

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ
КРАСНОАРМЕЙСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ ГВУЗ «ДонНТУ»

Методическое пособие

для лабораторных работ по сопротивлению материалов

Часть 1

Согласовано

на заседании кафедры
инженерной механики КИИ
протокол №11 от 29.05.2013

Утверждено

на заседании
учебно-издательского Совета
ГВУЗ «ДонНТУ»
протокол №4 от 03.10.2013

Красноармейск, КИИ - 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Определение модуля упругости при растяжении	4
Лабораторная работа №2. Испытание стального образца на растяжение	7
Лабораторная работа №3. Испытание материалов на сжатие	13
Лабораторная работа №4. Испытание материалов на сдвиг	16
Лабораторная работа №5. Определение твердости стали по Бринеллю	19
Лабораторная работа №6. Испытание на кручение стального круглого вала полого сечения	23
Лабораторная работа №7. Испытание на растяжение цилиндрической винтовой пружины	27
Лабораторная работа №8. Испытание балки на двух опорах с консолями на изгиб	29
Лабораторная работа №9. Определение перемещений в консольной балке при изгибе	32
Лабораторная работа №10. Проверка теорем о взаимности работ и перемещений	34

«Сопротивление материалов» – одна из важнейших общетехнических дисциплин, играющая существенную роль в научной подготовке инженера любой специальности, так как каждому из них в практической деятельности приходится решать широкий комплекс задач, среди которых большое место занимают расчеты на прочность, жесткость и устойчивость.

Сопротивление материалов является наукой экспериментально-теоретической, так как она широко использует опытные данные и теоретические исследования. Эксперимент необходим для определения механических свойств материалов, а также для проверки теоретических выводов и расчетных формул, основанных на некоторых упрощающих гипотезах. Механические характеристики материалов определяются испытанием стандартных образцов под нагрузкой в лаборатории.

Лабораторные занятия служат связующим звеном теории и практики. Они позволяют углублять и закреплять теоретические знания, полученные студентами на лекциях, проверять научно-теоретические положения экспериментальным путем, знакомиться с оборудованием, приборами, приспособлениями и материалами, изучать на практике методы научных исследований.

Настоящее методическое руководство содержит сведения, необходимые студентам для самостоятельной подготовки и выполнения лабораторных работ по сопротивлению материалов.

Задачами проведения лабораторных занятий являются:

- а) определение механических свойств материалов в условиях статического и динамического нагружений;
- б) проверка теоретических выводов путем эксперимента;
- в) ознакомление с современными экспериментальными методами определения напряжений.

Описание лабораторных работ сделано применительно к имеющемуся оборудованию в лабораториях кафедры инженерной механики КИИ ГВУЗ «ДонНТУ» с таким расчетом, чтобы работы могли проводиться в любой последовательности и в соответствии с программой курса в зависимости от специальности.

До проведения лабораторных занятий студент должен самостоятельно изучить те работы, которые предусмотрены рабочей программой по сопротивлению материалов, уяснить цель и теоретические основы данной работы, принципы действия машин и приборов, порядок выполнения работы и обработку результатов опыта.

При подготовке к лабораторным занятиям необходимо контролировать свои знания, отвечая на все вопросы для самопроверки, приведенные в конце каждой работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Цель работы - определение модуля продольной упругости E материала испытываемого образца (модуля Юнга), опытная проверка закона Гука при растяжении.

Краткие теоретические сведения

Для проверки закона Гука и определения модуля упругости материала необходимо измерение упругих деформаций при растяжении образца в пределах пропорциональности.

Испытанию подвергают так называемые нормальные образцы круглого или прямоугольного сечения. Для получения сопоставимых результатов испытаний на растяжение форма, размеры и условия нагружения образцов должны определяться стандартом (ГОСТ 1497-61 «Металлы. Методы испытания на растяжение»).

На рис.1 показан стандартный стальной образец, используемый для испытания на растяжение.

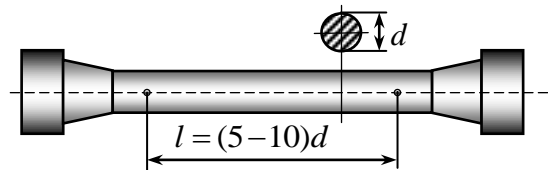


Рис.1

Расчетная длина l круглого образца принимается равной $10d$ (или $l_5 = 5d$). При испытаниях образца прямоугольного поперечного сечения $d = \sqrt{4F/\pi} = 1,13\sqrt{F}$.

Для многих материалов при растяжении или сжатии справедлива пропорциональная зависимость между приложенной нагрузкой и деформацией, то есть они подчиняются закону Гука:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}$$

где Δl – абсолютная продольная деформация (удлинение или укорочение) образца под действием силы P , приложенной вдоль оси стержня, l – расчетная длина образца, F – площадь поперечного сечения образца, E – модуль упругости первого рода (модуль Юнга), представляющий собой коэффициент пропорциональности между напряжением и деформацией и характеризующий способность материала сопротивляться упругим деформациям.

Зная размеры испытываемого образца, его деформацию, а также величину растягивающей силы P , можно вычислить модуль упругости на основании закона Гука:

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

Чтобы убедиться в линейной зависимости между нагрузкой и деформацией при определении модуля упругости E , нагружение образца производят несколькими ступенями, при этом нагрузку каждый раз увеличивают на одну и ту же величину. После каждого нагружения измеряют абсолютное удлинение Δl . Приращение длины образца на одну и ту же величину подтверждает наличие

линейной зависимости между деформацией Δl и продольной силой P , то есть справедливость закона Гука. Величина ступени нагружения P зависит от материала образца и размеров его поперечного сечения. Ее выбирают таким образом, чтобы наибольшая нагрузка при испытании не вызывала остаточных деформаций.

Описание испытательной машины и приборов

Лабораторная работа по определению модуля упругости выполняется на универсальной машине, принципиальная схема которой изображена на рис.2. Эта машина предназначена для статических испытаний материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Она относится к типу разрывных испытательных машин с механическим нагружением.

Характер деформации определяется направлением перемещения нижнего захвата 3. При растяжении в захваты 3 и 5 устанавливается испытываемый образец 4. Перемещение нижнего захвата осуществляется при помощи червячной передачи 1 (вручную или от электромотора) и винта 2. Опускание нижнего захвата при неподвижном верхнем захвате вызывает растяжение образца. Неподвижный верхний захват соединен с динамометрическим устройством, предназначенным для определения нагрузки.

Динамометрическое устройство машины состоит из цилиндра 6, в котором помещен поршень 7, оказывающий давление на жидкость (масло). По этому давлению с помощью манометра 8 определяется усилие в стержне.

Для измерения линейных деформаций при испытании образцов применяются специальные приборы тензометры. Используемый в данной работе тензометр системы МИЛ состоит из двух одинаковых частей, прижимаемых к образцу пружинами. Наличие двух тензометров помогает исключить влияние изгиба, если на грузка приложена не совсем вдоль оси стержня.

На рис.3 изображена схема правого тензометра. Неподвижная рамка 9 прижимается к образцу 1, опираясь на него неподвижным ножом 8 и подвижной призмой 3, расстояние между острями которых является базой прибора. База тензометра МИЛ равна 100 мм. Расчетная длина l образца равна базе тензометра.

С помощью винта 7 устанавливается начальное положение стрелки 5 на шкале 2, имеющей прорезь с зеркалом для повышения точности отсчетов.

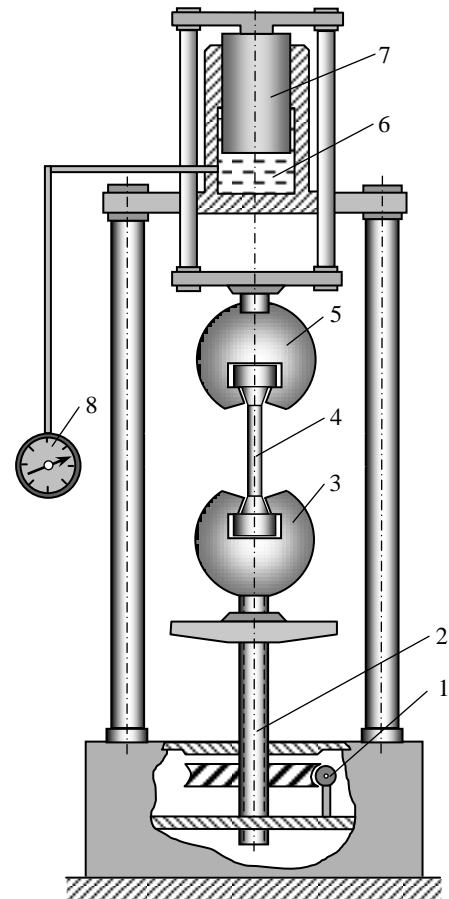


Рис.2

Вследствие деформации образца на величину Δl подвижная призма 3 и жестко связанный с ней рычаг 4 поворачиваются и с помощью поводка 6 поворачивают стрелку 5. Разность между новым и начальным положениями стрелки представляет собой деформацию образца, увеличенную в K раз. Коэффициент увеличения тензометра K зависит от соотношения плеч рычагов 4, 5 и 9. В рассматриваемом тензомере система рычагов подобрана так, что $K=500$.

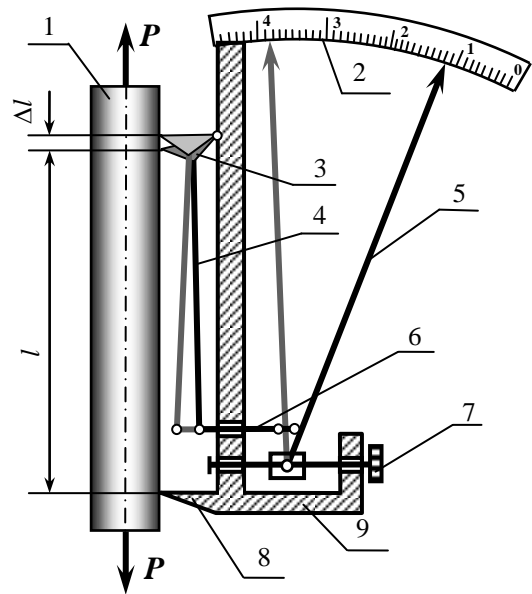


Рис.3

Проведение испытания

Данные обмера образца заносятся в бланк лабораторной работы. Так как линейная зависимость между нагрузкой и деформацией выполняется только до предела пропорциональности σ_n , то следует определить соответствующую ему нагрузку:

$$P_n = \sigma_n \cdot F.$$

Для стали Ст.3 $\sigma_n = 200$ МПа. Наибольшая нагрузка при испытаниях не должна превышать величину P_n .

