



**Методические указания для выполнения
лабораторных работ
«Механические испытания полимерных
материалов»**

Энгельс 2026

**Энгельсский технологический институт (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»**

**Методические указания для выполнения
лабораторных работ
«Механические испытания полимерных
материалов»**

по дисциплине
«Структура и свойства композитов»
для студентов направлений
18.04.01 – Химическая технология,
профиль «Химическая технология композиционных материалов и
покрытий»
очной формы обучения

Электронное издание локального распространения

Энгельс 2026

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем пособии приведены основные стандартные и дополнительные методики механических испытаний полимерных материалов. Рассмотрены испытания образцов из исследуемого материала на растяжении, сжатие, срез, сдвиг, скалывание и изгиб при статическом (кратковременным и длительном), циклическом и динамическом нагружениях. Кратко рассмотрены испытания полимерных материалов на твердость, теплостойкость и морозостойкость.

Пособие предназначено для более глубокого изучения курсов «Механика полимеров» студентами специальности «Технология переработки пластмасс и эластомеров», а также может быть использовано при изучении курса «Сопротивление материалов» студентами других специальностей.

В настоящее время во всех отраслях промышленности широко используются большое количество новых конструкционных полимерных материалов, обладающих ценными физико-химическими, механическими и электрическими свойствами.

Однако, прежде, чем использовать вновь полученный материал как конструкционный, необходимо тщательно проверить все свойства нового материала в условиях, близких к условиям его реальной работы [1,2]. Только после проведенной серии испытаний, в которых исследуются изменения свойств нового материала в зависимости от воздействия комплекса заданных факторов, таких как температура, агрессивная среда, нагрузка, можно рекомендовать этот материал для применения в промышленности. По результатам испытаний устанавливаются теоретические зависимости, описывающие поведение материала в различных условиях эксплуатации, и даются рекомендации по практическому применению материала. Результаты, полученные при испытаниях, позволяют рассчитывать конструкции из полимерных материалов.

В зависимости от исследуемых свойств материала, испытания подразделяются на физические, химические, биологические, технологические. В настоящем пособии рассматриваются вопросы, связанные с определением механических свойств полимерных материалов.

Для определения основных механических характеристик полимерных материалов применяются стандартные методики испытаний, приведенные в соответствующих государственных и отраслевых стандартах. В том случае, когда необходимо более полно исследовать поведение материала при различных внешних воздействиях, проводят дополнительные испытания, в процессе которых устанавливают связь механических характеристик материала с такими факторами, как

температура материала и скорость нагревания, перепад температур материала до или во время испытания, перепад нагрузок до или во время испытания, скорость нагружения, скорость деформирования, угол наклона нагрузки к направлению осей анизотропии материала, длительные воздействия температуры, нагрузки, влаги, агрессивных сред, атмосферных условий, радиации, размеры образца (для определения масштабного фактора).

Стандартные и дополнительные испытания можно также использовать и для решения обратной задачи - выбора типа, размеров и ориентации наполнителя, типа связующего, концентрации наполнителя, связующего, технологии изготовления для получения материала с заданными механическими свойствами.

В данном пособии приведены методики проведения основных и дополнительных механических испытаний полимерных материалов.

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Общие требования к механическим испытаниям полимерных материалов

Для получения достоверных результатов испытаний требуется решить две задачи:

1. Технологическая - разработка технологии изготовления образцов надлежащего качества. Эта задача в настоящем пособии не рассматривается.

2. Механическая - выбор формы образца и способа его закрепления, обеспечивающих получение возможно более однородного напряженного и деформированного состояния в процессе испытания.

К испытательной аппаратуре, образцам для испытаний, проведению испытаний и обработке результатов испытаний предъявляются следующие требования [3-7]:

1. Оборудование и аппаратура для проведения механических испытаний должна быть выбрана в соответствии с требованиями стандартов и технических условий на пластмассы и методы испытаний.

2. Испытательные машины и приборы должны полностью удовлетворять требованиям, установленным в стандартах на испытания и инструкциям Комитета стандартов, что удостоверяется свидетельством о государственной проверке.

3. Аппаратура должна иметь минимальную инерционность при установленных режимах испытаний и достоверно фиксировать измеряемую при испытании величину. В частности, испытательные машины должны обеспечивать измерение нагрузки с погрешностью не более 1% от измеряемой величины.

4. Оборудование и аппаратура, используемые для механических испытаний, должны обеспечивать выполнение режима испытаний согласно требованиям, предусмотренным в методике испытаний (например, постоянство нагрузки и разгрузки, скорости деформирования, скоростей нагрева и охлаждения образца в процессе испытаний). Для выполнения этих требований необходимо настройку оборудования и аппаратуры производить с учетом их податливости.

5. Форма и размеры образцов должны соответствовать требованиям стандартов и технических условий на пластмассы и метода испытаний. Форма и размеры образцов выбираются с учетом вида и величины измеряемых деформаций, а также с учетом анизотропии, пористости и других особенностей испытываемых материалов.

6. Образцы из анизотропных материалов вырезаются вдоль главных

осей анизотропии (рис.1), а также под углом α к направлению главных осей анизотропии. Наиболее часто принимают $\alpha = 45^\circ$.

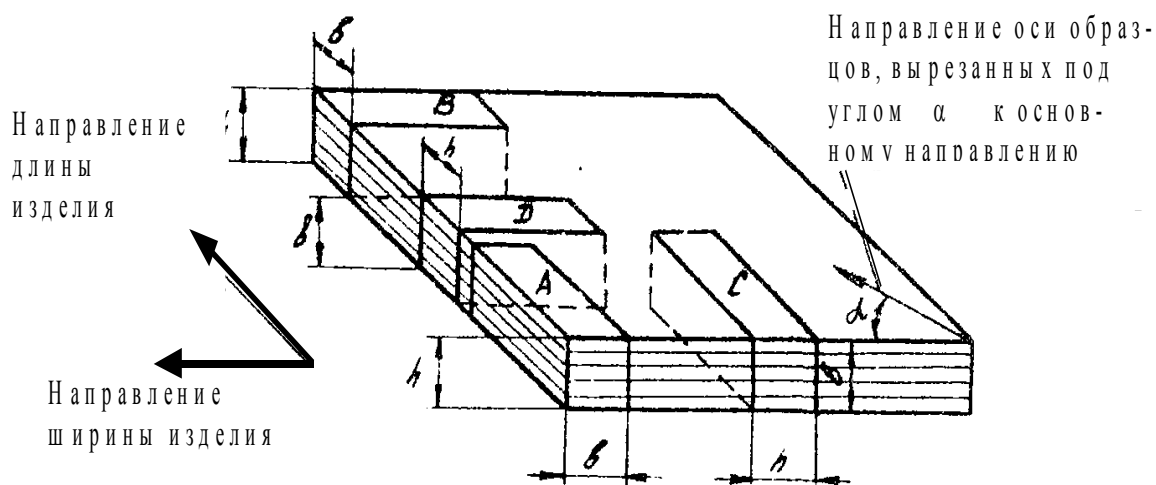


Рис. 1

7. Образцы перед испытанием следует нумеровать. Место и способ нанесения номера необходимо выбирать так чтобы не вызывать изменений механических свойств образца. Если образец при испытании разрушается на две части, то маркировка наносится так, чтобы на обеих частях сохранился номер.

8. Необходимо тщательно соблюдать технологию изготовления образцов. Изготовление образцов для испытаний из термореактивных пластмасс (реактопластов) прессованием при нагреве производится согласно стандарту [8]. Изготовление образцов для испытаний из термопластических масс (термопластов) литьем под давлением или прямым прессованием производится по [9]. Изготовление образцов механической обработкой из полуфабрикатов производится согласно требованиям стандартов и технических условий на пластмассы, резины [10] и методы испытаний, в частности, механическая обработка образцов по толщине проводится в продольном направлении либо с одной стороны (испытания на срез, на статический изгиб, на ударную вязкость), либо равномерно с двух сторон (для остальных испытаний).

9. Образцы должны быть изготовлены с соблюдением допусков на кривизну и параллельность, предусмотренных в методике испытаний, и не должны иметь раковин, сколов, вздутий, трещин и других дефектов, которые могут быть обнаружены при внешнем осмотре или дефектоскопии.

10. При проведении дополнительных испытаний рекомендуется проводить "тренировку" образцов, для чего все образцы подвергаются предварительному циклическому нагружению и разгрузению. Замер деформаций при конечном цикле нагружений позволяет контролировать качество изготовления образца. Если упругая мгновенная деформация

контрольного образца отличается на 15% и более от деформаций, полученных при кратковременных испытаниях "тренированных" образцов, то данный образец бракуется и к испытаниям не допускается.

11. При дополнительных испытаниях по исследованию влияния влажности на механические характеристики материала необходимо обтягивать образцы тонкой резиновой оболочкой во избежание потери процентного содержания влаги.

12. Количество образцов, необходимых для испытаний, вычисляется согласно стандартам и техническим условиям на пластмассу с учетом требований метода испытаний и количества образцов K , обеспечивавших заданную точность измеряемой величины с определенной вероятностью на испытываемом материале. Обычно $3 < K < 10$.

13. Перед проведением испытаний образцы кондиционируют по [11-12], а затем испытывают при стандартной лабораторной атмосфере (температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$; относительная влажность $65 \pm 5\%$). Выбор условий кондиционирования предусмотрен в стандартах на пластмассы.

Для указания условий кондиционирования образцов используется следующие обозначения:

$$\left[T_k^0 / \tau_k / B_R \frac{Ж}{С} \right], \quad (1.1)$$

где T_k^0 - температура кондиционирования $^\circ\text{C}$; τ_k - продолжительность кондиционирования в часах; B_k - относительная влажность в %; Ж - наименование жидкости, в которую должны быть погружены образцы; С - необходимость выслушивания образцов после кондиционирования.

14. Для указания условий испытаний образцов используются следующие обозначения:

$$[T_{II}^0 - \tau_{II} - B_{II}] \quad (1.2)$$

где T_{II}^0 - температура испытания в $^\circ\text{C}$; τ_{II} - продолжительность испытания в часах; B_{II} - относительная влажность воздуха при испытании в %.

Испытания при температурах, отличающихся от $20 \pm 2^\circ\text{C}$, проводят, выбирая температуру и допуск на ее изменение из табл. 1.

15. После кондиционирования, перед испытанием, образцы измеряют в рабочей части с точностью, предусмотренной в методике испытаний, в частности, измерение поперечных размеров образцов производится с погрешностью, не превышающей 0,01 мм. После проверки размеров образцы размечают, наносят на них метки, определяющие положение захватов испытательной машины. При нанесении меток свойства образцов не должны изменяться,

16. Образцы в захваты устанавливают так, чтобы исключить движение образца относительно захвата в месте крепления при испытании,

не вызвать его разрушения в месте закрепления и обеспечить направление действия силы, предусмотренное в методике испытаний.

17. Измерительные базы необходимо тщательно выбирать таким образом, чтобы устранить влияние различных вторичных факторов на результаты испытаний,

18. Результаты испытаний выражают численно и графически. При численном выражении определяют среднее значение определяемого показателя по формуле (6.1). Среднее значение определяемого показателя вычисляют как среднее арифметическое, или как среднее логарифмическое (для определений статической и усталостной долговечности).

19. Запись результатов испытаний должна состоять из следующих сведений:

а) по образцу - наименования, марки материала, номера стандарта или технического условия на материал;

б) по условиям измерения - записью условий кондиционирования и испытаний;

в) по методу измерения - указания стандарта на метод испытания или пластмассу, марки прибора и числа испытанных образцов;

г) по определению погрешностей - указанием среднего значения, определяемого показателя, отдельных значений показателя каждого образца или величины отдельных значений стандартного отклонения среднего значения, коэффициента вариации в относительной погрешности, а также метода их расчета.

20. Результаты испытания записываются в специальный протокол, предусмотренный методикой испытания.

Таблица 1

Рекомендуемые температуры испытания в °С	Допускаемый перепад температуры в рабочем объеме термокамеры в °С
+ 35	±1
-65, -55, -40, -25, 0, +50, +60, +70, +80, +90, +105, +120, +130, +150, +180	±2
от +200 до 300 через 25	±3
+325	±4
+350	±5
+400	±6
+450	±8
+500	±10
+600	±12

1.2. Классификация механических испытаний образцов из полимерных материалов

Механические испытания материалов могут быть классифицированы по следующим признакам:

1. По характеру прикладываемых нагрузок или деформаций на:

а) статические (квазистатические), которые проводятся при кратковременном и длительном действии статически приложенных нагрузок или деформаций, а также при циклическом изменении величин статически приложенных нагрузок или деформаций с частотой не более 0,1 Гц;

б) усталостные, которые проводятся при большом числе циклов изменения величин приложенных нагрузок или деформаций;

в) динамические, в которых исследуется поведение материала при действии ударных нагрузок, а также при низкочастотных, среднечастотных и высокочастотных колебаний нагрузок или деформаций.

