

Министерство образования и науки Российской Федерации

**Новомосковский институт (филиал)
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
«Российский химико-технологический университет имени
Д.И.Менделеева»**

**ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА
ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА
МЕХАНИКА**

Учебно-методическое пособие

Часть 1. Сопротивление материалов

**Новомосковск
2013**

УДК 620.1
ББК 30.121
П 759

Рецензент:
доктор технических наук, профессор Головин К.А.
(Тульский государственный университет)

Составители: А.Л. Суменков, И.И. Семочкин, Л.В. Лукиенко, А.Н. Афросин, В.Я. Цыцора

П 759 Прикладная механика, техническая механика, механика. Учебно-методическое пособие. Часть 1. Сопротивление материалов. Лабораторно - практические работы / ФГБОУ ВПО «РХТУ им. Д.И. Менделеева», Новомосковский институт (филиал). Сост.: А.Л. Суменков, И.И. Семочкин, Л.В. Лукиенко, А.Н. Афросин, В.Я. Цыцора. Новомосковск, 2013.- 48 с.

Приведено описание восьми лабораторно-практических работ по основным разделам первой части курсов «Прикладная механика», «Техническая механика», «Механика». Каждая работа содержит вопросы для самопроверки и список необходимой литературы. Имеются теоретические сведения, описание лабораторных установок и порядка выполнения работ.

Ил. 20. Таблиц 7.

УДК 620.1
ББК 30.121

© ГОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Новомосковский институт (филиал), 2010

Оглавление

Лабораторно - практическая работа 1.1	
Испытание материалов на растяжение	4
Лабораторно - практическая работа 1.2	
Определение механических характеристик пластмасс при растяжении	13
Лабораторно - практическая 1.3	
Определение основных механических характеристик материалов при сжатии	19
Лабораторно - практическая работа 1.4	
Определение механических свойств пластмасс при сжатии	25
Лабораторно - практическая работа 1.5	
Определение нормальных напряжений в балке при изгибе	29
Лабораторно - практическая работа 1.6	
Определение деформаций при изгибе	33
Лабораторно - практическая работа 1.7	
Определение модуля упругости пластмасс при статическом изгибе	41
Лабораторно – практическая работа 1.8	
Исследование явления потери устойчивости сжатого стержня	44

ЧАСТЬ 1

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторно - практическая работа 1.1

Испытание материалов на растяжение

Цель работы: Экспериментальное определение механических характеристик материалов.

Общие сведения. Основные механические характеристики материалов определяют опытным путём по результатам испытаний стандартных образцов на растяжение, сжатие, кручение, изгиб. По характеру нагружения различают испытания статические, динамические и испытания на усталость (*при переменных напряжениях*).

Наибольшее распространение получили испытания на растяжение при малой скорости нагружения (*при статическом нагружении*). Форма и размеры стандартных цилиндрических образцов показаны на рис. 1.1.1. Образцы бывают десятикратные (*длинные*) (рис. 1.1.1 а,б) с отношением начальной расчётной длины l_0 к начальному диаметру образца d_0 , равном 10, то есть $l_0/d_0=10$, и – пятикратные (*короткие*) (рис. 1.1.1 в) с отношением $l_0/d_0=5$.

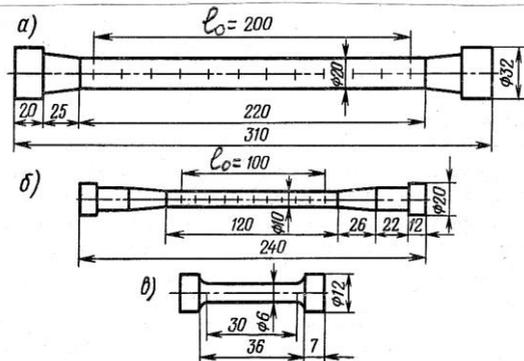


Рисунок 1.1.1 Стандартные образцы для испытаний материалов на растяжение

Испытания проводят на специальных разрывных машинах. В процессе испытаний образец устанавливают в захватах разрывной машины и медленно растягивают вплоть до разрушения. Одновременно диаграммный аппарат ма-

шины записывает диаграмму зависимости между нагрузкой F , растягивающей образец, и удлинением образца Δl .

Чтобы исключить влияние размеров образца, эту диаграмму перестраивают: растягивающую силу (ординаты) делят на начальную площадь поперечного сечения A_0 , а абсолютное удлинение (абсциссы) – на начальную расчетную длину l_0 . Полученная диаграмма в координатах $\sigma - \varepsilon$,

где $\sigma = F/A_0$, $\varepsilon = \Delta l/l_0$ называется условной диаграммой растяжения, которая не зависит от размеров образца, а характеризует только свойства материала.

По этой диаграмме определяются характеристики прочности, а непосредственными замерах образца до и после деформации определяются характеристики пластичности.

На рис.1.1.2 показан примерный вид диаграммы растяжения, полученной при испытании образца, изготовленного из малоуглеродистой стали Ст3.

Рассмотрим основные участки этой диаграммы и дадим определения основных механических характеристик, которым соответствуют наиболее характерные точки диаграммы.

Участок ОА – зона пропорциональности – прямая линия, заканчивающаяся точкой А, соответствующей пределу пропорциональности σ_{pr} .

Предел пропорциональности σ_{pr} – наибольшее напряжение, до которого материал подчиняется закону Гука. Для стали Ст3 $\sigma_{pr} = 210$ МПа.

На участке АВ линия диаграммы отклоняется от прямой, но после снятия нагрузки с образца остаточное удлинение практически отсутствует (не превышает 0,05% от расчетной длины l_0).

Точка В соответствует пределу упругости.

Предел упругости (σ_e) – наибольшее напряжение, до которого отсутствуют остаточные деформации (остаточные деформации не превышают 0,05% от расчетной длины l_0).

Для стали Ст3 $\sigma_e = 220$ МПа

При дальнейшем увеличении нагрузки на участке С наблюдается так называемая – **площадка текучести**, которая соответствует физическому пределу текучести σ_y .

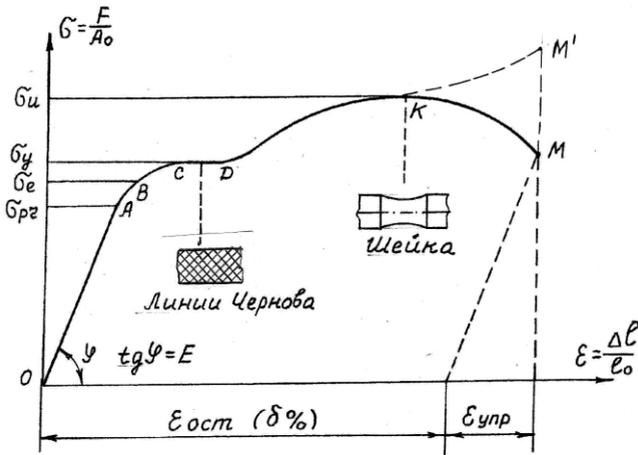


Рис. 1.1.2. Диаграмма растяжения образцов из малоуглеродистой стали

Физический **предел текучести** σ_y (или σ_T) – напряжение, при котором деформация образца растёт без увеличения нагрузки.

Для стали Ст3 $\sigma_y = 230$ МПа. Текучесть сопровождается значительными взаимными сдвигами кристаллов. Поверхность образца становится матовой, на ней можно видеть сетку из линий, наклонённых к оси образца примерно под углом 45° (линии Людерса-Чернова). Эти линии соответствуют площадкам, на которых при растяжении образца возникают наибольшие касательные напряжения. Это подтверждает гипотезу о том, что текучесть материала и сдвиг кристаллов обусловлены касательными напряжениями.

Многие сплавы цветных металлов и легированные стали, обладающие достаточно высокой пластичностью, дают диаграмму растяжения без площадки текучести. Для этих материалов введено понятие **условного предела текучести**, $\sigma_{0,2}$ представляющего собой напряжение, соответствующее относительному остаточному удлинению, равному $0,2\%$. В этом случае в справочниках в качестве предела текучести приводится именно условный предел текучести, причём и физический и условный пределы текучести обозначаются одинаково – σ_y (или σ_T).

Удлинившись на некоторую величину на площадке текучести CD при постоянном значении силы, материал снова приобретает способность сопротивляться растяжению (упрочняется). Диаграмма за точкой D вновь поднимается вверх, хотя и более полого, чем на участке OA, вплоть до верхней точки диаграммы – точки K. Участок DK называют зоной упрочнения материала.

Напряжение, которое соответствует максимальной нагрузке на образец (в точке К) называется **пределом прочности** и обозначается σ_u (индекс *и* от английского слова *ультиматум* – предельное).

Для материалов, образцы из которых дают перед разрывом шейку, вместо термина **предел прочности** используют термин **временное сопротивление разрыву**.

До точки К образец деформировался равномерно по всей рабочей длине. В точке К на образце появляется местное сужение – шейка. Площадь сечения образца в шейке быстро уменьшается, уменьшается и нагрузка, необходимая для дальнейшего деформирования и условное напряжение, а в точке М происходит хрупкий разрыв образца по наименьшему сечению шейки.

Участок КМ называют зоной местной деформации. Истинное напряжение по сечению шейки, то есть напряжение, отнесенное к поперечному сечению шейки, при этом возрастает (на рисунке оно показано штриховой линией).

Все перечисленные характеристики σ_{pr} , σ_e , σ_y , σ_u являются характеристиками прочности материала.

Характеристики пластичности

Пластичностью материала называют способность материала полужать перед разрушением значительные остаточные деформации.

Оценивают пластичность двумя величинами: δ и ψ

- $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$ – относительное остаточное удлинение образца

(отношение остаточной продольной деформации образца к начальной расчётной длине l_0 , выраженное в %).

где l_k – длина расчетной части образца после разрыва, измеряемая после соединения обеих частей разорванного образца.

Относительное удлинение длинного образца обозначается δ_{10} , а короткого δ_5 . Чем больше δ , тем более пластичным считается материал. Весьма пластичными являются алюминий, отоженная медь, латунь, малоуглеродистая сталь. К менее пластичным относятся бронза и дюраль.

- $\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\%$ – относительное остаточное сужение

(отношение изменения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади образца A_0).

