдавливания шара в испытываемый металл . . . . .</i>	<i>65</i>

Техническая характеристика прибора МЭИ-Т10 . . . . .	67
<b>6.4. Портативные приборы для измерения твердости . . . . .</b>	<b>67</b>
Устройство и принцип работы прибора . . . . .	68
Подготовка прибора к работе и порядок работы . . . . .	69
Проверка работоспособности . . . . .	70
<b>7.</b>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СЕЧЕНИЯХ БАЛКИ ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ . . . . .</b>	<b>71</b>
Описание испытательной установки . . . . .	71
Размеры испытываемой балки и расположение на ней измерительных приборов . . . . .	73
Проведение испытания . . . . .	74
Обработка опытных данных . . . . .	75
Теоретический расчет . . . . .	76
<b>8.</b>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРЯМОГО БРУСА ПРИ ПЛОСКОМ ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ . . . . .</b>	<b>78</b>
Краткие теоретические сведения . . . . .	78
Образцы, измерительные приборы и установка . . . . .	80
Порядок проведения испытаний . . . . .	83
<b>9.</b>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА . . . . .</b>	<b>84</b>
Краткие теоретические сведения . . . . .	84
Образцы, измерительные приборы и испытательная машина . . . . .	85
Порядок проведения испытаний . . . . .	85
Обработка опытных данных . . . . .	86



<b>10.</b>		
	<b>ИСПЫТАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ ПРУЖИНЫ НА СЖАТИЕ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА . . . . .</b>	<b>87</b>
	<i>Краткие теоретические сведения. . . . .</i>	<i>87</i>
	<i>Образец, измерительные приборы и испытательная машина . . . . .</i>	<i>88</i>
	<i>Порядок проведения испытания . . . . .</i>	<i>88</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>89</i>

## **ЧАСТЬ II**

	<b>ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПРОВЕРКЕ ВЫВОДОВ И ФОРМУЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ . . . . .</b>	<b>91</b>
--	---	-----------

<b>11.</b>		
	<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КОСОМ ИЗГИБЕ. . .</b>	<b>92</b>
	<i>Краткие теоретические сведения. . . . .</i>	<i>92</i>
	<i>Образец и установка для проведения испытаний . . . . .</i>	<i>93</i>
	<i>Проведение лабораторной работы . . . . .</i>	<i>93</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>94</i>
	<i>Теоретический расчет . . . . .</i>	<i>95</i>

<b>12.</b>		
	<b>ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ РАСТЯЖЕНИИ . . . . .</b>	<b>97</b>
	<i>Краткие теоретические сведения. . . . .</i>	<i>97</i>
	<i>Образец, измерительные приборы и испытательная машина . . . . .</i>	<i>98</i>
	<i>Порядок проведения испытаний . . . . .</i>	<i>99</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>99</i>
	<i>Теоретический расчет . . . . .</i>	<i>100</i>

<b>13.</b>		
	<b>ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ О ВЗАИМНОСТИ РАБОТ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ . . . . .</b>	<b>101</b>
	<i>Краткие теоретические сведения . . . . .</i>	<i>101</i>
	<i>Образец, измерительные приборы и установка . . . . .</i>	<i>104</i>
	<i>Порядок проведения испытаний . . . . .</i>	<i>105</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>106</i>
	<i>Теоретический расчет . . . . .</i>	<i>106</i>
<b>14.</b>		
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОДВИЖНОЙ ОПОРЫ СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЫ. . . . .</b>	<b>109</b>
	<i>Краткие теоретические сведения . . . . .</i>	<i>109</i>
	<i>Образец, измерительные приборы и установка . . . . .</i>	<i>110</i>
	<i>Проведение лабораторной работы . . . . .</i>	<i>111</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>112</i>
	<i>Теоретический расчет . . . . .</i>	<i>112</i>
<b>15.</b>		
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РЕАКЦИИ ОПОРЫ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМОЙ РАМЫ . . . . .</b>	<b>114</b>
	<i>Краткие теоретические сведения . . . . .</i>	<i>114</i>
	<i>Образец, измерительные приборы и установка . . . . .</i>	<i>117</i>
	<i>Порядок проведения испытаний . . . . .</i>	<i>118</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>119</i>
	<i>Теоретический расчет . . . . .</i>	<i>119</i>