На закрепленном в захватах образце устанавливается тензомер.

Для устранения зазоров в механизмах испытательной машины и обжатия в захватах концов образца с помощью ручного привода дается начальная нагрузка $P_0=5$ кН, при которой отсчеты снимаются по левому и правому тензомерам и записываются в таблицу. Выбирается расчетная ступень загрузки $\Delta P=5$ кН (для стали Ст.3), и последовательно прикладывается нагрузка от 10 до 30 кН с интервалом $\Delta P=5$ кН. При каждой нагрузке снимаются и записываются в таблицу отсчеты по обоим тензомерам. При снятии отсчетов глаз нужно располагать так, чтобы стрелка тензометра совпадала с ее отражением в зеркале.

После окончания испытаний образец надо разгрузить.

При остаточной нагрузке, равной 5 кН, убедиться, что показания тензомеров соответствуют исходным, то есть имели место только упругие деформации.

Обработка результатов испытания

В результате испытаний в таблице записаны масштабные деформации образца при каждой нагрузке. Требуется определить разности между каждым последующим и предыдущим отсчетами по левому и правому тензомерам (Δ_{il} и Δ_{in}) вычислить соответствующие средние арифметические разности ($\Delta_n = \Sigma_{il}/5$, $\Delta_n = \Sigma_{in}/5$, где 5 число разностей) и найти среднюю разность по обоим тензомерам, то есть

$$\Delta_{cp} = \frac{\Delta_l + \Delta_n}{2}.$$

Разделив последнее значение на коэффициент увеличения тензометра, получим абсолютную деформацию расчетной части образца:

$$\Delta l = \Delta_{cp} / K$$

Искомую величину модуля упругости материала образца получим из формулы закона Гука:

$$E = \frac{\Delta P l}{F \cdot \Delta l}.$$

Контрольные вопросы

- 1) Как формулируется закон Гука?
- 2) Что называется абсолютной продольной деформацией? Какова ее размерность?
- 3) Что такое модуль упругости и какова его размерность? Как влияет величина модуля упругости на деформацию стержня?
- 4) Какими параметрами определяется жесткость при растяжении?
- 5) Что такое тензометр? Назовите основные его параметры.
- 6) Чем отличается перемещение от деформации?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы - изучение поведения материала при растяжении до разрыва, получение диаграммы растяжения, определение основных механических характеристик и марки стали.

Краткие теоретические сведения

Наиболее простым и распространенным видом испытания материалов является испытание на растяжение при комнатной температуре. При этих испытаниях выявляются характеристики прочности и пластичности материалов. Кроме того, по механическим характеристикам материала при растяжении-сжатии на основании гипотез прочности осуществляется расчет при сложном сопротивлении.

Испытание материалов на растяжение осуществляется в соответствии с требованиями стандарта (ГОСТ 1497-61. «Металлы, Методы испытания на растяжение»). При испытаниях используются стандартные образцы (рис. 1).

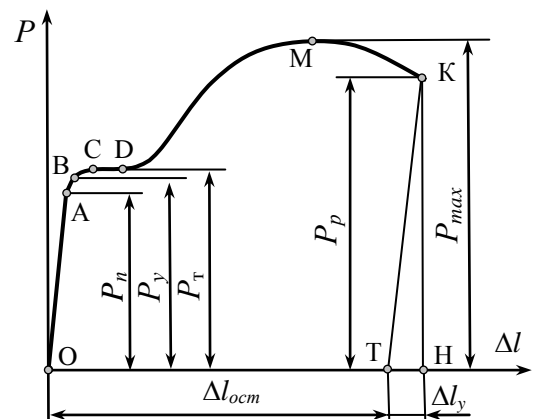


Рис.4

Испытательная машина имеет записывающее устройство, на бумажной ленте которого автоматически вычерчивается диаграмма растяжения в координатах $\Delta l - P$. На рис. 4 показана диаграмма растяжения малоуглеродистой стали с пятью характерными точками: А в конце прямой линии ОА, В на кривой несколько выше точки А, С на горизонтальном участка диаграммы, М самая верхняя точка, К в конце диаграммы.

Разделив силы, соответствующие этим точкам, на площадь поперечного сечения образца до деформации, получим:

$$\sigma_n = \frac{P_n}{F}$$

– предел пропорциональности, т.е. наибольшее напряжение, при котором справедлив закон Гука;

$$\sigma_y = \frac{P_y}{F}$$

– предел упругости, т.е. наибольшее напряжение, при котором нет остаточных деформаций или они пренебрежимо малы;

$$\sigma_m = \frac{P_T}{F}$$

– предел текучести, т.е. напряжение, при котором деформации растут без увеличения нагрузки; горизонтальный участок диаграммы называется площадкой текучести. Предел текучести является основной величиной для определения допускаемого напряжения при расчете конструкций из пластичных материалов;

$$\sigma_\sigma = \frac{P_{\max}}{F}$$

– предел прочности (временное сопротивление), т.е. условное напряжение, соответствующее максимальной нагрузке. По пределу прочности можно установить величину допускаемого напряжения как для пластичных, так и хрупких материалов;

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_1}$$

– напряжение в момент разрыва; здесь F_1 площадь поперечного сечения образца в самом узком месте образовавшейся шейки.

Диаграмма растяжения характеризует свойства данного образца, но не свойства материала вообще, так как учитывает размеры образца. Для оценки свойств материала строится условная диаграмма напряжений в осях $\sigma = P/F$ и $\varepsilon = \Delta l/l$.

В производственных условиях обычно ограничиваются определением пределов текучести и прочности, так как опытное определение пределов пропорциональности и упругости связано с необходимостью проведения весьма точных и трудоемких экспериментов.

Кроме механических характеристик прочности при статических испыта-

ниях стального образца определяют характеристики пластичности материала: относительное остаточное удлинение при разрыве

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \cdot 100\% = \frac{\Delta l_{ост}}{l} \cdot 100\%$$

и относительное остаточное сужение в месте разрыва

$$\Psi = \frac{F - F_1}{F} \cdot 100\%;$$

где l и l_1 - длина расчетной части образца до и после разрыва; F и F_1 - площадь поперечного сечения образца до испытания и в месте разрыва.

Для хрупко-пластичных материалов при отсутствии площадки текучести условным пределом текучести принято считать напряжение, при котором относительная остаточная деформация составляет 0,2%.

Описание испытательной машины

Испытание образца на разрыв производится на универсальной машине ГМС50 с гидравлическим приводом и маятниковым силоизмерителем. Эта машина предназначена главным образом для статических испытаний металлов на растяжение, сжатие и изгиб. Ее схема приведена на рис.5.

На чугунном основании 2 машины установлены две колонны 3, связанные сверху неподвижной поперечиной 6, на которой расположен рабочий цилиндр 10 с поршнем 9, поднимающим при подкачивании масла поперечину 7. Максимальная величина подъема подвижных частей машины 265 мм.

Подвижную траверсу 5 устанавливают по высоте с помощью механического привода 8, состоящего из электродвигателя, клиноременной передачи и двух червячных пар, которые преобразуют вращательное движение вала электродвигателя через подъемные винты 4 с гайками в поступательное движение траверсы 5. Траверса является опорной для установки образцов при испытании на сжатие и изгиб. На ней смонтирован верхний

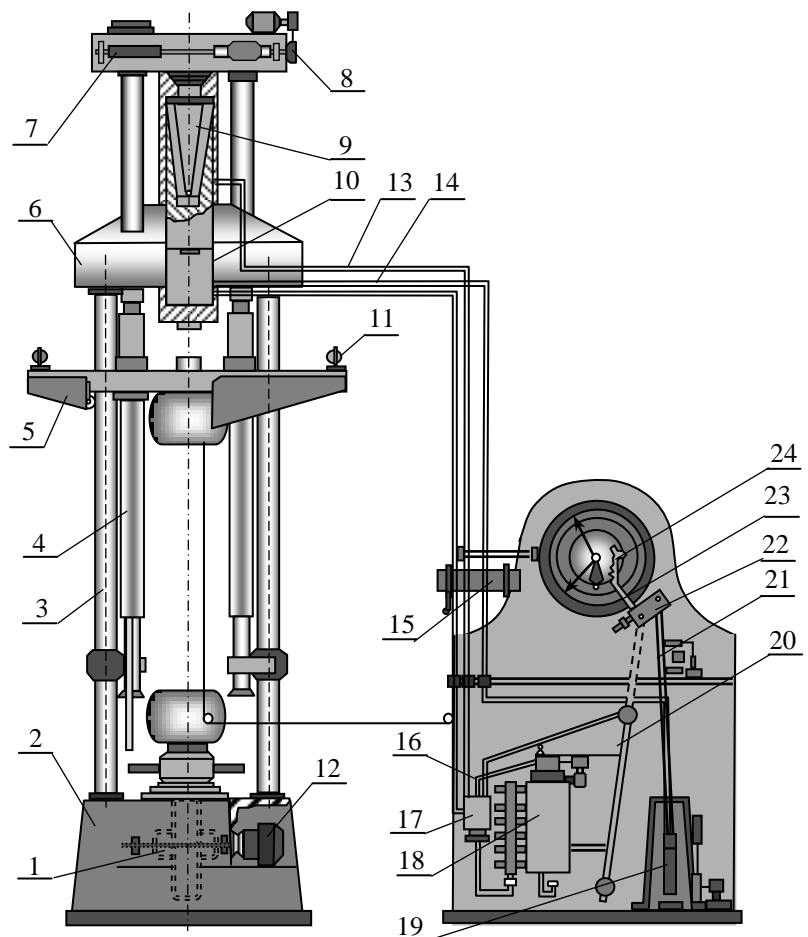


Рис.5

захват для закрепления образца, испытываемого на растяжение. Механический привод нижнего захвата состоит из электродвигателя 12 и червячной передачи подъемного винта 1.

Клиновидный нож закрепляется в днище рабочего цилиндра. Переставные опоры 11 служат для установки образца в горизонтальное положение. Стрелу прогиба образца отсчитывают по линейке, прикрепленной к одной из колонн. На другой колонне смонтирован концевой выключатель, действующий на магнитный пускатель электродвигателя насоса и останавливающий его работу в момент, когда рабочий поршень достигает верхнего предельного положения. Силоизмерительное устройство, насос 18 с регулятором и пусковая аппаратура размещены в пульте управления, расположенном отдельно от машины.

