

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

**Методические указания
к лабораторным работам для студентов
механических и технологических специальностей
очной и заочной форм обучения**

Минск 2007

УДК 539.3/.6(076.5)
ББК 30.121
С 64

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

Составители:

А. В. Дорожко, С. С. Макаревич

Рецензент

доцент, кандидат технических наук *А. И. Сурус*

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2007 год.

Для студентов механических и технологических специальностей очной и заочной форм обучения.

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2008

ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление материалов является наукой экспериментально-теоретической. Нельзя производить расчеты элементов конструкций или деталей машин, не зная свойств материалов, из которых они сделаны. Любой расчет заканчивается подстановкой в полученные формулы конкретных механических характеристик материала, из которого сделана деталь. Для определения механических свойств материалов и их способности сопротивляться внешним силовым воздействиям необходимо проводить испытания образцов при различных видах деформирования.

В настоящем пособии дано описание лабораторных работ, которые проводятся с целью определения упругих и прочностных свойств материалов при простых видах деформирования: растяжении, сжатии, сдвиге, кручении и изгибе. Работы приведены в той последовательности, в какой они обычно выполняются студентами в лаборатории. Описание лабораторных работ включает: цель работы, необходимые теоретические предпосылки, протокол испытаний, порядок проведения опыта, необходимые пояснения к пользованию аппаратурой, способы обработки результатов и стандарты, в соответствии с которыми проводятся эксперименты.

Лабораторная работа № 1 ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы: изучение поведения материала при растяжении; определение характеристик прочности и характеристик пластичности.

Теоретические сведения

Испытания металлов на растяжение проводятся в соответствии с ГОСТ 1497–73. Для испытаний применяют образцы: цилиндрические – диаметром 3 мм и более (изготавливаются из цилиндрических заготовок), плоские – толщиной 0,5 мм и более (изготавливаются из листа). Форма цилиндрического образца показана на рис. 1.

Тонкую часть образца постоянного диаметра d_0 называют рабочей, ее длину обозначают l . Форма и размеры головок образцов, а также размеры переходных частей от головок к рабочей части не являются обязательными, а определяются способом крепления образцов в захватах испытательной машины.

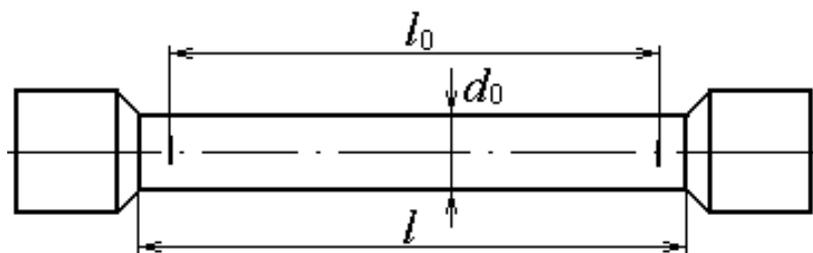


Рис. 1

Для определения остаточной деформации образца после разрыва предварительно выделяют метками расчетную длину l_0 , которая меньше рабочей на $(0,5-2)d_0$ (за счет этого уменьшается влияние деформации переходных зон у головок на деформацию выделенной части образца). Для стандартных цилиндрических образцов расчетная длина должна быть равна $l_0 = 10d_0$ (длинный образец) или $l_0 = 5d_0$ (короткий образец). Применение коротких образцов по экономическим соображениям предпочтительней.

При использовании плоских образцов (рис. 2) соотношение между длиной рабочей части и площадью ее поперечного сечения должно быть таким же, как для цилиндрических образцов.

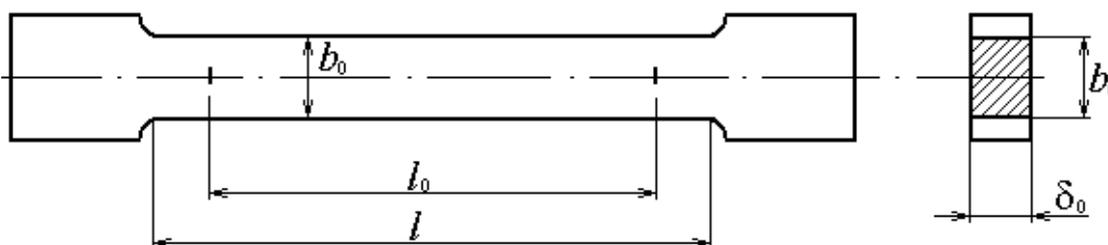


Рис. 2

Плоские образцы обычно используются при испытаниях на растяжение листовых неметаллических материалов и в зависимости от их толщины имеют рабочую часть шириной 20 или 30 мм.

Для испытаний образцов на растяжение используют разрывные машины. Такая машина при помощи двух захватов (зажимов) растягивает образец и при этом измеряет силу, с которой он сопротивляется деформации. Приблизительно деформация образца измеряется по перемещению подвижного захвата машины. Для измерения силы сопротивления образца используются динамометры (силоизмерители) с различным принципом действия: механические, гидравлические, электронные и др.

Современные машины, предназначенные для испытаний материалов на растяжение, снабжены устройством, автоматически записывающим диаграмму зависимости между удлинением и силой сопротивления образца. Такую диаграмму называют машинной.

В лаборатории кафедры для испытаний на растяжение обычно используется разрывная машина ИМ-4Р с предельной нагрузкой 40 кН. На этой машине диаграмма растяжения записывается на подвижную бумажную ленту. Перемещение ленты пропорционально удлинению образца, а отклонение пишущего узла – силе его сопротивления. Диаграмма строится в левой системе координат, т. е. абсолютное удлинение откладывается влево, а растягивающая сила – вверх. Растягивающая сила записывается по оси ординат в масштабе $m_f = 100$ Н/мм, т. е. 1 мм соответствует 100 Н, абсолютная деформация по оси абсцисс в масштабе $m_l = 25 : 1$, т. е. в 25 раз большей.

Характерная машинная диаграмма растяжения пластичного материала показана на рис. 3. В начале диаграммы имеется небольшой криволинейный участок aa_1 , обусловленный постепенным увеличением площади контакта головок образца и захватов машины, переходящий далее в прямую линию. Его исключают, продолжив прямую линию диаграммы Aa_1 до пересечения с осью абсцисс Δl . Полученную точку пересечения O считают началом диаграммы.

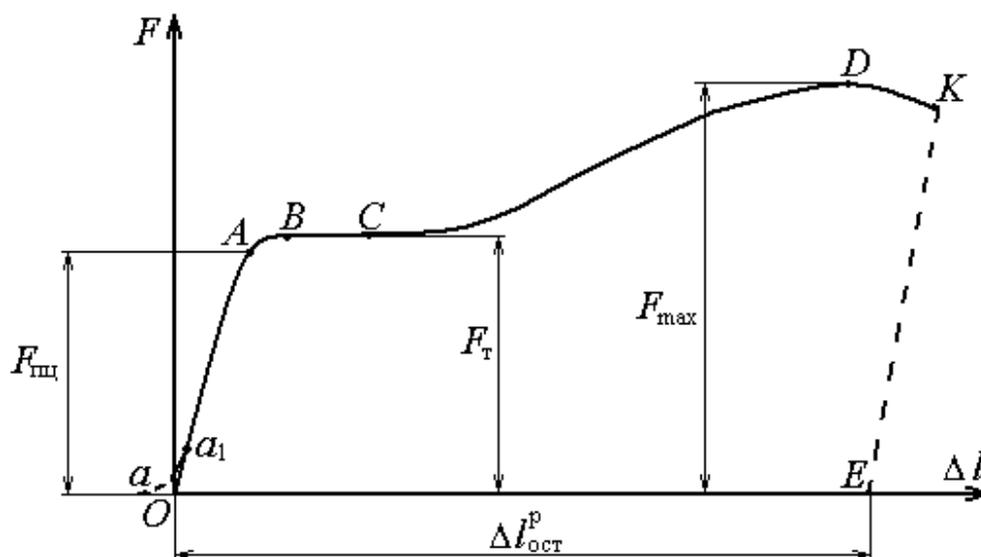


Рис. 3

Из диаграммы следует, что до некоторой силы $F_{пц}$, называемой усилием предела пропорциональности, соблюдается закон Гука, т. е. абсолютное удлинение прямо пропорционально силе ($\Delta l = Fl / EA_0$).

На диаграмме этот участок изображается прямой OA . До достижения усилия $F_{\text{пл}}$ в материале возникают только упругие деформации, исчезающие после снятия нагрузки. Пластические, т. е. остаточные, появляются при большей нагрузке. Ее минимальное значение называют усилием предела упругости F_y . Обычно F_y незначительно отличается от $F_{\text{пл}}$. Поэтому считают, что $F_y \approx F_{\text{пл}}$, и на машинной диаграмме определяют только одну силу $F_{\text{пл}}$.

После прямолинейного участка OA на диаграмме появляется кривая AB , где уже не соблюдается закон Гука. Криволинейный участок AB небольшой и является переходным. За ним следует участок BC , почти параллельный оси Δl . На этом участке сила не растет, а образец тем не менее продолжает деформироваться. Это явление называют текучестью материала, а участок BC – площадкой текучести. Силу, соответствующую текучести, обозначают F_T и называют усилием предела текучести.

За площадкой текучести материал упрочняется и снова приобретает способность оказывать сопротивление возрастающей нагрузке (участок CD). На этом участке небольшим увеличениям растягивающей силы соответствуют большие остаточные деформации образца. Зависимость между силой и удлинением криволинейная. Достигнув наибольшего значения F_{max} , которое называют усилием предела прочности, нагрузка при дальнейшем деформировании образца начинает падать. Это вызвано появлением на образце местного сужения – «шейки» (рис. 4, в).

До силы F_{max} рабочая часть образца деформировалась по всей своей длине равномерно (рис. 4, б). При появлении «шейки» деформации развиваются в основном в ее области, в то время как остальные участки почти не деформируются. Площадь поперечного сечения в области «шейки» резко уменьшается, и наконец происходит разрыв образца (точка K на диаграмме).

Таким образом, на диаграмме растяжения пластичного материала (рис. 3) различают три основные зоны: зона упругости OA , зона текучести BC и зона упрочнения CD .

В момент разрыва полная деформация образца состояла из двух частей – упругой и остаточной. Причем первая постоянно накапливалась в образце прямо пропорционально силе. При этом на участке OA возникла только упругая деформация. Интенсивность ее роста определялась углом наклона прямой OA . Следовательно, после снятия нагрузки упругая деформация всего образца будет уменьшаться с той же интенсивностью.

Если из точки K диаграммы растяжения провести прямую KE , параллельную OA , то отрезок OE будет представлять в масштабе абсолютное остаточное удлинение рабочей части образца после разрыва $\Delta l^p_{\text{ост}}$.

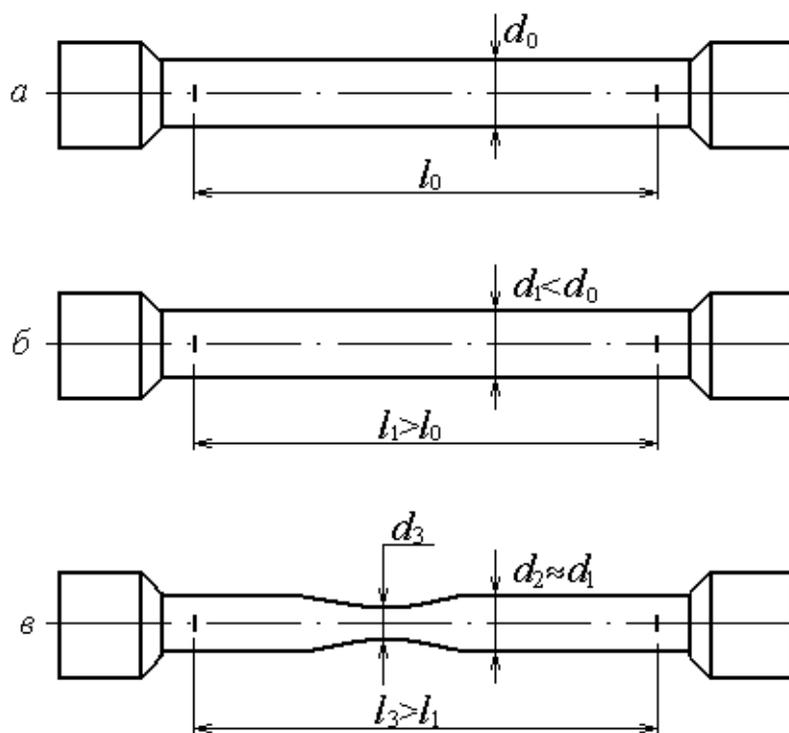


Рис. 4

По результатам испытания на растяжение рассчитывают характеристики прочности и пластичности материала. При этом площадь поперечного сечения A_0 образца вычисляется по его начальным размерам.

К характеристикам прочности относятся:

1. *Предел пропорциональности* $\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}} / A_0$ – это наибольшее напряжение, до которого справедлив закон Гука.

2. *Предел текучести* $\sigma_{\text{т}} = F_{\text{т}} / A_0$ – это напряжение, при котором материал «течет», т. е. деформация образца растет почти без увеличения нагрузки.