2 По виду деформации на:

а) продольные (растяжение, сжатие);

б) сдвиговые (сдвиг, срез, скалывание) ;

в) изгибные;

г) крутильные;

д) сложные (состоящие на комбинации первых четырех).

3. По методу регистрации измеряемых параметров на:

а) с непосредственной регистрацией;

б) с косвенной регистрацией.

1.3. Общие обозначения, принятые в учебном пособии

В тексте и в формулах обозначено:

T - температура (град. Цельсия) ;

t - время (сек.) ;

g - ускорение силы тяжести (м / сек²) ;

v - скорость (м / сек) ;

E - модуль Юнга материала (Па) ;

μ - коэффициент Пуассона материала ;

ρ - плотность материала (кг / м³) ;

F - сила (Н) ;

N - продольная сила (Н) ;

N_B - продольная сила при разрушении материала или появлении трещин (Н) ;

σ - нормальное напряжение (Па) ;

σ_T - предел текучести (Па) ;

σ_B - временное сопротивление - нормальное напряжение,

соответствующее действию максимальной нагрузки, выдерживаемой образцом (Па);

τ - касательное напряжение (Па);

ε - линейная деформация;

ℓ (ℓ_0) - первоначальная длина рабочей части образца (м);

A (A_0) - первоначальная площадь поперечного сечения рабочей части образца (м²);

b (b_0) и h (h_0) - первоначальные размеры прямоугольного поперечного сечения рабочей части образца (м);

d (d_0) - первоначальный диаметр круглого поперечного сечения рабочей части образца (м);

$\Delta\ell$ - абсолютное удлинение (м);

f - частота колебаний (Гц);

N^* - число циклов нагружения до разрушения материала.

На рисунках обозначено:

1 - образец;

2 - нагрузка;

3 - зажим или упор;

4 - захват машины;

5 - станина;

6 - индикатор часового типа.

2. СТАТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Виды статических испытаний

Статическими (квазистатическими) испытаниями материалов называются такие, при которых скорости деформаций настолько малы, что влиянием инерционных сил при обработке результатов испытаний можно пренебречь. К статическим (квазистатическим) испытаниям относятся, например, машинные испытания по снятию диаграммы $\sigma - \epsilon$ при достаточно медленном нагружении, испытания на ползучесть, релаксацию и длительную прочность. При построении диаграмм $\sigma - \epsilon$ необходимо таким образом подбирать скорость перемещения подвижного захвата машины, чтобы учесть скорость перемещения захвата, связанного с силоизмерителем.

Считая в первом приближении, что диаграмма $\sigma - \epsilon$ жестких полимеров состоит из двух участков (рис.2), скорость деформации образца на этих участках запишется

$$\dot{\epsilon}_I = \frac{v_m}{\ell + \frac{EA}{k}}, \quad \dot{\epsilon}_{II} = \frac{v_m}{\ell}, \quad (2.1)$$

где I участок и II участок - упругая и пластическая деформации; E - модуль упругости в I области; k - коэффициент жесткости динамометра; v_m - скорость нижнего захвата.

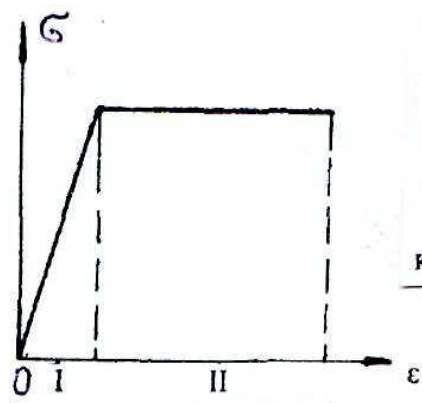


Рис. 2

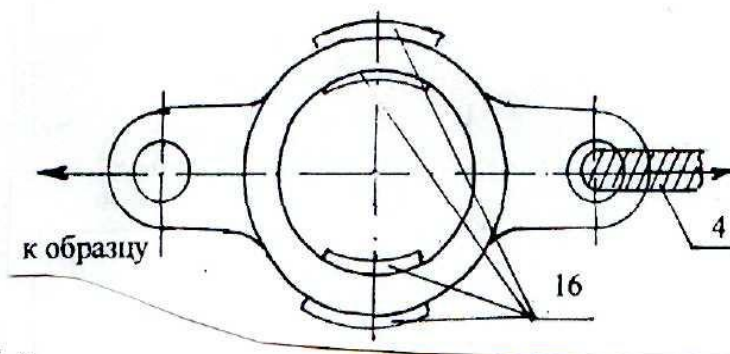


Рис. 3

Из формул (2.1) видно, что чем больше жесткость динамометра, тем $\dot{\epsilon}_I$ ближе к $\dot{\epsilon}_{II}$. Так как испытания образцов необходимо проводить при постоянной скорости деформирования, то желательно использовать динамометры с большой жесткостью, а именно динамометры, выполненные в виде упругого элемента (рис.3), деформация которого измеряется наклеенными на него тензорезисторами 16, включенными в мостиковую измерительную схему.

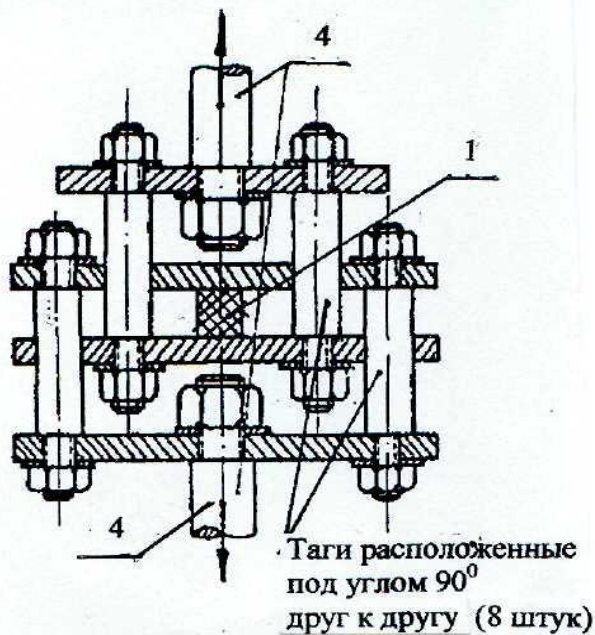


Рис. 4

Однако, в отличие от обычных (нециклических) испытаний, когда нагрузка или деформация меняются непрерывно с определенной скоростью в процессе испытаний, во время циклических испытаний, как нагрузка, так и деформация могут изменяться, скачками увеличиваясь или уменьшаясь. Гистерезис полимеров при нагрузке и разгрузке связан в большой степени с релаксационными явлениями, причем в отличие от металлов, полимеры не имеют какого-либо предела по напряжениям, ниже которого гистерезис отсутствует. В связи с этим, в диаграммах $\sigma - \epsilon$ деформации, соответствующие одинаковым напряжениям при нагрузке и разгрузке, не равны между собой. Если циклически менять не напряжения, а деформации, то напряжения в образце будут зависеть от того, достигнута ли данная деформация в процессе ее убывания или в процессе возрастания, а также от числа циклов изменения деформации.

Циклическое изменение напряжений или деформаций от нуля до заданной величины и наоборот, проводится для построения гистерезисных диаграмм. Площадь петли гистерезиса, ограниченная кривыми разгрузки и последующего нагружения, является важной характеристикой, которая определяет потери энергии в материале при циклическом нагружении. Циклическое изменение напряжения или деформации во времени дает возможность установить зависимость остаточных деформаций (напряжений) от числа циклов нагружения. В связи с тем, что циклическому нагружению подвергаются элементы конструкций весьма часто, эти характеристики являются необходимыми для использования полимеров в промышленности, циклические испытания проводятся по той

В связи с тем, что подобные упругие элементы работают лишь при растягивающей нагрузке, для испытаний на сжатие необходимо применять реверс – приспособление, преобразующее растягивающие усилие в сжимающее. Схема реверса приведена на рис.4.

Статические (квазистатические) испытания могут заключаться в однократном или многократном статическом деформировании образцов из исследуемого материала по некоторой задаваемой программе.

К квазистатическим видам испытаний относится и циклическое нагружение.

же методике и на том же оборудовании, что и статические испытания. Для механических испытаний пластмасс применяются объемные образцы, получаемые прессованием, литьем под давлением и механической обработкой.

Объемные образцы показывают более стабильные характеристики, чем пленочные, однако в результате неравномерного температурного поля или усадки во время литья, или в процессе механической обработки, в них возможно появление начальных напряжений трещин, неоднородностей, которые делают такие образцы непригодными для испытаний.

Рассмотрим статические (квазистатические), усталостные и динамические испытания пластмасс на растяжение, сжатие, сдвиг, скалывание, раскалывание и изгиб, а также испытание полимерных пленок на статическое растяжение. Специальное испытание на кручение для полимерных материалов практически не проводится. Испытание полимеров на кручение по методике испытаний металлических образцов [13] на крутильных машинах серии КМ проводят комплексно с испытаниями на растяжение, сжатие и изгиб, для получения более полной информации при сравнении механических свойств конкурирующих типов конструкционных полимерных материалов.

2.2. Испытания пластмасс на растяжение

Статические (квазистатические) испытания полимерных материалов на растяжение и сжатие, проводят на универсальных и специальных разрывных машинах, предназначенных для испытания полимерных материалов [14-15]. При испытании образцов из полимерных материалов на универсальных и специальных машинах, предназначенных для механических испытаний металлов, в силовые и измерительные устройства вводятся конструктивные изменения, учитывающие особенности деформирования полимерных материалов.

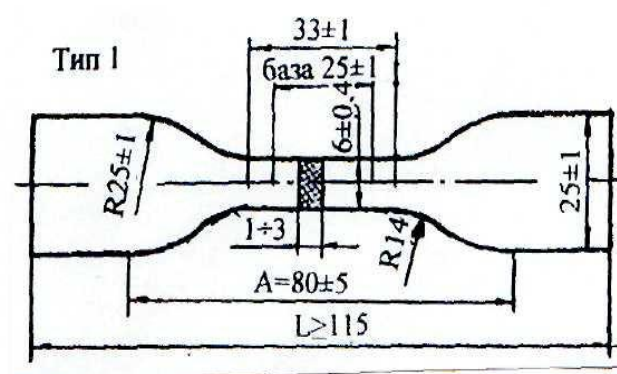
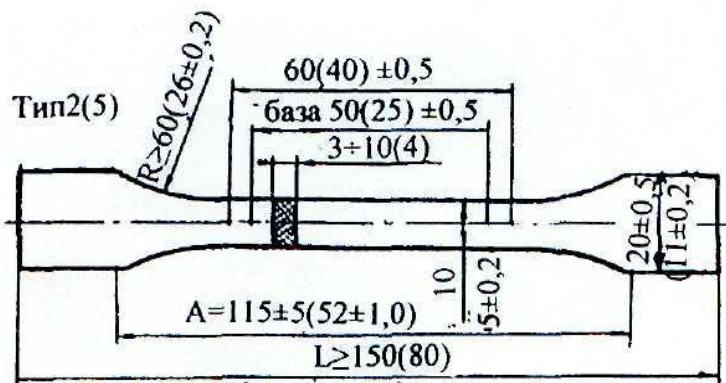


Рис. 5



Размер А определяет положение кромок захватов на образце

Рис. 6

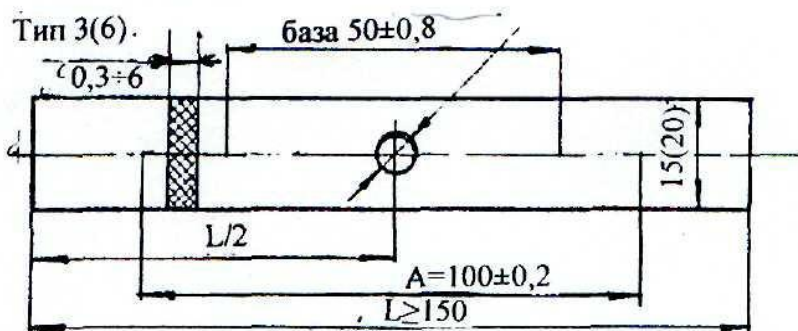


Рис. 7

Для стандартных и дополнительных механических испытаний пластмасс на растяжение используются образцы, изображенные на рис. 5 - 8, [16]. Образец типа 1 применяют для испытаний пластмасс с высоким относительным удлинением при разрыве (полиэтилен, пластифицированный поливинил-хлорид), типа 2 – для испытания большинства материалов (терморезактивные, термопластичные и слоистые материалы), типов 3 и 6 – для испытания стеклопластиков. Для испытания термопластичных и терморезактивных гомогенных пластмасс применяют образцы типов 4 и 5. Образец типа 6 с концентратором напряжений применяют при получении нестабильных результатов на образцах других типов.