<b>16.</b>		
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ЗАЩЕМЛЕНИЯ</b>	
	<b>ОДНОПРОЛЕТНОЙ СТАТИЧЕСКИ</b>	
	<b>НЕОПРЕДЕЛИМОЙ БАЛКИ. . . . .</b>	<b>122</b>
	<i>Краткие теоретические сведения . . . . .</i>	<i>122</i>
	<i>Образец, измерительные приборы и установка . . . . .</i>	<i>124</i>
	<i>Порядок проведения испытаний . . . . .</i>	<i>126</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>127</i>
<b>17.</b>		
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ</b>	
	<b>ПРИ ИЗГИБЕ КРИВОГО БРУСА . . . . .</b>	<b>128</b>
	<i>Краткие теоретические сведения . . . . .</i>	<i>128</i>
	<i>Образец, измерительные приборы</i>	
	<i>и испытательная машина. . . . .</i>	<i>130</i>
	<i>Порядок проведения испытания . . . . .</i>	<i>131</i>
	<i>Обработка опытных данных . . . . .</i>	<i>131</i>
	<i>Теоретический расчет . . . . .</i>	<i>132</i>
<b>18.</b>		
	<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ</b>	
	<b>ПРИ СЖАТИИ СТЕРЖНЯ БОЛЬШОЙ ГИБКОСТИ . . . . .</b>	<b>134</b>
	<i>Краткие теоретические сведения . . . . .</i>	<i>134</i>
	<i>Образец, измерительные приборы</i>	
	<i>и испытательная установка . . . . .</i>	<i>136</i>
	<i>Порядок проведения испытаний . . . . .</i>	<i>137</i>
	<i>Теоретический расчет . . . . .</i>	<i>137</i>
<b>19.</b>		
	<b>ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛОВ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ . . . . .</b>	<b>139</b>
	<i>Краткие теоретические сведения . . . . .</i>	<i>139</i>
	<i>Образцы для испытаний. . . . .</i>	<i>141</i>
	<i>Измерительные приборы и испытательная машина. . . . .</i>	<i>142</i>

<i>Порядок проведения испытания</i> . . . . .	144
<i>Обработка результатов испытаний</i> . . . . .	144
<b>20.</b>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ НА БАЛКУ, ЛЕЖАЩУЮ НА ДВУХ ОПОРАХ.</b> . . . . .	<b>145</b>
<i>Краткие теоретические сведения</i> . . . . .	145
<i>Образцы, измерительные приборы и испытательная установка</i> . . . . .	150
<i>Порядок проведения испытаний</i> . . . . .	151
<b>21.</b>	
<b>ИСПЫТАНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАПРЯЖЕНИЯХ</b> . . . . .	<b>155</b>
<i>Общие сведения</i> . . . . .	155
<i>Испытательная машина, образцы, приборы</i> . . . . .	163
<i>Порядок проведения испытаний</i> . . . . .	169
<i>Обработка и анализ экспериментальных данных.</i> . . . .	172
<i>Содержание отчета</i> . . . . .	175
<i>Техника безопасности при выполнении лабораторных работ на испытательной машине УКИ-10М</i> . . . . .	175
<b>22.</b>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИИ.</b> . . . . .	<b>176</b>
<i>Краткие теоретические сведения</i> . . . . .	176
<i>Образцы, измерительные приборы и установка</i> . . . . .	181
<i>Порядок проведения испытаний</i> . . . . .	182
1. Исследование напряженного состояния при чистом сдвиге. . . . .	182
2. Исследование напряженного состояния при изгибе с кручением. . . . .	184
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> . . . . .	<b>186</b>

<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> . . . . .	<b>187</b>
<i>Приложение 1</i>	
<i>Механические характеристики некоторых сталей</i> . . . . .	188
<i>Приложение 2</i>	
<i>Механические характеристики некоторых чугунов</i> . . . . .	189
<i>Приложение 3</i>	
<i>Механические характеристики некоторых</i> <i>цветных металлов.</i> . . . . .	190
<i>Приложение 4</i>	
<i>Механические характеристики</i> <i>некоторых материалов</i> . . . . .	192
<i>Приложение 5</i>	
<i>Модули упругости и коэффициенты Пуассона</i> <i>некоторых материалов</i> . . . . .	193
<i>Приложение 6</i>	
<i>Ориентировочные значения основных допускаемых</i> <i>напряжений на растяжение и сжатие</i> . . . . .	195
<i>Приложение 7</i>	
<i>Единицы измерения механических величин</i> <i>в Международной системе (СИ).</i> . . . . .	196
<i>Кратные и дольные единицы</i> . . . . .	196

*Учебное издание*

***ХМЕЛЕВ Александр Афанасьевич,  
СИДОРОВ Виктор Александрович***

**СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ**  
*Лабораторные работы*

Ответственный за выпуск *А. П. Аношко*  
Технический редактор *Л. Г. Левадная*

Подписано в печать 17.11.2003.

Бумага офсетная. Формат 60x84/16. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 11,9. Усл. изд. л. 12,2. Тираж 1000 экз. Заказ 1089.

Издательство УП «Технопринт», ЛВ № 380 от 29.04.99

Отпечатано на УП «Технопринт», ЛП № 203 от 26.01.03

220027, Минск, пр-т Ф. Скорины, 65, корп. 14, оф. 215, тел. 231-86-93