где A_k – площадь поперечного сечения разорванного образца в наиболее тонком месте шейки. Для стали Ст3 $\psi = 50...60\%$.

Значение δ для одного и того же материала зависит от отношения длины рабочей части образца к диаметру d_0 . С ростом l_0/d_0 величина δ уменьшается. Для пятикратных образцов относительное удлинение при разрыве больше, чем для десятикратных, т.е. $\delta_5 > \delta_{10}$. Поэтому величина ψ характеризует свойства пластичности более точно, чем δ , поскольку она меньше зависит от формы и размеров образца. Чем выше δ и ψ , тем пластичнее материал. Свойства пластичности имеют решающее значение для штамповки, вытяжки, гибке и т.д.

Хрупкость – способность материала разрушаться при очень малых остаточных деформациях (величина относительного удлинения при растяжении для хрупких материалов не превышает 2...5%), то есть, хрупкость – это свойство, противоположное пластичности. Материалы обладающие этим свойством, называются хрупкими. К хрупким материалам относятся стекло, кирпич, чугун, высокоуглеродистая сталь. С повышением содержания углерода в стали ее предел прочности возрастает, а пластичность снижается.

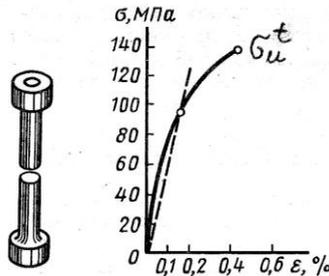


Рисунок 1.1.3 Диаграмма растяжения образцов из чугуна

На рис.1.1.3 представлена диаграмма растяжения образцов из чугуна. Из диаграммы видно, что даже в начальной стадии растяжения хрупкие материалы плохо подчиняются закону Гука. При практических расчетах отклонение от закона Гука не учитывают, диаграмму спрямляют прямой линией, (на рисунке – штриховая линия), что позволяет при расчетах пользоваться законом Гука вплоть до разрушения образца. Разрыв образца наступает внезапно без образования шейки. При таком виде диаграммы для хрупких материалов определяют только одну характеристику прочности – предел прочности при растяжении $\sigma_{иt}$.

Лабораторное оборудование и образцы

Испытания могут проводиться на разрывных машинах типа Р-0,5; Р-5; УММ -20 и т.д.

Машина оснащается подвижным и неподвижным захватами для зажима головок образца, силоизмерителем и диаграммным аппаратом барабанного типа. Погрешность записи величины деформации составляет $\pm 5\%$ от действительного значения, а средние отклонения нагрузки $\pm 1\%$. Во время испытаний должны соблюдаться следующие условия:

а) надежное центрирование образца в захватах испытательной машины;

б) плавность нагружения;

в) скорость перемещения подвижного захвата при испытании, мм/мин до предела текучести - не более 0,1; за пределом текучести – не более 0,4 от длины расчетной части - образца;

г) возможность приостанавливать нагружение с точностью до одного наименьшего деления шкалы силоизмерителя, либо плавно разгружать образец.

Величина нагрузки при испытании отсчитывается с точностью до 0,5 от наименьшего деления шкалы силоизмерителя. Наибольшая нагрузка должна составлять не менее 0,1 применяемой шкалы, либо не ниже 0,004 от предельной нагрузки испытательной машины.

Для испытаний на растяжение применяют образцы (рис. 1.1.1) с начальной расчетной длиной $l_0 = 5,65 \cdot \sqrt{A_0}$ или $l_0 = 11,6 \cdot \sqrt{A_0}$ диаметром от 3 мм и более. Наиболее предпочтительны цилиндрические образцы с диаметром $d_0 = 10$ мм и начальной расчетной длиной $l_0 = 10 \cdot d_0$ и $l_0 = 5 \cdot d_0$, именуемые соответственно «длинными» и «короткими».

Геометрические размеры образцов приведены в таблице 1.1.1.

Таблица 1.1.1

Общие размеры					Длинный образец $l_0 = 10 \cdot d_0$				Короткий образец $l_0 = 5 \cdot d_0$			
d_0	D	h	h_1	R	№ обр.	l_0	l	L	№ обр.	l_0	l	L
20	34	25	5	5	13	200	220	$L = l + 2h + 2h_1$	13к	100	120	$L = l + 2h + 2h_1$
15	28	20	3	3	14	150	265		14к	75	90	
10	16	10	3	3	15	100	110		15к	50	60	
5	11	10	2,5	1,5	18	50	55		18к	25	30	
4	9	8	2,5	1,5	19	40	44		19к	20	24	
3	7	7	2,0	1,5	20	30	33		20к	15	18	

Порядок выполнения работы и подсчет результатов

1. Ознакомиться с испытательной машиной и образцами.
2. Ограничить неглубокими кернами или рисками начальную расчетную длину образца. Величина l_0 округляется до ближайшего числа, кратного 5 или 10.
3. Измерить не менее чем в трех местах (в середине и по краям рабочей части) начальный диаметр образца в рабочей части d_0 , вычислить площадь поперечного сечения по наименьшим из полученных размеров.
4. Подготовить образец, установить в захваты испытательной машины и произвести плавное нагружение вплоть до разрушения. Записать диаграмму растяжения.

Испытания считаются недействительными:

- при разрыве образца за пределами расчетной длины;
- при образовании двух и более шеек или мест разрыва;
- при обнаружении ошибок в проведении испытаний или записи результатов.

5. Вычислить предел пропорциональности $\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_0}$.

6. Вычислить предел упругости (условный) $\sigma_{0,05} = \frac{F_{0,05}}{A_0}$.

7. Вычислить предел текучести (физический) $\sigma_y = \frac{F_y}{A_0}$

Нагрузка F_y , может быть определена по явно выраженной остановке стрелки силоизмерительного устройства испытательной машины, обусловленной деформацией образца без заметного увеличения нагрузки.

8. Вычислить временное сопротивление $\sigma_u = \frac{F_{max}}{A_0}$.

9. Измерить длину расчетной части образца после разрушения l_k и минимальный диаметр в месте разрыва d_k в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

10. Определить истинное сопротивление разрыву $S_k = \frac{F_k}{A_k}$,

где F_k - нагрузка в момент разрыва.

11. Вычислить относительное удлинение образца $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$.

12. Вычислить относительное сужение после разрыва

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100\%.$$

13. Построить диаграмму растяжения в координатах $\sigma - \varepsilon$.

14. Заполнить протокол испытаний (табл.1.1.2).

Таблица 1.1.2

№ п/п	Начальный диаметр d_0 , мм	Диаметр после разрыва d_k , мм	Начальная расчетная длина l_0 , мм	Длина после разрыва l_k , мм	Разрушающее усилие F_{max} , Н	Усилие при пределе текучести F_y , Н	Усилие при пределе пропорциональности F_{pr} , Н	Временное сопротивление σ_u , МПа	Предел текучести σ_y , МПа	Пределе пропорциональности σ_{pr} , МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Скорость испытаний, мм/мин
----------	------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	--	--	--	-----------------------------------	--	--------------------------------------	----------------------------------	----------------------------

Вопросы для самопроверки

1. Какие механические характеристики получают испытанием образцов на растяжение?
2. Что называют пределом пропорциональности, упругости, текучести, временным сопротивлением?

3. Из каких соотношений выбирают начальную расчетную длину образца?
4. Как вычисляется относительное удлинение и сужение образцов после разрушения?
5. В каком случае считают испытания недействительными?
6. Чем лимитируется скорость нагружения?
7. Какую механическую характеристику повышают предварительным разгрузением образца?
8. Почему величины σ_{pr} , σ_e , σ_y , σ_u считают условными, а S_k - истинной?

Литература

1. Заблонский К.И. Прикладная механика / К.И. Заблонский, М.С. Беляев, И.Я. Телис и др. - Киев: Вища школа, 1999. – 280 с.
2. Степин П. А. Сопротивление материалов. - СПб.: М.: Краснодар: Лань, 2012. – 320 с.

Лабораторно - практическая работа 1.2

Определение механических характеристик пластмасс при растяжении

Цель работы: Ознакомление с особенностями испытания пластических масс при растяжении, определение пределов прочности и текучести, а также относительного удлинения.

Общие сведения. Особенности строения полимеров обуславливают характерные закономерности их механических свойств, в том числе и механической прочности, и не позволяют пользоваться классическими представлениями о сопротивлении материалов. Большое влияние на механические свойства полимеров, в особенности на их прочность, оказывает тип надмолекулярной структуры. Под воздействием внешних сил полимерные материалы могут значительно удлиняться, так как длинная свернутая молекула способна распрямляться за счет гибкости цепи, а не увеличения расстояния между атомами. При этом важную роль играют межмолекулярные связи и тепловое движение.

Особенности строения полимеров проявляются в специфических закономерностях их разрушения. Полимеры, как и все твердые тела, разрушаются при напряжениях, меньших теоретической прочности. Однако их техническую прочность можно повысить до значений, близких к теоретическим (ориентированные, волокнистые материалы, линейные полимеры, кристаллизующиеся при растяжении, и др.). Расхождение между технической и теоретической прочностью объясняется тем, что в любом материале, независимо от его природы, есть различные дефекты, снижающие прочность. Воспроизвести на образцах или деталях из одного и того же материала одинаковый набор дефектов никогда не удастся. Наиболее полное представление о механических свойствах интересующего нас материала дает диаграмма «напряжение — деформация».

На рис. 1.2.1, *a* приведена диаграмма растяжения конструкционного полимерного материала при нормальной температуре и достаточно высокой скорости нагружения. В этих условиях испытуемый материал находится в стеклообразном состоянии. Начальный участок *OA* диаграммы соответствует области упругих деформаций, пропорциональных напряжениям и формально подчиняющихся закону Гука. Деформация на этом участке — упругая, восстанавливаемая. Отрезок *AB* соответствует так называемой вынужденно-эластической деформации. Здесь уже рост деформации не пропорционален напряжению. Вынужденная эластическая деформация, как и упругая, обратима и развивается при достаточно больших напряжениях. В точке *B* начинается необратимое удлинение полимера, которое до точки *B''* происходит при почти постоянном напряжении. Участок *BB''* соответствует вязкому течению мате-

риала при постоянном напряжении. За точкой B'' начинается участок упругого упрочнения с последующим разрушением в точке K .