3. *Временное сопротивление* $\sigma_{\text{в}} = F_{\text{max}} / A_0$ – это напряжение, соответствующее наибольшему значению силы, которую может выдержать образец. Временное сопротивление называют также пределом прочности. Следует отметить, что это напряжение много меньше того, которое действует в самом узком месте образца – «шейке», где и происходит его разрыв. Поэтому предел прочности, рассчитанный по начальной площади сечения образца, является величиной условной.

Однако для расчетов эта величина намного удобней, т. к. всегда проще использовать начальные размеры деталей.

К характеристикам пластичности материала относятся:

1. *Относительное остаточное удлинение* образца после разрыва

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

где l_k – длина расчетной части (т. е. между метками) после разрыва.

2. *Относительное сужение*, или относительное остаточное уменьшение площади поперечного сечения в «шейке» после разрыва

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_k},$$

где $A_k = \pi d_k^2 / 4$ (d_k – диаметр образца в «шейке» после разрыва).

Чем больше характеристики прочности $\sigma_{\text{пц}}$, $\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{в}}$, тем материал прочнее, чем больше характеристики пластичности δ и ψ , тем материал пластичнее.

Часто машинную диаграмму растяжения, построенную в координатах $F - \Delta l$, перестраивают в диаграмму напряжений в координатах $\sigma - \varepsilon$ (рис. 5).

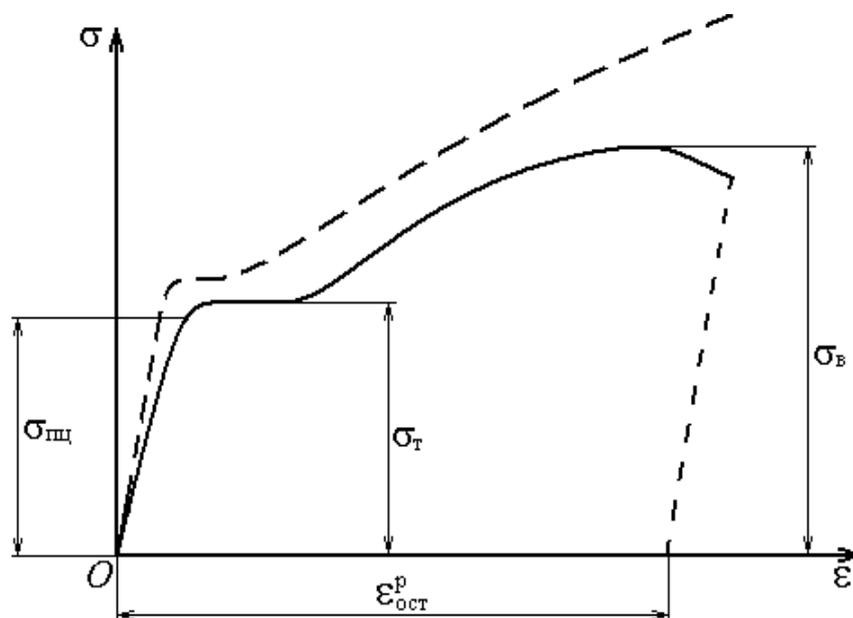


Рис. 5

Если силы, показанные на машинной диаграмме, поделить на начальную площадь поперечного сечения образца A_0 ($\sigma = F / A_0$), а абсолютные удлинения – на начальную рабочую длину образца

($\varepsilon = \Delta l / l$), получим диаграмму условных напряжений. Напряжения называют в этом случае условными потому, что площадь поперечного сечения образца в процессе испытания не будет оставаться постоянной и равной A_0 , а будет уменьшаться. Диаграмма условных напряжений на рис. 5 показана сплошной линией.

Чтобы получить диаграмму истинных напряжений (на рис. 5 показана штриховой линией), надо силу разделить на соответствующую ей площадь поперечного сечения образца. Истинные напряжения растут вплоть до разрыва образца.

Для практических целей используют обычно условные напряжения, т. е. характеристики прочности $\sigma_{\text{пц}}$, σ_{T} и $\sigma_{\text{в}}$, определенные по начальной площади поперечного сечения образца A_0 .

Характерная машинная диаграмма растяжения хрупкого материала показана на рис. 6. К хрупким относят материалы, у которых относительное остаточное удлинение после разрыва $\varepsilon < 5\%$. Это серый чугун, бетон, кирпич, керамика и др. На диаграмме растяжения хрупкого материала отсутствует площадка текучести и зона упрочнения.

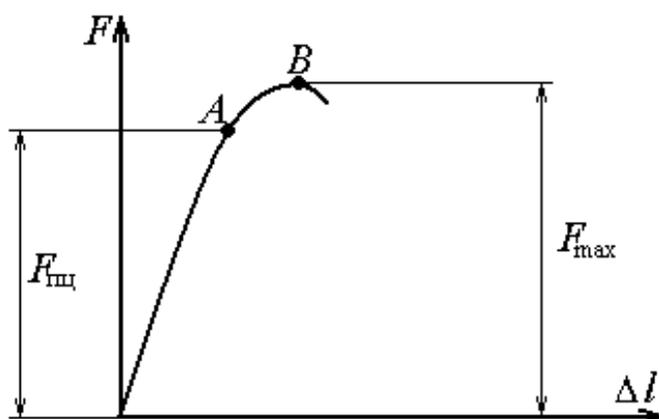


Рис. 6

По данной диаграмме (рис. 6) определяют наибольшую силу $F_{\text{пц}}$, до которой справедлив закон Гука. Ей соответствует точка A , до которой диаграмма изображается примерно прямой линией. Кроме того, определяют силу F_{max} . Зная эти силы и площадь поперечного сечения образца до испытания A_0 , определяют характеристики прочности: предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}} / A_0$ и временное сопротивление $\sigma_{\text{в}} = F_{\text{max}} / A_0$.

Характеристики пластичности определяют так же, как и для пластичных материалов. У хрупких материалов после разрыва от-

сутствует местное сужение – «шейка», поэтому диаметр после разрыва d_k измеряют посередине образца.

Условный предел текучести. Для некоторых материалов машинная диаграмма растяжения не имеет явно выраженной площадки текучести (рис. 7). В то же время характеристики пластичности значительны ($\psi > 5\%$, $\delta > 3\%$). Такие материалы называют хрупкопластичными. Для них определяют условный предел текучести.

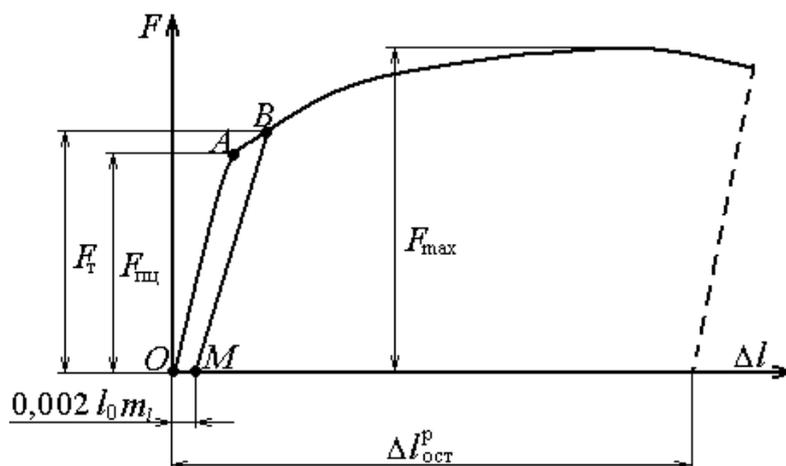


Рис. 7

Условным пределом текучести называют напряжение, при котором относительное остаточное удлинение образца достигает $\varepsilon = 0,002 = 0,2\%$.

Для определения силы F_T , соответствующей условному пределу текучести, необходимо на машинной диаграмме отложить от начала координат по оси Δl отрезок $OM = 0,002l_0m_l$. Из точки M провести прямую MB , параллельную начальному прямолинейному участку OA ($MB \parallel OA$), до пересечения с диаграммой. Сила, соответствующая точке B , и будет условной силой текучести F_T . Тогда условный предел текучести будет равен $\sigma_T = F_T / A_0$. Обычно его обозначают $\sigma_{0,2}$.

Допускаемое напряжение. Одной из важнейших механических характеристик материала, определяемых по результатам испытаний на растяжение и сжатие, является допускаемое напряжение. Наибольшие напряжения, фактически возникающие в конструкции, не должны превышать некоторой допускаемой величины. При этом допускаемое напряжение должно быть таким, чтобы конструкция работала не на пределе своих возможностей, а с определенным запасом прочности. Поэтому допускаемое напряжение для материала $[\sigma]$ определяют

путем деления предельного (опасного) напряжения σ_0 на коэффициент запаса n_0 , т. е. $[\sigma] = \sigma_0 / n_0$.

Эксперимент показывает, что для пластичных и хрупких материалов момент перехода в предельное состояние принципиально отличается.

Для пластичных и хрупкопластичных материалов в качестве предельного (опасного) напряжения принимают не разрушающее напряжение, а предел текучести ($\sigma_0 = \sigma_T$ или $\sigma_0 = \sigma_{0,2}$), так как при достижении его в материале появляются большие остаточные деформации. При этом существенно меняются размеры, а нередко и форма элементов конструкции, что приводит к нарушению ее нормальной работы в целом. Особенно это относится к деталям машин.

У хрупких материалов текучесть отсутствует и в качестве опасного напряжения для них принимают временное сопротивление $\sigma_0 = \sigma_B$, после достижения которого материал разрушается.

При назначении коэффициента запаса n_0 конструктору необходимо учитывать множество факторов. В первую очередь это степень ответственности конструкции, которая определяется тяжестью последствий выхода ее из строя, далее следуют экономичность, достоверность расчетных нагрузок, условия работы, назначение, изученность материала, из которого конструкция изготовлена, и др.

Наклен. Если образец из пластичного материала нагрузить напряжением, большим предела текучести, но меньшим временного сопротивления ($\sigma_T < \sigma < \sigma_B$), а затем разгрузить, то линия разгрузки пойдет по прямой MO_1 , параллельной начальной прямой OA (рис. 8, а). При этом упругая деформация исчезнет (отрезок O_1L) и останется пластическая (остаточная) деформация, измеряемая отрезком OO_1 . Как уже отмечалось, полная деформация при нагружении выше предела упругости будет складываться из упругой и остаточной деформации: $\varepsilon = \varepsilon_{ост} + \varepsilon_y$.

При повторном нагружении того же образца диаграмма растяжения пойдет по прямой O_1M , а начиная с точки M так, как будто не было разгрузки, т. е. теперь диаграмма имеет вид линии O_1MDK . Это свидетельствует о том, что материал в результате предварительного растяжения выше предела текучести меняет свои упругие свойства. Рассмотрим, как изменились характеристики прочности и пластичности материала. Диаграмма зависимости напряжения от деформации для исходного образца запишется кривой $OABCMDC$ (рис. 8, а), а

диаграмма растяжения образца, предварительно растянутого до точки M , – кривой O_1MDK (рис. 8, б).

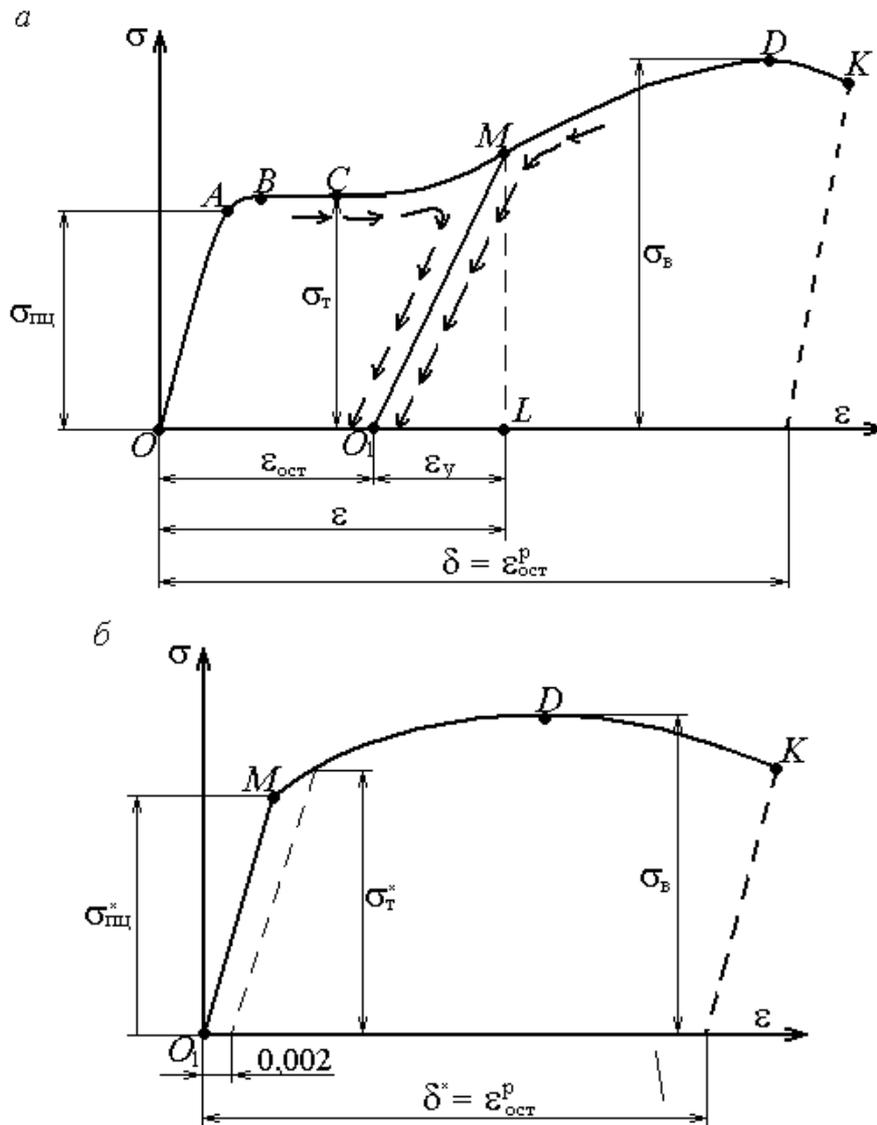


Рис. 8

Из диаграмм видно, что при повторном нагружении предел пропорциональности увеличился, пропала площадка текучести, диаграмма стала короче. Но так как остаточная деформация после разрыва предварительно растянутого образца довольно большая, то материал еще достаточно пластичен. Поэтому в качестве опасного напряжения для него определяют условный предел текучести σ_T^* (рис. 8, б).