В образцах формы "двойная лопатка" весьма мала концентрация напряжений в местах зажима, и образец разрушается в пределах рабочей части, а не на концах. Для снижения концентрации напряжений в зажимах концы образцов могут покрываться слоем эластичного полимера. Иногда в рабочих зажимах ставят деревянные прокладки, через которые рабочее давление передается на головку образца. На концах образца предусматриваются утолщения для надежного крепления их в рабочих зажимах машины. Однако, в случае прямоугольных образцов без головок, а также для образцов из ориентированных высокопрочных стеклопластиков, эти меры полностью не гарантируют разрушение образца на его рабочей

части. Некоторые исследователи считают, что прочность образцов, разорвавшихся в зажимах, была в среднем выше, чем прочность образцов, разорвавшихся на рабочей части. Образцы, разорвавшиеся на рабочей части, имели дефекты в тех точках, где произошло разрушение. Там, где дефектов не было, большую роль играет концентрация напряжений, и образцы разрываются в зажимах.

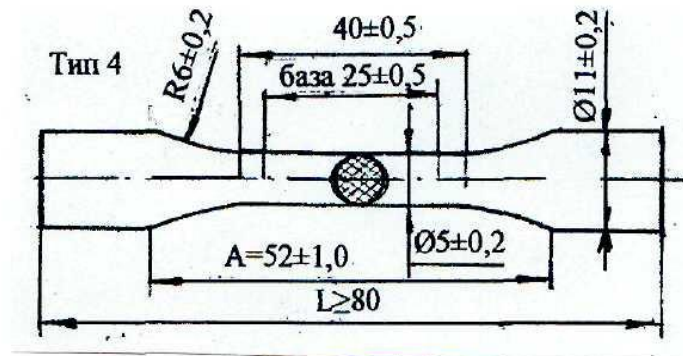


Рис. 8

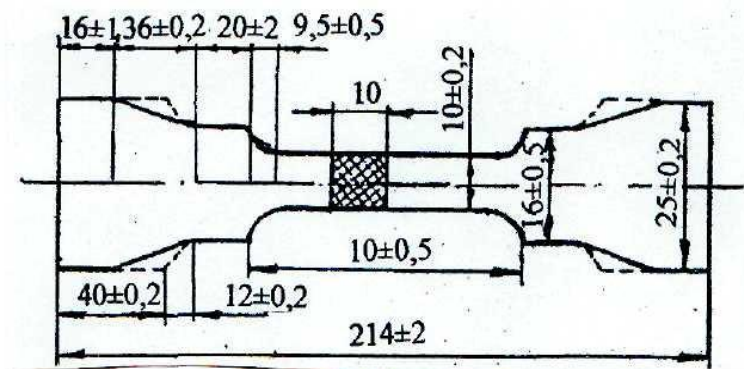


Рис. 9

Зажимы, связывающие образцы с рабочими захватами испытательной машины, должны обеспечивать надежное крепление образцов, исключаящее их скольжение, и совпадение продольной оси образцов с направлением растягивающей нагрузки (для чего зажимные приспособления крепятся к захватам машины с помощью шаровых опор). При испытании стеклопластиков зажимы должны обеспечивать возможность регулирования давления на испытуемый образец, создание максимальной силы трения между поверхностью образца и захвата в месте соприкосновения, и иметь гладкую поверхность закрепления. Для увеличения силы трения рекомендуется применять прокладки из двухсторонних шлифовальных шкур или прорезиненной ткани.

Для крепления полимерных образцов к захватам испытательной машины применяются: клиновые зажимы с гладкими, рифлеными и зубчатыми губками (конструкция таких зажимов зависит от величины разрывной нагрузки), рычажные зажимы, поджимающие образец в процессе

нагрузки, одно- и двухступенчатые зажимы цангового типа, винтовые зажимы, зажимы с постоянным поджимом образца. Зажимы с самозатягивающимися вкладышами и зажимы с грубой рифленой поверхностью при испытании полимерных образцов применять не рекомендуется.

При проведении дополнительных испытаний полимерных материалов на растяжение, удобно применять образцы в форме «двойной лопатки» с дополнительными утолщениями для крепления измерительной аппаратуры (рис.9). Преимущество такого образца перед образцом в форме стандартной «двойной лопатки» состоит в том, что деформации измеряются непосредственно на базе образца, и погрешности, вносимые деформациями растяжениями, сдвига и смятия в зажимах, не влияют на измеряемую величину деформации рабочей части образца. На рис.10 приведен чертеж зажимов для таких образцов. Крепление зажимов к рабочим захватам машины шарнирное.

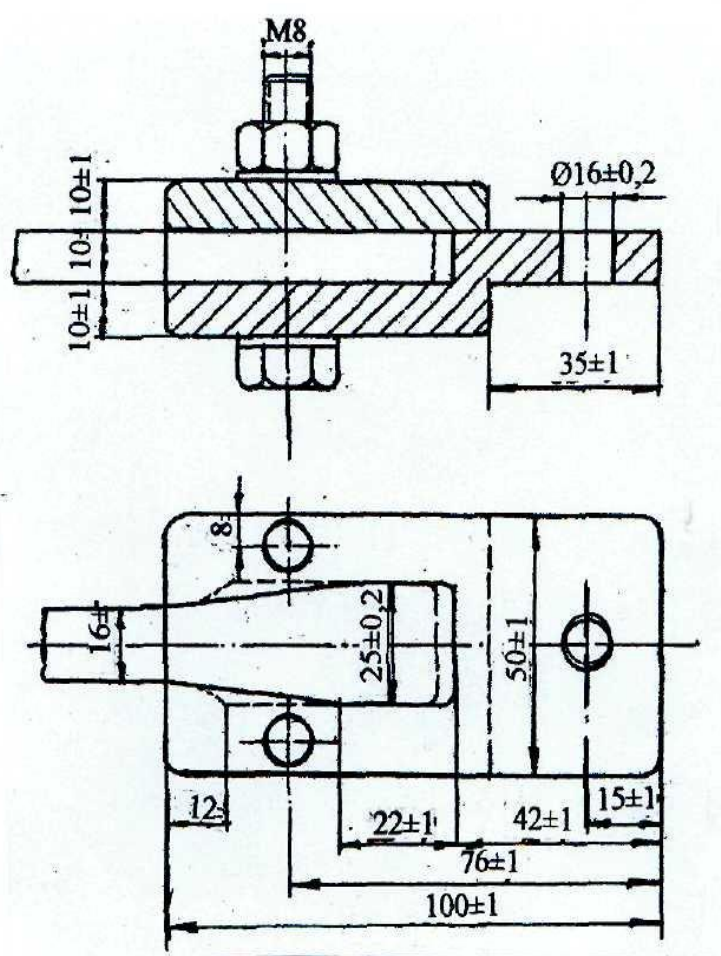


Рис. 10

Все образцы, подлежащие испытанию на растяжение, подвергаются предварительному циклическому нагружению и разгрузке с продолжительностью времени воздействия неизменной нагрузки и "отдыха" по 100 часов. Это циклическое нагружение производится за три цикла соответственно с напряжениями $\sigma = 0,3 \sigma_B$; $\sigma = 0,5 \sigma_B$; $\sigma = 0,7 \sigma_B$. Если дальнейшее нагружение образца до $\sigma = 0,7 \sigma_B$ не вызывает изменения роста остаточной деформации, то материал после 200 часов "отдыха" подвергается плановому испытанию.

При кратковременном статическом растяжении образца из пластмассы по [16] определяются:

- 1) разрушающее напряжение на растяжении

$$\sigma_a = \frac{N_a}{A}; \quad (2.2)$$

- 2) предел текучести при растяжении (рис.11 кривая 1)

$$\sigma_T = \frac{N_T}{A}; \quad (2.3)$$

- 3) условный предел текучести σ_{Ty} , - напряжение при заданном относительном удлинении (для материалов, у которых площадка текучести отсутствует - рис.11, кривая 2);

- 4) относительное удлинение образца при разрыве в процентах –

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta l_p}{l} 100\%; \quad (2.4)$$

- 5) относительное удлинение образца при пределе текучести в процентах

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta l_T}{l} 100\%; \quad (2.5)$$

- 6) несущая способность - нагрузка, приходящаяся на единицу первоначальной ширины образца - b (только для стеклопластиков)

$$P = \frac{N_a}{b}; \quad (2.6)$$

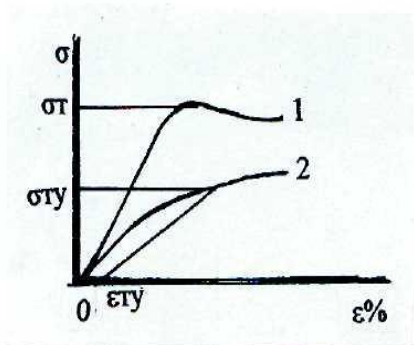


Рис. 11

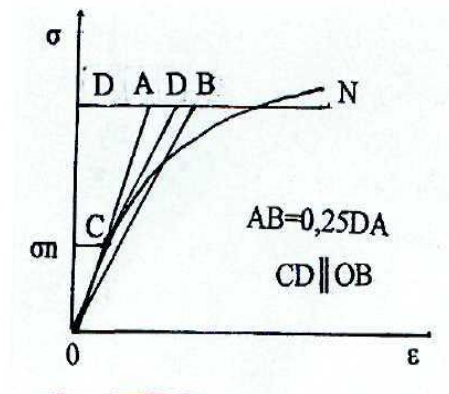


Рис. 12

7) удельная несущая способность - нагрузка, приходящаяся на единицу первоначальной ширины одного армирующего слоя образца (для однонаправленных слоистых стеклопластиков)

$$P_c = \frac{N_6}{n\ell}. \quad (2.7)$$

Здесь $\Delta\ell_p$ - максимальное удлинение образца; N_T и $\Delta\ell_T$ - усилие и удлинение образца, соответствующие площадке текучести; n - число армирующих слоев.

Кроме величин (2.2) - (2.7), при кратковременном статическом растяжении образцов из пластмассы, согласно [17], определяют модуль упругости E - отношение напряжения к соответствующей относительной деформации растяжения в пределах пропорциональности

$$E = \frac{(N_2 - N_1)100}{A(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}, \quad (2.8)$$

где N_1 - нагрузка, соответствующая относительной деформации $\varepsilon_1 = 0,1\%$ или $N_1 = 3\% N_B$;

N_2 - нагрузка, соответствующая относительной деформации $\varepsilon_2 = 0,3\%$ или $N_2 = 10\% N_B$;

$\varepsilon_1 = 0,1\%$ или ε_1 - относительная деформация в % при $N_1 = 3\% N_B$;

$\varepsilon_2 = 0,3\%$ или ε_2 - относительная деформация в % при $N_2 = 10\% N_B$.

За условный предел пропорциональности $\sigma_{пу}$ принимают напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между напряжением и деформацией достигает 25%. Напряжение, соответствующее пределу пропорциональности, определяют следующим образом (рис.12): из любой точки оси ординат параллельно оси абсцисс проводят прямую DN , продолжают начальный прямолинейный участок до пересечения с прямой DN в точке A и откладывают отрезок $AB=0.25DA$. Ордината точки касания касательной $CD\parallel OB$ к кривой $\sigma - \varepsilon$ принимается за предел пропорциональности (его величину округляет с точностью до 1 МПа).

Погрешность измерения деформации при определении характеристик (2.2) - (2.7) должна составлять:

- при деформации 0,5 - 10 мм - не более 0.1 мм,
- при деформации свыше 10 мм - не более 1,0 % а при определении модуля упругости по (2.8):

- не более 0,002 - при базе измерения деформации 50 мм;

- не более 0.001 - при базе намерения деформация 20 или 25 мм.

Для измерения деформации могут быть использованы приборы, закрепляемые непосредственно на образце – тензодатчики, тензометры, а также приборы, позволяющие производить измерение по меткам, нанесенным на образце при помощи оптических или других систем измерения.

При выборе скорости раздвижения захватов следует руководствоваться тем, чтобы время от момента приложения нагрузки к образцу до момента его разрушения было не менее 1 мин. при испытаниях материалов, имеющих предел текучести и не менее 30 сек при испытаниях материалов, не имеющих предела текучести. Рекомендуемые скорости раздвижения захватов: $1 \pm 0,5$, $5 \pm 1,0$, $25 \pm 2,5$, $50 \pm 5,0$, $100 \pm 10,0$, $500 \pm 50,0$ мм/мин. В процессе нагружения нагрузку и удлинение измеряют непрерывно или в момент достижения определяемого показателя.