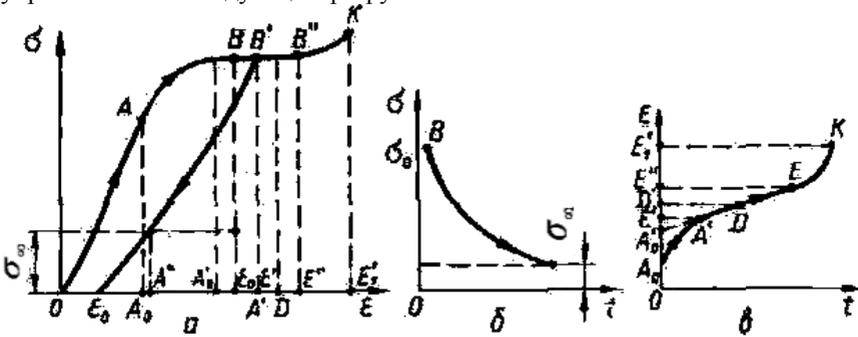


Рисунок 1.2.1. Деформативность полимерных материалов

Рассмотрим характерные особенности протекания процесса деформирования на выделенных участках. Если в точке B нагружение образца прекратить и, не изменяя значения деформации, провести наблюдения во времени, то можно заметить следующее. Через какой-то промежуток времени напряжение уменьшается от σ_0 до σ_∞ (рис. 1.2.1, б).

Самопроизвольное уменьшение напряжений со временем при постоянной деформации называют *релаксацией напряжений*. Кривая релаксаций $\sigma = f(t)$ имеет экспоненциальную зависимость от времени. Отношение $\sigma_\infty/\sigma_0 = E_\infty$ определяет равновесный модуль. Установлено, что время релаксации напряжений зависит от температуры, состояния полимера, размеров макромолекул и их энергии взаимодействия. На участке A_0D (рис. 1.2.1, в) скорость изменения деформации уменьшается до постоянного значения, характеризующего условия вязкого течения материала. Таким образом, общая деформация складывается из упругой OA_0 , вынужденно-эластической $A_0A'_0$, течения A'_0E'' и упрочнения $E''E'$ перед разрушением. Если в точке B' (рис. 1.2.1, а), характерной для вязкого течения, освободить материал от нагрузки, то процесс разгрузки пойдет по кривой $B'\epsilon_0$. Поведение материала в этом случае характеризуется запаздыванием деформации по отношению к напряжению. Первоначально происходит упругое восстановление $A'A''$, а затем деформация восстановления первоначального размера протекает с запаздыванием (упругое последствие). Продолжая прямую ED (рис. 1.2.1, в) до оси ординат, можно найти составляющую A'_0D' эластической деформации, соответствующую вязкому течению. Из диаграммы следует, что при разгрузке материала в точке B' составляющая $\epsilon'A'_0 = A'A'_0$ деформации, соответствующая вязкому течению, равна остаточной $O\epsilon_0$. Петля $OABB'\epsilon_0$ показывает работу, затраченную на потери внутри материала вследствие механического гистерезиса.

У различных видов жестких пластмасс диаграммы растяжения (рис. 1.2.2) могут быть совершенно непохожими. В зависимости от этого при растяжении определяют различные механические показатели. Для кривой 1 находят только характеристики разрушения, т. е. предел прочности и удлинение в момент разрыва. Для кривых 2 и 5 - характеристики разрушения и вынужденной эластичности, т. е. предел прочности и предел вынужденной эластичности (точки a , b), а также соответствующие им удлинения. У некоторых пластмасс диаграммы растяжения имеют явно выраженную площадку текучести (кривые 3 и 4). В этом случае определяют предел текучести и соответствующее ему относительное удлинение.

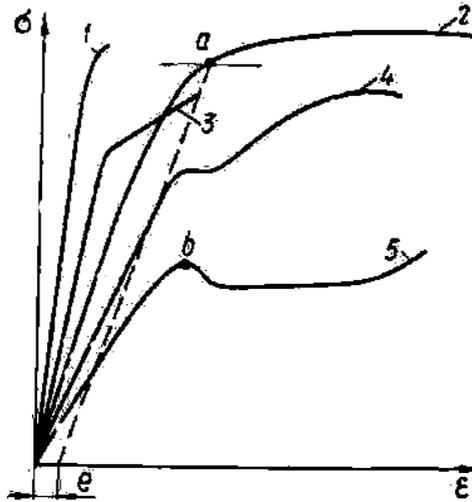


Рисунок 1.2.2. Диаграммы растяжения для различных видов жестких пластмасс

Испытания пластмасс на растяжение проводят по ГОСТ 11262—80. При этом определяют следующее:

- 1) разрушающее напряжение σ_p и предел текучести $\sigma_{т.р}$, которые вычисляют как отношения соответствующих усилий к первоначальной площади сечения A_0 образца;
- 2) относительное удлинение при разрыве ε_p и относительное удлинение, соответствующее пределу текучести $\varepsilon_{т.р}$ в процентах, определяемые как отношения соответствующих абсолютных деформаций к первоначальной длине l_0 рабочей части образца.

Нагрузку, определяющую предел текучести, измеряют в первый момент роста деформации, происходящего без заметного увеличения нагрузки, или в момент образования на образце местного сужения - шейки. Если испытываемый материал не имеет предела текучести, определяют условный предел текучести, т. е. напряжение, рассчитанное как отношение соответствующей нагрузки к первоначальному поперечному сечению образца. В этом случае (рис. 1.2.2, кривая 2) нагрузка должна соответствовать точке пересечения кривой на диаграмме σ - ε с прямой, параллельной начальному прямолинейному участку кривой, которая отсекает на оси ε определенное удлинение (отрезок e), указанное в стандартах или технических условиях на материал.

Лабораторное оборудование и образцы.

Для испытаний применяют образцы трех типов (рис. 1.2.3, табл. 1.2). Образцы типа 1 применяют для испытания пластмасс с высоким относительным удлинением при разрыве (полиэтилен, пластифицированный поливинилхлорид и др.). На образцах типа 2 испытывают большинство терморезистивных, термопластичных и слоистых полимерных материалов. Образец 3 (полоску) применяют для испытания стеклопластиков. Ширина образца указана в стандартах или технических условиях на материал. Изготавливают образцы формованием или механической обработкой полуфабрикатов и специальных заготовок. Механическую обработку следует проводить в продольном направлении. Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, трещин, раковин и других видимых дефектов. Такие же требования предъявляют к образцам и для других видов испытаний, если соответствующим стандартом не предусмотрены дополнительные условия. Измеряют образцы любым инструментом, точность которого не ниже 0,01 мм.

Испытание проводят на испытательных машинах, которые при растяжении образца обеспечивают измерение нагрузки с погрешностью не более 1 % измеряемой величины. Захваты' машины должны обеспечивать надежное крепление образца и совпадение его продольной оси с направлением растяжения. На показания приборов для измерения деформаций не должна влиять скорость перемещения подвижного захвата. При деформации рабочей части образца 0,5...10 мм погрешность измерения не должна превышать 0,1 %, а при деформации свыше 10 мм - 1 %. Для измерения деформации можно использовать следующее:

1) приборы, закрепляемые непосредственно на образце,- механические, электрические и другие типы тензометров;

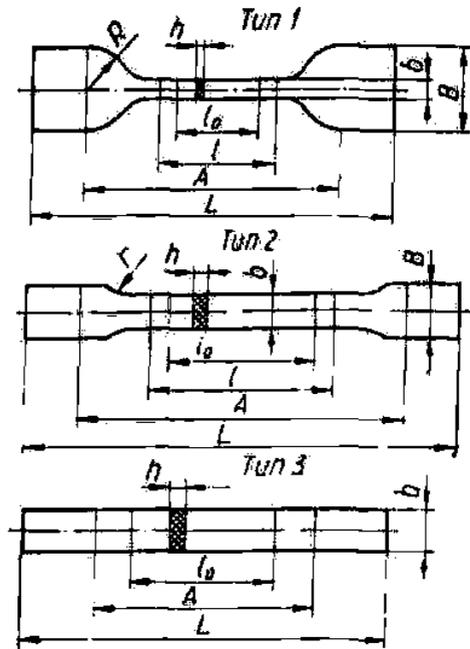


Рисунок 1.2.3. Образцы для испытаний пластмасс на растяжение

2) приборы с оптической или другой системой измерения, не закрепляемые на образце и позволяющие производить измерение по меткам, нанесенным на образец.

На результаты испытания большое влияние могут оказать скорость приложения нагрузки и температура окружающей среды. Поэтому от начала приложения нагрузки до разрушения образца должно пройти не менее 1 мин, а температура находится в пределах 20...22 °С.

Порядок выполнения работы

Измерить толщину и ширину рабочей части образца не менее чем в трех местах (в расчет принимают наименьшую площадь его поперечного сечения). Нанести на образец метки, ограничивающие базу l_0 (рабочую длину) и расстояние A границ захватов. Закрепить образец в захватах испытательной машины и установить на него тензометр с ценой деления 0,01 мм. Скорость перемещения подвижного захвата установить в пределах 10...15 мм/мин.

Таблица 1.2

Размеры образцов из жестких пластмасс при испытаниях на растяжение

Параметр, мм	Тип образца		
	1	2	3
Общая длина L (не менее)	115	150	250
Ширина B головки	25 ± 1	25 ± 0.5	25 ± 0.5
Длина l рабочей части	33 ± 1	60 ± 0.5	-
Ширина b рабочей части	6 ± 0.4	10 ± 0.5	15
Радиус закругления r	14 ± 0.5	-	-
Радиус закругления R	25 ± 1	-	-
Расстояние A между метками, определяющими положение кромок захватов на образце	80 ± 0.5	115 ± 5	170 ± 5
Толщина h рабочей части	2 ± 0.2	4	2 ± 0.2
Длина l_0 базы	25 ± 1	50 ± 0.5	50 ± 1

В процессе растяжения образца самопишущее диаграммное устройство записывает диаграмму в координатах «нагрузка - удлинение». Одновременно с этим для характерных точек нужно отсчитывать значения нагрузок (по циферблату силоизмерителя) и соответствующих деформаций (по шкале тензометра). Полученная диаграмма растяжения дает наглядное представление о процессе деформирования. По достижении предела текучести тензомер снять, чтобы в момент разрушения не повредить его. После разрушения образца обе его части вынуть из машины, соединить и определить остаточное удлинение. В расчет принимать результаты, полученные на образцах, разрушившихся в пределах рабочей части.