Таким образом, сравнивая характеристики прочности и пластичности исходного материала и предварительно растянутого напряже-

нием $\sigma_T < \sigma < \sigma_B$, можно записать: $\sigma_{\text{пц}}^* > \sigma_{\text{пц}}$, $\sigma_T^* > \dots$, $\delta^* < \delta_1$. Следовательно, после предварительной вытяжки материал стал более упругим, так как увеличился предел пропорциональности. При этом возросло и допускаемое напряжение, т. к. увеличилось опасное – условный предел текучести σ_T^* . Однако предел прочности материала остался прежним. В то же время материал стал более хрупким, так как уменьшилась относительная остаточная деформация после разрыва. Такое изменение свойств материала в результате предварительного пластического деформирования называют наклепом.

Наклеп может возникнуть не только при растяжении, но и при любых других видах пластического деформирования, например при холодной обработке материала, которая вызывает напряжения выше предела текучести. Наклеп широко используется в технике. Цепи, тросы, ремни часто подвергают предварительной вытяжке, с тем чтобы в дальнейшем избежать остаточных удлинений при их работе. В нежелательных случаях можно снять наклеп термообработкой (отжигом).

Порядок выполнения работы

На образец острым предметом наносят метки A и B (рис. 1). При помощи штангенциркуля замеряют расчетную длину l_0 и диаметр d_0 с точностью до 0,1 мм. Причем диаметр замеряют не менее чем в трех местах (в середине и по краям рабочей части образца), а затем определяют среднее значение d_0 , на основании которого вычисляют площадь поперечного сечения образца $A_0 = \pi d_0^2 / 4$. Образец вставляют в захваты машины таким образом, чтобы его головки вплотную соприкасались с захватами, но образец не был натянут. Устанавливают диаграммную ленту (миллиметровую бумагу) в записывающий аппарат. После этого включают машину и наблюдают за записью диаграммы и изменениями в образце.

Для измерения конечной длины l_k расчетной части образца после разрыва обе части плотно складывают так, чтобы их оси образовали прямую линию. Измеряют наименьший диаметр d_k образца, т. е. диаметр в месте «шейки». Причем его замеряют в двух взаимно-перпендикулярных направлениях и определяют среднее значение d_k . Затем вычисляют площадь поперечного сечения $A_k = \pi d_k^2 / 4$.

После этого на машинной диаграмме проводят координатные оси F и Δl . В соответствии с рис. 3 обозначают силы $F_{\text{пц}}$, F_T и F_{max} и по измеренным ординатам с учетом масштаба рассчитывают их величины. По полученным силам и размерам образца определяют для испытанного

материала характеристики прочности $\sigma_{\text{пц}}$, $\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{в}}$, и характеристики пластичности δ и ψ , а также назначают допускаемое напряжение $[\sigma]$, приняв для примера $n_0 = 2,0$.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: 1) цель эксперимента; 2) эскиз образца до испытания и после разрушения; 3) машинную диаграмму растяжения, построенную в масштабе, с указанием всех характерных точек и сил им соответствующих; 4) расчет характеристик прочности и пластичности; 5) протокол испытаний.

Протокол испытаний

1. Тип испытательной машины.
2. Масштаб сил m_f , масштаб деформаций m_l .
3. Начальные размеры образца: расчетная длина l_0 , диаметр d_0 , площадь поперечного сечения A_0 .
4. Конечные размеры образца: расчетная длина после разрыва l_k , диаметр в «шейке» после разрыва d_k , площадь поперечного сечения в «шейке» A_k .
5. Силы, соответствующие основным характеристикам прочности, т. е. $F_{\text{пц}}$, $F_{\text{т}}$, F_{max} .
6. Характеристики прочности $\sigma_{\text{пц}}$, $\sigma_{\text{т}}$, $\sigma_{\text{в}}$.
7. Характеристики пластичности δ , ψ .
8. Допускаемое напряжение при коэффициенте запаса $n_0 = 2,0$.

Контрольные вопросы

1. Какую форму имеют образцы для испытания на растяжение?
2. Перечислите характеристики прочности и пластичности материала.
3. Что называют пределами пропорциональности, текучести и прочности?
4. Почему предел прочности является условной характеристикой?
5. Чем отличаются машинная, условная и истинная диаграммы деформирования?
6. Начертите машинную диаграмму растяжения образца пластичного материала, обозначьте и укажите названия ее характерных участков.
7. Укажите на соответствующей диаграмме отрезок, равный относительной остаточной деформации рабочей части образца после разрыва.

8. Чем принципиально отличаются диаграммы деформирования хрупкого и пластичного материалов?

9. До какого значения силы рабочая часть пластичного образца деформируется равномерно по всей длине?

10. Как называется сила, после достижения которой, на образце образуется местное сужение – «шейка»?

11. Что называют условным пределом текучести? Укажите последовательность действий для его определения с помощью диаграммы деформирования. Для каких материалов его определяют?

12. Запишите формулу для расчета допускаемого напряжения в общем виде.

13. Какое напряжение принимают в качестве опасного для хрупких, пластичных и хрупкопластичных материалов?

14. Перечислите основные факторы, которые следует учитывать при назначении коэффициента запаса прочности.

15. Каким образом и в каких материалах получают наклеп?

16. Перечислите механические характеристики материала, которые изменяются в результате наклепа.

17. Перечислите механические характеристики материала, которые не изменяются в результате наклепа.

Лабораторная работа № 2 **ИСПЫТАНИЕ НА СЖАТИЕ ПЛАСТИЧНЫХ** **И ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Цель работы: изучение поведения пластичных и хрупких материалов при испытаниях на сжатие; определение характеристик прочности при сжатии; определение допускаемых напряжений при заданном коэффициенте запаса.

Теоретические сведения

Испытание металлов на сжатие производят в соответствии с ГОСТ 25.503–80. При этом используют цилиндрические образцы (рис. 9, *а*) с начальным диаметром $d_0 = 10, 15, 20, 25, 30$ мм. Высота образца h_0 составляет $(1,5–2)d_0$.

Испытание древесины на сжатие производят в соответствии с ГОСТ 16483.10–73. При этом используют образцы в виде прямоугольного параллелепипеда (рис. 9, *б*) квадратного поперечного сече-

ния. Высота образца совпадает с продольным направлением волокон древесины.

В лабораториях кафедры испытания на сжатие проводят на машине ИМ-4А с предельной нагрузкой 40 кН или на машине Р-5 с предельной нагрузкой 50 кН. Обе машины автоматически записывают диаграмму сжатия.

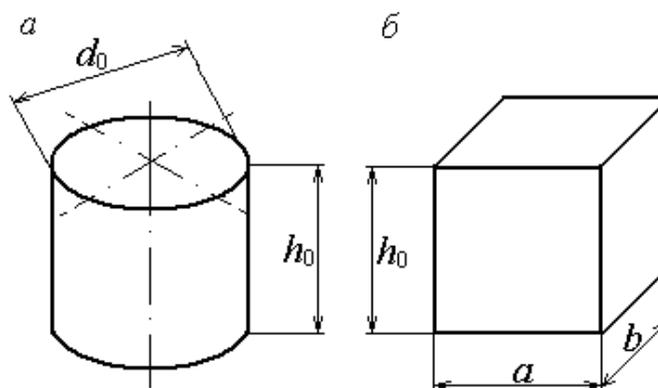


Рис. 9

На машине ИМ-4А диаграмма сжатия записывается в левой системе координат. Сжимающая сила записывается в масштабе $m_f = 100$ Н/мм, абсолютная деформация – в масштабе $m_l = 100:1$.

В машине Р-5 масштаб сил зависит от выбранной предельной нагрузки (10 кН, 25 кН, 50 кН), а масштаб абсолютных деформаций устанавливается из диапазона 10:1, 50:1, 100:1).

На рис. 10 представлена характерная машинная диаграмма сжатия пластичного материала.

На начальном участке OA наблюдается прямо пропорциональная зависимость между абсолютным укорочением Δl и силой F , т. е. соблюдается закон Гука. Потом линия диаграммы искривляется и переходит в участок с небольшим наклоном к горизонтали – участок текучести. Обычно при сжатии явно выраженная площадка текучести отсутствует.

Образец из пластичного материала при сжатии укорачивается, а поперечные размеры его увеличиваются, особенно в средней части (рис. 11).

По торцам образца поперечные деформации затруднены из-за наличия сил трения в местах соприкосновения с плитами испытательной машины, поэтому при сжатии цилиндр приобретает форму бочонка (рис. 11, б). При дальнейшем нагружении образец продолжает деформироваться, превращаясь в диск (рис. 11, в), но разрушить его не

удается, поэтому наибольшую силу F_{\max} установить нельзя. Таким образом, при сжатии пластичного материала, в отличие от растяжения, нельзя определить временное сопротивление σ_B .

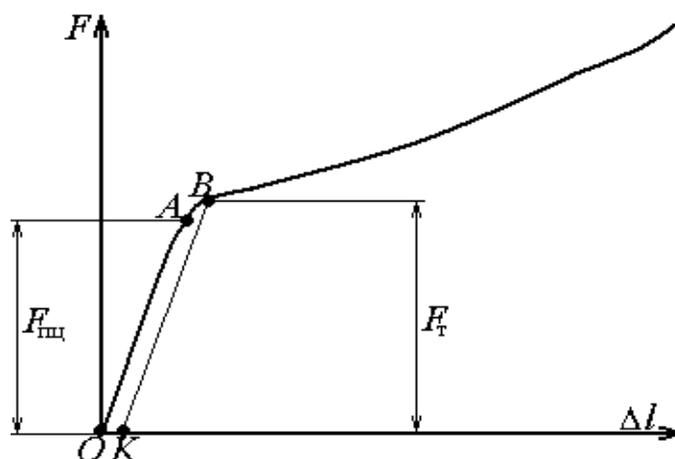


Рис. 10

По машинной диаграмме сжатия пластичного материала (рис. 10) определяют силу $F_{\text{пц}}$, т. е. наибольшую силу, до которой справедлив закон Гука, и силу F_T , соответствующую условному пределу текучести.

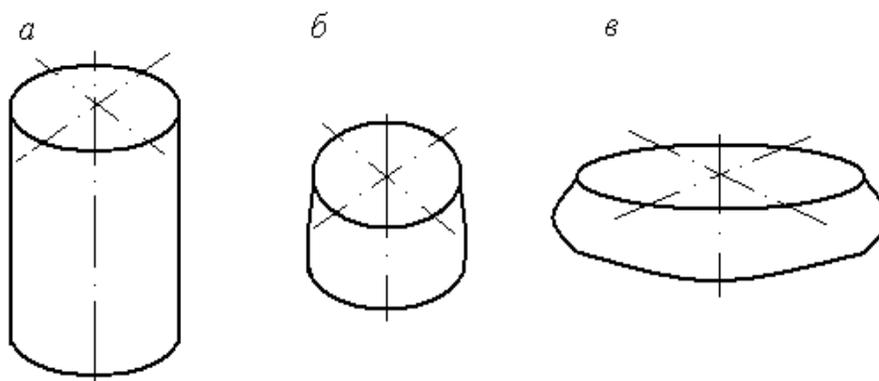


Рис. 11

Для определения силы F_T на горизонтальной оси откладывают отрезок $OK = 0,002h_0m_1$. Из точки K проводят прямую KB , параллельную прямолинейному начальному участку OA , до пересечения с линией диаграммы ($KB \parallel OA$). Ордината точки пересечения B соответствует усилию предела текучести F_T .

Таким образом, для пластичного материала при сжатии определяют только две характеристики прочности, т. е. предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}} / A_0$ и предел текучести $\sigma_T = F_T / A_0$, где A_0 –

площадь поперечного сечения образца до испытания. Пределы текучести при растяжении и сжатии одного и того же пластичного материала практически не отличаются.