Модуль упругости E по (2.8) определяют в следующей последовательности:

1. Производят трехкратное нагружение и разгрузку образца (тренировку) до $\varepsilon = 0,5\%$. При тренировке определяют величины нагрузок, соответствующие $\varepsilon = 0,1\%$ и $\varepsilon = 0,5\%$. На образцах разрушающихся в процессе тренировки при $\varepsilon < 0,5\%$ тренировку производят до величины нагрузки, равной $0,1N_B$.

2. Нагружают образец до $\varepsilon = 0,1\%$ или до $N = 0,03N_B$ и устанавливают прибор, измеряющий деформацию, в нулевое положение.

3. При проведении испытаний с использованием ручного привода производят ступенчатое нагружение образца, увеличивая нагрузку приблизительно равными величинами. Количество ступеней при нагружении до $\varepsilon = 0,5\%$ или $N = 0,1N_B$ должно быть не менее 8. Время нагружения должно быть не более 2 минут. На каждой ступени нагрузки измеряют соответствующее значение деформации.

4. При проведении испытания с автоматической записью нагрузки и деформации на диаграмму производят непрерывное нагружение образца при скорости раздвижения захватов $1 \pm 0,5$ мм/мин.

5. Результаты, полученные при ступенчатом нагружении, откладывают на графике, через полученные точки проводят прямую линию. С этой прямой или с автоматически записанной диаграммы снимают исходные данные для формулы (2.8).

Кратковременное статическое растяжение проводят при различных температурах и способах нагрева образца. В частности, для учета влияния одностороннего нагрева образца на величину условного предела прочности при растяжении определяют нагрузку N_{By} при растяжении образца, нагреваемого с одной стороны по заданному температурно-временному режиму. После пятиминутного прогрева образцы растягиваются со скоростью $v = 5-10$ мм/мин. В качестве образцов можно использовать образцы типа 3 (рис. 7) или полоски $300 \times (30 \pm 0,5) \times (2 - 10)$ мм, окруженными защитными боковыми экранами. Условный предел прочности определяется по формуле

$$\sigma_{gy} = \frac{N_{gy}}{A} . \quad (2.9)$$

2.3. Испытание полимерных пленок на растяжение

Статическое кратковременное растяжение полимерных пленок по [18] проводится аналогично испытанию пластмасс на кратковременное статическое растяжение по [16]. При испытании определяются механические характеристики пленки по формулам (2.2 – 2.7). Методика испытания предназначена для испытания полимерных пленок и пленочных материалов толщиной до 1,0 мм, и не распространяется на пористые пленки со сквозными крупными порами, на тисненные и формованные пленочные материалы, имеющие неровную поверхность обеих сторон, а также на армированные пленки. Для механических испытаний полимерных пленок и пленочных материалов используются пленочные образцы прямоугольной формы (полоска шириной 10-25 мм, длиной не менее 150 мм, допуск по ширине образца 0,2 мм), вырезанные из пленки с помощью специального приспособления ([18], приложение 3). Не допускается подготовка образцов вырубанием штампами и шанцевыми ножами. Крепление пленочных образцов к захватам машины осуществляется с помощью зажимов, изображенных на рис.13. Контактная площадка прибора должна быть плоской, круглой, оказывать на образец давление 0,01-0,03 мпа.

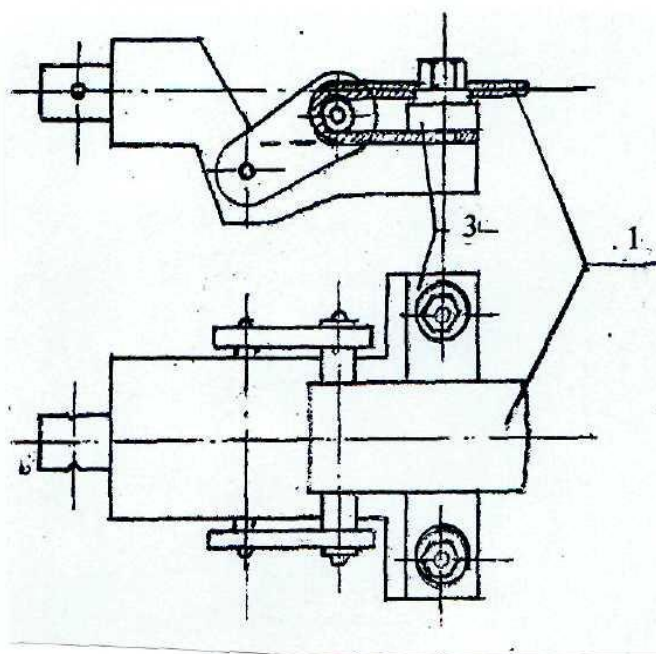


Рис. 13

Допускается увеличение давления на образец при замере жестких пленок толщиной менее 0,05 мм. Минимальный диаметр площадки должен быть 5 мм, максимальный не должен превышать ширины образца. Толщины пленочных образцов измеряются со следующей точностью (мм):

(до 0,01)	$\pm 0,0005$;
(от 0,01 до 0,05)	$\pm 0,001$;
(от 0,05 до 0,1)	$\pm 0,002$;
(от 0,1 до 0,25)	$\pm 0,005$;
(от 0,2 до 1,0)	$\pm 0,01$.

Перед испытанием на центральную часть образца наносят метки, ограничивающие базу (рабочий участок) образца (метки не должны приводить к изменению свойств образцов и разрушению их по меткам), Метки располагают их на расстоянии $50 \pm 0,5$ мм или $100 \pm 0,5$ мм одну от другой.

При измерениях удлинения по меткам, на образец наносятся дополнительные метки на расстоянии не менее 60 мм или 120 мм, определяющие положение кромок зажимов и располагающиеся на равном расстоянии от основных меток. При измерении удлинения по расстоянию между зажимами, это расстояние устанавливают равным базе образца. Замеряется в трех местах толщина и ширина образца, для расчета принимается минимальная площадь. Для измерения толщины тонких пленок (менее 0,02 мм) допускается применение гравиметрического метода, основанного на вычислении толщины образца по известным ширине, длине, удельному весу материала и весу образцов. Скорости раздвижения зажимов такие же, как и при испытании пластмассовых образцов.

по результатам испытаний определяют σ_B , σ_T , σ_B , ε_B , ε_T , ε_B , по формулам (2.2) – (2.7).

Испытания полимерных пленок на растяжение проводят на специальных установках, а также на машинах для разрыва волокон, нитей и пленок.

2.4. Испытание резины на растяжение

Испытание резины на растяжение проводится в соответствии со стандартом [19-20]. Образцы для испытаний должны иметь форму двусторонней лопатки или кольца. Типы и размеры образцов двусторонних лопаток должны соответствовать рис. 14 и табл. 2.

Таблица 2

Размер, мм	Тип образца					
	I	II	III	IV	V	VI
L_1 не менее	115	110	75	55	115	35
B_1	25,0±1,0	25,0±1,0	12,5±1,0	9,0±1,0	25,0±1,0	6,0±0,5
L_3	33,0±1,0	30,0±1,0	25,0±1,0	12,5±1,0	60,0±1,0	12,5±1,0
B_0	6,0 ^{+0,4}	3,0 ^{+0,2}	4,0±0,1	2,0±0,1	6,0 ^{+0,4}	2,0±0,1
L_2	80±5	80±5	50±3	33±3	103±5	21±2
R_2	14,0±1,0	14,0±1,0	8,0±0,1	7,0±0,5	14,0±1,0	3,0±0,1
R_1	25,0±1,0	20,0±1,0	12,5±1,0	9,0±1,0	25,0±1,0	3,0±0,1
L_0	25,0±1,0	25,0±1,0	20,0±1,0	10,0±1,0	50,0±1,0	3,0±0,1

Здесь : L_1 - общая длина, B_1 - ширина широкой части, L_3 - длина узкой части, B_0 - ширина узкой части, L_2 - расстояние между линиями, определяющими положение большего радиуса, R_2 - малый радиус, R_1 - большой радиус, L_0 - расстояние между метками, d - толщина для всех образцов 1,0±0,2 мм или 2,0±0,2 мм.

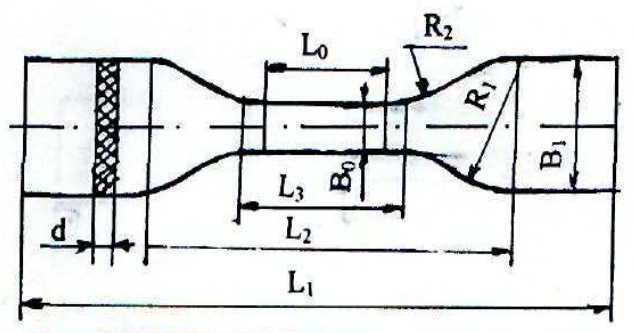


Рис . 14

Размеры образцов, кроме толщины, определяются размерами штанцевых ножей и после вырубки не контролируются. Образцы типа VI применяются, если нельзя вырубить образцы типов I - V. Образцы из готовых изделий могут иметь толщину не более 3мм. Образцы вырубают из вулканизованных пластин толщиной $(1,0\pm 0,2)$ мм или $(2,0\pm 0,2)$ мм ножами. Разность между максимальной и минимальной толщиной образца в узкой части не должна превышать 0,1 мм.

Для измерения удлинения на узкую часть образца наносят параллельные метки, расстояние между которыми для образцов типов I и II составляет (50 ± 1) мм, для типа III— (40 ± 1) мм, для типа IV— (25 ± 1) мм, для типов V (80 ± 1) мм, для типа VI— (20 ± 1) мм. Метки должны быть нанесены симметрично относительно центра образца. Для лучшего закрепления образцов в захватах применяют образцы с напльвами, расположенными симметрично относительно центра образца.

Размеры образцов кольцевой формы определяются вырезным устройством или штанцевым ножом, у которых внутренний диаметр должен быть равен $44,60\pm 0,05$ мм, а наружный диаметр — $52,60\pm 0,05$ мм. Толщина образцов должна быть равна $4,0\pm 0,2$ мм или $6,0\pm 0,3$ мм. Образцы кольцевой формы, у которых внутренний диаметр должен быть равен $44,60\pm 0,05$ мм, а наружный диаметр — $52,60\pm 0,05$ мм вырубают из пластин штанцевыми ножами или вырезают на машинах с вращающимися ножами. Допускается, заготовка колец вулканизацией в пресс-формах, но при этом результаты испытаний колец, вырубленных или вырезанных и вулканизованных в пресс-формах, не сопоставимы. Образцы перед испытанием кондиционируют. Толщину образцов лопаток измеряют толщиномером на узкой части, а образцов колец - в разных местах по окружности не менее чем в трех точках. За результат измерения принимают среднее арифметическое всех измерений. За ширину образца лопатки принимают расстояние между режущими кромками ножа в его узком участке.

Допускается вычислять площадь поперечного сечения кольца S , исходя из его массы, плотности резины и длины средней окружности образца кольца по формуле

$$S = m / \rho \ell_{\text{ср}} = m / \rho 15,2 , \quad (2.10)$$

где m - масса образца (г), определенная с погрешностью взвешивания не более 0,01 г;

ρ - плотность резины, (г/см³);

$\ell_{\text{ср}}$ - длина средней окружности кольца, составляющая $\pi * 4,86 = 15,2$ см.

Испытания проводят на разрывных машинах для испытания резины при температуре $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ и скорости движения активного захвата (500 ± 50) мм/мин. Допускается проводить испытания при повышенных температурах рекомендуемого ряда: 70 ± 2 ; 100 ± 2 ; 125 ± 2 ; 150 ± 2 ; 200 ± 3 ; $250 \pm 5^\circ\text{C}$. Образец лопатку закрепляют таким образом, чтобы установочные метки находились посередине наружной стороны поджимающих валиков, а образец кольца надевают на два сближенных ролика.

В ходе непрерывного растяжения образца фиксируют силу, соответствующую заданным удлинениям. В момент разрыва образца фиксируют силу и расстояние между метками для образцов лопаток или расстояние между центрами роликов для образцов колец. При разрыве образца за пределами узкой части результаты испытания не учитывают.

При необходимости определения относительной остаточной деформации после разрыва, части разорванного образца, освобожденные из захватов, помещают на ровный стол и через 1 мин. после разрыва измеряют расстояние между метками двух сложенных по месту разрыва частей образца.

Остаточную деформацию образца после разрыва (относительное остаточное удлинение θ) в процентах вычисляют по формуле;

$$\Theta = (\ell - \ell_0) / \ell \cdot 100 \% , \quad (2.11)$$

где ℓ - расстояние между метками образца по двум сложенным вместе частям разорванного образца, (мм);

ℓ_0 - расстояние между метками образца до испытания, (мм).