Механизм управления насосом состоит из рукоятки с круговой шкалой, валика с эксцентриком и рычажной системы 16. При вращении рукоятки эксцентрик поднимает (или опускает) рычаг 16, связанный тягой с зубчатой рейкой насоса 17.

Масло, накапливающееся между рабочим поршнем и цилиндром, удаляется по маслопроводу 13.

Нагрузка, прилагаемая к образцу, измеряется маятниковым силоизмерительным устройством. Изменение давления масла в рабочем цилиндре передается по трубопроводу 14 поршеньку 19. С помощью тяг 21 поршеньки, перемещаясь, вызывает поворот рычага 22 и толкателя 23. Когда рычаг 22 поворачивается, штанга маятника 20 отклоняется до тех пор, пока его момент силы не уравновесит момент силы, приложенной от поршенька к рычагу 22. Толкатель 23 перемещает зубчатую рейку 24, вращающую шестерню, на ось которой насажена стрелка шкалы силоизмерительного устройства.

Диаграммы испытаний автоматически записываются на барабане 15. Линейное перемещение траверсы 5 преобразуется во вращательное движение барабана. Самописец, жестко насаженный на зубчатую рейку 24, полностью повторяет ее движение.

Путем подвешивания сменных грузов к штанге маятника можно установить различные пределы намерения нагрузок.

Проведение испытания

До проведения лабораторной работы необходимо ознакомиться с устройством испытательной машины ИМС-50.

Замерить диаметр образца d и его расчетную длину, отмеченную на поверхности образца двумя рисками. Данные обмера образца внести в бланк лабораторной работы 2. Затем образец устанавливается в захваты машины. На барабане 15 закрепляется бумага для записи диаграммы растяжения. Включив электродвигатель гидравлического насоса машины, образец подвергают действию статической нагрузки.

При испытании по шкале силоизмерителя надо отметить нагрузку P_T , при которой напряжения в образце достигают предела текучести σ_m (в это время рост нагрузки прекращается, несмотря на то, что деформация образца продолжается; на диаграмме появляется площадка текучести), максимальную нагрузку

P_{\max} для определения предела прочности σ_B и нагрузку в момент разрыва P_p , необходимую для определения соответствующего напряжения.

Пока нагрузка не достигла максимального значения, деформации распределялись равномерно по всему образцу. С момента, когда нагрузка достигает наибольшего значения, остаточная деформация приобретает местный характер, концентрируясь около какого-либо участка по длине образца, оказавшегося наиболее слабым. В этом месте начинается образование так называемой шейки, то есть местного сужения поперечного сечения образца. Вследствие интенсивного уменьшения площади сечения для дальнейшего растяжения образца нужна меньшая нагрузка. Поэтому на диаграмме и наблюдается падение нагрузки, которое продолжается до разрыва образца. Но следует иметь в виду, что из-за резкого уменьшения поперечного сечения образца в шейке напряжение в действительности возрастает здесь до самого разрыва. После разрыва образца обе его половины освобождаются из захватов, а бумага с диаграммой растяжения снимается с барабана. При автоматическом вычерчивании диаграммы на оси ординат в определенном масштабе фиксируется нагрузка, а по оси абсцисс (тоже в масштабе) - удлинение образца.

Обработка результатов испытания

Приложив друг к другу обе части образца по месту разрыва, измеряют с помощью штангенциркуля диаметр в самом узком месте d_1 и длину расчетной части l_1 . Эти величины, а также площадь поперечного сечения $F_1 = \pi d_1^2/4$, вычисленную в месте разрыва, записывают в бланк лабораторной работы.

По нагрузкам и соответствующим им деформациям строится диаграмма растяжения $P - \Delta l$ и с помощью миллиметровой сетки определяется ее площадь ω . Обычно площадь диаграммы вычисляется как сумма площадей прямоугольников, треугольников и трапеций, на которые можно разбить фигуру ОАВСМКН (рис.4).

По нагрузкам P_m , P_{\max} и P_p определяются пределы текучести, прочности и напряжение в момент разрыва. Кроме того, вычисляются характеристики пластичности δ_5 и Ψ .

Для оценки качества испытанного материала так же важно определить работу, затраченную на разрыв образца. Чем больше эта работа, тем больше энергии может накопить материал, не разрушаясь (то есть тем более пластичен материал).

Величина полной работы A , затраченной на разрушение образца, графически изображается площадью диаграммы растяжения ОАВСМКН (рис.4). С учетом масштабов сил m и удлинений n $A = m \cdot n \cdot \omega$.

Работа, затраченная только на пластическую деформацию, выражается площадью ОАВСМКН, уменьшенной на величину площади треугольника КНТ, соответствующей работе, израсходованной на упругую деформацию, исчезающую после разрыва.

По найденным механическим характеристикам σ_m , σ_B , δ_5 можно установить марку стали, пользуясь справочными таблицами и стандартами (табл.1).

Контрольные вопросы

- 1) Что называется пределом пропорциональности? Пределом упругости? Пределом текучести ? Пределом прочности?
- 2) Какие деформации называются упругими и какие остаточными (пластическими)?
- 3) Что такое наклеп?
- 4) Когда должны появляться линии Чернова-Людерса?
- 5) В какой момент испытания появляется шейка на образце?
- 6) Что такое допускаемое напряжение и как оно определяется?
- 7) Что представляет собой площадь диаграммы растяжения?
- 8) Чем определяется модуль упругости на диаграмме напряжений?
- 9) Что называется относительными остаточными удлинением и сужением?
- 10) Какие материалы считаются пластичными и какие хрупкими?

Таблица 1

Механические свойства углеродистых сталей по ГОСТу 380.60. Группа А.

Марка стали	Предел прочности при растяжении σ_s , МПа	Относительное удлинение, %			Предел текучести, δ_t , МПа
		При σ_s , МПа	Для длинного образца, δ_{10}	Для короткого образца, δ_5	
Ст. 0	320 - 470	320 - 470	18	22	
Ст. 1	320 - 400	320 - 400	28	33	
Ст. 2	340 - 420	340 - 420	26	31	210
Ст. 3	380 - 470	380 - 400	23	27	220
		410 - 430	22	26	
		440 - 470	21	25	
Ст. 4	420 - 520	420 - 440	21	25	240
		450 - 480	20	24	
		490 - 520	19	23	
Ст. 5	500 - 620	500 - 530	17	21	270
		540 - 570	16	20	
		580 - 620	15	19	
Ст. 6	600 - 720	600 - 630	13	15	300
		640 - 670	12	14	
		680 - 720	11	13	
Ст. 7	700 и более	700 - 740	9	11	
		750 и более	8	10	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СЖАТИЕ

Цель работы - определение предела прочности при испытании на сжатие чугуна и древесины.

Краткие теоретические сведения

При испытании на сжатие хрупких материалов, в том числе чугуна, ограничиваются определением предела прочности σ_B , соответствующего напряжению при наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца:

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F},$$

где P_B – наибольшая нагрузка, F – площадь поперечного сечения образца до испытания.

Предел прочности чугуна обычно достигает 500 - 1000 МПа. Испытание производится на образцах цилиндрической формы с отношением высоты образца к его диаметру $l \leq \frac{h}{d} \leq 2$. В данной работе используются образцы с раз-

мерами $d = 30$ мм и $h = 40$ мм. Для испытания образец помещают между плитами пресса и подвергают сжатию. Под действием сжимающих сил образец укорачивается и принимает бочкообразную форму (рис.6). При сжатии образцов происходит ряд явлений, существенно отличающих испытания на сжатие от испытаний на растяжение. При уменьшении высоты сжимаемого образца от h до h_1 и перемещении частиц в радиальном направлении между торцами образца и плитами пресса возникают силы трения, направленные в сторону, противоположную направлению поперечной деформации, то есть радиально к центру. Эти силы трения нарушают одноосный характер деформации образца. Так как действие касательных напряжений, вызванных силами трения на контактных плоскостях, проявляется по высоте сжимаемого образца неравномерно (максимум на контактной поверхности, нуль на половине высоты образца), напряженное состояние материала при сжатии будет неравномерным. Внешнее проявление этой неравномерности заключается в том, что цилиндрическая форма образца переходит в бочкообразную.

Опыты показывают, что разрушение чугунных образцов происходит путем скалывания по плоскостям, наклонным примерно под углом 45° к оси образца, то есть по сечению, в котором действуют максимальные касательные напряжения. Разрушение происходит внезапно, как обычно у хрупких материалов, которые намного лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению. Предел прочности хрупкого материала при сжатии в несколько раз больше предела прочности при растяжении. Модули упругости при растяжении и сжатии тоже различны.

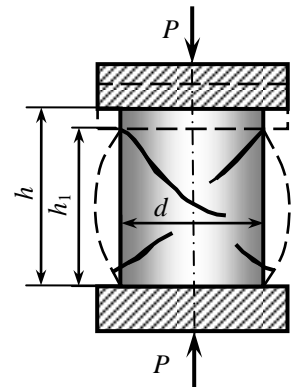


Рис.6

У пластичных материалов величины предела пропорциональности, предела упругости и предела текучести при сжатии получаются такие же, как и при растяжении. При сильном сжатии такой материал не разрушается, а сплющивается, поэтому понятие предела прочности при сжатии отсутствует, и его принимают равным пределу прочности при растяжении. Таким образом, для пластичных материалов испытание на сжатие не дает никаких новых характеристик материала и обычно не производится.

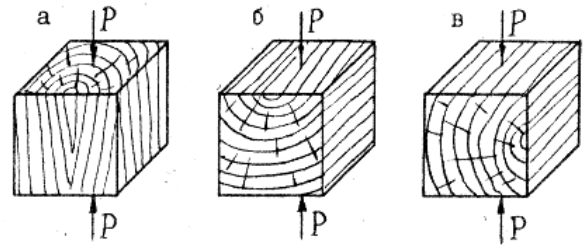


Рис. 7

Дерево материал неоднородный и анизотропный испытывается на сжатие вдоль волокон (рис.7,а) и поперек волокон в радиальном (рис.7,б) и тангенциальном (рис.7,в) направлениях по отношению к годовым кольцам. Для испытания дерева образцы изготавливаются в виде кубиков. В данной работе применяются кубики из дуба и сосны размерами $20 \times 20 \times 20 \text{ мм}^3$.