На рис. 12 показана машинная диаграмма сжатия хрупкого материала. До некоторой точки A наблюдается почти пропорциональная зависимость между силой сопротивления образца и деформацией, т. е. можно считать, что на участке OA справедлив закон Гука.

Затем рост силы сопротивления образца замедляется, и после достижения максимума она резко падает и образец разрушается.

На рис. 13 показан характерный вид разрушения чугунного образца при сжатии. Разрушение происходит по сечению, наклоненному примерно под углом 45° к оси образца. Под этим углом при сжатии возникают наибольшие касательные напряжения, которые и являются причиной разрушения. При сжатии очень хрупких материалов, таких как керамика, при достижении силы F_{\max} намечаются сдвиги под углом 45° по разным направлениям, и образец разрушается на множество частей. Следует отметить, что большинство хрупких материалов существенно лучше сопротивляются сжатию, чем растяжению.

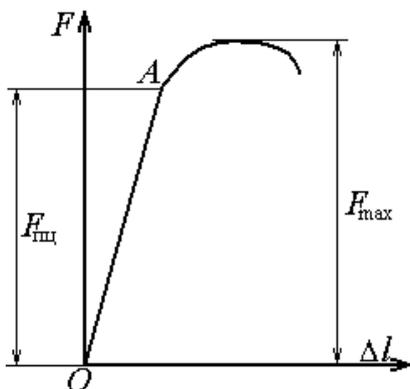


Рис. 12

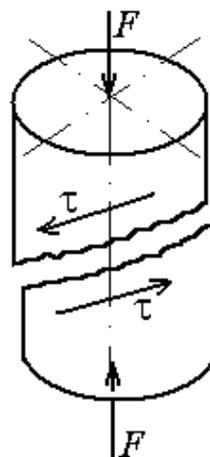


Рис. 13

По машинной диаграмме сжатия хрупкого материала определяют две характерные силы: силу, до которой соблюдается закон Гука ($F_{\text{тц}}$), и наибольшую силу, которую может выдержать материал (F_{max}). По этим силам, отнесенным к начальной площади поперечного сечения образца A_0 , определяют характеристики прочности хрупкого материала при сжатии, т. е. предел пропорциональности $\sigma_{\text{тц}} = F_{\text{тц}} / A_0$ и временное сопротивление $\sigma_{\text{в}} = F_{\text{max}} / A_0$.

На рис. 14 показана машинная диаграмма сжатия древесины вдоль волокон. В отличие от однородных хрупких материалов при сжатии древесины разрушение образца происходит как бы «постепенно», т. е. по мере разрушения отдельных, наиболее нагруженных элементов строения. Поэтому участок диаграммы после достижения F_{\max} сравнительно протяженный.

Для древесины при сжатии вдоль волокон определяют предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}} = F_{\text{пц}} / A_0$ и временное сопротивление $\sigma_{\text{в}} = F_{\max} / A_0$.

Как и при растяжении, при сжатии для пластичных материалов в качестве предельного (опасного) напряжения принимают предел текучести $\sigma_0 = \sigma_{\text{т}}$, а для хрупких материалов временное сопротивление $\sigma_0 = \sigma_{\text{в}}$. Для неоднородных материалов, например древесины, в качестве опасного принимают временное сопротивление, т. е. $\sigma_0 = \sigma_{\text{в}}$.

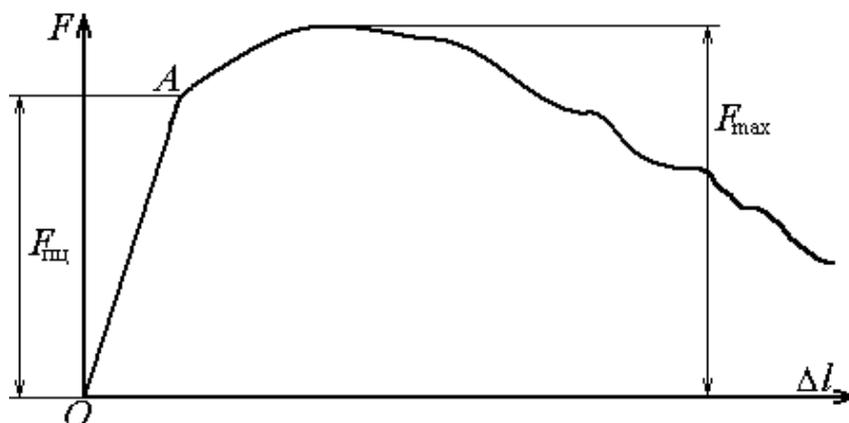


Рис. 14

По опасному напряжению в дальнейшем определяют допускаемое напряжение $[\sigma] = \sigma_0 / n_0$, где n_0 – коэффициент запаса прочности.

Порядок выполнения работы

При помощи штангенциркуля измеряют диаметр d_0 и высоту h_0 металлических образцов. Для деревянного образца измеряют размеры поперечного сечения a и b и высоту h_0 . Замеры производят с точностью до 0,1 мм.

Вычисляют площадь поперечного сечения: для цилиндрических образцов $A_0 = \pi d_0^2 / 4$; для призматического образца $A_0 = ab$.

Образец устанавливают на нижнюю опорную плиту машины. Используя ускоренное перемещение нижней опоры, образец подводят до соприкосновения с верхней опорной плитой. Подготавливают к

работе записывающий аппарат, задают рабочую скорость движения нижней плиты и деформируют (нагружают) образец.

При испытаниях, особенно пластичных материалов, необходимо внимательно следить за шкалой силоизмерителя. Когда нагрузка приближается к предельной для данной испытательной машины, ее следует выключить. Пластичный материал при сжатии довести до разрушения невозможно, он прессуется в пластинку, но не разрушается. Поэтому опыт ограничивается предельной силой машины. При испытании хрупких материалов и древесины опыт прекращают, когда происходит разрушение образца. Вид образца после испытания следует зарисовать.

По машинным диаграммам определяют необходимые силы, как это было показано выше, и вычисляют характеристики прочности.

Испытание на сжатие иногда проводят без записи диаграммы. В этом случае предел пропорциональности не определяют. Для пластичных материалов определяют только предел текучести, а для хрупких – предел прочности. Силу, соответствующую пределу текучести F_T , для пластичных материалов можно достаточно точно определить, наблюдая за движением стрелки силоизмерителя. До появления текучести сила растет быстро, следовательно, стрелка силоизмерителя перемещается также быстро. При достижении текучести материала наблюдается кратковременная остановка стрелки или очень медленное ее перемещение, что дает возможность зафиксировать силу F_T и определить предел текучести: $\sigma_T = F_T / A_0$.

Для определения предела прочности хрупких материалов и древесины при испытании на сжатие по шкале силоизмерителя фиксируют наибольшую силу F_{max} , которую выдержал образец. По этой силе определяют предел прочности: $\sigma_B = F_{max} / A_0$.

После проведения испытаний студент должен дать сравнительный анализ поведения при сжатии пластичных и хрупких материалов, а также показать отличительные особенности разрушения древесины.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: 1) цель эксперимента; 2) эскизы образцов до и после испытания; 3) диаграммы сжатия для всех испытанных материалов, построенные в масштабе, с указанием характерных точек и соответствующих им сил; 4) расчет характеристик прочности испытанных материалов; 5) описание характера разрушения каждого материала; 6) протокол испытаний для каждого испытанного материала.

Протокол испытаний

1. Тип испытательной машины.
2. Масштаб сил m_f , масштаб деформаций m_l .
3. Начальные размеры образца: высота h_0 , диаметр d_0 (для древесины a , b), площадь поперечного сечения A_0 .
4. Силы, соответствующие основным характеристикам прочности, $F_{\text{пц}}, F_{\text{т}}, F_{\text{мах}}$.
5. Характеристики прочности $\sigma_{\text{пц}}, \sigma_{\text{т}}, \sigma_{\text{в}}$.
6. Допускаемое напряжение, приняв для алюминия $n_0 = 2,5$; для чугуна $n_0 = 4$, для древесины $n_0 = 5$.

Контрольные вопросы

1. Какую форму имеют образцы для испытания на сжатие? Какова их относительная высота?
2. Перечислите механические характеристики пластичного материала, получаемые при испытаниях на сжатие.
3. Перечислите механические характеристики хрупкого материала, получаемые при испытаниях на сжатие.
4. Начертите машинную диаграмму сжатия образца пластичного материала, обозначьте и укажите название характерных усилий.
5. Какую механическую характеристику пластичного материала невозможно получить при испытании на сжатие?
6. Начертите машинную диаграмму сжатия образца хрупкого материала, обозначьте и укажите название характерных усилий.
7. Какие характерные особенности имеет разрушение образцов хрупких материалов при сжатии?
8. Какие характерные особенности имеет разрушение образцов слоистых материалов при сжатии?
9. Какую форму приобретает образец пластичного материала при сжатии?

Лабораторная работа № 3 ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА НА СРЕЗ (ПЕРЕРЕЗЫВАНИЕ)

Цель работы: определить предел прочности малоуглеродистой стали при срезе; назначить для нее допускаемое напряжение при срезе по заданному коэффициенту запаса n .

Теоретические сведения

Во многих соединениях деталей машин крепляющие элементы (заклепки, шпонки, болты, вставленные без зазора, винтовая резьба и т. д.) работают на срез. При назначении допускаемых напряжений для таких элементов необходимо исходить из результатов экспериментов, имитирующих их работу в соединении, т. е. при перерезывании. Это позволит определить опасное напряжение, а именно предел прочности при срезе $\tau_{пч}$.

Испытание цилиндрических образцов на срез проводят на специальном приспособлении (рис. 15). Образец соединяет обе части приспособления наподобие болта или заклепки.

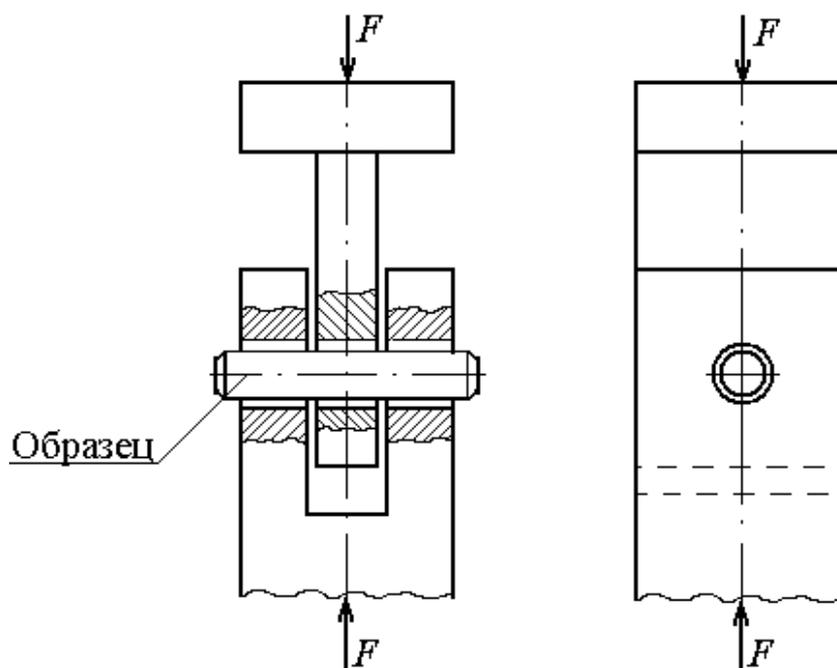


Рис. 15

Принцип работы приспособления следующий. Под действием сил, сжимающих приспособление, его верхняя часть (проушина) продвигается в нижней (вилке). Этому движению препятствует образец. При увеличении усилия происходит сдвиг средней его части относительно крайних, и образец перерезывается по двум плоскостям. Очевидно, что опыт можно проводить и при действии растягивающих сил.

Порядок выполнения работы

Замеряют штангенциркулем диаметр образца с точностью до 0,1 мм. Помещают его в приспособление, которое устанавливают на

нижнюю опорную плиту машины для испытаний на сжатие. Путем ускоренного перемещения нижней опоры подводят приспособление до соприкосновения с верхней опорной плитой. После этого проводят испытание, следя за стрелкой силоизмерителя, и фиксируют силу F_{\max} , при которой происходит срез. Рассчитывают площадь поперечного сечения образца: $A = \pi d_0^2 / 4$.

Площадь среза будет равна удвоенной площади поперечного сечения образца, т. к. срез проходит по двум плоскостям: $A_{\text{ср}} = 2A$. Предел прочности при срезе определяют по формуле $\tau_{\text{пч}} = F_{\max} / A_{\text{ср}}$.

Пластичные материалы обычно лучше сопротивляются действию нормальных напряжений (растяжение), чем касательных (срез). Поэтому предел прочности при срезе будет меньше, чем при растяжении (лаб. работа № 1), если оба испытания проводились на образцах из одного и того же материала.

По пределу прочности на срез назначают допускаемое напряжение на срез $[\tau] = \tau_{\text{пч}} / n_0$, где n_0 – коэффициент запаса прочности.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: 1) цель эксперимента; 2) эскиз образца до испытания и после разрушения; 3) эскиз приспособления для испытаний на срез; 4) описание характера разрушения образца при срезе; 5) вычисление предела прочности при срезе; 6) определение допускаемого напряжения при срезе (в качестве примера принять $n_0 = 2,5$); 7) протокол испытаний.