Для испытания при повышенной температуре, температуру в камере доводят до заданной, устанавливают в камеру образец и прогревают образцы лопатки не менее 3 мин, а образцы кольца не менее 5 мин. Допускается прогревать в камере одновременно несколько образцов, при этом время прогрева образцов не должно превышать 15 мин.

По результатам испытаний находят:

1. Условную прочность f_p образца лопаток:

$$f_p = F_p / d b_0, \quad (2.12)$$

где F_p - сила, вызывающая разрыв образца, (Н); d - среднее значение толщины образца до испытания, (м); b_0 - ширина образца до испытания, (м).

2. Условную прочность f_{pk} образцов кольца:

$$f_{pk} = F_{pk} / 2 h_k b_k \quad \text{или} \quad f_{pk} = F_{pk} / 2 S, \quad (2.13)$$

где F_{pk} - сила, вызывающая разрыв образца кольца, (Н); h_k - среднее значение толщины образца до испытания, (м); b_k - ширина образца до испытания, (м).

3. Относительное удлинение ε_p при разрыве образца лопаток в процентах ;

$$\varepsilon_p = (\ell_p - \ell_0) / \ell_0 100 \% , \quad (2.14)$$

где ℓ_p — расстояние между метками в момент разрыва образца (мм);
 ℓ_0 — расстояние между метками образца до испытания.

4. Относительное удлинение ε_p при разрыве образцов с напльвами типов I, II, V и образцов лопаток типа I без напльвов в процентах:

$$\varepsilon_p = K \varepsilon_{общ} 100 \% , \quad (2.15)$$

где K — коэффициент пропорциональности, который находят с помощью табл. 3, в которой общее относительное удлинение $\varepsilon_{общ}$ в процентах вычисляют по формуле;

$$\varepsilon_{общ} = (\ell_{pk} - \ell_0) / \ell_0 100 \% , \quad (2.16)$$

где ℓ_{pk} - расстояние между напльвами образца в растянутом состоянии, (мм); ℓ_0 - расстояние между напльвами до испытания, (мм).

Таблица 3

$\varepsilon_{общ}$	Тип образца				$\varepsilon_{общ}$	Тип образца			
	I	II	V	VI		I	II	V	VI
1,0	-	-	1,13	1,16	3,5	1,08	1,11	1,06	
1,25	-	-	1,12	1,15	4,0	1,07	1,10	1,06	
1,50	-	-	1,11	1,14	5,0	1,06	1,09	1,05	
1,75	-	-	1,10	1,13	6,0	1,05	1,08	1,04	
2,0	1,10	1,14	1,09	1,11	7,0	1,04	1,07	1,04	
2,5	1,10	1,13	1,08	1,10	8,0	1,04	1,06	1,03	
3,0	1,09	1,12	1,07	1,09	9,0	1,03	1,04	1,02	

5. Относительное удлинение при разрыве образцов колец ε_{pk} в процентах

$$\varepsilon_{pk} = (\ell_{pk} - \ell_0) / \ell_0 \cdot 100 \% , \quad (2.17)$$

где ℓ_{pk} - длина внутренней окружности образца кольца в момент разрыва, вычисляемая по формуле

$$\ell_{pk} = 2c + \pi d , \quad (2.18)$$

где c - расстояние между центрами роликов в момент разрыва образца, (мм);

d - диаметр ролика, (мм);

$\ell_{ок}$ - номинальная длина внутренней окружности образца кольца до испытания, (мм).

6. Условное напряжение при заданном удлинении образцов лопаток f_ε

$$f_\varepsilon = F_\varepsilon / d b_0 , \quad (2.19)$$

где F_ε - сила при заданном удлинении, (Н);

d - среднее значение толщины образца до испытания, (м);

b_0 - ширина образца до испытания, (м).

7. Условное напряжение при заданном удлинении образцов колец $f_{\varepsilon k}$

$$f_{\varepsilon k} = F_{\varepsilon k} / 2 h_k b_k , \quad (2.20)$$

где $F_{\varepsilon k}$ - сила при заданном удлинении, (Н);

h_k - среднее значение толщины образца до испытания, (м);

b_k - ширина образца до испытания, (м).

8. Истинное напряжение при заданном удлинении образцов лопаток σ_ε

$$\sigma_\varepsilon = f_\varepsilon (\varepsilon_\varepsilon + 1) , \quad (2.21)$$

где f_ε - условное напряжение при заданном удлинении, (Па);

ε_ε - заданное удлинение.

9. Истинную прочность σ_p

$$\sigma_p = f_p (\varepsilon_p + 1) , \quad (2.22)$$

где f_p - условная прочность, (Па);

ε_p - относительное удлинение.

2.5. Испытания пластмасс на сжатие

Выбор размеров образцов для испытаний на сжатие определяется двумя факторами: возможностью потери устойчивости при сжатии и влиянием граничных условий. Первый из них определяет максимально возможную длину, а второй - минимально возможную длину при данном поперечном сечении.

Для испытаний на сжатие по [21] применяют образцы в виде цилиндра, трубки или параллелепипеда с квадратным или прямоугольным основанием. Для испытания пластмасс с модулями упругости более 10^3 МПа используют образцы с отношением высоты ℓ к минимальному размеру основания, приблизительно равным:

- для образца в виде параллелепипеда ℓ/a или $\ell/b = 2,9$;

- для образца в виде цилиндра $\ell/d = 2,5$;

- для образца в виде трубки
$$\frac{\ell}{\sqrt{D^2 + d_1^2}} = 2,5.$$

Здесь a - сторона основания параллелепипеда с квадратным поперечным сечением в мм; b - ширина основания параллелепипеда с прямоугольным поперечным сечением в мм; d - диаметр цилиндра в мм; d_1 - внутренний диаметр трубки в мм; D - наружный диаметр трубки в мм.

Для пластмасс с модулями упругости менее 10^3 МПа, отношение высоты образца к минимального размеру его основания должно быть равным 1,5. Размеры образцов для испытаний на сжатие приведены в таблице 4.

Таблица 4

Вид образца	Модуль упругости материала, МПа	Размеры образца, мм			
		ℓ	a	b	d
1. Параллелепипед с квадратным основанием	Более 10^3	$30 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	-----
	Менее 10^3	$15 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	-----
2. Параллелепипед с прямоугольным основанием	Более 10^3	$30 \pm 0,5$	$15 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	-----
	Менее 10^3	$15 \pm 0,5$	$15 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5$	-----
3. Цилиндр	Более 10^3	$30 \pm 0,5$	-----	-----	$12 \pm 0,5$
	Менее 10^3	$15 \pm 0,5$	-----	-----	$10 \pm 0,5$

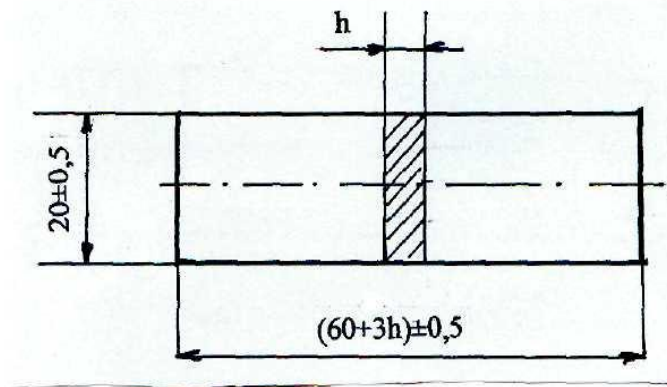


Рис. 15

Приведенные здесь размеры установлены для материалов имеющих $E \geq 10^3$ МПа, исходя из $\lambda = 10$; для материалов, имеющих $E < 10^3$ МПа, исходя из $\lambda = 6$, где λ - гибкость образца.

При изучении сжатия для некоторых полимеров удается получить достаточно однородное деформированное состояние вплоть до момента разрушения, (только эти результаты и следует учитывать), для других же, влияние трения на торцах приводит к сравнительно раннему нарушению однородности и к образованию бочкообразной формы. Для испытаний на сжатие тонколистовых пластмасс в плоскости листа применяют образцы в форме прямоугольной полоски (рис.15), и в форме «двойной лопатки» (рис.16) для материалов, разрушение которых происходит у краев зажимных губок.

При кратковременном статическом сжатии образца из пластмассы определяют [21]:

1. Разрушающее напряжение при сжатии

$$\sigma_s = \frac{N_s}{A}, \quad (2.23)$$

где N_B – разрушающая нагрузка – максимальное сжимающее усилие, вызывающее разрушение образца или появление трещин.

2. Напряжение при заданной относительной деформации сжатия $\epsilon_{зад} = 25\%$ (для материалов, не разрушающихся при сжатии) – σ_{25} .

3. Предел текучести при сжатии - σ_T .

4. Условный (смещенный) предел текучести - $\sigma_{ТУ}$ - напряжение, соответствующее заданной величине упругой относительной деформации $\epsilon_{ТУ}$ (рис. 17).

5. Относительную деформацию сжатия при разрушении в процентах

$$\epsilon_{pc} = \frac{\Delta l_{pc}}{l_0} 100\%, \quad (2.24)$$

где Δl_{pc} – уменьшение длины образца при разрушении,

6. Относительную деформацию сжатия при пределе текучести в процентах

$$\epsilon_{TC} = \frac{\Delta \ell_{TC}}{\ell_0} 100\%, \quad (2.25)$$

где $\Delta \ell_{TC}$ – уменьшение длины образца при пределе текучести.

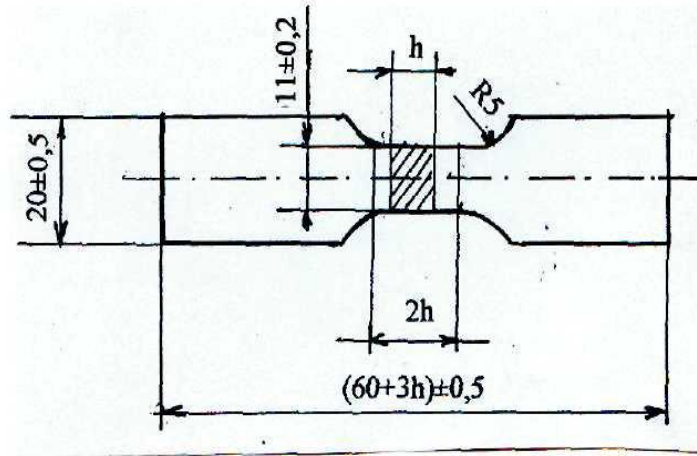


Рис. 16

При испытаниях скорость деформирования определяют по следующей формуле

$$v = (0,0015 - 0,045) \ell .$$

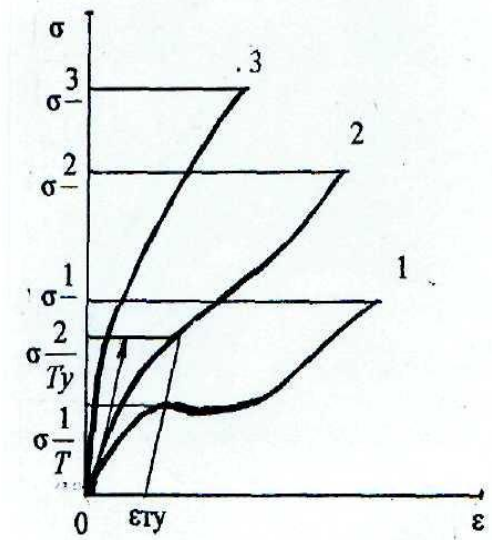


Рис. 17

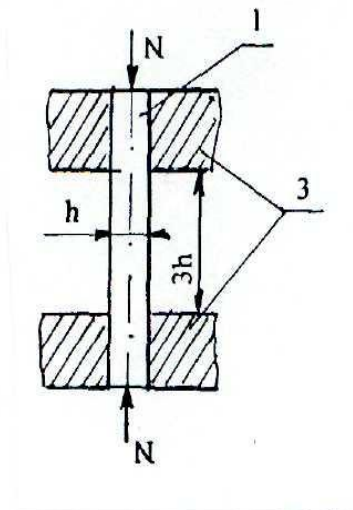


Рис. 18

Для определение прочности σ_{BO} при сжатии тонколистовых пластмасс в плоскости листа при температурах от -196°C до $+400^\circ\text{C}$ используется формула

$$\sigma_{BO} = \frac{N_0}{A}, \quad (2.26)$$

где N_0 – сила, при которой наступает разрушение или течение образцов, изображенных на рис. 15 и 16, установленных в специальном приспособлении (рис.18) и сжимаемых со скоростью 2 ± 1 мм/мин. В том случае, когда нет возможности довести материал до хрупкого разрушения, и материал не имеет площадки текучести, испытания проводят до заданной величины напряжения или деформации, равной 10%, 20% или 50% .