На основании полученных данных вычислить механические характеристики материала. В журнал лабораторных работ перенести диаграмму растяжения в выбранном масштабе, записать значения полученных механических характеристик, выполнить эскиз разрушенного образца.

Вопросы для самопроверки

1. Особенности испытания пластических масс на растяжение.
2. Каков характер деформирования полимерных материалов при растяжении? Нарисуйте диаграмму и покажите ее характерные точки.
3. Как определяют основные механические характеристики при растяжении пластмасс?
4. Каковы различия в диаграммах растяжения для мягкой стали и пластмасс?
5. Можно ли по виду разрушения образца при испытании на растяжение судить о пластичности материала?
6. Какие факторы существенно влияют на механические свойства полимерных материалов?

Литература

1. Цурпал И.А. Соппротивление материалов: Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П. Барабан, В.М. Швайко. - Киев: Выща школа, 1998. - 245 с.

Лабораторно - практическая работа 1.3

Определение основных механических характеристик материалов при сжатии

Цель работы: Исследовать поведение различных материалов при сжатии, определить предел пропорциональности для пластичных материалов, предел прочности для хрупких материалов и коэффициент анизотропии для анизотропных материалов.

Общие сведения: Испытания на сжатие – основные при определении механических характеристик хрупких материалов: чугуна, фарфора, естественных и искусственных строительных материалов. В отличие от испытаний на растяжение испытания на сжатие имеют свои особенности:

1. В процессе испытания пластичные материалы могут сжиматься, не разрушаясь и не дробясь на части, а хрупкие - разрушаются.
2. Деформационные и прочностные характеристики цилиндрического образца при испытаниях на сжатие существенно зависят от отношения высоты образца к диаметру.
3. На результаты испытаний значительно влияют условия трения по торцам образца.

Под действием сжимающей нагрузки различные материалы ведут себя по-разному.

Пластичные материалы (стали): При сжатии стального образца до некоторой нагрузки F_{pr} (рис.1.3.1, а) наблюдается пропорциональная зависимость между деформацией и вызвавшей ее нагрузкой. Отношение F_{pr} к первоначальной площади поперечного сечения A_0 называется пределом пропорциональности стали при сжатии:

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_0} \quad (1.1)$$

В процессе дальнейшего нагружения отмечается значительный рост деформаций, т.е. материал «течет», но без явно выраженной площадки текучести. Образец принимает бочкообразную форму (рисунок 1.3.1, б) вследствие наличия трения между торцами образца и поверхностями сжимающих плит. Чтобы увеличить дальнейшую деформацию, сжимающую нагрузку резко увеличивают. Образец не разрушается, а расплющивается, иногда с образованием трещин по краям. Пла-

стичные материалы при сжатии не имеют предела прочности, т.е. их можно расплющивать до получения фольги. Четко выражен только предел пропорциональности.

Хрупкие материалы (чугун): При сжатии чугунного образца практически с начала нагружения и до разрушения наблюдается нелинейная зависимость между силой и деформацией. Однако, в условиях тех небольших деформаций, при которых материал используют в различных деталях машин и сооружений, диаграмма $F-\Delta l$ представляет собой линию малой кривизны (рис.1.3.2, а). Поэтому в практических расчетах считают, что материал подчиняется закону Гука. Четко выражена только разрушающая нагрузка F_u , которая к тому же и максимальна. Отношение F_u к первоначальной площади A_0 поперечного сечения называют пределом прочности или временным сопротивлением σ_u чугуна при сжатии:

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0} \quad (1.2)$$

Образец, укорачиваясь, принимает бочкообразную форму (рисунок 1.3.2, б).

Это свидетельствует о наличии небольших пластичных деформаций. Разрушение происходит по плоскостям, наклоненным к оси образца примерно на $\alpha = 40...50^\circ$ (рис. 1.3.2, б,в), т.е. под действием максимальных касательных напряжений. При разрушении нагрузочная способность чугуна падает практически мгновенно, что характерно для хрупких материалов. Следует помнить, что величина σ_u сильно зависит от условий испытания и отношения высоты h к диаметру d образца.

Дерево: Испытание деревянного образца проводят вдоль волокон (рис. 1.3.3, б) и поперек (рис. 1.3.3, в) волокон.

Диаграмма $F-\Delta l$ для сжатия образца вдоль волокон (рисунок 1.3.3, а, кривая 1) внешне похожа на диаграмму сжатия чугуна. Между усилием F и деформацией Δl в начале нагружения отмечается незначительная нелинейная зависимость, причем нелинейность возрастает по мере увеличения нагрузки. По достижении предельной нагрузки F' образец разрушается. Отношение F' к первоначальной площади A_0 поперечного сечения образца называют пределом прочности σ'_u или временным сопротивлением дерева вдоль волокон.

$$\sigma'_u = \frac{F'}{A_0} \quad (1.3)$$

Обычно разрушение происходит с образованием поперечных складок и обмятием торцов.

При сжатии образца поперек волокон диаграмма $F-\Delta l$ имеет другой вид (рисунок 1.3.3, а, кривая 2). До некоторой точки B наблюдается пропорциональная зависимость между силой и деформацией. Это позволяет определить предел пропорциональности σ_{pr} , представляющий собой отношение F_{pr} к первоначальной площади A_0 поперечного сечения:

$$\sigma_{pr} = \frac{F_{pr}}{A_0} \quad (1.4)$$

С дальнейшим увеличением нагрузки древесина способна сильно уплотняться без видимых признаков разрушения образца. Момент потери несущей способности уловить не представляется возможным. Поэтому за разрушающую силу - F'' условно принимают такую силу, при действии которой деформация образца по высоте достигает $1/3$ первоначального значения, т.е. $\Delta l = \frac{1}{3}h$. Отношение F'' к A_0 называют пределом прочности σ_u'' или временным сопротивлением дерева при сжатии поперек волокон:

$$\sigma_u'' = \frac{F_u''}{A_0} \quad (1.5)$$

Сравнивая кривые 1 и 2 (рис. 1.3.3, а), выясняем, что при сжатии до разрушения вдоль волокон образец претерпевает значительно меньшие деформации, чем при сжатии поперек волокон: характер разрушения в обоих случаях разный. Прочность образца в первом случае в 5...10 раз выше, чем во втором. Коэффициент анизотропии, характеризующий различие механических свойств дерева вдоль и поперек волокон, представляет собой отношение предела прочности при сжатии вдоль волокон σ_u' к пределу прочности при сжатии поперек волокон σ_u'' :

$$K = \frac{\sigma_u'}{\sigma_u''} \quad (1.6)$$

Лабораторное оборудование и образцы

При испытании на сжатие стальные и чугунные образцы берут цилиндрической формы (рис. 1.3.4, а) с отношением размеров высоты к диаметру

$1 \leq \left(\frac{h}{d}\right) \leq 2$. Используют металлические образцы с размерами $h = 20$ мм,

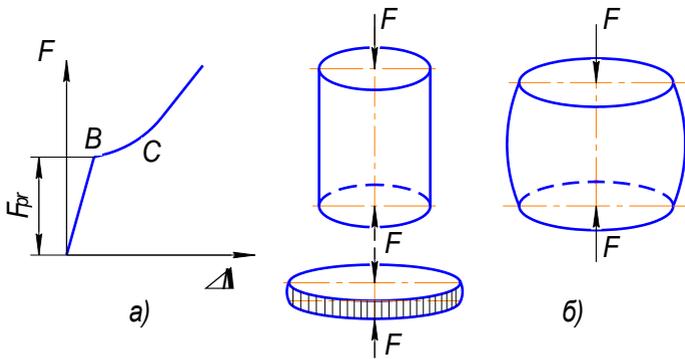


Рисунок 1.3.1

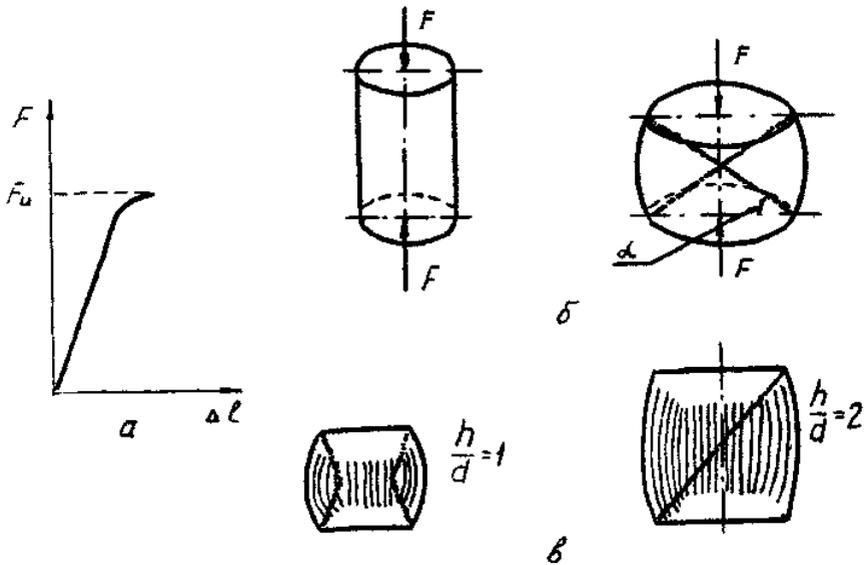


Рисунок 1.3.2

$d = 20$ мм. Деревянные образцы имеют форму прямоугольного параллелепипеда (рис.1.3.4, б) с основанием 20×20 мм и высотой 30 мм. Для измерения образцов применяют штангенциркуль с пределами измерения $0 \dots 150$ мм и ценой деления $0,1$ мм. Испытания производят на разрывной машине.