Протокол испытаний

1. Тип испытательной машины.
2. Цена деления шкалы силоизмерителя.
3. Диаметр образца d_0 .
4. Площадь среза $A_{\text{ср}}$.
5. Наибольшая сила F_{\max} .
6. Предел прочности при срезе $\tau_{\text{пч}}$.
7. Допускаемое напряжение на срез $[\tau]$.

Контрольные вопросы

1. Начертите эскиз образца и укажите, где приложены срезающие усилия.
2. Какую характеристику материала определяют при испытаниях образцов на срез?

3. Используя эскиз образца, покажите сечения, где происходит срез.
4. Как рассчитывают предел прочности при срезе?
5. Приведите примеры соединений, которые рассчитывают на срез.

Лабораторная работа № 4

ИСПЫТАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ НА СКАЛЫВАНИЕ

Цель работы: определение предела прочности древесины при скалывании, назначение допускаемого напряжения при скалывании вдоль волокон.

Теоретические сведения

Большинство материалов, имеющих слоистую структуру (древесина, стеклопластики и др.), обладают минимальной прочностью при сдвиге между слоями. Поэтому испытания на межслойный сдвиг (скалывание) для таких материалов обязательны.

Испытание древесины на скалывание производится в соответствии с ГОСТ 16483.5–73. Форма и размеры образца для испытаний на скалывание приведены на рис. 16. Испытания проводят в приспособлении, показанном на рис. 17. Для нагружения используют любую машину, предназначенную для испытаний на сжатие.

Порядок выполнения работы

Перед испытанием в месте предполагаемого скалывания при помощи штангенциркуля измеряют размеры b и l с точностью до 0,1 мм (рис. 16) и вычисляют площадь скалывания $A_{ск} = bl$.

Образец устанавливают в приспособление для испытания на скалывание (рис. 17) таким образом, чтобы выступающая часть образца со стороной 12 мм находилась сверху. В этом случае линия скалывания образца с небольшим (до 2 мм) искривлением волокон выйдет на свободную поверхность выступа и сколотая часть образца не будет зажата между опорой 3 и верхней плитой испытательной машины.

Образец 2 закрепляется в приспособлении при помощи подвижной опоры 3 завинчиванием винта 4. Для снижения силы трения между образцом и корпусом приспособления 1 усилие прижима должно быть минимальным.

Приспособление с образцом устанавливают на нижнюю опорную плиту машины, подводят до соприкосновения верхней части образца с верхней опорной плитой и равномерно нагружают до скалывания.

вания. Максимальную нагрузку F_{\max} отсчитывают по шкале силоизмерителя.

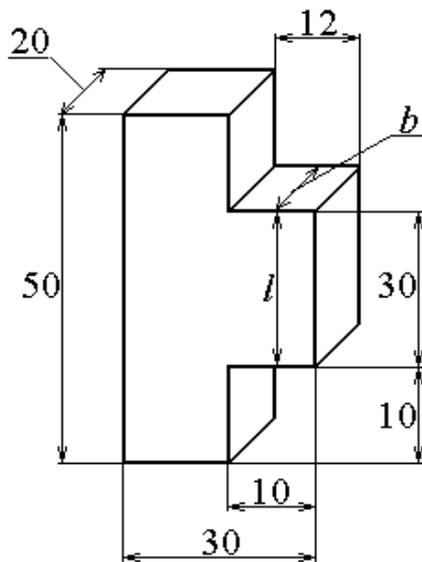


Рис. 16

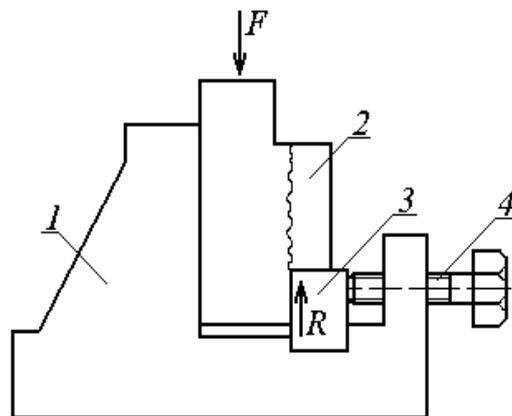


Рис. 17

Предел прочности при скалывании рассчитывают по формуле $\tau_b = F_{\max} / A_{\text{ск}}$.

При испытании древесины на скалывание необходимо указывать влажность образца и направление плоскости скалывания по отношению к годичным слоям. При испытании образцов, хранившихся в комнатных условиях (лаборатории), их влажность обычно составляет около 12%.

После определения предела прочности рассчитывают допускаемое напряжение на скалывание древесины вдоль волокон $[\tau] = \tau_b / n$, приняв для примера коэффициент запаса $n_0 = 5$.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: 1) цель эксперимента; 2) эскиз образца с указанием всех размеров; 3) эскиз приспособления для испытаний на скалывание; 4) описание характера разрушения с изображением плоскости скалывания; 5) вычисление предела прочности и допускаемого напряжения на скалывание; 6) протокол испытаний.

Протокол испытаний

1. Тип испытательной машины.
2. Цена деления силоизмерителя.

3. Размеры скалываемой части образца l и b .
4. Площадь скалывания $A_{ск}$.
5. Сила, при которой произошло скалывание, F_{max} .
6. Предел прочности на скалывание τ_v .
7. Допускаемое напряжение на скалывание $[\tau]$.

Контрольные вопросы

1. Начертите эскиз образца и укажите, где действуют скалывающие усилия.
2. Какую характеристику материала определяют при испытаниях образцов на скалывание?
3. Используя эскиз образца, покажите сечение, где происходит скалывание.
4. Как рассчитывают предел прочности при скалывании?
5. Какую структуру имеют материалы, которые испытывают на скалывание?

Лабораторная работа № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ПРОДОЛЬНОЙ УПРУГОСТИ

Цель работы: опытная проверка закона Гука при растяжении и определение модуля продольной упругости стали.

Теоретические сведения

Для расчета деформаций элементов конструкций под нагрузкой необходимо иметь сведения о жесткости материала, из которого они изготовлены.

Опыты показывают, что для большинства материалов до определенного предела деформация и нагрузка связаны прямо пропорциональной зависимостью.

При растяжении зависимость между относительной продольной деформацией ε и действующим напряжением σ имеет вид $\varepsilon = \sigma / E$. Данная зависимость называется законом Гука. Коэффициент пропорциональности E называется модулем продольной упругости или модулем Юнга. Это одна из важнейших механических характеристик любого материала, которая показывает его способность сопротивляться упругому деформированию при действии растягивающих или сжимающих нагрузок.

Численное значение модуля упругости E исследуемого материала определяют экспериментально, обычно при растяжении или

сжатии образцов, имеющих форму стержней с круглым или реже прямоугольным поперечным сечением. При испытании на образец устанавливают прибор для измерения деформаций (тензомер), поэтому длина рабочей части образца должна быть сравнительно большой. Такие образцы следует испытывать на растяжение, т. к. при сжатии они недостаточно устойчивы. Учитывая, что при растяжении $\sigma = F / A$, Н/м² (Па), а $\varepsilon = \Delta l / l$, величину модуля продольной упругости E , Н/м² (Па) можно рассчитать из выражения $E = Fl / \Delta l A$, где F – величина осевой нагрузки, Н, вызывающая изменение рабочей длины образца l , м на величину Δl , м; A – площадь поперечного сечения образца, м².

Чтобы установить зависимость между удлинением Δl и осевой нагрузкой F , образец нагружают в несколько этапов. Их обычно называют ступенями. Нагрузку или деформацию на каждой ступени увеличивают на одну и ту же величину. Для удобства измерения можно задать шаг приращения деформации Δl , приняв его равным одному делению шкалы тензомера. Тогда после каждого приращения деформации Δl следует определять по шкале силоизмерителя соответствующую нагрузку F . Приращение ΔF в каждой ступени нагружения на одинаковую величину подтверждает наличие прямо пропорциональной зависимости между нагрузкой и деформацией, т. е. справедливость закона Гука.

Предельная нагрузка F_{\max} на образец в эксперименте не должна превышать усилия предела пропорциональности. Величину F_{\max} можно определить, используя значение предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ для исследуемого материала. Если он неизвестен, можно приближенно считать, что $\sigma_{\text{пц}} = \sigma_{\text{T}} / 1,2$ (для стали Ст. 3 $\sigma_{\text{T}} = 240$ МПа). Тогда $F_{\max} = A\sigma_{\text{T}} / 1,2$.

Нагружение образцов в лаборатории кафедры производят на разрывной машине Р-5 или ИМ-4Р. Отсчет нагрузки производят по шкале силоизмерителя испытательной машины.

Поскольку деформация металлических образцов обычно составляет сотые доли миллиметра, для ее измерения используют специальные высокочувствительные приборы – тензометры. Наиболее часто используются электрические, механические и оптические тензометры.

В данной работе рассматривается применение механического тензомера с рычажной системой и индикатором перемещений часового типа (рис. 18).

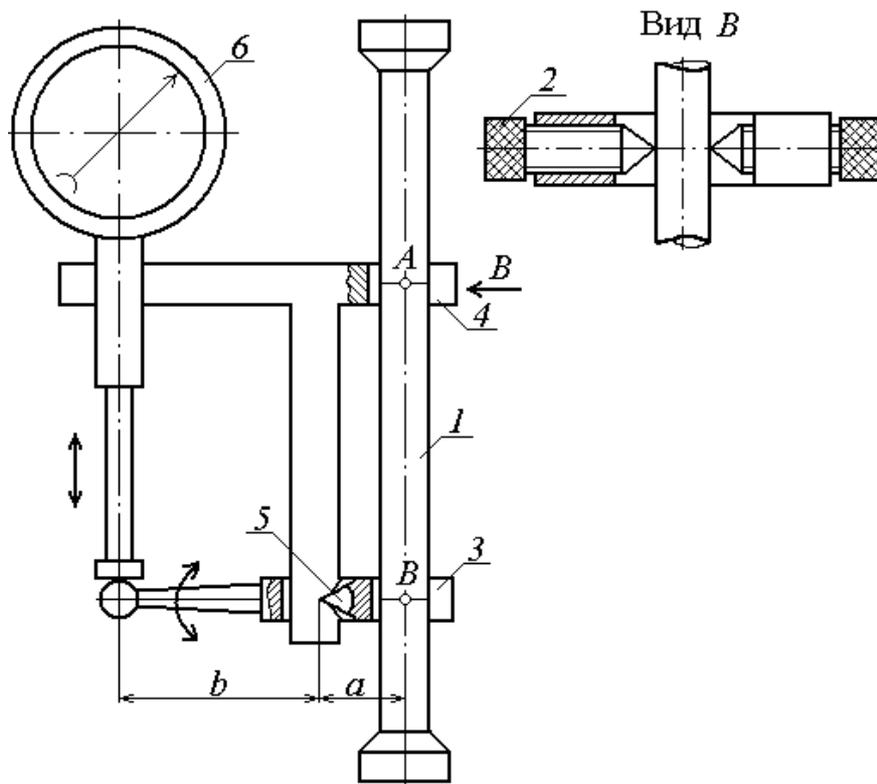


Рис. 18

Тензометр устанавливается на образце *1* путем завинчивания винтов *2* в двух скобах *3* и *4*. Крепление происходит в двух сечениях, отмеченных точками *A* и *B*. Расстояние между ними определяет базу тензометра, т. е. длину участка образца, на котором изменяется деформация. При растяжении образца расстояние между точками *A* и *B* увеличивается. Это приводит к повороту подвижной скобы *3* и перемещению ее свободного конца, находящегося в контакте со штоком индикатора часового типа *б*.

Рассматривая подвижную скобу *3* как рычаг первого рода с точкой опоры на призме *5*, получаем, что перемещение, передаваемое к штоку индикатора *б*, будет в b/a раз больше, чем деформация образца. Поэтому для повышения чувствительности прибора плечо b делают в несколько раз большим, чем плечо a . Шкала индикатора *б* отградуирована с учетом передаточного отношения рычажной системы и позволяет измерять деформацию в действительных величинах линейных перемещений (наиболее часто в микрометрах).

Следует подчеркнуть, что тензометр измеряет абсолютную деформацию не всего образца, а лишь его части, ограниченной базой прибора.

Расчет деформации производится по формуле $\Delta l = Nc$, где N – отсчет по шкале тензометра; c – цена деления шкалы.

Порядок выполнения работы

Ознакомиться с устройством тензометра. В отчет записать размер базы и цену деления его шкалы, а также цену деления шкалы силоизмерителя испытательной машины. Измерить и записать диаметр рабочей части образца. Рассчитать предельную нагрузку в эксперименте F_{\max} . Установить образец в испытательную машину и закрепить на нем тензометр. Установить на шкале тензометра путем ее вращения нулевое показание. Произвести пробное нагружение до 80–90% от F_{\max} и снять показания тензометра. Разгрузить образец. Рассчитать величину приращения деформации в ступени нагружения Δl_i , исходя из того что $i = (5-6)$.