Дубовый образец, испытанный вдоль волокон на сжатие до разрушения, претерпевает сравнительно небольшие остаточные деформации. После достижения наибольшего значения нагрузки P_B начинается разрушение образца с последующим падением нагрузки. Разрушение происходит путем сдвига одной части образца по отношению к другой, причем линия сдвига направлена примерно под углом 45° к линии действия нагрузки, то есть по направлению максимальных касательных напряжений (рис.8,а). В сухом сосновом образце при сжатии вдоль волокон образуются продольные трещины и происходит смятие контактных поверхностей (рис.8,б).

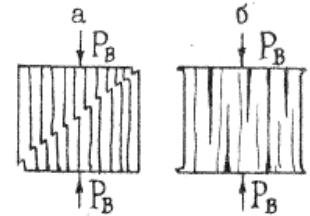


Рис. 8

При испытаниях деревянных образцов на сжатие поперек волокон кубики быстро деформируются (спрессовываются, иногда расслаиваются) почти без увеличения нагрузки. Значительный рост деформаций позволяет считать, что несущая способность материала исчерпана. За разрушающее условно принимают то значение нагрузки, при котором кубики сжимаются на одну треть первоначальной высоты.

Описание испытательной машины

Чугунные образцы испытывают на гидравлическом прессе с наибольшим усилием 3МН (рис.9), деревянные - на настольном гидравлическом прессе с усилием 40 кН (рис.10).

Пресс (рис.9) работает от насоса 5, который приводится в действие вручную. От насоса 5 масло поступает в рабочий цилиндр и поднимает пор-

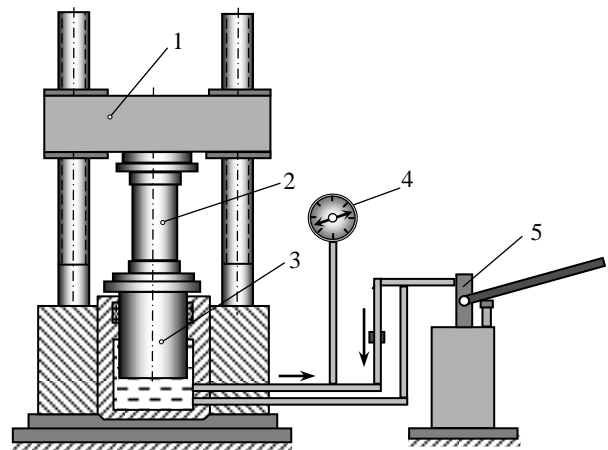


Рис.9

шень 3 с укрепленной на нем нижней опорной подушкой, на которую ставится чугунный образец 2. Верхняя плита 1 во время испытания остается неподвижной. Измерение нагрузки производится при помощи манометра 4, присоединенного к трубопроводу. Показания манометра пересчитываются в кН по таблицам, имеющимся в лаборатории. Принцип действия настольного гидравлического пресса (рис.10) примерно такой же. При испытании деревянных образцов 2 нагрузка определяется как произведение показаний манометра 4 (давление в цилиндре) и площади поршня, равной $26,4 \text{ см}^2$.

Проведение испытания

Отбираются образцы для испытания (цилиндр из чугуна и три деревянных кубика: один дубовый и два сосновых). Замеряются поперечные размеры и высоты каждого образца. Данные измерений и вычисленные площади поперечных сечений образцов записываются в бланк лабораторной работы 3. Там же зарисовывается вид образцов до испытаний.

Чугунный образец 2 (рис.9) ставится на нижнюю подушку пресса и прижимается верхней плитой 1 с помощью маховика. Действуя рукояткой, приводят в движение поршень 3, следя при этом за показаниями манометра 4. Чугунный образец доводится до предельного состояния, при котором появляются трещины, и нагрузка начинает падать. Величина максимальной нагрузки записывается в бланк. После заметного падения нагрузки образец разгружают. Подняв верхнюю плиту и сняв образец, надо установить вид разрушения и положение площадок, по которым произошло разрушение. Зарисовать вид образца после испытания.

Испытание деревянных образцов проводится на настольном прессе (рис.10). Кубик из дуба сжимается вдоль волокон, из сосны - один вдоль волокон, другой - поперек волокон. Порядок проведения опытов аналогичен предыдущему.

При сжатии деревянного кубика поперек его волокон сначала может наблюдаться быстрый прирост нагрузки при небольших деформациях. Это имеет место до предела пропорциональности. Затем деформации начинают расти весьма быстро при малом приросте нагрузки. Образец сплющивается и при достаточной влажности и отсутствии пороков в древесине (сучки, косослой) может не разрушиться. В этом случае за разрушающую нагрузку принимают ту, которая вызывает укорочение высоты кубика на $1/3$ начального размера. Эту нагрузку и записывают в бланк. Если разрушение произошло, то устанавливают его характер и отмечают в бланке лабораторной работы.

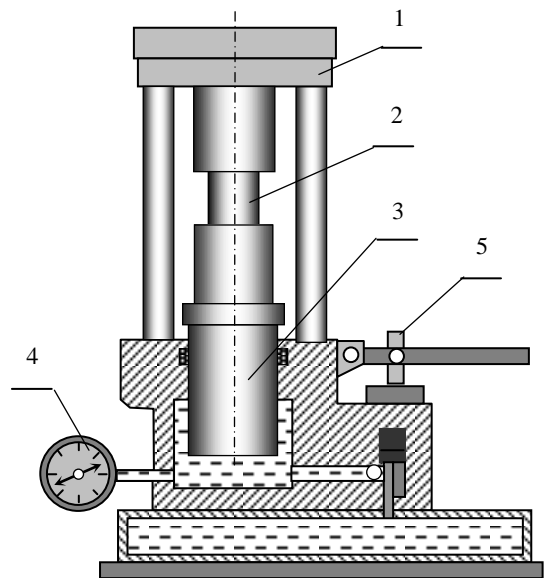


Рис.10

Обработка результатов испытания

По установленным в результате испытаний разрушающим нагрузкам (действительным или условным) и площадям поперечных сечений образцов вычисляются пределы прочности на сжатие.

Пределы прочности дерева, полученные при сжатии вдоль и поперек волокон, необходимо сравнить между собой и сделать вывод о плотности дерева при различном направлении нагрузки.

Внимательно рассмотреть все испытанные образцы и зарисовать их после опыта, отметив преимущественное направление трещин и видимых линий сдвигов.

Контрольные вопросы

- 1) Каковы признаки разрушения чугунного образца ?
- 2) Чем объясняется появление бочкообразной формы чугунного образца при сжатии ?
- 3) Какие материалы называются анизотропными ?
- 4) Соблюдается ли закон Гука для чугуна ?
- 5) Для каких материалов пределы прочности на сжатие и растяжение различны ?
- 6) Какое различие в характере разрушения чугуна и древесины при сжатии ?
- 7) Какой предел прочности сосны при сжатии больше - при действии нагрузки вдоль или поперек волокон ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА СДВИГ

Цель работы - определение предела прочности стали на срез и предела прочности дерева на скалывание.

Краткие теоретические сведения

В металлических конструкциях машин и сооружений многие детали в процессе работы подвергаются деформации сдвига, или среза. К ним можно отнести заклепки, крепежные болты, соединительные пальцы муфт, оси шарнирных соединений и др.

Детали в зависимости от числа срезов подразделяют на односрезные и многосрезные. Методика расчета на срез основана на теории чистого сдвига. Известно, что в случае чистого сдвига теоретическая величина допускаемого напряжения на срез для малоуглеродистой стали составляет примерно 60-80% от допускаемого напряжения на растяжение (согласно энергетической теории прочности). Однако на практике в деталях, работающих на срез, кроме касательных напряжений сдвига, возникают и нормальные напряжения изгиба и смятия. Следовательно, материал таких деталей находится в более сложных

условиях работы, чем при чистом сдвиге, а поэтому назначение допускаемых напряжений в таких случаях должно базироваться на экспериментальных данных, полученных при испытании на прочность целых узлов или отдельных срезных деталей.

Для правильного проектирования узлов со срезными деталями необходимо знать, прежде всего, величину предела прочности материала детали на срез. Определением этой величины и займемся в настоящей лабораторной работе.

В процессе работы будем полагать, что при срезе возникают только касательные напряжения, равномерно распределенные по всей поверхности среза. Таким образом, сопротивление материала срезу оценивается условной характеристикой

$$\tau_B = \frac{P_B}{F_{cp}},$$

то есть отношением разрушающей нагрузки к площади среза.

Деревянные элементы конструкций соединяются между собой с помощью различных врубок. Этот вид соединений подлежит проверке на сдвиг, или скалывание, древесины вдоль волокон. Поэтому для расчета деревянных конструкций надо знать предел прочности древесины на скалывание. Распределение касательных напряжений при скалывании древесины вдоль волокон принимается равномерным. Тогда, зная разрушающую нагрузку P_e и площадь скалывания F_{ck} , определяют предел прочности дерева:

$$\tau_B = \frac{P_B}{F_{ck}}$$

Описание приспособлений для испытания

В данной работе испытание стали на срез производится по схеме штамповки листового материала. Приспособление для такого испытания представлено на рис.11. Оно состоит из опорной части 1 с прорезью, в которую вставляется образец в виде пластинки 2 толщиной δ и шириной $b > d$, и пуансона 3 диаметром d . Чтобы предотвратить при испытании смятие верхнего торца пуансона, на него надевается съемная головка 4.

На рис.12 показано приспособление с образцом для испытания дерева на скалывание. Приспособление состоит из нижней опорной части 1 с глубоким вырезом и верхней части с более мелким вырезом 3, между которыми вставляется сосновый образец 2 с двумя поверхностями скалывания размерами a и b .

Испытание стали на срез и сосны на скалывание производится на настольном гидравлическом прессе (рис.10).

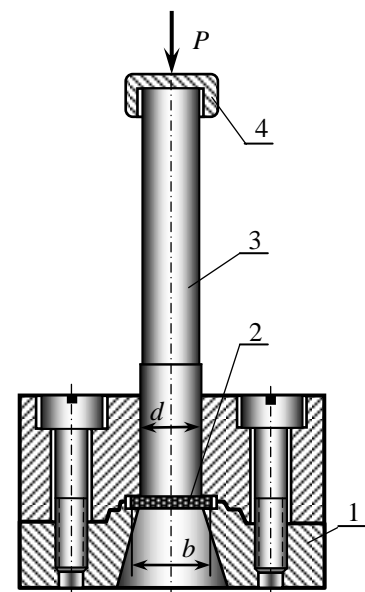


Рис.11

Проведение испытания

Перед испытанием толщину пластинки и диаметр пуансона измеряют штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Затем пластинку 2 помещают в сквозную прорезь опорной части 1 (или матрицы, рис.11), пуансон 3 вставляют в направляющее отверстие и надевают головку 4. Все приспособление в сборе зажимают между плитами пресса.