2.6. Дополнительные результаты испытаний на растяжение или сжатие

По результатам стандартных и дополнительных статических (квазистатических) испытаний исследуемого полимерного материала на кратковременное растяжение или сжатие, кроме определения перечисленных выше показателей, строят графики, выражающие:

1. Зависимость напряжение σ - деформация ϵ и зависимость секущий модуль $E_{\text{СЕК}} = \sigma / \epsilon$ - напряжение σ для различных скоростей нагружения v и температур T .

2. Зависимость начального модуля упругости E от температуры T для различных скоростей нагружения v .

3. Зависимость напряжение σ - деформация ϵ - температура T для различных скоростей нагружения v и зависимость напряжение σ - деформация ϵ - скорость нагружения v для различных температур T .

4. Зависимость логарифма скорости нагружения $\ln v$ от логарифма предела прочности $\ln \sigma_B$ для их связи в виде дробно-экспоненциальной функции.

5. Зависимость предела прочности σ_B от температуры T .

На рис.19 для примера приведен график зависимости σ - ϵ при растяжении конструкционного стекловолоконного материала АГ-4-С при разных температурах.

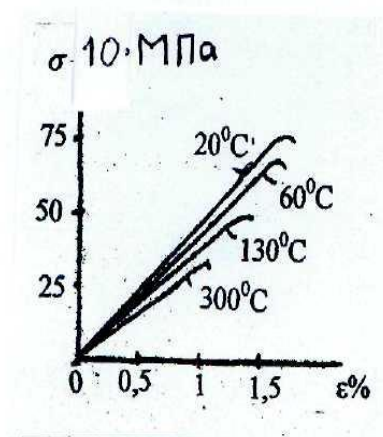


Рис. 19

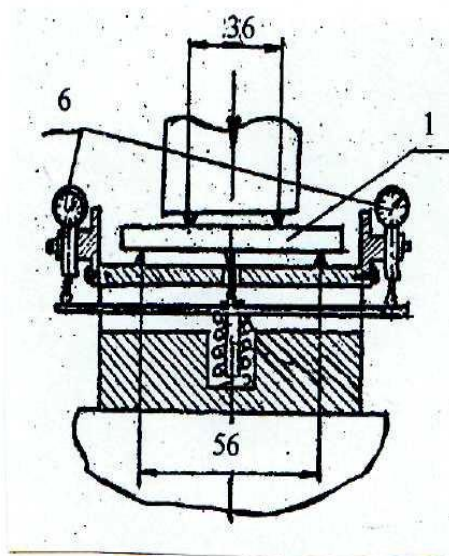


Рис. 20

Из графиков, построенных по результатам статических (квази-статических) испытаний на кратковременное растяжение или сжатие, находят:

1. Значения напряжений, до которых можно пользоваться величиной начального модуля упругости.
2. Уменьшение модуля упругости в % в зависимости от температуры.
3. Значения предельной деформация для различных материалов в зависимости от температуры и скорости нагружения.
4. Уменьшение предела прочности в % при увеличении температуры для различных скоростей нагружения.

2.7. Испытания пластмасс на изгиб

Испытания на статический изгиб проводятся на специальных установках, а также на универсальных разрывных машинах с использованием специальных приспособлений. Для испытаний на чистый изгиб на универсальных разрывных машинах используется приспособление, изображенное на рис. 20.

Для испытания пластмасс на статический изгиб по [22] используются призматические образцы (рис.21), имеющие следующие размеры: длина L - не менее 80 мм, ширина $b = 10 \pm 0,5$ мм, толщина $h = 4 \pm 0,2$ мм. При невозможности изготовить образец с этими размерами, допускается применять образцы, у которых ширину образца выбирают в зависимости от его толщины по таблице 5.

Таблица 5

Толщина образца h , мм	Ширина образца b , мм
От 1 до 3	25 ± 0.5
От 3 до 5	20 ± 0.5
От 5 до 10	15 ± 0.5

Для пластмасс, содержащих крупные частица наполнителя, ширина образца должна быть 25 мм.

Для проведения испытаний, образец устанавливают на опоры широкой стороной, причем образцы, подвергавшиеся механической обработке, кладут на опоры необработанной стороной. Нагружение образцов производится посередине, плавно, без толчков, с определенной скоростью, для стандартных образцов равной $2 \pm 0,5$ мм/мин. а для образцов других размеров равной $h/2$.

В процессе нагружения образца, прогиб и нагрузку замеряет непрерывно или в момент достижения определяемого показателя. Результаты, полученные на дефектных образцах, а также результаты на образцах, разрушившихся не на средней трети их длины, в расчет не принимаются.

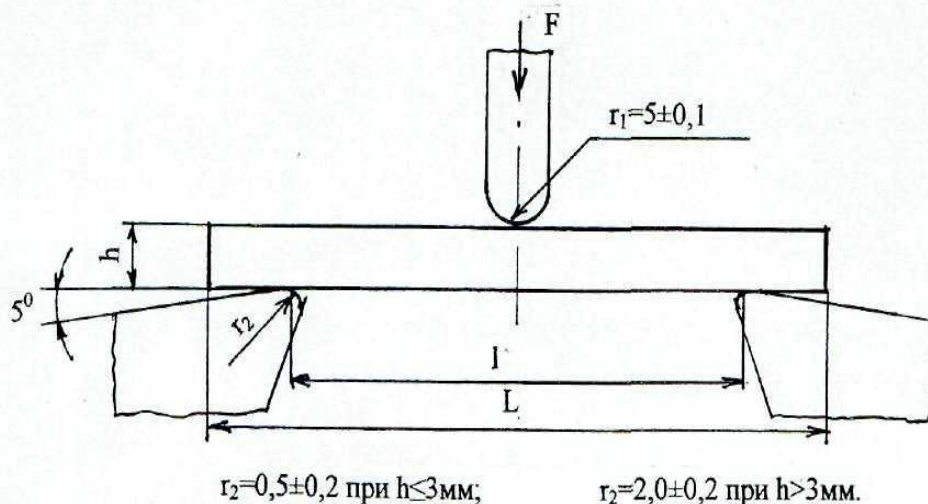


Рис. 21

При кратковременном статическом поперечном изгибе призматического образца (рис. 21) по [17, 22] определяют:

1. Разрушение напряжение при изгибе σ_p и прогиб Δp в момент разрушения для пластмасс, разрушающихся при испытании

$$\sigma_p = \frac{M_p}{W} . \quad (2.27)$$

2. Изгибающее напряжение $\sigma_{(1,5)}$ при прогибе, равном 1,5 толщины образца для пластмасс, не разрушавшихся при испытании

$$\sigma_{1,5} = \frac{M_{1,5}}{W} . \quad (2.28)$$

3. Максимальное напряжение σ_{\max} при изгибе для пластмасс, у которых нагрузка проходит через максимум при заданной величине прогиба или до достижения этой величины

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} , \quad (2.29)$$

$$M_p = \frac{F_p \ell}{4}; M_{1.5} = \frac{F_{1.5} \ell}{4}; M_{\max} = \frac{F_{\max} \ell}{4}; W = \frac{bh^2}{6} \quad (2.30)$$

где F_p , $F_{(1,5)}$ и F_{\max} - разрушающая нагрузка, нагрузка при прогибе образца $\Delta = 1,5h$ и максимальная нагрузка, все в (Н); ℓ - расстояние между опорами (м), $\ell = 16 h \pm 0,5$ м.

Максимальное напряжение определяют в момент первого максимума нагрузки. Прогиб определяют посередине образца.

4. Модуль упругости пластмассы по формуле

$$E = \frac{(F_2 - F_1)\ell^3}{4bh^3(u_2 - u_1)}, \quad (2.31)$$

где F_1 и F_2 - нагрузки в (Н) при величине прогибов $0,0025\ell$ и $0,0075\ell$; $u_1=0,0025\ell$, $u_2=0,0075\ell$, все линейные размеры в метрах.

Данная методика не распространяется на газонаполненные пластмассы и листовые материалы толщиной менее 1 мм.

Определение модуля упругости при статическом изгибе образца проводится следующим образом:

1. Производится трехкратное нагружение и разгружение образца (тренировка) до величины прогиба, равной $0,01 \ell$. При тренировке определяется нагрузка, соответствующая величине прогиба $0,0025 \ell$ и $0,01 \ell$.

2. Производится предварительное нагружение образца до достижения нагрузки, соответствующей прогибу $0,0025 \ell$, и устанавливается в нулевое положение прибор для измерения прогиба.

3. При проведении испытаний с использованием ручного привода производится ступенчатое нагружение образца. Количество ступеней при нагружении от предварительной нагрузки до нагрузки, соответствующей прогибу $0,01 \ell$, должно быть не менее 8. На каждой ступени нагрузки замеряется соответствующее значение прогиба.

4. При проведении испытания с автоматической записью нагрузки и деформации на диаграмму, производятся непрерывное нагружение образца при скорости сближения нагружающего наконечника и опор, равной $1 \pm 0,5$ мм/мин.

5. Результаты, полученные при ступенчатом нагружении, откладывают на графике, и через полученные точки проводят прямую. С этой прямой или с диаграммы автоматической записи считывают значения нагрузок, соответствующих величинам прогиба $0,0025 \ell$ и $0,0075 \ell$, и модуль упругости вычисляют по формуле (2.31).

2.8. Испытания пластмасс на срез, сдвиг и скалывание

При испытании пластмасс на срез по [23] определяется предел прочности пластмассы при срезе

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{2A}, \quad (2.33)$$

где $Q_{\text{ср}}$ – величина перерезывающей силы при срезе образца по двум плоскостям.

Для испытаний полимерных материалов на срез применяются образцы в виде бруска прямоугольного поперечного сечения со следующими размерами: длина – $\ell \geq 100,0$ мм; ширина – $b = 15,0 \pm 0,5$ мм; толщина – $h = 10,0 \pm 0,5$ мм.

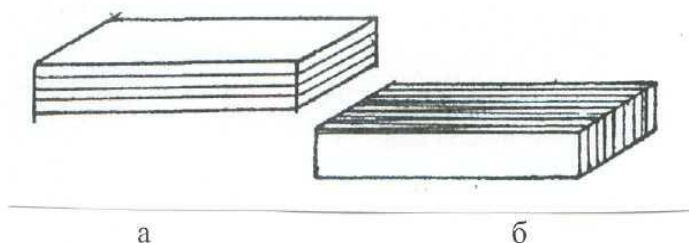


Рис. 22

Допускается, использование образцов с $h : b : \ell = 1,0 : 1,5 : \ell \geq 10$, при этом $h \geq 4,0$ мм. В том случае, если испытываются образцы из листового материала с $h < 4,0$ мм, допускается применение образцов, состоящих из нескольких слоев с толщиной отдельного слоя не менее 2,0 мм, при этом должно быть обеспечено плотное прилегание слоев. Образцы слоистых пластмасс должны быть вырезаны так, рис. 22, чтобы обеспечить испытание перпендикулярно или параллельно слоям.

Образцы устанавливают в специальное приспособление, изображенное на рис. 23. Длина ножа $L_{\text{н}}$, расстояние между опорами ℓ и скорость перемещения ножа $V_{\text{н}}$ зависят от толщины образца h следующим образом (табл.7).

Таблица 7

h мм	$L_{\text{н}}$ мм	ℓ мм	V мм/мин
4,0 - 6,0	$15,0 \pm 0,5$	$15,0 \pm 0,5$	2,0
6,0 - 10,0	$25,0 \pm 0,5$	$25,0 \pm 0,5$	4,0

В общем случае принимают $v_{\text{н}} = 0,5h$.