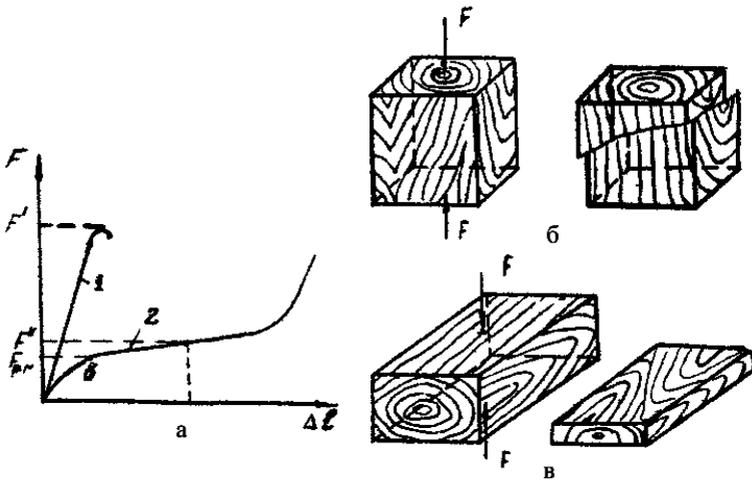


Рисунок 1.3.3

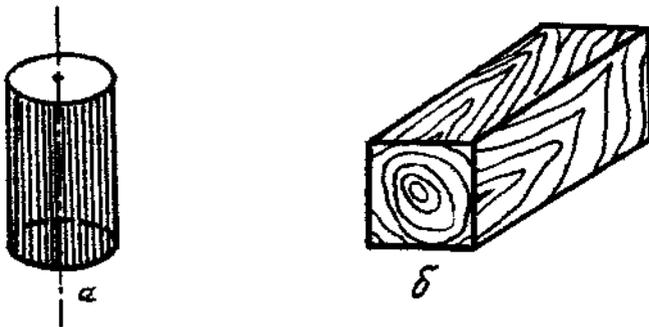


Рисунок 1.3.4

Порядок выполнения работы

Объем и последовательность выполнения работ при испытании на сжатие такие же, как и при испытании на растяжение. Разница заключается лишь в том, что образец устанавливается на опорной плите нижней поперечины.

Траверса опускается, прижимая образец к нижней опорной плите. Записанные диаграммы снимают и обрабатывают. Результаты обработки данных испытания заносят в таблицу.

Таблица 1.3

№ п/п	Начальный диаметр d_0 , мм	Диаметр после испытания d_k , мм	Начальная расчетная длина l_0 , мм	Длина после разрыва l_k , мм	Разрушающая нагрузка F_u , Н	Усилии при пределе пропорциональности F_{pp} , Н	Пределная нагрузка	Предел прочности			Коэффициент анизотропии	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Скорость испытаний, мм/мин

Вопросы для самопроверки

1. Какова цель работы?
2. Какие механические характеристики можно определить при сжатии мягкой стали, чугуна и дерева?
3. Чем объясняется бочкообразная форма стального образца?
4. Чему равен предел прочности при сжатии стали, чугуна?
5. Какие деформации претерпевает стальной образец?
6. Почему разрушение чугунного образца происходит по наклонным площадкам?
7. Как разрушается чугунный образец во времени?
8. Что такое анизотропия, и каким параметром она характеризуется?
9. Чему равен коэффициент анизотропии для дерева?
10. Как и почему разрушаются деревянные образцы при сжатии вдоль и поперек волокон?

Литература

1. Цурпал И.А. Сопротивление материалов: Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П. Барабан, В.М. Швайко. - Киев: Выща школа, 1998. – 245 с.
2. Степин П. А. Сопротивление материалов. - СПб.: М.: Краснодар: Лань, 2012. – 320 с.

Лабораторно - практическая работа 1.4

Определение механических свойств пластмасс при сжатии

Цель работы: Определение предела прочности и условного предела прочности для пластмасс с различным характером разрушения.

Общие сведения: Испытания на сжатие проводят согласно требованиям ГОСТ 4651—82, который предусматривает испытание двух видов пластмасс: пластмасс, образцы которых при сжатии разрушаются или в которых появляются трещины (хрупкие материалы), и пластмасс, образцы которых при сжатии значительно деформируются (сплющиваются), но не разрушаются (пластичные материалы). Разрушение первого вида пластмасс аналогично разрушению таких металлических материалов, как чугун, а второго вида - разрушению пластичных сталей (рис.1.4.1, а,б) Этот стандарт не применим к пенопластам, поропластам и сотопластам.

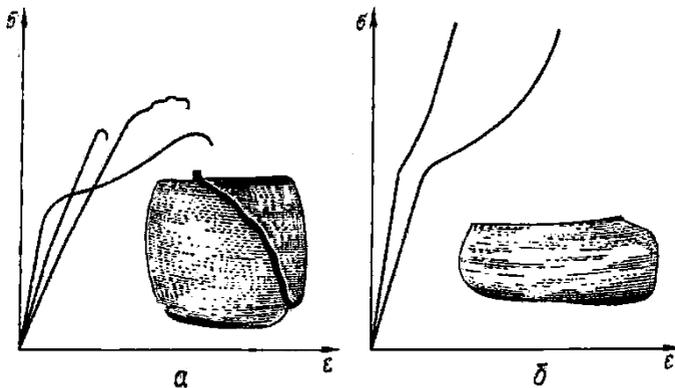


Рисунок 1.4.1 Характерные диаграммы и виды образцов при сжатии пластмасс

а — хрупкое разрушение, б — пластическое деформирование

Испытание образцов пластмасс на сжатие состоит в определении следующих характеристик:

- 1) разрушающего напряжения $\sigma_{p.c}$ -отношения нагрузки $F_{p.c}$ вызывающей разрушение образца или появление трещин, к площади A_0 начального поперечного сечения образца;
- 2) напряжения σ_{25} при заданной относительной деформации сжатия -

отношения нагрузки в момент достижения заданной величины (25 %) относительной деформации к площади A_0 начального поперечного сечения образца. Этот показатель - условный предел прочности - используют для характеристики материалов, не разрушающихся при сжатии;

3) относительной деформации сжатия при разрушении $\varepsilon_{p,c}$ %, измеренной одновременно с разрушающей нагрузкой $F_{p,c}$:

$$\varepsilon_{p,c} = (\Delta h / h_0) 100 \% \quad (1.7)$$

Для пластмасс с ярко выраженными вязкотекучими свойствами определяют дополнительные характеристики:

1) предел текучести $\sigma_{m,c}$ при сжатии - отношение нагрузки $F_{m,c}$ (рис. 1.4.2), при которой начинается нарастание деформации без увеличения усилия, к площади A_0 начального поперечного сечения образца;

2) условный (смещенный) предел текучести $\sigma_{y,m,c}$ при сжатии - отношение нагрузки $F_{y,m,c}$ (рис. 1.4.2) к начальному поперечному сечению образца A_0 . Нагрузку $F_{y,m,c}$ находят по точке пересечения кривой с прямой, проведенной параллельно начальному прямолинейному участку кривой и отсекающей на оси деформаций заданную величину a , указанную в стандартах или технических условиях;

3) относительную деформацию сжатия при пределе текучести $\varepsilon_{m,c}$ %, измеренную в момент достижения нагрузки, при которой рассчитывается предел текучести.

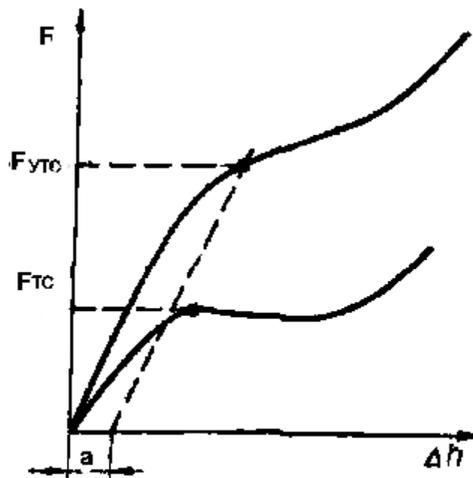


Рисунок 1.4.2 Кривая F - Δh при сжатии пластмасс

Лабораторное оборудование и образцы

Для испытаний применяют образцы различной формы - цилиндр, параллелепипед с прямоугольным и квадратным основанием и полый цилиндр. Вид и размеры образца выбирают согласно требованиям стандартов и технических условий в зависимости от рода пластмассы.

Для испытания пластмасс с модулями продольной упругости более $1 \cdot 10^3$ МПа используют образцы с такими отношениями высоты к минимальному размеру основания:

h/a или $h/b = 2,9$ — образец в виде параллелепипеда;

$h/d = 2,5$ — образец в виде цилиндра;

$h/\sqrt{D^2 + d^2} = 2,5$ - образец в виде трубки.

Для пластмасс с модулями упругости менее $1 \cdot 10^3$ МПа отношение высоты образца к минимальному размеру его основания должно быть 1,5. Изготавливают образцы формованием или механической обработкой полуфабрикатов и специальных заготовок.

Проводить испытание можно на любой машине, позволяющей осуществлять испытание на сжатие с погрешностью измерения нагрузки не более 1 % измеряемой величины. Чтобы иметь возможность правильно установить образец по отношению к действующему усилию и равномерно распределить нагрузку по сечению, одна из указанных площадок должна быть самоустанавливающейся. Точность инструмента для измерения образцов должна быть 0,01 мм.

Порядок выполнения работы

Ознакомиться с устройством машины. В журнал наблюдений записать цену деления шкалы силоизмерительного устройства, скорость сближения площадок и температуру окружающей среды. Скорость сближения площадок при деформировании образца определяют по номограмме, прилагаемой к машине, или по формуле

$$V = 0,03 \cdot h_o \cdot \frac{1}{t} \quad (1.8)$$

где V — скорость сближения площадок, мм/мин; t - время; $t = 1$ мин.