При помощи рукоятки насоса подкачивают масло, под поршень пресса и следят за показаниями манометра. Момент продавливания образца обычно сопровождается глухим ударом и резким падением давления. Записав в бланк работы величину максимального (разрушающего) давления, продолжают поднимать поршень до тех пор, пока пуансон вытолкнет выдавленную круглую пластинку из приспособления, после чего возвращают поршень в исходное положение и вынимают приспособление.

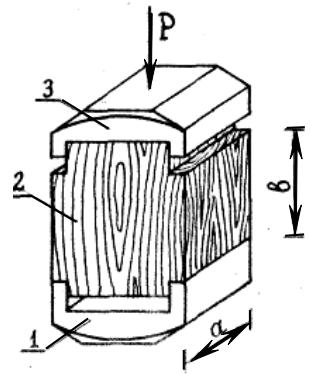


Рис. 12

Для испытания дерева на скалывание собирают приспособление с образцом (рис.12), который после измерения должен быть вставлен по центру приспособления так, чтобы между горизонтальной плоскостью выреза опорной плиты 1 и нижним торцом испытываемого образца 2 был зазор, а горизонтальная плоскость выреза верхней плиты 3 плотно прилегала к верхнему торцу образца. При этом между выступами верхней плиты 3 и верхними вырезами образца 2 обеспечивается необходимый зазор. После этого приспособление в сборе зажимают между плитами пресса. Образец нагружается до разрушения, которое сопровождается характерным треском. Показание манометра (давление) в момент разрушения образца записывается в бланк работы.

Обработка результатов испытания

Так как испытания проводились на настольном прессе (рис.10), площадь поршня которого $F_n=26,4 \text{ см}^2$, то разрушающая нагрузка получится как равнодействующая давления η на поршень:

$$P_{max} = F_n \cdot \eta$$

Для определения пределов прочности на сдвиг надо вычислить площадь среза стального образца и площадь скалывания соснового.

Площадь среза стального образца представляет собой боковую поверхность штампованной круглой пластинки диаметром d и высотой δ :

$$\tau_{cp} = \pi \cdot \delta \cdot d$$

а площадь плоскостей скалывания соснового образца равна удвоенному произведению размеров a и b (рис.12), то есть

$$F_{ск} = 2 \cdot a \cdot b.$$

Разделив соответствующие разрушающие нагрузки на эти площади, получим пределы прочности стали и сосны на сдвиг. Результаты всех вычислений вписываются в бланк.

Контрольные вопросы

- 1) Какое напряженное состояние называется чистым сдвигом?
- 2) Какое различие между сдвигом, срезом и скалыванием?
- 3) Сформулируйте закон Гука при чистом сдвиге.
- 4) Как определяется величина разрушающей нагрузки?
- 5) Что называется абсолютным и относительным сдвигом?
- 6) От чего зависит модуль упругости второго рода (модуль сдвига)?
- 7) Приведите примеры деформаций сдвига.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ СТАЛИ ГО БРИНЕЛЛЮ

Цель работы - определение значения твердости стали по Бринеллю и предела прочности по числу твердости.

Краткие теоретические сведения

Твердостью называется способность материала сопротивляться проникновению в него других тел. Если надавить одним твердым телом на поверхность другого твердого тела, то в месте контакта возникнут деформации смятия, причем более твердое тело деформируется меньше, а менее твердое больше.

Между твердостью материала и пределом прочности существует определенная зависимость. Следовательно, испытав, например, сталь на твердость, можно судить о ее пределе прочности. Испытания на твердость просты, занимают мало времени и не требуют разрушения образца, поэтому они часто проводятся для ориентировочной оценки прочности испытываемой стали в производственных условиях.

Испытания на твердость проводят непосредственно на детали. Единственным требованием, предъявляемым к объекту испытания, является соблюдение чистоты и гладкости поверхности, на которой производятся испытания на твердость.

В данной работе используется наиболее распространенный метод испытания металлов на твердость по Бринеллю. Сущность этого метода заключается в том, что в испытываемый материал постепенно возрастающей нагрузкой вдавливается стальной шарик определенного диаметра (рис.13) с выдержкой в течение некоторого времени.

В результате вдавливания на поверхности испытываемого материала остается отпечаток в виде шарового сегмента. Отношение нагрузки к площади сферической поверхности полученного отпечатка называется числом твердости по Бринеллю, то есть

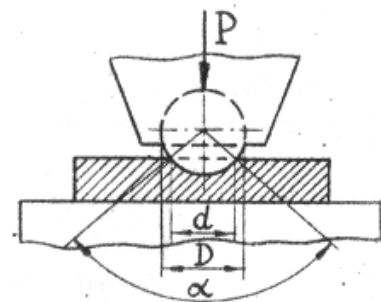


Рис. 13

$$HB = P / F_c.$$

F_c - площадь сферической поверхности отпечатка определяется по формуле:

$$F_c = \pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}) / 2$$

Следовательно, искомое число твердости по Бринеллю можно вычислить по формуле:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где D - диаметр вдавливаемого шарика; d - диаметр отпечатка, который замеряется с помощью микроскопа, дающего увеличение в 10 раз. Для облегчения определения числа твердости HB составлены таблицы, в которых число твердости по Бринеллю представлено в зависимости от величин d , D и P (например, табл.2).

Таблица 2

Значения чисел твердости по Бринеллю (HB)

Диаметр отпечатка d , мм, при $d = 10$ мм, или $2d$ при $d = 5$ мм, или $4d$ при $d =$ 2,5 мм.	Число твердости по Бринеллю HB , МПа, при нагрузке $P(H)$, равной при d , мм		
	$300D^2$	$100D^2$	$25D^2$
3,2	3630	1210	303
3,6	2850	950	237
4,0	2290	763	191
4,4	1870	624	156
4,8	1560	519	130
5,2	1310	437	109
5,6	1110	371	92,7
6,0	955	318	79,6

Чем тверже металл, тем больше число твердости по Бринеллю.

К недостаткам испытаний на твердость по Бринеллю следует отнести невозможность измерения твердости очень твердых и очень мягких материалов. Поэтому ГОСТ 9012-59 устанавливает предел изменений диаметра отпечатка $0,2D \leq d \leq 0,6D$. Для получения одинаковых результатов испытаний на твердость при использовании шариков различных диаметров (ГОСТ допускает применение шариков диаметром 10, 5 и 2,5 мм) необходимо, чтобы угол вдавливания α (рис. 13) оставался неизменным при различных D .

Диаметр шарика выбирается в зависимости от толщины испытываемой детали и материала. Чем тоньше деталь в месте испытаний, тем меньше должен быть диаметр шарика. В противном случае глубина погружения шарика будет

зависеть не только от твердости испытываемой детали, но и от твердости столика прессы, на котором лежит деталь.

Диаметр шарика, величина нагрузки и время испытаний различных металлов на твердость в зависимости от НВ устанавливается по ГОСТу 9012-59 (табл.3).

Обозначение твердости НВ должно сопровождаться индексами, указывающими на условия проведения опыта. Например, НВ 5(7,5)30-3000 расшифровывается так: твердость по Бринеллю при вдавливании стального шарика диаметром $D = 5$ мм силой $P = 7,5$ кН в течение 30 с равна 3000 МПа.

Между числом твердости по Бринеллю НВ и пределом прочности σ_e при разрыве стали существует довольно устойчивая зависимость:

$$\sigma_e = (0,3 - 0,36) \text{ НВ.}$$

Так часто определяют предел прочности, если почему-либо нельзя изготовить образцы для определения σ_e при разрыве.

Таблица 3

Условия испытаний различных металлов на твердость

Материал	Интервал НВ, МПа	Минимальная толщина детали, мм	Соотношения P (Н) и d , мм	Диаметр шарика d , мм	Нагрузка P , кН	Выдержка под нагрузкой, с
Черные металлы	1400 – 4500	от 6 до 3 от 4 до 2 менее 2	$P = 300 D^2$	10,0 5,0 2,5	30,000 7,500 1,875	10
Черные металлы	1400	более 6 от 6 до 3 менее 3	$P = 100 D^2$	10,0 5,0 2,5	10,000 2,500 0,625	10
Цветные металлы	1300	от 6 до 3 от 4 до 2 менее 2	$P = 300 D^2$	10,0 5,0 2,5	30,000 7,500 1,875	30
Цветные металлы	350 – 1300	более 6 от 6 до 3 менее 3	$P = 100 D^2$	10,0 5,0 2,5	10,000 2,500 0,625	30
Цветные металлы е	80 - 350	более 6 от 6 до 3 менее 3	$P = 25 D^2$	10,0 5,0 2,5	2,500 0,625 0,156	60

Описание прессы Бринелля

Пресс Бринелля (рис.14) имеет механический привод.

Образец помещают на столик, 1 и вращением маховика 2 доводят до со-

прикосновения со стальным закаленным шариком 3. Вращением рукоятки 4 через систему зубчатых и червячных передач движение передается на шатун 5, который опускается и создает возможность грузу 6 через систему рычагов 7 передать давление на шарик 3. Шарик вдавливается в образец и образует отпечаток. Нагружение, выдержка под нагрузкой и снятие нагрузки происходит за период вращения рукоятки до совершения одного полного цикла шатуном 5.

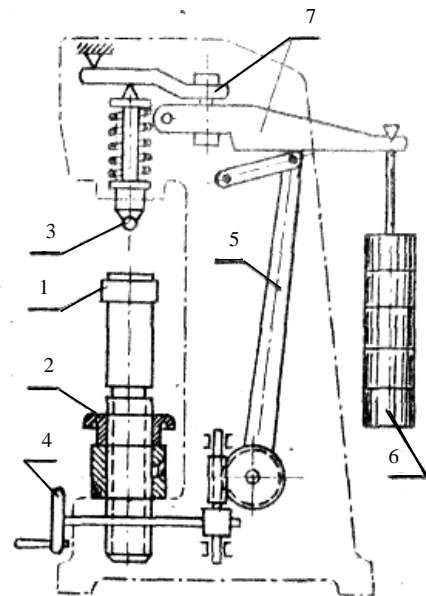


Рис.14.