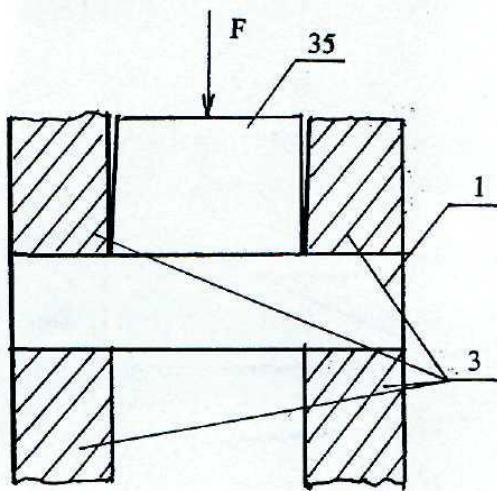


Рис.23

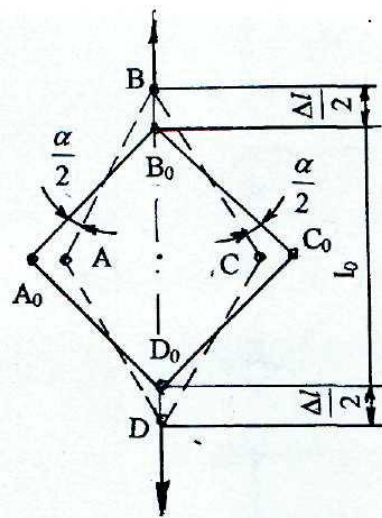


Рис.24

Испытание прочности слоистых листовых пластмасс при сдвиге в плоскости листа, [24] проводится по схеме (рис.24) на крестообразном образце изображенным на рис.25. При испытании определяется прочность листовых слоистых пластмасс при сдвиге в плоскости листа при температурах от -100°C до $+400^{\circ}\text{C}$. При испытании на сдвиг в плоскости листа путем перекашивания в шарнирной раме в режиме кратковременного деформирования с постоянной скоростью $V=1-5$ мм/мин измеряется нагрузка и линейная деформация диагонали образца. В процессе испытания рабочее поле образца (рис.24), первоначально имеющее форму квадрата $A_0 B_0 C_0 D_0$, перекашивается на угол сдвига α и приобретает форму ромба $ABCD$, при этом длина рабочего поля образца остается неизменной. Испытание проводят до разрушения. Для испытания используется шарнирная рамка, ее оси поворота совмещены с угловыми точками рабочего поля образца. Для надежного крепления образца к жестким звеньям рамы на образце имеются выступы с отверстиями.

Образцы из ортотропных пластмасс вырезают, как минимум, в двух направлениях, так, чтобы главные оси анизотропии были параллельны сторонам рабочего поля образца (испытание на "параллельный" сдвиг), и так, чтобы главные оси анизотропии составляли углы 45° и 135° со стороной рабочего поля образца (испытание на "диагональный" сдвиг). У пластмасс, обладающих неодинаковыми свойствами при растяжении и сжатии в направлении главных осей анизотропии, рекомендуется для испытаний на "диагональный" сдвиг отбирать удвоенное число образцов. Одну часть образцов испытывают в положении, когда растягивающие напряжения совпадают с одной главной осью, а вторую часть - когда растягивающие напряжения совпадают с другой главной осью.

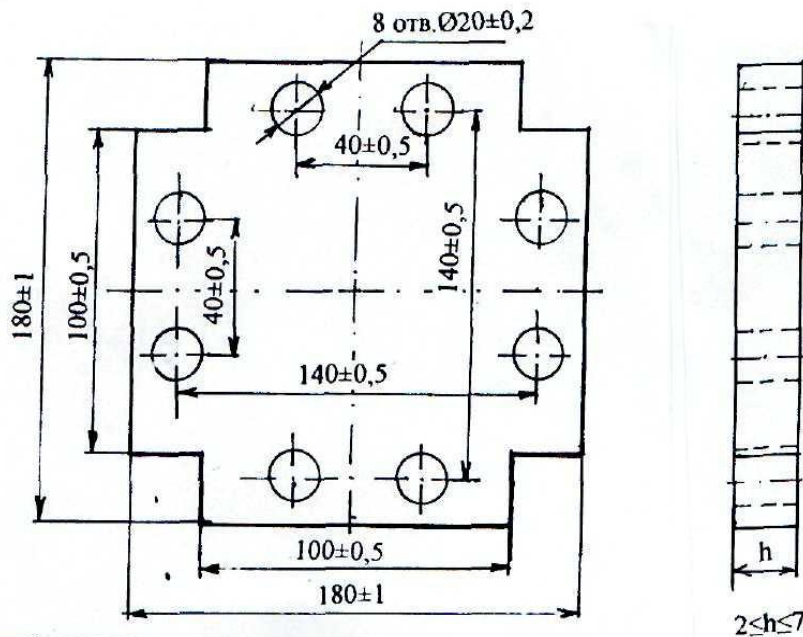


Рис.25

В процессе испытаний производится автоматическая запись диаграммы $F - \Delta l$, либо диаграмм $F - t$ и $\Delta l - t$ одновременно, здесь t - время. По данным диаграмм определяются касательные напряжения на площадках, параллельных сторонам рабочего поля образца и относительный сдвиг γ по формулам:

$$\tau = \frac{\sqrt{2} Q}{2 ah}, \quad (2.34)$$

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha = 0,5 \left(\frac{1 + \varepsilon_1}{1 + \varepsilon_2} - \frac{1 + \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_1} \right), \quad (2.35)$$

где a - длина стороны рабочего поля образца;

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad \varepsilon_2 = -1 + \sqrt{1 - 2\varepsilon_1 - \varepsilon_1^2}. \quad (2.36)$$

относительная деформация вдоль сжимаемой диагонали.

В случае малых деформаций

$$\gamma \approx 2\varepsilon_1 (1 + 0.5\varepsilon_1), \quad (2.37)$$

τ_{\max} и τ_{\min} определяются в момент разрушения. В том случае, если образец разрушился от сдвига в плоскости листа, а не потерял устойчивость плоской формы, что определяют визуально, τ_{\max} является пределом прочности при сдвиге в плоскости листа.

Для определения прочности слоистых полимерных материалов при межслойном скалывании используются образцы с двумя противоположными надрезами (рис.26).

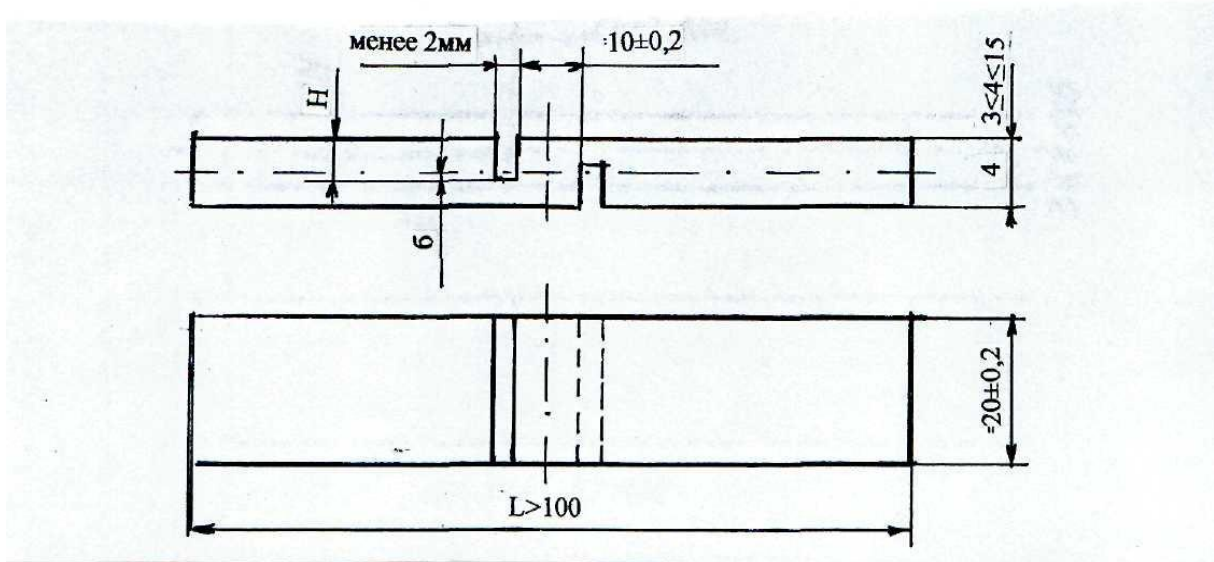


Рис. 26

Сущность метода заключается в кратковременном статическом нагружении (рис.27) образца (рис.26) и определении среднего по площади скалывания разрушающего касательного напряжения -

τ_p - предела прочности при межслойном скалывании

$$\tau_p = \frac{Q}{bl} \quad (2.34)$$

Скорость деформации $v = 10$ или 20 мм/мин.

При испытании тонколистовых пластмасс $1,5 \leq h \leq 3$, образец получается склеиванием трех заготовок по толщине. Глубину пропила (мм) определяют по формуле

$H = 0,5h + \delta$, где $\delta = \frac{h}{n}$ - толщина одного слоя материала; n - число слоев. В том случае, если δ нельзя установить, то $H = 0,5h + 0,5$.

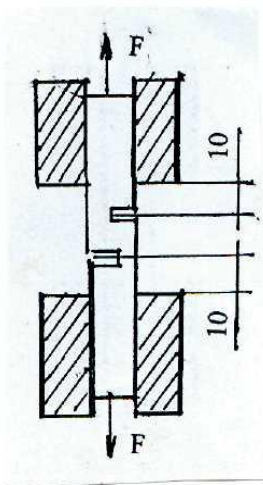


Рис.27

2.9. Испытания на раздир и раскалывание

Испытания на раздир и раскалывание относятся к технологическим пробам – таким видам испытаний, результаты которых не позволяют определить механические характеристики материалов, а служат для сравнения поведения разных материалов при заданных вида нагружений.

Испытание на раздир проводится для пластмасс, полимерных пленок и резины [25,27].

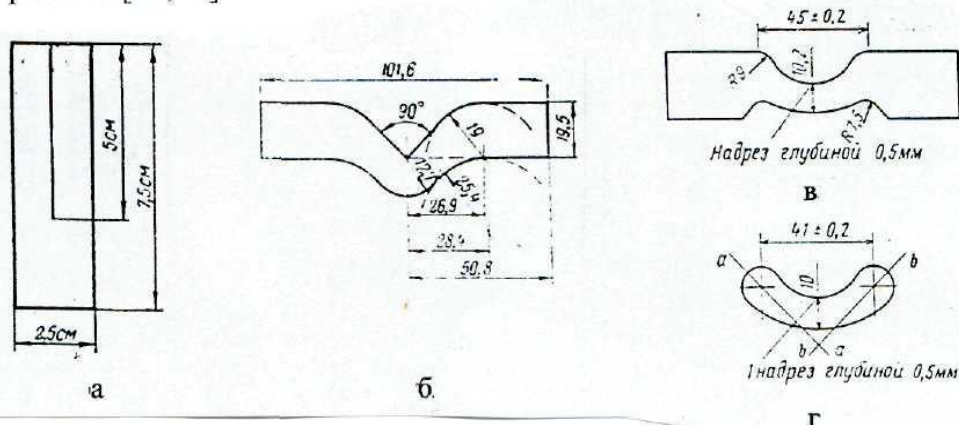


Рис. 28

Образец растягивается на разрывной машине до разрушения и определяется величина сопротивления раздиру по формуле

$$B = F / h, \quad (2.35)$$

где F – усилие при раздире, h – толщина образца.

Этот показатель имеет смысл работы разрушения, отнесенной к единице площади вновь образовавшейся поверхности при раздире. На рис.28 изображены образцы для испытаний на раздир : а,б - образцы из пластмассы; в,г - образцы из резины.

Испытание на раскалывание позволяет сравнивать различные слоистые пластмассы между собой. Сопротивление раскалыванию - некоторая условная характеристика материала. Испытанию подвергаются слоистые пластмассы толщиной не более 10 мм.

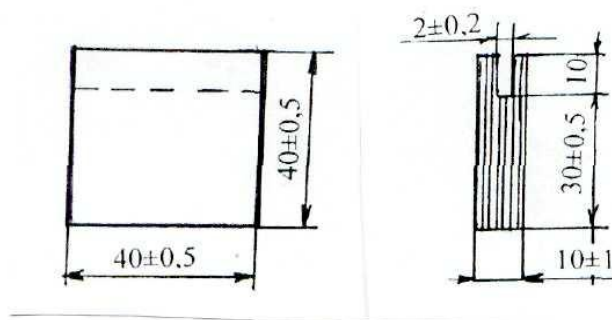


Рис.29

Для испытания полимерных материалов на раскалывание по [28] применяются образцы в виде прямоугольного параллелепипеда с надрезом и без надреза (рис.29, 30). Скорость движения клина (рис. 31) должна обеспечить раскалывание образцов за определенное время (20-70 сек). При испытании измеряют наибольшую нагрузку F_p , при которой происходит разрушение (раскалывание) образцов и определяют сопротивление раскалыванию S_p по формуле

$$S_p = \frac{F_p}{b}, \quad (2.36)$$

где b - ширина средней части образца в м.