Измерить необходимые размеры образца и установить его на опорную плиту испытательной машины так, чтобы продольная ось образца совпала с направлением действия силы. Для удобства установки образца на опорной плите нанесены концентрические круговые риски. Испытание проводится с записью диаграммы «нагрузка - деформация». Если пластмасса хрупкая, на диаграмме «нагрузка - деформация» по достижении определенной нагрузки появятся небольшие выступы, что говорит о появлении трещин. После разрушения образца машину остановить, вынуть разрушенный образец и измерить

его высоту, если это возможно. Высоту образца в момент разрушения можно определить из диаграммы. Если же образец не разрушился, то значение разрушающего напряжения определяют по диаграмме из условия равенства его значению, которое соответствует 25 % относительной деформации образца. По формулам вычислить значения $\sigma_{p.c}$, σ_{25} , $\varepsilon_{p.c}$ и записать их в журнал наблюдений. Зарисовать в журнал форму образца до и после испытания и кратко описать характер разрушения. В выбранном масштабе вычертить диаграмму испытания образца.

Вопросы для самопроверки

1. В каких координатах строят диаграмму сжатия?
2. От каких факторов зависят форма и размеры образцов из пластмасс при испытаниях на сжатие?
3. Какие отличия наблюдаются при испытании на сжатие металлических и пластмассовых образцов?
4. Назовите виды разрушения пластмасс.
5. Какие характеристики определяют при сжатии пластмасс?

Литература

1. Цурпал И.А. Сопротивление материалов: Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П. Барабан, В.М. Швайко. - Киев: Выща школа, 1998. – 245 с.

Лабораторно - практическая работа 1.5

Определение нормальных напряжений в балке при изгибе

Цель работы: Определить экспериментально нормальные напряжения в заданном поперечном сечении и сравнить эти величины с вычисленными теоретически.

Общие сведения. Теория изгиба балок в сопротивлении материалов базируется на следующих основных гипотезах: материал балки подчиняется закону Гука, причем коэффициент Пуассона одинаков при растяжении и сжатии; сечения при деформации остаются плоскими; продольные волокна друг на друга не давят, т.е. под действием нормальных напряжений они испытывают только растяжение на сжатие; нормальные напряжения изменяются по высоте балки, оставаясь постоянными по ширине. Нормальные напряжения σ в любой точке поперечного сечения балки при плоском изгибе определяются по формуле:

$$\sigma_B = \frac{M_x}{J_x} \cdot y_B, \quad (1.9)$$

где y_B - расстояние от нейтральной оси до той точки сечения, в которой определяют нормальное напряжение.

Из формулы (1.9) видно, что нормальные напряжения в сечении прямо пропорциональны координате y_B , изгибающему моменту M_x и обратно пропорциональны J_x . Независимо от формы поперечного сечения балки (прямоугольник, двутавр, треугольник и др.) закон распределения нормальных напряжений одинаков. Максимальное напряжение по длине балки наблюдается в том сечении, где $M=M_{max}$.

Максимальное же значение нормального напряжения в данном сечении будет в точках, наиболее удаленных от нейтральной линии

$$\sigma_{max} = \frac{M_x}{J_x} \cdot y_{max} = \frac{M_x}{W_x}, \quad (1.10)$$

где $\frac{J_x}{y_{max}} = W_x$ – осевой момент сопротивления сечения.

Эпюра распределения нормальных напряжений показана на рисунке 1.5.1.

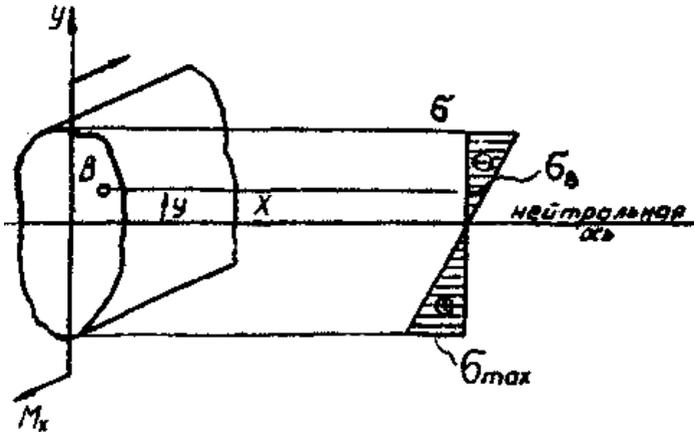


Рисунок 1.5.1 Эпюра распределения нормальных напряжений

Растягивающие напряжения считаем положительными, сжимающие - отрицательными.

Слой балки, не испытывающий при изгибе ни растяжения, ни сжатия, называют нейтральным слоем. Линия пересечения нейтрального слоя с плоскостью поперечного сечения балки называется нейтральной осью (линией). Необходимо помнить, что векторы нормальных напряжений перпендикулярны плоскости поперечного сечения балки, а отрезки, изображающие их на эпюре (см. рисунок 1.5.1), условно - совмещены с плоскостью сечения.

Лабораторное оборудование, измерительные приборы

Исследования проводят на двухопорной балке или на консольной балке, заделанной с одного конца (рис. 1.5.2).

Нагрузка осуществляется равными ступенями на величину ΔF (Н). В сечении D на верхних и нижних волокнах наклеены тензодатчики, которые передают сигнал на измеритель деформации в случае появления в этих волокнах деформации и напряжения. В этом случае теоретические значения максимального нормального напряжения равны:

$$\sigma_{\max}^{\text{теор}} = \frac{F \cdot a}{2W_x} \quad \text{или} \quad \sigma_{\max}^{\text{теор}} = \frac{F \cdot a}{W_x} \quad (1.11)$$

в зависимости от схемы балки (рис. 1.5.2, а и б).

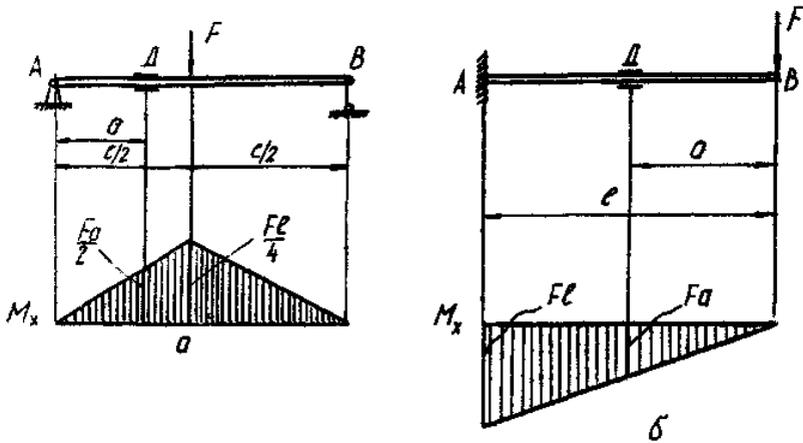


Рисунок 1.5.2 Балки для исследования

Экспериментальные значения максимального нормального напряжения

$$\sigma_{\max}^{\text{эксн}} = K \cdot \Delta n, \quad (1.12)$$

где K - цена деления шкалы прибора, т.е. коэффициент, показывающий какому напряжению соответствует одно деление шкалы измерителя деформаций;

Δn - среднее приращение показаний прибора, соответствующее среднему приращению нагрузки.

Порядок выполнения работы

1. Замерить размеры балки a и l , а также размеры поперечного сечения балки, чтобы определить величину осевого момента сопротивления W_x .
2. Соединить измеритель деформаций с тензодатчиками.
3. Нагрузить балку предварительной нагрузкой 10 Н.
4. Установить нуль на шкале измерителя деформаций.
5. Нагружать балку ступенями $\Delta F = 20$ Н до $F_{\max} = 90$ Н, после каждой ступени снимая показания со шкалы прибора (n_i).
6. Результаты замеров занести в таблицу 1.5: величины n_i и Δn_i , причем Δn_i - разность между последующим и предыдущим значениями n_i , т.е. значение показаний прибора, приходящееся на ступень нагружения.

Таблица 1.5

№ п/п	$F, \text{ Н}$	$\Delta F, \text{ Н}$	n_1	Δn_1	n_2	Δn_2

7. Определить среднее арифметическое значение показаний Δn_{cp} - на ступень нагружения.

8. Определить нормальное напряжение по формуле (1.12); величину цены деления шкалы прибора K сообщает преподаватель.

9. Сравнить найденную величину с величиной напряжения, определенного по формуле (1.12).

Вопросы для самопроверки

1. Как распределяются нормальные напряжения в сечении по высоте балки?
2. Что такое изгибающий момент? Эпюра изгибающих моментов?
3. Что такое осевой момент сопротивления и чему он равен для круга, прямоугольника? Разъясните физический смысл момента сопротивления?
4. Изменяются ли нормальные напряжения по ширине балки?
5. Укажите сечения на балке, в которых нет нормальных напряжений. Почему их нет?

Литература

1. Цурпал И.А. Сопротивление материалов: Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П. Барабан, В.М. Швайко. - Киев: Выща школа, 1998. – 245 с.
2. Степин П. А. Сопротивление материалов. - СПб.: М.: Краснодар: Лань, 2012. – 320 с.

Лабораторно - практическая работа 1.6

Определение деформаций при изгибе

Цель работы: Определить экспериментально прогибы и углы поворотов поперечных сечений балки при изгибе и сравнить их с теоретическими значениями.

Общие сведения. Часто элементы конструкций и деталей машин рассчитывают на жесткость, чтобы возникающие деформации не превышали допустимых значений. Деформированную продольную ось балки называют упругой линией. При этом деформация балки характеризуется следующими параметрами:

1. Прогибом, под которым понимают перемещение центра тяжести сечения (точка B , рисунок 1.6.1) в направлении, перпендикулярном к первоначальной оси балки (линейная деформация).

2. Углом поворота сечения балки θ , который измеряется углом наклона касательной к упругой линии (рисунок 1.6.1) (угловая деформация).

Следует отметить, что при изгибе балки (рисунок 1.6.1) точка B не только перемещается в вертикальном направлении, но и несколько смещается в направлении, параллельном оси балки. Однако в области упругих деформаций эти смещения очень малы и ими пренебрегают.