Проведение испытания

Перед проведением испытания уточняют по табл.3 исходные данные, после чего устанавливают диаметр шарика и величину нагрузки. В настоящей работе определяется твердость стального образца (диска) толщиной 10 мм, поэтому допустимо применение шарика любого диаметра. Принимаем диаметр шарика 5 мм, а нагрузку 7,5 кН. Установив образец на стол пресса, производим испытание так, как указано в предыдущем пункте.

После получения первого отпечатка образец передвигают и вновь при том же давлении выдавливают на поверхности образца еще один - два отпечатка. Центр отпечатка должен находиться от края образца на расстоянии не менее диаметра шарика, а от центра соседнего отпечатка - на расстоянии не менее двух диаметров шарика. **Обработка результатов испытания**

После получения отпечатков (лунок) надо измерить их диаметры, Для повышения точности определения числа твердости измерение диаметра каждого отпечатка производится дважды по двум взаимно перпендикулярным направлениям, и диаметр лунки определяется как среднее арифметическое из двух измерений. Диаметр лунок измеряется специальным микроскопом с десятикратным увеличением.

Вычислив средний диаметр всех отпечатков, расчетом (см.П.3) или по табл.2 находим число твердости по Бринеллю НВ. После этого определяем приближенное значение предела прочности стали, учитывая переводной коэффициент (см.П.3).

Результаты записываются в бланк лабораторной работы 5, 6.

Контрольные вопросы

- 1) Что такое твердость?
- 2) Что называется числом твердости?
- 3) Как вычисляется твердость по Бринеллю?
- 4) Как выбирается величина нагрузки при испытании?
- 5) Как замеряется диаметр отпечатка на образце?
- 6) Как зависит предел прочности стали от числа твердости?
- 7) Какова размерность числа твердости?

8) Расшифруйте запись НВ 5(7,5)30-3000.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 ИСПЫТАНИЕ НА КРУЧЕНИЕ СТАЛЬНОГО КРУГЛОГО ТОНКОСТЕННОГО ВАЛА

Цель работы - определение касательных напряжений и углов закручивания опытным путем и сравнение полученных результатов с теоретическими.

Краткие теоретические сведения

Кручением называется деформация стержня под действием пар сил, лежащих в плоскостях, перпендикулярных оси стержня, и находящихся в равновесии. Кручение возникает в валах, винтовых пружинах и других элементах конструкций.

Основные допущения, принятые в теории кручения круглых валов, выполненных из однородного упругого материала:

1) гипотеза плоских сечений: поперечные сечения, плоские до кручения, остаются плоскими и при кручении, поворачиваясь одно относительно другого на некоторый угол φ (угол закручивания);

2) ось вала при кручении не искривляется;

3) расстояния между поперечными сечениями не изменяются, то есть отсутствуют продольные деформации волокон вала;

4) радиусы поперечных сечений вала остаются прямыми, поворачиваясь на некоторый угол φ (угол закручивания);

5) в поперечных сечениях вала возникают только касательные напряжения.

Таким образом, кручение можно рассматривать как чистый сдвиг, вызываемый поворотом одного сечения относительно другого. При этом в поперечных сечениях вала возникают касательные напряжения:

$$\tau = \frac{M_k}{J_p} \rho,$$

где τ – касательное напряжение в точке поперечного сечения, находящейся на расстоянии ρ от оси вала; J_p – полярный момент инерции поперечного сечения вала; M_k – крутящий момент в рассматриваемом сечении. Полярный момент инерции кольцевого сечения вала

$$J_p = \frac{\pi D^4}{32} \left(1 - \frac{d^4}{D^4} \right),$$

где D и d – соответственно наружный и внутренний диаметры поперечного сечения полого вала.

Максимальные касательные напряжения возникают на наружной поверхности вала, где $\rho_{\max} = D/2$:

$$\tau_{\max} = \frac{M_k}{W_p},$$

где $W_p = \frac{J_p}{\rho_{\max}} = \frac{\pi D^3}{16} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)$ - полярный момент сопротивления кольцевого сечения вала.

Полагая в формулах для определения геометрических полярных характеристик $d=0$, можно получить соответствующие выражения для сплошного круглого вала.

Углы закручивания при постоянном на длине l крутящем моменте определяются по формула:

$$\varphi = \frac{M_k l}{GI_p},$$

где

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}$$

- модуль сдвига (модуль упругости второго рода); E - модуль Юнга; μ - коэффициент Пуассона материала вала. Для стали при $E = 2 \cdot 10^5$ МПа и $\mu = 0,25$ $G = 8 \cdot 10^4$ МПа.

Описание установки и приборов

Схема экспериментальной установки для испытания полого вала показана на рис.15.

Вал кольцевого сечения защемлен одним концом, второй конец опирается на шарнирно подвижную опору для исключения изгиба. От нагрузки P , приложенной к рычагу 5, полый вал 1 испытывает деформацию кручения моментом $M_k = PR$ (R - плечо силы P , то есть расстояние, от линии действия нагрузки до центра тяжести поперечного сечения вала).

Для определения угла закручивания надо измерить перемещение Δ подвижного рычага 4. Тогда угол закручивания при упругих деформаци-

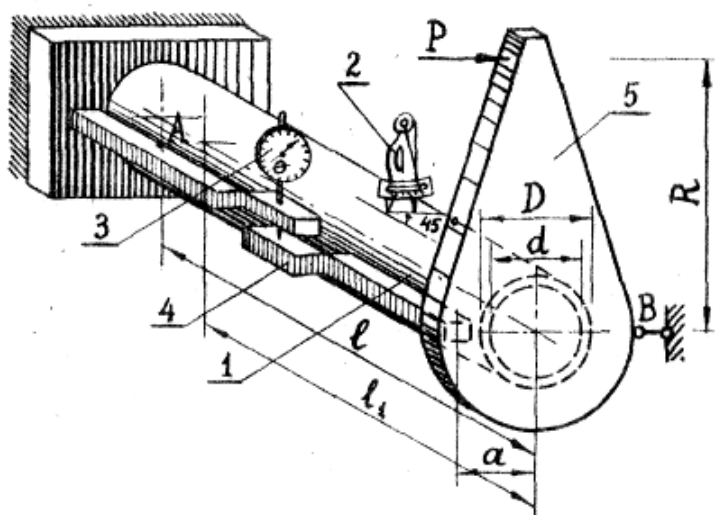


Рис.15

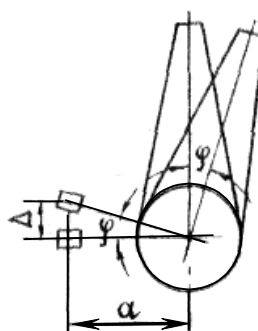


Рис. 16

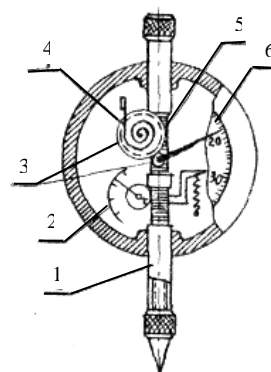


Рис. 17

ях может быть найден как отношение этого перемещения к плечу a измерительного рычага 4 (рис.16):

$$\varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta}{a}.$$

Линейные перемещения измеряются стрелочным индикатором (рис.17). Для измерения перемещений индикатор устанавливается неподвижно и штифтом 1 опирается в точке, перемещение которой определяется по направлению штифта 1. При перемещении точки соприкосновения конец штифта следует за ней, так как штифт при помощи спиральной пружины 4 все время прижат к этой точке. В верхней части штифта имеется зубчатая рейка 5 и шестерни 3, которые преобразуют поступательное движение штифта во вращательное движение стрелки-указателя, перемещающейся по шкале 6, разбитой на 100 делений (цена одного деления равна 0,01 мм). Соотношения размеров зубчатой рейки и системы шестерен таковы, что перемещению штифта на 1 мм соответствует один полный оборот стрелки по большой шкале 6. Для отсчета целых миллиметров имеется малая шкала 2. Величина поступательного перемещения штифта равна 10 мм.

При чистом сдвиге в квадратном элементе главные напряжения, равные по величине приложенным касательным (то есть $\sigma_1 = \tau$, $\sigma_2 = -\tau$), возникают в площадках, наклоненных под углом 45° к исходным площадкам (рис.18). Относительная деформация по направлению σ_1 определяется по обобщенному закону Гука:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \mu \sigma_2}{E} = \frac{\tau(1 + \mu)}{E},$$

откуда $\tau = \frac{E\varepsilon}{1 + \mu}$, где $\varepsilon = \frac{\Delta s}{s}$ – относительная деформация, s – база тензомера (расчетная длина волокна); Δs – абсолютная деформация волокна по направлению σ_1 .

Абсолютная деформация исследуемого волокна измеряется с помощью тензомера 2, поставленного под углом 45° к оси вала (рис. 15). В данной работе применяется рычажный тензомер *ТР* (рис.19),

Основанием прибора является рама 1. В нижней части рамы 1 жестко закреплен стальной нож 2. Рычаг 3 жестко соединен с ромбовидным ножом 4. Расстояние между остриями ножей называется базой тензомера ($s = 20$ мм). Прибор прикрепляется к испытываемому валу специальной струбциной так, чтобы ножи 2 и 4 с небольшой силой надавливали на поверхность вала. При деформации вала расстояние между ножами 2 и 4 изменяется, и рычаг 3 поворачивается вокруг верхнего ребра ножа 4. К верхнему концу рычага 3 и к выступу на указательной стрелке 5 пружиной 6 прижат анкер 7.

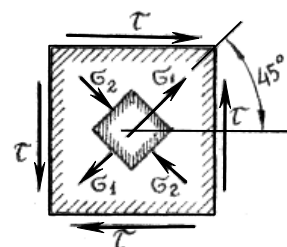


Рис. 18

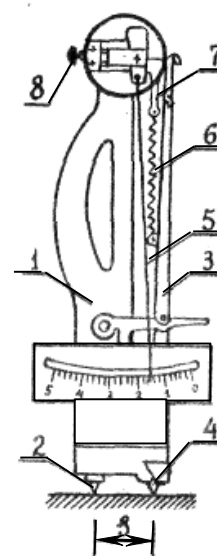


Рис. 19

Движение рычага 3 через анкер 7 передается указательной стрелке 5. Тензомер ТР дает увеличение деформаций в 1000 раз, то есть если стрелка отклонилась на одно деление, то абсолютное перемещение призмы 4 (на базе 20 мм) составит $\Delta s = 0,001$ мм. Для повышения точности отсчетов шкала снабжена прорезью с зеркалом: при снятии отсчетов надо, чтобы стрелка и ее отражение совпали.