После этого проводится эксперимент по определению модуля продольной упругости. Вначале производят предварительное нагружение образца силой $F_0 = 5-10\%$ от F_{\max} . Это необходимо для того, чтобы устранить зазоры в механических передачах тензометра и испытательной машины и, как следствие, уменьшить погрешность измерения. Затем вновь устанавливают нулевое показание на шкале тензометра. Записывают значение предварительной нагрузки F_0 и производят окончательное нагружение образца в 4–5 ступеней. После каждой ступени нагружения следует производить запись отсчетов по шкале силоизмерителя и тензометра. Закончив испытания, разгружают образец и снимают тензометр.

При обработке результатов эксперимента строят график зависимости $F - \Delta l$. Поскольку приращение деформации образца Δl_i в каждой ступени нагружения было постоянным, то и приращение нагрузки ΔF_i должно быть приблизительно постоянным. Выполнение этого условия подтвердит справедливость закона Гука. Величину модуля упругости рассчитывают для каждой ступени, а затем определяют его среднее значение.

Содержание отчета

1. Цель эксперимента.
2. Тип и наименование испытательной машины и тензометра; цена деления шкалы силоизмерителя машины, N ; цена деления шкалы тензометра c , м; база тензометра l , м.

3. Эскиз образца: площадь поперечного сечения A , м²; предел пропорциональности материала $\sigma_{\text{пл}}$, МПа; значение наибольшей нагрузки F_{max} , Н; число ступеней нагружения i ; значение деформации в ступени нагружения Δl_i , м.

4. Таблицу результатов испытаний.

№ п/п	Отсчеты по тензомеру N	Абсолютная деформация Δl , м	Нагрузка, Н		Модуль упругости E_i , МПа
			F	ΔF_i	

5. Расчет модуля продольной упругости для каждой ступени нагружения $E_i = Fl / \Delta l A$ и его среднего значения $E_{\text{ср}} = \Sigma E_i / i$.

6. Установленный вид зависимости между деформацией образца и нагрузкой.

Контрольные вопросы

1. Какие свойства материала характеризует модуль упругости?
2. Сформулируйте закон Гука.
3. Запишите формулу для расчета модуля упругости.
4. Как рассчитать предельную нагрузку на образец при определении модуля упругости?
5. Для чего предназначен тензомер?
6. Что называют базой тензометра?
7. С какой целью образец нагружают ступенями?
8. Зачем к образцу прикладывают предварительную нагрузку?

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА

Цель работы: проверка постоянства отношения поперечной деформации к продольной при осевом растяжении, определение коэффициента Пуассона для стали.

Теоретические сведения

При расчетах многих конструкций необходимо иметь сведения не только о продольных, но и о поперечных деформациях ее элементов.

При осевом растяжении стержня его удлинение в направлении приложенной силы сопровождается уменьшением поперечного разме-

ра. Экспериментально установлено, что соотношение между поперечной и продольной относительными деформациями является постоянной величиной для каждого материала и характеризует его упругие свойства. Абсолютная величина отношения относительной поперечной деформации ε_{\perp} к относительной продольной ε_{\parallel} называется коэффициентом Пуассона: $\mu = |\varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}|$. Для изотропных материалов, свойства которых одинаковы во всех направлениях, $0 \leq \mu \leq 0,5$.

При экспериментальном определении коэффициента Пуассона необходимо одновременно измерять продольную и поперечную деформации образца. Для большинства материалов относительная поперечная деформация в 3–4 раза меньше продольной, поэтому образцы для таких испытаний имеют сравнительно широкую рабочую часть.

Для измерения деформаций таких образцов обычно используют электрические датчики сопротивления – тензорезисторы. Различают проволочные, фольговые и полупроводниковые тензорезисторы. В данной работе используются проволочные датчики (рис. 19).

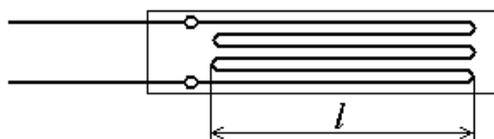


Рис. 19

Проволочные тензорезисторы представляют собой несколько петель тонкой проволоки с высоким удельным электрическим сопротивлением, обычно константановой, наклеенных на изолирующую подложку – полоску тонкой бумаги. Для включения в электрическую цепь к тонкой проволоке припаяны более толстые гибкие проводники.

Датчик наклеивают на исследуемую деталь в том месте, где будет измеряться деформация. При этом вытянутые участки петель длиной l должны быть ориентированы в направлении измеряемой деформации.

Работает тензорезистор следующим образом. Под действием нагрузки образец и приклеенный к нему датчик деформируются совместно. Деформация проволоки датчика приводит к изменению ее геометрических размеров (длины и диаметра), а также электрической проводимости и, как следствие, к пропорциональному изменению электрического сопротивления.

Зигзагообразная укладка проволоки с петлями, вытянутыми в продольном направлении датчика, позволяет измерять деформацию практически только в этом направлении. Изменение деформации

производится в пределах того участка образца, который находится под датчиком, т. е. длина петли l соответствует базе датчика.

Изменение электрического сопротивления датчика в результате деформирования сравнительно невелико, поэтому обычно измеряют не само сопротивление, а величину его изменения. Для этого датчик включают в мостовую электрическую схему (рис. 20).

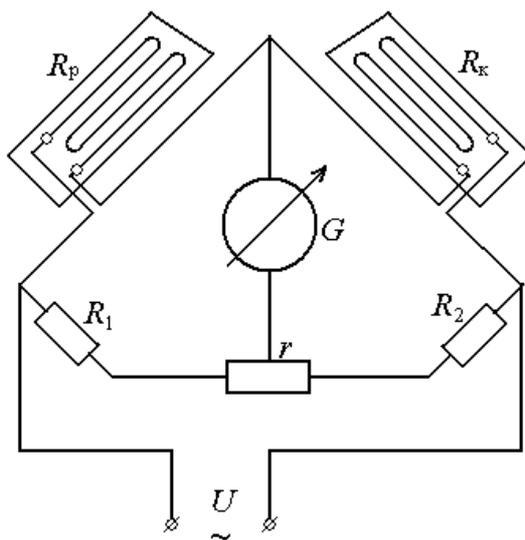


Рис. 20

Во время испытания температура образца, а значит, и датчика по разным причинам может изменяться, что приведет к нежелательному температурному изменению сопротивления последнего, которое вполне соизмеримо с изменением, полученным в процессе измерения деформации. Поэтому во второе плечо моста включают компенсационный датчик R_k , который не измеряет деформаций, а имеет такую же температуру, что и рабочий. Это достигается наклеиванием компенсационного датчика на пластинку из того же материала и размещением ее вблизи испытываемого образца. Сопротивления R_1 и R_2 , образующие два других плеча моста, постоянной величины. Одна из диагоналей моста подключается к источнику электропитания (U), а другая, измерительная, – к гальванометру G или милливольтметру. При условии $R_1 R_k = R_2 R_p$, мост находится в равновесии и на его измерительной диагонали нет разности потенциалов. Если сопротивление рабочего датчика R_p изменится, то равновесие моста нарушится и на его измерительной диагонали появится разность потенциалов, пропорциональная

измеряемой деформации. При этом возможно проведение двух вариантов измерения.

В первом варианте к измерительной диагонали подключают милливольтметр, показания которого и будут пропорциональны измеряемой деформации. Во втором варианте, который обычно применяется в специальных приборах – измерителях деформаций (ИД), при каждом измерении мост приводят в состояние равновесия (балансируют) с помощью реохорда r . Для контроля баланса используют гальванометр G . Отсчет производят по шкале реохорда r .

Для расчета деформаций Δl необходимо знать цену деления шкалы реохорда C . Она может быть вычислена по паспортным данным датчика и моста, а также определена экспериментально путем тарировки (градуировки). В общем случае $\varepsilon = Cn$, где n – отсчет по шкале реохорда.

Если для измерения продольной и поперечной деформации использовать одинаковые датчики ($C_{\perp} = C_{\parallel}$), то коэффициент Пуассона можно вычислить на основании следующей зависимости:

$$\begin{aligned} \mu &= -\varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel} = \\ &= C_{\perp} n_{\perp} / C_{\parallel} n_{\parallel} = n_{\perp} / n_{\parallel}. \end{aligned}$$

Для испытаний используют образец (рис. 21), на обе стороны которого наклеены тензорезисторы 1 и 2, предназначенные соответственно для измерения продольной и поперечной деформации. Для повышения чувствительности и точности измерения датчики, находящиеся по обе стороны образца и предназначенные для измерения односторонних деформаций, например продольных, соединяются в электрическую цепь последовательно. Нагружение образцов производится на машине Р-5 или ИМ-4Р. Для измерения деформаций используют прибор ИД-70 или цифровой милливольтметр.

Порядок выполнения работы

Ознакомиться с устройством испытательной машины, тензодатчиков и измерителя деформаций. Записать в отчет цену деления силоизмерителя испытательной машины и тип тензодатчиков. По величине предела пропорциональности и площади поперечного сечения образца рассчитать максимальную нагрузку F_{\max} , до которой выполняется закон Гука. Установить образец в испытательную машину и подключить к клеммам измерителя деформаций компенсационный датчик и датчик продольных деформаций. Включить на прогрев измеритель

деформаций. Произвести предварительное нагружение образца силой $F_0 \approx 0,1F_{\max}$ для устранения зазоров в местах закрепления. Записать значение предварительной нагрузки. Добиться баланса измерительного моста и снять отсчет по шкале реохорда $n_{0\parallel}$. Произвести нагружение образца до $F \approx 0,9F_{\max}$ и вновь сбалансировать мост. Снять отсчет $n_{1\parallel}$. Разгрузить образец и повторить опыт 2–3 раза.

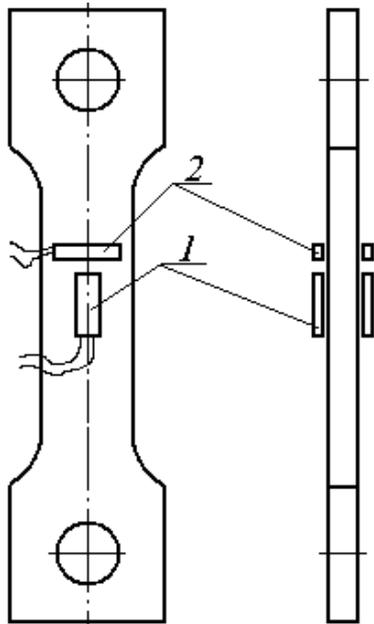


Рис. 21

Подключить к измерительному мосту взамен датчика продольных деформаций датчик поперечных деформаций. Измерить поперечные деформации образца при нагружении в том же диапазоне сил, что и при измерении продольных.

Следует обратить внимание на противоположное направление отклонения стрелки гальванометра. Это указывает на то, что при растяжении образец в поперечном направлении укорачивается. Рассчитать коэффициент Пуассона по формуле $\mu = \Delta n_{\text{ср}\perp} / \Delta n_{\text{ср}\parallel}$, где $\Delta n_{\text{ср}}$ – среднее значение приращения отсчета по шкале реохорда в двух или

трех опытах.

Содержание отчета

1. Тип и наименование испытательной машины, цена деления шкалы силоизмерителя, тип и наименование тензодатчика, тип измерителя деформаций.
2. Эскиз образца с наклеенными тензодатчиками; наименование материала образца; предел пропорциональности $\sigma_{\text{пл}} = \sigma_{\text{T}} / 1,2$ МПа; толщина и ширина рабочей части образца, мм; площадь поперечного сечения образца A , м²; предельная нагрузка для образца $P_{\max} = \sigma_{\text{пл}}A$, кН.
3. Начальная нагрузка образца, кН; конечная нагрузка образца, кН.
4. Таблица результатов эксперимента.

Продольная деформация n_{\parallel}		Поперечная деформация n_{\perp}	
n_{\parallel}	Δn_{\parallel}	n_{\perp}	Δn_{\perp}

5. Среднее значение приращения отсчетов датчиков деформаций $\Delta n_{\text{ср}\parallel} = \dots, \Delta n_{\text{ср}\perp} = \dots$.
6. Коэффициент Пуассона $\mu = \Delta n_{\text{ср}\perp} / \Delta n_{\text{ср}\parallel} = \dots$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение коэффициенту Пуассона.
2. В каком диапазоне изменяется коэффициент Пуассона изотропных материалов?
3. Опишите принцип работы тензорезистора.
4. Почему при работе с тензорезисторами используют мостовую измерительную схему?
5. Как компенсируется тепловое изменение сопротивления тензорезистора?
6. Покажите на рисунке, как расположены на образце тензорезисторы.
7. Как рассчитать предельную нагрузку на образец при определении коэффициента Пуассона?

Лабораторная работа № 7 ИСПЫТАНИЕ НА КРУЧЕНИЕ

Цель работы: определение механических характеристик материалов при кручении, выявление характера разрушения пластичных и хрупких образцов.

Теоретические сведения

Для расчета деталей машин и элементов конструкций, работающих на кручение, необходимо иметь данные о механических характеристиках материалов, полученные при испытаниях, когда образец нагружают только крутящим моментом M_k . При этом в его поперечных сечениях возникают касательные напряжения τ . В произвольной точке круглого сечения с полярным моментом инерции I_p , отстоящей от оси вала на расстоянии ρ , напряжение рассчитывается по формуле $\tau = M_k \rho / I_p$.