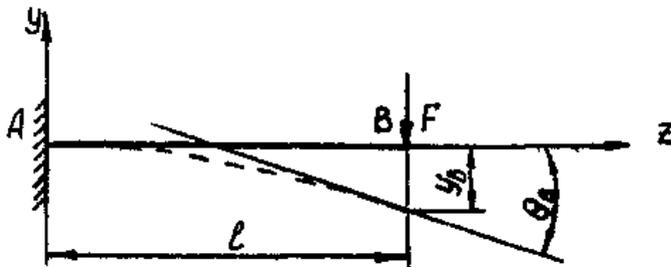


Рисунок 1.6.1 Упругая линия балки

Аналитически деформации балок можно определить, интегрируя приближенное дифференциальное уравнение упругой линии изогнутой балки:

$$EJ_x \frac{d^2 y}{dz^2} = M_x, \quad (1.13)$$

где EJ_x жесткость балки при изгибе;

M_x - изгибающий момент в сечении балки.

Проинтегрировав уравнение (1.13), получают уравнение углов поворота сечений:

$$\frac{dy}{dz} = \theta = \frac{1}{EJ_x} \int M_x dz + c_1,$$

интегрируя повторно - уравнение прогибов

$$y = f = \frac{1}{EJ_x} \int dz \int M_x dz + c_1 z + c_2$$

Константы интегрирования c_1 и c_2 определяют из граничных условий (условий закрепления балки).

Часто для определения деформаций, особенно в случаях, если балка состоит из трех или большего числа участков, используют метод начальных параметров (универсальные уравнения упругой линии), т.к. применение дифференциальных уравнений и определение большого количества констант интегрирования сложно и трудоемко.

При использовании универсального уравнения упругой линии удобно пользоваться следующей последовательностью:

1. Начало осей координат помещают обязательно на левом конце балки. Ось z , как обычно, является продольной, ось y направляют вверх.

2. Если на балку действует равномерно распределенная нагрузка, и она обрывается в сечении, расположенном левее правого конца балки (т.е. не «доходит» до этого конца), то нагрузку продолжают до правого крайнего сечения, одновременно добавив нагрузку, равную по абсолютному значению, но противоположную по направлению. Другими словами, нагрузку продлевают и уравновешивают.

3. Разбивают балку на участки, как это делается при определении изгибающего момента.

4. Записывают универсальное уравнение упругой линии (пример записи - для схемы балки на рисунке 1.6.2):

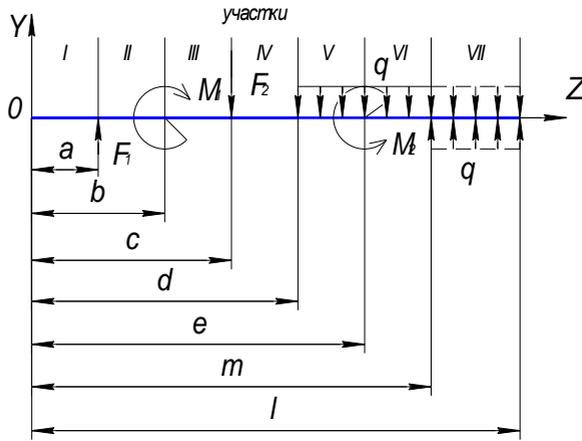


Рисунок 1.6.2

$$\begin{aligned}
 EJy = EJy_0 + EJ\Theta_0 z|_I + F_1 \frac{\langle -a \rangle^3}{3!} \Big|_{II} + M_1 \frac{\langle -b \rangle^2}{2!} \Big|_{III} - \\
 F_2 \frac{\langle -c \rangle^3}{3!} \Big|_{IV} - q \frac{\langle -d \rangle^4}{4!} \Big|_V - M_2 \frac{\langle -e \rangle^2}{2!} \Big|_{VI} + q \frac{\langle -m \rangle^4}{4!} \Big|_{VII}
 \end{aligned} \quad (1.14)$$

где - $EJ = EJ_x$ – жесткость балки при изгибе;

y_0, θ_0 - прогиб и угол поворота поперечного сечения, находящегося в начале осей координат (точка 0);

z – текущая координата (координата сечения, в котором определяется линейная или угловая деформация);

$4! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$ – факториал;

a, b, c, d, e, m – расстояние, на котором от начала осей координат находится соответствующий силовой фактор;

Слагаемые, стоящие слева от вертикальной черты с индексом (индекс - номер участка), позволяют определить прогиб любого сечения в пределах участка, номер которого указан.

Первые три слагаемые всегда имеют вид, как в выражении (1.14), остальные записываются в виде, зависящем от внешней нагрузки и условий закрепления балки. Знак слагаемого соответствует знаку изгибающего момента, т.е. слагаемое положительно, если в рассматриваемом сечении балка изгибается выпуклостью вниз.

5. Если требуется, то записывают универсальное уравнение углов поворота, которое получают дифференцированием выражения (1.14) по z . Например, для рис. 1.6.2:

$$EJ\Theta = EJ\Theta_0|_I + F_1 \frac{\langle -a \rangle}{2!} \Big|_{II} + M_1 \frac{\langle -b \rangle}{1!} \Big|_{III} - F_2 \frac{\langle -c \rangle}{2!} \Big|_{IV} - \\ - q \frac{\langle -d \rangle}{3!} \Big|_V - M_2 \frac{\langle -e \rangle}{1!} \Big|_{VI} + q \frac{\langle -m \rangle}{3!} \Big|_{VII} \quad (1.15)$$

Константы y_0 и θ_0 находят из граничных условий, используя либо выражение (1.15), либо одновременно выражения (1.14) и (1.15).

Следует также отметить, что в выражения (1.14) и (1.15) могут входить не только активные силовые факторы, но и реакции связей (опор).

Линейные и угловые деформации можно определить также, используя энергетические методы, например, теорему Кастилиано, метод Мора, правило Верещагина. Сведения об этих методах приведены в литературе [2,3].

Лабораторное оборудование, измерительные приборы

Исследуют деформации стальной балки. Материал балки – Сталь 3, для которой модуль упругости $E=2 \cdot 10^5$ МПа. Прогобы и углы поворота сечений определяют с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Исследуемую балку 8 шарнирно закрепляют в установке СМ - 4А (рис. 1.6.3) или СМ-11А, которая состоит из следующих основных частей: основания I, устанавливаемого на четырех регулируемых ножках 17, подвижной 16 и неподвижной 11 стоек, двух индикаторных стоек 14, двух гиревых подвесов с набором грузов 12.

Подвижная стойка 16 имеет возможность перемещаться по направляющей планке 3, жестко прикрепленной к основанию установки. Передвигая стойку вдоль основания, можно регулировать длину пролета относительно неподвижной стойки 11 в пределах 700...1000 мм, а также получать балку с консольным вылетом. Чтобы исключить самопроизвольное перемещение подвижной стойки вдоль основания, ее фиксируют на планке 3 стопором 2. Настраивая установку по заранее выбранной схеме, контролируют перемещение стойки по шкале 15, неподвижно прикрепленной к основанию установки. Закрепление ис-

следуемого бруса на подвижной стойке выполнено по схеме шарнирно - подвижной опоры, которая может совершать поступательное движение относительно стойки.

Неподвижная стойка 11 жестко прикреплена винтами к основанию установки. Крепление исследуемого бруса к стойке выполнено по схеме шарнирно-неподвижной опоры.

Нагружающее устройство установки состоит из двух гиревых подвесов с набором грузов 12. Гиревые подвесы можно перемещать по длине исследуемой балки, изменяя тем самым точки приложения сил. Фиксируются гиревые подвесы зацепами, входящими в небольшие пазы на брус. Положение гиревых подвесов, т.е. расстояния от опор до точек приложения нагрузки, определяют по шкале, наносимой на исследуемый брус.

Углы поворота опорных сечений бруса измеряют при помощи индикаторов 5 и 10, которые крепятся соответственно на подвижной и неподвижной стойках. Своими подвижными штоками индикаторы упираются в опорные пятки 4 стержней 6, жестко соединенных с шарнирными устройствами опор подвижной и неподвижной стоек. Очевидно, что углы поворота опорных сечений определяются по соответствующим шкалам индикаторов, благодаря угловым перемещениям стержней, расчетная длина которых (измеренная от оси бруса до оси индикатора) l .

Цена деления шкалы индикатора в радианах:

$$C = \frac{a}{l} \quad (1.16)$$

где $a = 0,01$ мм - цена деления шкалы индикатора в миллиметрах.

Горизонтальное перемещение шарнирно-подвижной опоры измеряется индикатором 7.

Прогибы определяется индикаторами 9, закрепленными в зажимных устройствах индикаторных стоек 14. Стойки можно перемещать вдоль основания установки по направляющим. Фиксируются стойки относительно направляющих стопорами 13.

Порядок проведения испытаний

Согласно указанной преподавателем схеме (рис. 1.6.4) настроить установку в следующем порядке:

1. Установить требуемое расстояние между опорами.

2. Переместить гиревые подвесы 12 (рис. 1.6.3) в точки нагружения, указанные в схеме.
3. Передвигая индикаторные стойки 14 по направляющим основания установки, совместить подвижные штоки индикаторов 9 с точками измерения прогибов бруса.
4. Отпустить винты крепления индикаторов на индикаторных стойках 14, опустить индикаторы так, чтобы их подвижные штоки переместились вверх на 7...9 мм. При этом подвижные штоки индикаторов должны упираться в исследуемый брус. Индикаторы 10 и 7 передвинуть в их зажимных приспособлениях так, чтобы их подвижные штоки упирались в опорные пятки нажимных стержней.
5. Установить стрелки всех индикаторов на «0».
6. Определить ступень нагрузки ΔF . Давая одинаковые приращения ΔF произвести 3...4 нагружения исследуемого бруса. После каждой ступени ΔF по индикаторам 9 и 10 фиксировать соответственно прогибы и углы поворотов опорных сечений. Наибольшая нагрузка на каждый гиревой подвес не должна превышать 59 Н (6 кгс).
7. Разгрузить брус в обратной последовательности и сравнить показания индикаторов с первоначальными.
8. Подсчитать средние арифметические приращения прогибов Δy и углов поворотов сечений $\Delta \theta_{cp}$. По формуле (1.16) показания индикаторов в миллиметрах перевести в радианы, замерив заранее расстояние l .
9. По соответствующим формулам определить теоретические значения прогибов и углов поворота сечений при нагрузке, равной ΔF .
10. Определить расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями прогибов и углов поворота сечений по формулам:

$$\frac{\Delta y_{\text{э}} - \Delta y_m}{\Delta y_m} \cdot 100\% \quad \text{и} \quad \frac{\Delta \theta_{\text{э}} - \Delta \theta_m}{\Delta \theta_m} \cdot 100\%$$

Допускаемое отклонение не должно превышать $\pm 8\%$.