Проведение испытания

Так как испытание должно проводиться в пределах упругих деформаций, то предварительно надо определить максимальную нагрузку P_{\max} при которой напряжения не превышают предела пропорциональности. Полагая, что $\tau_n = 0,6\sigma_n$ ($\sigma_n = 200$ МПа), получим:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{k \max}}{W_p} = \frac{P_{\max} \cdot R}{W_p} \leq 0,6\sigma_n.$$

Отсюда $P_{\max} \leq 0,6\sigma_n W_p / R$.

Установив с помощью винта 8 (рис.19) начальный отчет на шкале тензометра (не обязательно нуль) и приняв интервал нагрузки $\Delta P = 0,5$ кН, производим пять ступеней нагружения вала. Показания приборов (тензометра и индикатора) при каждом нагружении вала записываются в таблицу наблюдений.

Обработка результатов испытания

Вычисляются средние разности отсчетов по тензометру Δn_{cp} и индикатору Δn_{cp1} . Определяется относительная деформация волокна под углом 45° к оси вала

$$\varepsilon_{on} = \frac{\Delta n_{cp}}{sK_T},$$

где $K_m = 100$ – коэффициент увеличения тензометра.

По формуле

$$\tau_{on} = \frac{E\varepsilon_{on}}{1 + \mu}$$

находится касательное напряжение на поверхности вала.

Опытная величина угла закручивания

$$\varphi_{on} = \frac{\Delta n_{1cp} \cdot K_u}{a},$$

где $K_u = 0,01$ мм - цена деления шкалы индикатора; $a = 50$ мм – плечо измерительного рычага (рис.15, 16) Затем вычисляются теоретические значения касательного напряжения и угла закручивания по формулам:

$$\tau_m = \frac{M_k}{W_p} = \frac{\Delta P \cdot R}{W_p};$$

$$\varphi_m = \frac{M_k l}{GJ_p} = \frac{\Delta P \cdot R \cdot l}{G \cdot J_p}$$

Делается сравнение опытных величин с теоретическими. Результаты всех вычислений заносятся в бланк работы.

Контрольные вопросы

- 1) Что называется кручением?
- 2) Какое напряженное состояние испытывает элемент при кручении?
- 3) Назовите гипотезы теории кручения круглого стержня,
- 4) Какие напряжения возникают в поперечном сечении круглого стержня при кручении и как они определяются?
- 5) Возникают ли при кручении нормальные напряжения?
- 6) Чему равен полярный момент инерции поперечного сечения сплошного и полого валов?
- 7) Что называется полярным моментом сопротивления? В каких единицах он измеряется?
- 8) Как подобрать диаметр вала из условия прочности?
- 9) Как производится расчет вала на жесткость?
- 10) Напишите зависимость между тремя упругими постоянными изотропного материала.

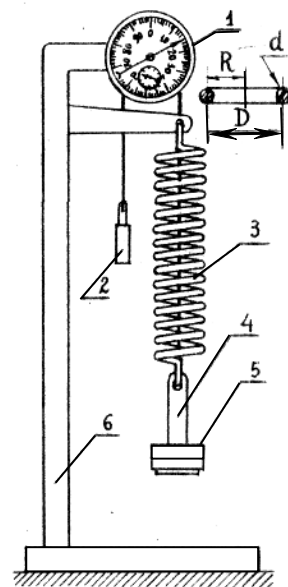
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 ИСПЫТАНИЕ НА РАСТЯЖИШЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВИНТОВОЙ ПРУЖИНЫ

Цель работы - определение модуля сдвига G из растяжения цилиндрической винтовой пружины в пределах упругих деформаций.

Краткие теоретические сведения

Обычно формула для определения осадки (удлинения) винтовой пружины диаметром D выводится при учете действия только крутящего момента $M_k = PD/2$. Поэтому гипотезы, положенные в основу теории кручения, принимаются и при выводе теоретического значения осадки винтовой пружины. Влияние поперечной силы, вызывающей перемещение от взаимного сдвига сечений, не учитывается. Не принимается во внимание также влияние как изгибающего момента, так и продольных усилий, возникающих за счет наклона витков.

Величина осадки пружины с малым шагом



$$\lambda = \frac{4PR^3n}{Gr^4},$$

где P – осевая сила, действующая на пружину; R – средний радиус витка пружины; r – радиус поперечного сечения проволоки пружины; n – число рабочих витков; G – модуль упругости материала при сдвиге.

Описание установки

Установка для испытания пружины (рис.20) состоит из штатива 6, на котором крепится прогибомер 1 и пружина 3. Одним концом пружина крепится к жесткой опоре, а к другому ее концу крепится подвеска у, для установки грузов 5. К нижнему концу пружины прикреплена нить с натяжным грузом 2, которая перекинута через рабочий шкив прогибомера. Величина перемещения нижнего конца пружины под действием груза 5 замеряется по шкалам прибора.

Прогибомер имеет два отсчетных устройства: малую шкалу, разделенную на 10 частей ценой деления 10 мм, и большую шкалу, разбитую на 100 делений ценой 0,1 мм. Таким образом, наибольшая величина измеряемых перемещений, отсчитываемая непосредственно по прогибомеру, равна 100 мм. При превышении этого значения прибор продолжает работать, но надо отсчитывать количество полных оборотов его рабочего шкива, соответствующих каждому перемещению в 100 мм.

Проведение испытания

После обмера пружины (определение среднего диаметра ее витков, диаметра проволоки и количества витков) она крепится верхним концом к жесткой опоре установки (рис.20). К нижнему концу на прикрепленную подвеску устанавливают начальный груз, например, 5 Н, при котором делается первый отсчет по прогибомеру. Затем увеличивают нагрузку равными ступенями $\Delta P=5$ Н и после каждого прибавления нагрузки фиксируют осадку пружины. Такой порядок приложения нагрузки позволяет проверить линейную зависимость между нагрузками и перемещениями. Снятые по шкалам прогибомера отсчеты записываются в бланк лабораторной работы.

Обработка результатов испытания

Вычисляется средняя арифметическая разность отсчетов $\Delta\lambda$ по прогибомеру - это и есть удлинение пружины (осадка).

Зная осадку, по формуле $G_{on} = \frac{4\Delta PR^3n}{\Delta\lambda r^4} = \frac{8\Delta PD^3n}{\Delta\lambda d^4}$ можно определить опытное значение модуля сдвига.

Теоретическое значение модуля сдвига $G_m = \frac{E}{2(1+\mu)}$, где $\mu = 0,25$ - коэффициент Пуассона стали.

Расхождение между опытным и теоретическим значениями модуля сдви-

га в процентах находится из соотношения $\frac{G_m - G_{om}}{G_m} 100\%$.

Результаты вычислений записываются в бланк работы.

Контрольные вопросы

- 1) Как вычисляются напряжения в цилиндрической винтовой пружине? На каких допущениях основана формула для вычисления касательных напряжений?
- 2) В каких точках поперечного сечения витка пружины возникают максимальные касательные напряжения?
- 3) Из каких соображений определяется осадка пружины? Чему она равна?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 ИСПЫТАНИЕ БАЛКИ НА ДВУХ ОПОРАХ С КОНСОЛЯМИ НА ИЗГИБ

Цель работы - определение опытным путем напряжений и прогиба посередине балки и сравнение их с теоретическими значениями.

Краткие теоретические сведения

Деформация плоского поперечного изгиба вызывается силами, лежащими в плоскости симметрии поперечного сечения балки и направленными перпендикулярно к ее оси. Ось балки располагается в плоскости действия нагрузки.

Нормальные напряжения в точках поперечного сечения балки как при чистом, так и при поперечном изгибе определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{M}{J_z} y,$$

где M - изгибающий момент в данном сечении балки; J_z – момент инерции поперечного сечения балки относительно нейтральной оси z ; y – расстояние от нейтральной оси до уровня волокон, в которых определяются напряжения.

Из этой зависимости видно, что нормальные напряжения изменяются по высоте сечения балки по линейному закону и достигают наибольших значений в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси. Вычисление максимальных нормальных напряжений производится по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_z},$$

где $W_z = \frac{J_z}{y_{\max}}$ - момент сопротивления поперечного сечения балки относительно нейтральной оси z .

Величина прогиба испытываемой балки посередине пролета может быть определен либо методом начальных параметров, либо по правилу Верещагина, либо с помощью других известных методов.

Описание установки

Стальная балка 1 (рис.21) квадратного поперечного сечения $b \times h = 1,4 \times 1,4 \text{ см}^2$ длиной $4a$ ($a = 25 \text{ см.}$) с двумя консолями установлена на двух шарнирных опорах 5. Нагрузки прикладываются к консолям длиной a с помощью подвесок 4. При симметричной нагрузке участок балки между опорами испытывает чистый изгиб. Поэтому рычажный тензометр 3 для измерения деформации установлен в пролете балки. С помощью индикатора 2 определяется прогиб посередине балки, то есть в месте установки индикатора. Спасание тензометра (рис.19) и индикатора (рис.17) приведено в лабораторной работе 6.

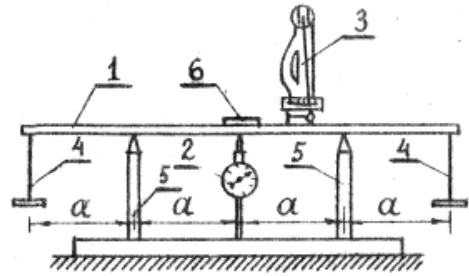


Рис. 21

Проведение испытания

Перед испытанием вычисляют наибольшую величину нагрузки, которая может быть приложена к балке, не вызывая напряжений больше допускаемых. Из условия прочности

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} = \frac{P \cdot a}{W_z} \leq [\sigma]$$

находится допускаемая нагрузка:

$$[P] \leq \frac{[\sigma]W_z}{a},$$

где $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$ – допускаемое напряжение для стали Ст.3;

$$W_z = \frac{bh^2}{6}$$

– осевой момент сопротивления поперечного сечения балки.