В соответствии с законом парности в продольных сечениях образца начинают действовать такие же по величине касательные напряжения. Следовательно, при кручении образца круглого

поперечного сечения его материал работает в условиях чистого сдвига (рис. 22).

В этом случае в плоскостях, расположенных под углом 45° к продольной оси образца, касательных напряжений нет, зато действуют максимальные нормальные напряжения σ_1 – растягивающие и σ_3 – сжимающие. Эти напряжения и площадки, на которых они действуют, называют главными.

Расчет показывает, что нормальные и касательные напряжения по модулю равны ($\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau_{\max}$), поэтому разрушение образца может произойти как от сдвига, так и от отрыва – в зависимости от свойств материала. У пластичных материалов, например малоуглеродистой

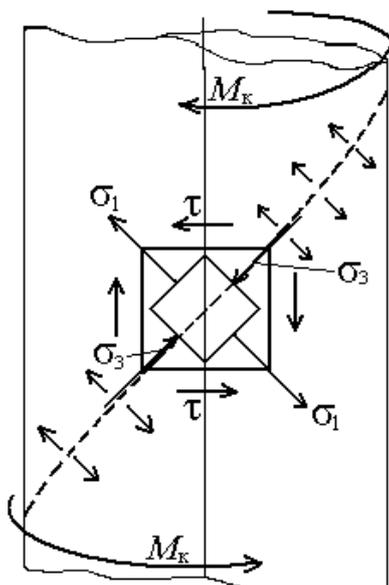


Рис. 22

стали, сопротивление сдвигу меньше, чем сопротивление отрыву, и стальной образец разрушается от действия наибольших касательных напряжений в плоскости поперечного сечения.

Для хрупких материалов, например серого чугуна, сопротивление отрыву меньше, чем сопротивление сдвигу, поэтому чугунный образец разрушается по винтовой поверхности под углом 45° к оси образца от действия наибольших растягивающих напряжений σ_1 .

При кручении тонкостенных трубчатых образцов из пластичных материалов на поверхности образца образуются складки, также расположенные по винтовой линии. Их появление вызвано действием наибольших сжимающих напряжений. Тонкие стенки образца от сжатия выгибаются и теряют устойчивость, образуя складки. Это явление называется местной потерей устойчивости.

При кручении деревянных образцов на их поверхности появляются продольные трещины. Разрушение происходит от касательных напряжений, действующих в продольном направлении. Эти напряжения приводят к межслойному сдвигу, сопротивление которому у древесины минимально.

Образцы для испытаний на кручение имеют цилиндрическую форму (рис. 23).

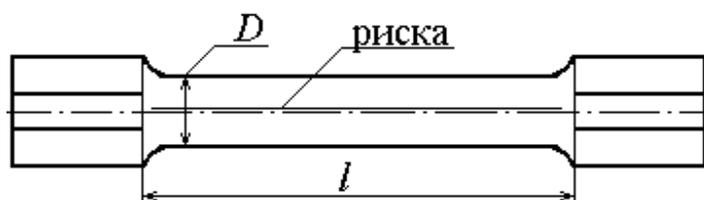


Рис. 23

Они изготавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 3565–60. На рисунке D и l – размеры рабочей части образца. Головки предназначены для крепления образца в захватах машины кручения. Во избежание проворачивания головки снабжены лысками (скосами).

Испытания проводятся на машине кручения типа КМ-50-1. Она оборудована записывающим устройством, которое в процессе испытания автоматически вычерчивает диаграмму зависимости крутящего момента M_k от угла закручивания образца φ (кривая деформации).

Порядок выполнения работы и ее оформление

Для стального образца

1. Вычертить эскиз образца, измерить диаметр D и длину его рабочей части l . На поверхности рабочей части образца провести риску (рис. 23).
2. Установить рукоятку скорости нагружения машины в положение, соответствующее $n = 0,3$ об/мин, а рукоятку масштаба записи угла закручивания образца в положение $m = 1$ град/мм.
3. Закрепить образец в захваты машины кручения.
4. Включить машину и довести образец до разрушения. При этом риска на его поверхности позволяет проследить за процессом закручивания.
5. По диаграмме определить: $M_{\text{пц}}$ – момент, соответствующий пределу пропорциональности; $M_{\text{т}}$ – момент, соответствующий условному пределу текучести; $M_{\text{пч}}$ – момент, соответствующий пределу прочности; $\varphi_{\text{ост}}$ – остаточный угол закручивания.

Для определения $M_{\text{пц}}$ нужно провести на диаграмме прямую OE , совпадающую с прямолинейным участком кривой деформации (рис. 24).

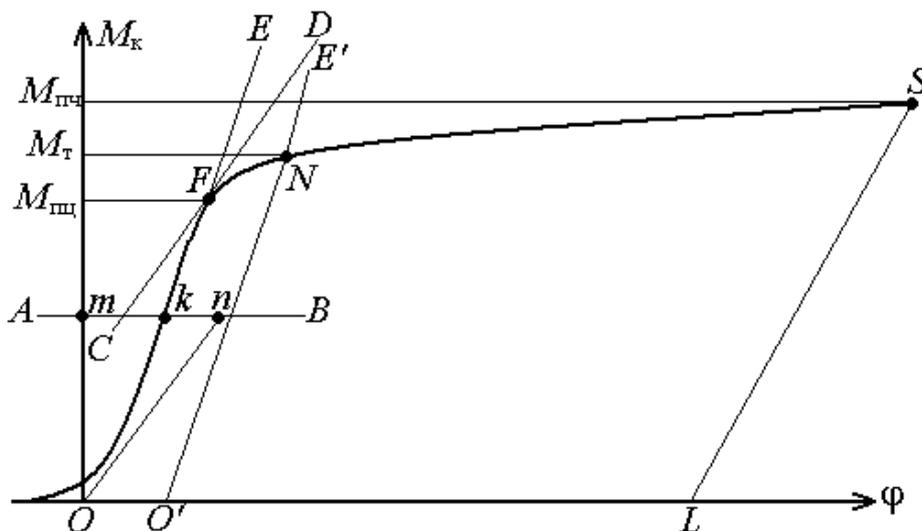


Рис. 24

Из точки O провести ось ординат OM_k . Затем на произвольном расстоянии от оси абсцисс провести параллельно ей прямую AB . На этой прямой отложить отрезок kn , равный половине полученного отрезка mk . Через точку n и начало координат провести прямую On и параллельную ей CD – касательную к кривой деформации. Ордината точки касания F соответствует $M_{пц}$. Найти численное значение $M_{пц}$.

Для определения M_T от начала координат отложить отрезок OO' , соответствующий остаточному сдвигу $\gamma = 0,003$ рад. Из точки O' провести прямую $O'E'$, параллельную прямой OE . Ордината точки N пересечения прямой $O'E'$ с кривой деформации соответствует M_T .

Для определения длины отрезка OO' необходимо рассчитать угол закручивания образца $\varphi_{0,3}$ в градусах, соответствующий остаточному сдвигу $\gamma = 0,003$ рад, по формуле

$$\varphi_{0,3} = (0,003 \cdot 2l / D) 180 / \pi = 0,34l / D,$$

а длину отрезка OO' – по соотношению

$$OO' = \varphi_{0,3} / m,$$

где m – масштаб записи угла закручивания образца, который устанавливается на записывающем устройстве перед проведением испытаний, град/мм.

Рассчитать числовое значение M_T .

Ордината точки S соответствует $M_{пч}$. Используя масштаб диаграммы рассчитываем значение $M_{пч}$.

Для определения $\varphi_{ост}$ из точки S следует провести прямую SL , параллельную OE , отрезок OL соответствует $\varphi_{ост}$. Рассчитать значение $\varphi_{ост}$.

Вычислить значение механических характеристик:

- предела пропорциональности $\tau_{пц}$, МПа: $\tau_{пц} = M_{пц} / W_p$, где $W_p = \pi D^3 / 16$ – полярный момент сопротивления круглого сечения, мм^3 ;
- условного предела текучести $\tau_{0,3}$, МПа: $\tau_{0,3} = M_T / W_p$;
- предела прочности $\tau_{пч}$, МПа: $\tau_{пч} = M_{пч} / W_p$;
- относительного угла закручивания θ , рад/мм: $\theta = (\varphi_{ост} / l) \pi / 180$;
- максимального остаточного угла сдвига γ_{max} , рад: $\gamma_{max} = (\varphi_{ост} D / 2l) \pi / 180$.

6. Вычертить эскиз образца после испытания, объяснить характер разрушения.

7. Полученные данные внести в таблицу:

Наименование параметра	Обозначение	Материал образца	
		Сталь	Чугун

К полученным данным относятся: диаметр рабочей части образца D , мм; длина рабочей части образца l , мм; полярный момент сопротивления сечения образца W_p , мм^3 ; момент, соответствующий пределу пропорциональности $M_{пц}$, Н·м; момент, соответствующий условному пределу текучести M_T , Н·м; разрушающий момент $M_{пч}$, Н·м; остаточный угол закручивания $\varphi_{ост}^o$; предел пропорциональности $\tau_{пц}$, МПа; условный предел текучести $\tau_{0,3}$; предел прочности $\tau_{пч}$; относительный угол закручивания θ , рад/мм; максимальный остаточный угол сдвига γ_{max} , рад.

Для чугунного образца

1. Повторить п. 1–3.
2. По диаграмме (рис. 25) определить $M_{пч}$ и рассчитать значение $\tau_{пч}$.
3. Повторить п. 5, 6.

Расчет допускаемых напряжений при кручении производится по формулам: $[\tau] = \tau_{0,3} / n$ – для пластичных материалов и $[\tau] = \tau_{пч} / n$ – для хрупких материалов, где n – коэффициент запаса прочности,

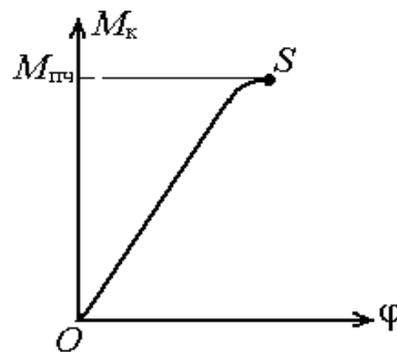


Рис. 25

назначаемый в диапазоне от 1,5 до 3 в зависимости от условий работы рассчитываемой на прочность детали.

Контрольные вопросы

1. Как рассчитать напряжение в произвольной точке поперечного сечения круглого образца при кручении?
2. В каком напряженном состоянии находится материал круглого образца при кручении?
3. Какие напряжения приводят к разрушению образца пластичного материала и как при этом расположена поверхность разрушения?
4. Какие напряжения приводят к разрушению образца хрупкого материала и как при этом расположена поверхность разрушения?
5. Какой вид имеет типичная диаграмма кручения пластичного материала?
6. Какой вид имеет типичная диаграмма кручения хрупкого материала?
7. Перечислите механические характеристики материала, получаемые при испытаниях на кручение.

Лабораторная работа № 8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ СДВИГА

Цель работы: опытная проверка закона Гука при кручении, определение модуля сдвига стали.

Теоретические сведения

Для расчета угловых деформаций элементов конструкций, работающих на сдвиг, необходимо располагать сведениями о жесткости материала при данном виде нагружения. Так же как и при растяжении (лаб. работа № 5), при сдвиге в определенных пределах имеется прямо пропорциональная зависимость между нагрузкой и деформацией, называемая законом Гука. Коэффициент пропорциональности между касательным напряжением τ и углом сдвига γ называется модулем сдвига G или модулем упругости второго рода.

Очевидно, что для определения модуля сдвига G необходимо создать в образце состояние чистого сдвига и измерить угол сдвига γ при известном касательном напряжении τ .

Наиболее просто чистый сдвиг можно получить при кручении образца круглого поперечного сечения (лаб. работа № 7). В этом случае измеряют угол закручивания $\Delta\varphi$ участка образца длиной l при действии на нем крутящего момента $M_{кр}$. Модуль сдвига рассчитывают из выражения $G = M_{кр}l / \varphi I_p$, где $I_p = \pi d^4 / 32 \approx 0,1d^4$.

Схематическое изображение установки для определения модуля сдвига показано на рис. 26. Стальной образец 2 с диаметром d одним концом зашпелен в основании установки, другой конец опирается на шарикоподшипник 3 и соединен со стержнем 4, на котором расположен груз весом Q . Стержень опирается на поворотный упор, снабженный рукояткой 5. В двух сечениях образца, отстоящих друг от друга на расстояние l , к нему на струбцинах прикреплены рычаги 1 и 7. На расстояниях R_1 и R_2 от продольной оси образца установлены измерители перемещений – индикаторы часового типа 6 и 8, штоки которых упираются в рычаги.

При повороте рукоятки 5 груз Q начинает опускаться и его сила тяжести создает в образце крутящий момент $M_{кр} = Qa$. Величина крутящего момента во всех сечениях образца одинакова (см. эпюру $M_{кр}$). Под его действием сечения образца начинают поворачиваться вокруг продольной оси. И чем дальше от заделки находится сечение, тем на больший угол оно поворачивается (см. эпюру φ , где l^* – расстояние от заделки).