11. Результаты измерений занести в таблицу:

Таблица 1.6

№ п/п	F , Н	ΔF , Н	$y_{\text{э}}$, мм	$\Delta y_{\text{э}}$, мм	$\theta_{\text{э}}$, рад	$\Delta \theta_{\text{э}}$, рад	Δy_m , мм	$\Delta \theta_m$, рад

Вопросы для самопроверки

1. Какими параметрами характеризуются деформации балок?

2. Зачем надо знать деформации балок?
3. В чем состоит аналитический способ определения деформаций балок?
4. Какую физическую характеристику материала надо знать при определении деформации балок?
5. Какая геометрическая характеристика влияет на жесткость балок?

Литература

1. Цурпал И.А. Сопротивление материалов: Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П. Барабан, В.М. Швайко. - Киев: Выща школа, 1998. – 245 с.
2. Степин П. А. Сопротивление материалов. - СПб.: М.: Краснодар: Лань, 2012. – 320 с.
3. Дарков А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С. Шпиро. - М.: Высшая школа, 1999. – 624 с.

Лабораторно - практическая работа 1.7

Определение модуля упругости пластмасс при статическом изгибе

Цель работы: Определение модуля упругости при статическом изгибе, сравнение упругих свойств пластмасс при изгибе, кручении и растяжении.

Общие сведения: Рассчитывая детали из конструкционной пластмассы (зубчатые передачи, малогабаритные детали, подшипники скольжения и т. п.), работающие на изгиб, во многих случаях необходимо знать значение и направление деформаций, обусловленных внешними силовыми воздействиями. Для случая балки, свободно лежащей на двух опорах (рис.1.7.1), деформация посередине

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \quad (1.17)$$

Учитывая допущение об упругости деформации (пропорциональной зависимости между напряжением и деформацией), модуль упругости можно определить так:

$$E = \frac{\Delta F \cdot l^3}{\Delta f \cdot 48 \cdot I_x} \quad (1.18)$$

Для балки прямоугольного сечения с шириной основания b и высотой h модуль упругости

$$E = \frac{\Delta F \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta f} \quad (1.19)$$

Определяют модуль упругости при статическом изгибе по ГОСТ 9550—81, который распространяется на пластические массы с модулем упругости не ниже 300 МПа.

Лабораторное оборудование, измерительные приборы

Образцы испытываемых пластмасс имеют форму брусков прямоугольного сечения с размерами сторон $b \cdot x \cdot h = 15 \times 10$ мм и длиной 120 мм. Изготавливают образцы механической обработкой или формованием.

Для проведения работы можно использовать любую машину, позволяющую проводить испытание на изгиб и измерять нагрузки с погрешностью, не превышающей 1 % измеряемой нагрузки. Испытательная машина должна иметь приспособление, позволяющее менять расстояние между опорами. Се-

редина пролета между опорами должна совпадать с осью наконечника. Измеряют деформации (прогибы) образца непосредственно под местом приложения нагрузки.

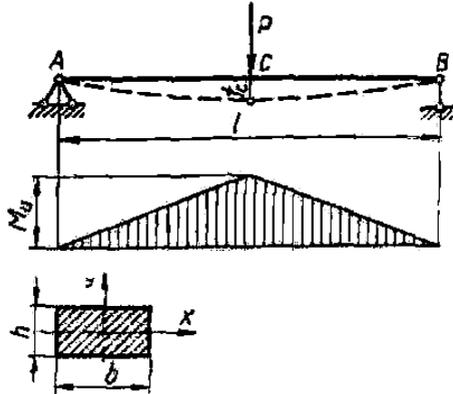


Рисунок 1.7.1 Схема нагружения балки для определения модуля упругости при статическом изгибе.

Расстояние между опорами и радиус закрепления наконечника устанавливают в зависимости от толщины образца в соответствии с ГОСТ 9550-81.

Порядок проведения работы

Измерить штангенциркулем толщину и ширину образца в средней части с точностью до 0,01 мм. Широкой стороной уложить образец на опоры реверсора машины. Включив ее, плавно поднять опоры с установленным образцом до касания с нажимным наконечником. Установить шкалу индикатора на «0». На каждом испытываемом образце провести шесть измерений прогиба при скорости нагружения 15...20 МПа/мин для материалов, прочность на растяжение которых более 100 МПа, и 4...5 МПа/мин для материалов, прочность на растяжение которых 100 МПа и меньше. Деформации отсчитывать по индикатору не менее чем при двух нагрузках - начальной F_0 , равной примерно 2 % разрушающей нагрузки F_p , и максимальной F_{max} составляющей 8...10 % нагрузки F_p . По формуле (1.19) вычислить модуль упругости для каждого нагружения. Определить среднее арифметическое значение модуля упругости для всех нагружений. Результаты испытаний, а также соответствующие вычисления занести в журнал лабораторных работ.

Вопросы для самопроверки

1. Напишите формулу для модуля упругости при изгибе и объясните величины, входящие в нее.
2. Расскажите порядок выполнения работы по определению модуля упругости при изгибе.
3. Как выбирают радиус нажимного наконечника и расстояние между опорами, определяя модуль при изгибе?
4. Каковы требования, предъявляемые к образцам?

Литература

1. Цурпал И.А. Сопротивление материалов: Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П. Барабан, В.М. Швайко. - Киев: Выща школа, 1998. – 245 с.

Лабораторно - практическая работа №1.8

Исследование явления потери устойчивости сжатого стержня

Цель работы: Изучить экспериментально явление потери устойчивости при осевом сжатии гибких стержней; сравнить значения критических сил, определенных по расчетной формуле и опытным путем при различных способах закрепления концов стержня.

Общие сведения. Как известно, под устойчивостью понимают свойство системы сохранять свое состояние при внешних воздействиях. В реальных условиях существуют причины, по которым может произойти отклонение от исходного равновесного состояния. В этом случае говорят о потере устойчивости, которая может сопровождаться большими деформациями, появлением пластических деформаций или полным разрушением.

Для многих деталей машин, элементов конструкций и сооружений расчеты на прочность и жесткость бывают часто недостаточны, чтобы получить полное представление об их работоспособности, выяснить, находится ли конструкция или ее части в состоянии устойчивого равновесия.

Если прямолинейный стержень сжимать центрально приложенной силой, то с возрастанием этой силы стержень вначале только укорачивается, сохраняя свою прямолинейную форму, а затем наступает явление потери устойчивости - стержень изгибается. Наименьшую центрально приложенную сжимающую силу, которая выводит стержень из прямолинейного устойчивого равновесия, называют критической силой $F_{кр}$.

Потерю устойчивости сжатого прямолинейного стержня называют иногда продольным изгибом. Появление продольного изгиба опасно тем, что при незначительном увеличении сжимающей силы прогибы нарастают очень быстро.

Критическую силу в продольно сжатом стержне определяют по формуле Эйлера, если напряжение в стержне не превышает предела пропорциональности $\sigma_{пр}$:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(il)^2} \quad (1.20)$$

где J_{min} – минимальный осевой момент инерции поперечного сечения стержня;

l – его длина;

μ – коэффициент приведения длины, зависящий от условий закрепления стержня (рисунок 1.8).

Формулу Эйлера можно применять, если гибкость стержня

$$\lambda = \frac{\mu l}{i} = \frac{\mu l}{\sqrt{\frac{J_{min}}{A}}} \text{ больше критической гибкости } \lambda,$$

т.е. при:

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_{pr}}} \quad (1.21)$$

Величину критической силы, найденную по расчетной формуле и опытным путем на лабораторном оборудовании, и предстоит определить в данной работе.

Лабораторное оборудование и образцы

Экспериментальное определение критического усилия для продольно сжимаемого стержня производят на разрывной машине обязательно в присутствии преподавателя и лаборанта.

Для испытания применяют стальные образцы круглого сечения при различных случаях закрепления концов стержней.

Порядок выполнения работы

1. С помощью штангенциркуля и линейки тщательно измерить диаметр и длину стержня.
2. Выяснить условия закрепления испытуемого образца в захватах разрывной машины, чтобы найти на рисунке 1.12 коэффициент приведения длины.
3. Вычислить гибкость стержня, чтобы выяснить, какой расчетной формулой пользоваться при определении величины критической силы.
4. Определить величину критической силы по выбранной расчетной формуле.
5. Закрепить испытуемый стержень в захватах разрывной машины.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается явление потери устойчивости?
2. Что называется критической силой?
3. По какой формуле можно определить критическую силу?
4. Приведите примеры потери устойчивости из инженерной практики.
5. Что называется гибкостью стержня и по какой формуле ее можно определить?
6. Как установить предел применимости формулы Эйлера и что называется предельной гибкостью стержня?
7. Как влияет жесткость поперечного сечения и длина стержня на значение критической силы?
8. Что такое коэффициент приведения длины?
9. Зависит ли критическая сила от упругих свойств материала?
10. К чему может привести расчет по формуле Эйлера в области ее неприменимости?

Литература

1. Степин П. А. Сопротивление материалов. - СПб.: М.: Краснодар: Лань, 2012. – 320 с.
2. Цурпал И.А. Сопротивление материалов: Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П. Барабан, В.М. Швайко. - Киев: Выща школа, 1998. – 245 с.

Учебное издание

ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА МЕХАНИКА

Учебно-методическое пособие

Часть 1. Сопротивление материалов

Составители:

СУМЕНКОВ Александр Леонидович

СЕМОЧКИН Игорь Иванович

ЛУКИЕНКО Леонид Викторович

АФРОСИН Анатолий Николаевич

ЦЫЦОРА Владимир Яковлевич

Редактор

Подписано в печать

Формат 60×84^{1/16}

Бумага «Снегурочка». Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 6,7. Уч.-изд. л. 5,2.

Тираж 50 экз. Заказ №

ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Новомосковский институт (филиал). Издательский центр

Адрес университета: 125047, Москва, Миусская пл., 9

Адрес института: 301655 Тульская обл., Новомосковск, ул. Дружбы, 8