После определения $[P]$, принимая интервал нагрузки $\Delta P = 10 \text{ Н}$, загружают балку до $P = 50 \text{ Н}$. При каждой ступени нагрузки фиксируют показания тензометра n_t и индикатора Π и вносят их в таблицу наблюдений. После этого балку следует разгрузить.

Обработка результатов испытания

Так как при изгибе принята гипотеза о ненадавливании волокон, то напряжения определяют по формуле линейного напряженного состояния

$$\sigma_{on} = E\varepsilon = E\Delta s/s,$$

где $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ – модуль упругости стали; s – база тензометра (длина волокна, деформацию которого измеряют),

Продольная деформация Δs (удлинение), полученная опытным путем:

$$\Delta s = \Delta n_T / K_T,$$

где Δn_T – среднее значение разности отсчетов по тензомеру; $K_T=1000$ – коэффициент увеличения тензометра.

Опытное значение прогиба посередине балки вычисляют по среднеарифметическому приращению показаний индикатора, умножая его на цену деления индикатора:

$$f_{on} = \Delta n_u K_u,$$

где Δn_u – средняя разность отсчетов по индикатору; $K_u = 0,001$ см – цена деления индикатора.

Теоретическое значение напряжений определяется по формуле

$$\sigma_m = M/W_z = \Delta Pa/W_z,$$

а прогиб определяют любым известным методом, например, по правилу Верещагина. Для этого строят эпюру изгибающих моментов от единичной силы, приложенной посередине балки/ Так. как в данном случае грузовая эпюра изгибающих моментов в пролете имеет один участок, а единичная - два, то удобнее площадь единичной эпюры умножить на ординату под ее центром тяжести на грузовой эпюре:

$$f_m = \frac{a}{2} \cdot \frac{2a}{2} \cdot \frac{\Delta Pa}{EI_z} = \frac{\Delta Pa^3}{2EI_z}.$$

Затем сравнивают полученные опытным путем напряжение и прогиб с их теоретическими значениями, оценивая погрешность в процентах.

Все результаты записываются в лабораторный бланк.

Контрольные вопросы

- 1) Какая зависимость существует между изгибающим моментом и поперечной силой?
- 2) Что называется чистым изгибом?
- 3) Какие гипотезы принять при чистом изгибе?
- 4) По какой кривой изгибается балка при чистом изгибе?
- 5) Как изменяются нормальные напряжения по высоте сечения балки?
- 6) Что называется осевым моментом сопротивления поперечного сечения?
- 7) Напишите дифференциальное уравнение изогнутой оси балки.
- 8) Из каких условий определяются постоянные интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки ?
- 9) Как вычисляются прогибы по правилу Верещагина ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В КОНСОЛЬНОЙ БАЛКЕ ПРИ ИЗГИБЕ

Цель работы - определение опытным путем величины прогибов и углов поворота сечений балки и сравнение полученных результатов с теоретическими.

Краткие теоретические сведения

Под действием приложенной внешней нагрузки балка деформируется. Перемещения поперечных сечений балок при изгибе характеризуются двумя величинами: прогибом y и углом поворота сечения α . Определение прогибов и углов поворота можно выполнить одним из известных методов: аналитическим, методом начальных параметров, с помощью интеграла Мора или по правилу Верещагина.

Для консольной балки, изображенной на рис.22, прогиб в точке приложения нагрузки (то есть в точке B):

$$y_b = -\frac{P \cdot l_1^3}{3 \cdot E \cdot J_z},$$

а угол поворота в этой же точке

$$\alpha_B = \frac{P \cdot l_1^2}{2 \cdot E \cdot J_z},$$

где P - сила, приложенная в точке B ; l_1 - расстояние от заделки до точки B ; E - модуль упругости материала балки; J_z - момент инерции поперечного сечения балки относительно нейтральной оси z . Эти формулы могут быть получены любым из перечисленных выше методов.

Описание установки

Экспериментальное определение перемещений производится на установке, схема которой показана на рис.22,а.

Установка состоит из консольной балки длиной l , жестко защемленной с одной стороны, двух индикаторов часового типа, подвески для нагрузки.

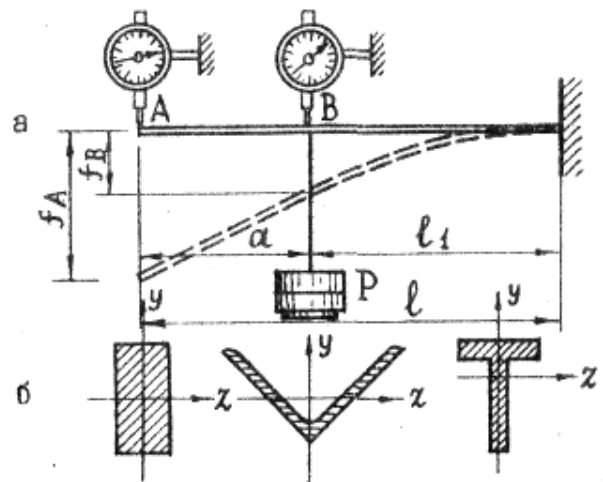


Рис. 22

Нагружение балки производится сосредоточенными грузами на расстоянии l_1 от заделки. Измерение перемещений осуществляется с помощью индикаторов, укрепленных в специальных держателях. Один индикатор установлен таким образом, чтобы получить прогиб на конце консоли в точке А, другой - в точке приложения нагрузки P (то есть в точке В).

На установке могут быть использованы балки различного поперечного сечения (рис.22,б). Они закрепляются так, чтобы главные оси сечения были расположены строго вертикально (ось y) и горизонтально (ось z). Это делается для обеспечения плоского изгиба балки.

Проведение испытания

После замера длин l_1 и a на балке (см. рис.22,а) и выбора интервала нагрузки $\Delta P=10$ Н загружают балку ступенями до $P=50$ Н. При каждой ступени нагрузки показания n_1 и n_2 индикаторов, установленных в точках А и В на балке, записывают в бланк работы.

После снятия всех отсчетов балку следует разгрузить.

Обработка результатов испытания

Вычислив средние значения разностей отсчетов по каждому индикатору Δn_1 и Δn_2 , определяют опытную величину прогиба в точке В и угол поворота сечения В:

$$f_B = K_u \cdot \Delta n_2; \alpha_B \approx \operatorname{tg} \alpha_B = \frac{f_A + f_B}{a} = \frac{K_u \cdot (\Delta n_1 - \Delta n_2)}{a},$$

где $K_u = 0,01$ мм - цена деления индикатора; Δn_1 (Δn_2) - средняя разность отсчетов по индикатору, установленному в точке А (В).

Определяют теоретические значения прогиба и угла поворота в сечении В, с которыми сравнивают соответствующие перемещения, полученные экспериментальным путем. Погрешность оценивается в процентах:

$$\frac{f_B^T - f_B^{ОП}}{f_B^T} \cdot 100\%; \frac{\alpha_B^T - \alpha_B^{ОП}}{\alpha_B^T} \cdot 100\%.$$

Контрольные вопросы

- 1) По какому направлению происходит перемещение поперечных сечений балки при плоском изгибе ?
- 2) Во сколько раз уменьшатся прогибы рассматриваемой балки, если нагрузку уменьшить в два раза ?
- 3) Как изменится прогиб в точке В, если расстояние l_1 увеличить в 2 раза ?
- 4) Какой вид имеет ось балки на участке АВ ?
- 5) Как следует прикладывать нагрузку, чтобы вызвать плоский изгиб балки ?
- 6) На заданном поперечном сечении балки укажите ось, в точках которой

нормальные напряжения равны нулю.

7) Как определить прогиб и угол поворота сечения В по правилу Верещагина ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10 ПРОВЕРКА ТЕОРЕМ О ВЗАИМНОСТИ РАБОТ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Цель работы - проверить опытным путем справедливость теорем о взаимности работ и перемещений.

Краткие теоретические сведения

Теорема о взаимности работ (теорема Бетти) относится к числу общих теорем сопротивления материалов. Она прямо вытекает из принципа независимости действия сил и применима ко всем упругим системам, для которых соблюдается этот принцип. Эта теорема может быть сформулирована следующим образом: работа силы P_1 на перемещении, вызванном силой P_2 , равна работе силы P_2 на перемещении, вызванном силой P_1 , то есть

$$P_1 \Delta_{12} = P_2 \Delta_{21},$$

где Δ_{ik} - перемещение от действия силы P_k по направлению силы P_i . Если положить $P_1 = P_2$, то получим частный случай - теорему о взаимности перемещений (теорему Максвелла):

$$\delta_{12} = \delta_{21}.$$

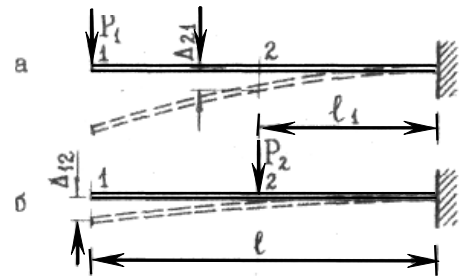


Рис. 23

Описание установки

Работа выполняется на установке, принципиальная схема которой представлена на рис.23 (индикаторы для измерения перемещений не показаны). Описание установки приведено в лабораторной работе 9.

Проведение испытания

Перед испытанием снимают показания первого и второго индикаторов при отсутствии нагрузки и заносят их в таблицу наблюдений. Затем балка нагружается силой $P_1 = 20$ Н, и показания второго индикатора записываются в бланк работы. (рис.23,а). Убрав силу P_1 , прикладывают силу $P_2 = 30$ Н, показания первого индикатора записывают в бланк.

Разгрузив балку, в точке 1 прикладывают силу $P_1 = 10$ Н, записывает показания второго индикатора. После разгрузки в точке 2 прикладывают силу $P_2 = 10$ Н, показания первого индикатора вносят в таблицу наблюдений (рис.23,б).

Обработка результатов испытания

С учетом цены деления индикаторов ($K_u = 0,01$ мм) по разностям отсчетов при загрузках и при отсутствии нагрузки определяют перемещения Δ_{21} , Δ_{12} , δ_{21} и δ_{12} и проверяют справедливость теорем о взаимности работ ($P_1 \Delta_{12} = P_2 \Delta_{21}$) и перемещений ($\delta_{21} = \delta_{12}$). Погрешность вычисляется в процентах.

Контрольные вопросы

- 1) Сформулируйте теорему о взаимности работ.
- 2) Сформулируйте теорему о взаимности перемещений.
- 3) Какое практическое приложение имеет теорема о взаимности перемещений ?