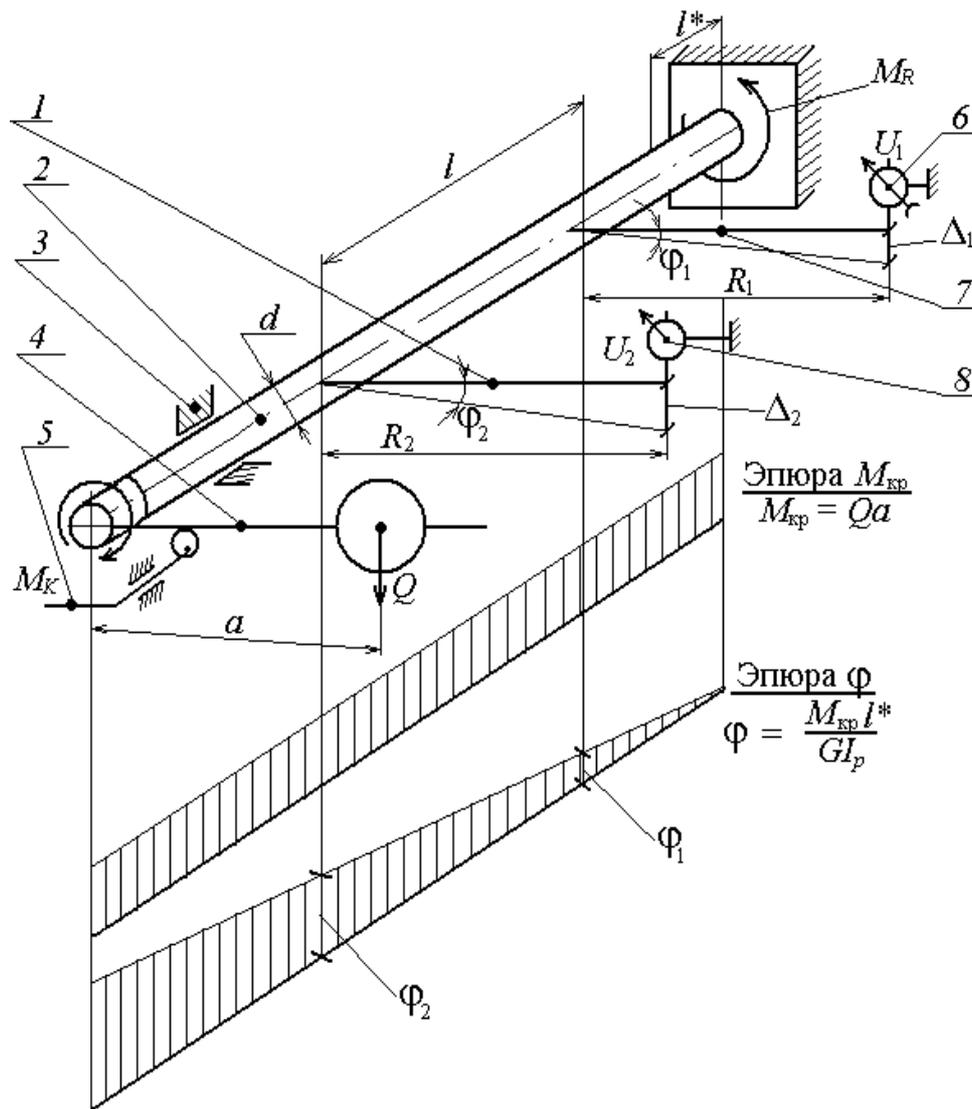


Рис. 26

Модуль сдвига определяется на средней части образца длиной l , удаленной от мест приложения крутящих моментов. Поэтому в качестве угла закручивания φ этой части образца принимается разность углов поворота сечений в конце φ_2 и в начале φ_1 участка, т. е. $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Для расчета углов поворота сечений φ_i при помощи индикаторов δ и δ измеряют линейные перемещения рычагов Δ_i , установленных в соответствующих сечениях на определенном расстоянии R_i от оси образца. Ввиду малости углов можно считать, что $\varphi_i \approx \Delta_i / R_i$.

Порядок выполнения работы

1. Измерить диаметр образца d .

2. Измерить длину рабочей части образца l (расстояние между струбцинами 1 и 7).

3. Измерить расстояния R_1 и R_2 , мм, от оси образца до индикаторов 6 и 8. Записать цену деления индикаторов C_1 и C_2 .

4. Определить массу груза Q .

5. Составить таблицу.

№ п/п	a , м	$M_{кр}$, Н·м	n_1	Δ_1 , мм	φ_1 , рад	n_2	Δ_2 , мм	φ_2 , рад	φ , рад	G , МПа
----------	---------	-------------------	-------	--------------------	----------------------	-------	--------------------	----------------------	--------------------	--------------

6. Установить груз Q в первоначальное положение при $a_1 = a_{min}$ (груз расположен вблизи образца).

7. Установить на нуль стрелки индикаторов 6, 8.

8. Нагрузить образец путем медленного опускания груза при повороте рукоятки 5.

9. Снять показания индикаторов $n_{1(1)}$ и $n_{2(1)}$ и записать в таблицу.

10. Повторить испытание при 4–5 различных положениях груза (п. 7–9).

Содержание отчета

1. Вычертить схему установки и записать результаты измерений (п. 1–4).

2. Вычислить полярный момент инерции сечения образца I_p , м⁴.

3. Вычислить для каждого из испытаний: крутящий момент $M_{кр}$, Н·м, линейные перемещения рычагов $\Delta = nC$, мм, соответствующие им углы поворота сечений φ_i и угол закручивания участка образца φ , а также модуль сдвига G .

4. Вычислить среднее значение модуля сдвига G для стали.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Гука при кручении.

2. Каким образом наиболее просто получить в образце чистый сдвиг?

3. Начертите схему измерения угла поворота сечения вала.

4. Какие деформации будет испытывать вал, если убрать подшипник 3 (рис. 26)?

5. Запишите формулу для вычисления модуля сдвига и укажите наименования входящих в нее величин.

6. Почему один из рычагов 1 и 7 всегда поворачивается на больший угол (рис. 26)?

Лабораторная работа № 9 ОПЫТНАЯ ПРОВЕРКА УНИВЕРСАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ УПРУГОЙ ЛИНИИ БАЛКИ

Цель работы: ознакомиться с методикой экспериментального определения прогиба балки, сравнить измеренный и рассчитанный прогибы.

Теоретические сведения

Во многих случаях помимо обязательного выполнения условия прочности балка должна отвечать и условию жесткости, т. е. ее максимальный прогиб не должен превышать допустимого значения.

Для расчета прогибов балок наряду с другими методами используется универсальное уравнение упругой линии балки.

Рассмотрим балку на двух опорах, нагруженную силой F , приложенной посередине пролета l (рис. 27).

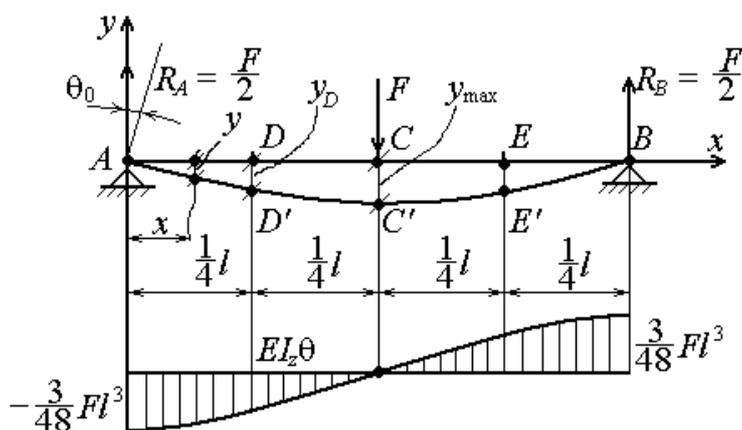


Рис. 27

Приближенное дифференциальное уравнение упругой линии балки ($AD'CE'B$) при небольших прогибах имеет вид $d^2y/dx^2 = M_z(x)/EI_z$, где y – прогиб балки в сечении, отстоящем от начала координат на расстоянии x ; $M_z(x)$ – изгибающий момент, действующий там же; E – модуль упругости материала балки; I_z – осевой момент инерции сечения балки.

Решение этого уравнения в общем виде называется универсальным уравнением упругой линии балки и применительно к данной балке имеет вид

$$EI_z y = EI_z y_0 + EI_z \theta_0 x + R_A \frac{x^3}{6} - F \frac{\left(x - \frac{1}{2}l\right)^3}{6},$$

где y_0, θ_0 – прогиб и угол поворота сечения балки в начале координат, $EI_z y_0, EI_z \theta_0$ – это т. н. начальные параметры, которые являются постоянными интегрирования и зависят от способа крепления балки в начале координат.

Очевидно, что для вычисления прогиба в любом сечении балки вначале необходимо определить две неизвестные величины – $EI_z y_0$ и $EI_z \theta_0$. Для данной балки начало координат расположено на шарнирно-неподвижной опоре A , поэтому прогиб $y_0 = y_A = 0$, а угол поворота сечения $\theta_0 = \theta_A \neq 0$. Таким образом, первая неизвестная $EI_z y_0 = 0$. Вторая $EI_z \theta_0$ может быть найдена из условия, что прогиб на опоре B также отсутствует. В результате решения уравнения $y = y_B = 0$ получаем $EI_z \theta_0 = -(3 / 48)Fl^2$.

Для расчета прогиба в любом сечении, например в точке D (при $x_D = (1 / 4)l$), в уравнение записывают только те силы, которые действуют на участке от начала координат до этого сечения, т. е. только R_A .

Положение сечения с максимальным прогибом y_{\max} определяют, анализируя углы поворота сечений балки θ . В таком сечении $dy / dx = \theta = 0$. Для данной балки в силу симметрии y_{\max} , очевидно, будет посередине пролета при $x = (1 / 2)l$.

Для экспериментального определения прогиба измеряют линейное перемещение точки, принадлежащей заданному сечению балки. С этой целью под балку устанавливают датчик перемещения, обычно индикатор часового типа, который измеряет перемещение нижней грани сечения.

Описание экспериментальной установки. В данной работе в качестве модельной используется балка двутаврового сечения на двух опорах. Для ее нагружения применяется гидравлический цилиндр, расположенный в основании установки под серединным сечением балки. Гидростатическое давление в цилиндре, а значит, и сила F , действующая на балку, регулируется с помощью дросселя, управляемого вручную. Значение силы F определяют по шкале манометрического силоизмерителя, подключенного к гидросистеме установки.

Для измерения прогиба балки используется индикатор часового типа, закрепленный на переносной стойке. Ее уставляют на основание (раму) установки под нужным сечением балки. При этом положение индикатора на стойке должно быть таким, чтобы его шток контактировал с нижней поверхностью двутавра. При нагружении перемещение штока соответствует прогибу балки.

Порядок выполнения работы

1. Измерить длину балки l .
2. Измерить высоту h и ширину b двутаврового сечения, см. Высота h соответствует номеру двутавра. По таблице сортамента прокатной стали определить соответствующий осевой момент инерции сечения I_z .
3. Используя универсальное уравнение упругой линии балки, выразить в общем виде ее прогибы в трех сечениях: при $x_1 = x_D = (1/4)l$, $x_2 = x_C = (1/2)l$ и $x_3 = x_E = (3/4)l$. Вычислить эти прогибы при заданном преподавателем значении силы F .
4. Записать цену деления шкалы c используемого в работе индикатора часового типа.
5. Установить стойку с индикатором в сечении D . Произвести предварительное нагружение балки силой F_0 и установить шкалу индикатора на нуль. Затем увеличить нагрузку на силу F и снять показания индикатора n . Аналогично произвести измерения прогибов в сечениях C и E .
6. Рассчитать значения измеренных прогибов $y^{\text{эк}} = cn$.
7. Произвести расчет расхождений теоретических и экспериментальных значений прогибов.

Содержание отчета

1. Схема установки. 2. Результаты измерений. 3. Расчет прогибов.

Контрольные вопросы

1. Какой параметр сечения используется для расчета балки на жесткость?
2. Запишите приближенное дифференциальное уравнение упругой линии балки.
3. Что называют начальными параметрами в универсальном уравнении упругой линии балки? Каковы они для модельной балки?
4. Какой прибор используется для измерения прогиба?

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Испытание материалов на растяжение.....	3
.....	
Лабораторная работа № 2. Испытание на сжатие пластичных и хрупких материалов.....	15
Лабораторная работа № 3. Испытание стального образца на срез (перерезывание).....	21
Лабораторная работа № 4. Испытание древесины на скалывание.....	24
Лабораторная работа № 5. Определение модуля продольной упругости.....	26
Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента Пуассона.....	30
Лабораторная работа № 7. Испытание на кручение.....	35
Лабораторная работа № 8. Определение модуля сдвига.....	40
Лабораторная работа № 9. Опытная проверка универсального уравнения упругой линии балки.....	43

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторные работы

Составители: **Дорожко** Александр Валентинович,
Макаревич Сергей Степанович

Редактор Т. Е. Самсанович

Подписано в печать 14.01.2008. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 2,7. Уч.-изд. л. 2,8.
Тираж 500 экз. Заказ

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220006. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».

220006. Минск, Свердлова, 13.

ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.