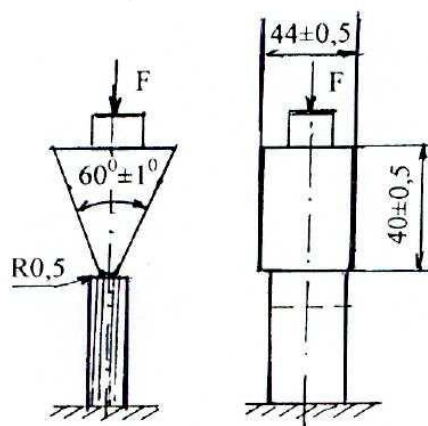
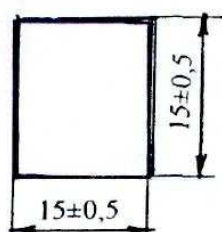


Рис.30

Рис. 31

2.10. Испытания пластмасс на ползучесть, релаксацию и длительную прочность

При долговременном статическом растяжении или сжатии образца из пластмассы определяют ползучесть, релаксацию и длительную прочность материала. При исследовании ползучести и релаксации материала применяются динамометры, выполненные в виде упругого элемента.

Ползучестью называется деформирование материала во времени при действии постоянного напряжения. Релаксацией напряжений называется процесс спада напряжений во времени в материале после мгновенной деформации последнего до некоторой наперед заданной и поддерживаемой затем постоянной величины.

В отличие от испытания металлов на ползучесть, которых проводятся не при $\sigma = \text{const}$, а при $F = \text{const}$, в полимерных материалах необходимо учитывать изменение поперечного сечения образца в процессе испытания, и соответствующим образом менять нагрузку.

При испытании на ползучесть (релаксацию) при растяжении – сжатии при постоянной нагрузке, измеряются деформации (напряжения) образцов во времени и время между моментом приложения полной нагрузки (деформации) и установлением в образце заданной величины деформации (напряжения). При этом определяют следующие показатели [29-30]:

1. Деформацию ε_t - отношение приращения длины базы образца в данный момент времени - Δl_t к начальной длине базы образца - l_0 в процентах

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta l_t}{l_0} 100\% . \quad (2.37)$$

2. Напряжение σ_t в данный момент времени - t .

3. Среднюю скорость ползучести - K_t (релаксации - K'_t) - изменение деформации (напряжения) в единицу времени

$$K_t = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t_2 - t_1} , \quad k'_t = \frac{\sigma_2 - \delta_1}{t_2 - t_1} , \quad (2.38)$$

где ε_1 в % и σ_1 - деформация и напряжение в момент времени t_1 ;

ε_2 в % и σ_2 - деформация в напряжении в момент времени t_2 .

4. Показатель ползучести β_t (релаксации - β'_t) - изменение деформации (напряжения) в течение заданного промежутка времени (t_2-t_1), выраженное в % к деформации (напряжению) в момент времени t_1 .

$$\beta_t = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} , \quad \beta'_t = \frac{\sigma_2 - \delta_1}{\delta_1} . \quad (2.39)$$

5. Модуль ползучести - E_t - отношение напряжения к деформации в заданный момент испытания и модуль релаксация — Π'_t — отношение деформация к напряжению в заданный момент испытания

$$E_t = \frac{\sigma_t 100}{\varepsilon_t} , \quad \Pi'_t = \frac{\varepsilon_t}{\sigma_t 100} . \quad (2.40)$$

6. Время ползучести (релаксации) - время между моментом приложения к образцу полной нагрузки (деформации) и моментом достижения заданной величины деформации (напряжения). За результат испытания принимается среднее логарифмическое всех определений.

7. Податливость - величину, обратную модулю ползучести при испытании на ползучесть)

$$\Pi_t = \frac{1}{\varepsilon_t} . \quad (2.41)$$

Для испытаний на ползучесть образцов из жестких пластмасс в условиях одноосного напряженного состояния применяется стенд, схема которого приведена на рис. 32а. В качестве нагружающих элементов использованы тарированные стальные пружины 7, жесткость которых подбирается таким образом, чтобы при наибольшей ожидаемой деформации образца напряжение изменялось в нем не более, чем на 1,5%. Для записи быстро меняющихся деформаций используется гибкий элемент с наклеенными на него тензодатчиками в самопишущий мост. Возможно также применение стендов, (см. рис. 32б), в которых нагружение производится не пружинами, а грузами и рычажной передачей. Усилие нагрузки на образец осуществляется регулировкой плеч рычажной системы.

Для серийных испытаний на ползучесть и релаксацию при растяжении используется компактный стенд, изображенный на рис. 33. На этом стенде можно одновременно испытывать на ползучесть при разных напряжениях несколько партий образцов. Для испытаний на релаксацию начальная деформация осуществляется при помощи нагруженная с заранее установленной величиной перемещения рычажного устройства (установка рычага начального фиксирования 8).

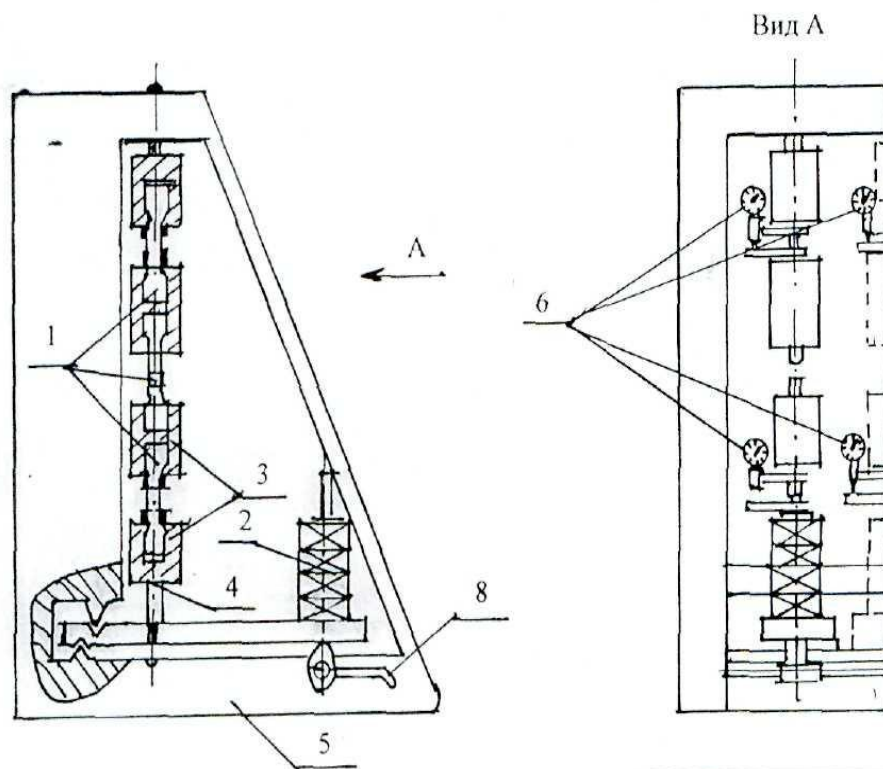


Рис. 33

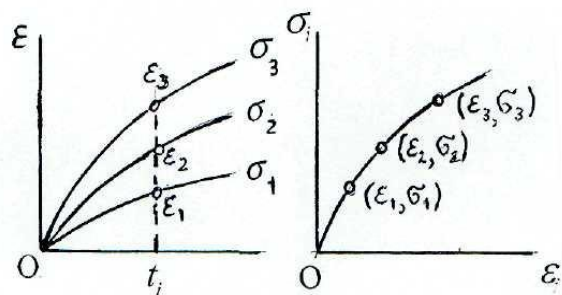
Погрешность измерения деформации при ползучести должна быть не более - 0,01 мм; погрешность измерения напряжения - не более $\pm 1\%$ измеряемой величины. Для измерения деформаций при ползучести не рекомендуется пользоваться тензорезисторами, наклеенными на образец.

При проведении испытаний до приложения испытательной нагрузки (деформации) для выбора люфтов прикладывают предварительную нагрузку (деформацию), равную 10% испытательной. Испытательную нагрузку вычисляют исходя из выбранного испытательного напряжения, которое обычно выбирают из следующего ряда величин: 1, 3, 5, 10 МПа и далее через каждые 5 МПа. Испытательная деформация выбирается равной 10%, 20% и далее кратной 10% от деформации при разрыве. Приложение нагрузки к образцу или его деформирование осуществляют плавно за время не более 10 сек. В процессе испытания либо производится автоматическая запись деформации (напряжения) во времени, либо замеры производятся через 1, 3, 10, 30, 100 часов с погрешностью промежутков времени + 3% с таким расчетом, чтобы логарифм времени изменялся примерно на 0,5. При определении деформации (напряжения), средней скорости ползучести (релаксации), показателя и модуля ползучести (релаксации) и податливости, продолжительность испытаний принимается равной 100 час (если нет специальных указаний).

Кроме определения вышеперечисленных характеристик материала, при ползучести и релаксации по результатам испытаний дополнительно получают :

1. Строятся кривые ползучести (релаксации), связывающие деформацию (напряжение) со временем испытания или его логарифмом.

2. Строятся изохронные кривые напряжение - деформация, для чего при заданном значении времени t_i определяют из кривых ползучести (релаксации) ряд значений де-



формаций ε_i (напряжений σ_i), отвечающих заданным напряжениям $\sigma_{i_зад}$ (деформациям $\varepsilon_{i_зад}$) и строят кривую по точкам с координатами ($\sigma_{i_зад}$ ε_i или σ_i $\varepsilon_{i_зад}$), (рис.34).

Рис.34

3. Определяется условная долговременная прочность (деформативность) из изохронных кривых σ_i - ε_i , построенных при заданном времени t_i .

4. Определяется долговременная прочность из кривой "логарифм долговечности ($\lg \tau$) - приложенное напряжение σ , как напряжение σ_τ при заданном $\tau_i (\lg \tau_i)$.

5. Находится нижний предел долговременной прочности $-\sigma_{\min_д.л.}$ - напряжение, ниже которого скорость деформации ползучести стремится к нулю, а при действии напряжения, большего $-\sigma_{\min_д.л.}$ скорость деформации стабилизируется и образец разрушается.

6. Определяется долговременная прочность материала при различных температурах, в условиях одностороннего нагрева.

7. Для резин определяется релаксация напряжений при осевом сжатии.

Ползучесть и релаксацию материалов при изгибе определяют при долговременном действии изгибающей нагрузки, приложенной к образцу, или некоторого начального прогиба образца.

Исследование ползучести и релаксации при изгибе проводится на стенде, изображенном на рис. 35. Этот стенд предназначен для исследования ползучести материала при консольном изгибе. Аналогичные устройства используются для исследования ползучести при изгибе балки, лежащей на двух опорах. Возможно одновременное испытание большого количества образцов.

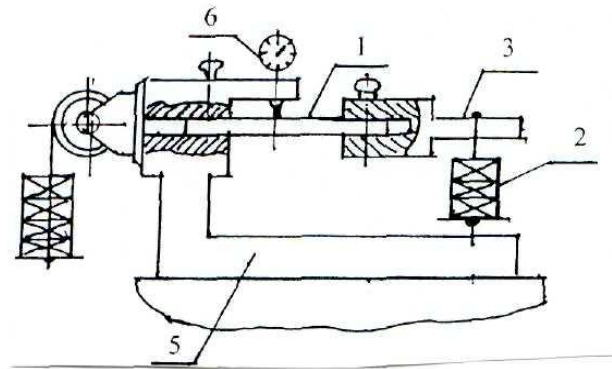


Рис. 35

Для исследования релаксации напряжений при изгибе на подобных стендах, нагрузка выбирается с таким расчетом, чтобы начальная деформация производилась мгновенно и на полную величину. Изменение тягового усилия в этом случае регистрируется динамометрами в виде упругих элементов.

2.11. Сложное сопротивление полимерных материалов

В большинстве случаев в условиях эксплуатации материал находится под одновременным действием ряда простых видов деформаций - растяжения - сжатия, сдвига, кручения и изгиба. Прочность материала в этом случае оценивается критериями предельных состояний (теориями

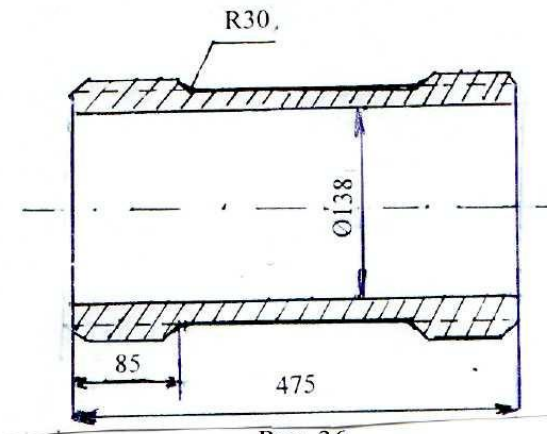


Рис. 36

прочности), в основу каждого из которых принимается гипотеза о том, какое из напряжений или какая их комбинация определяет переход к предельному состоянию, характеризующемуся качественным изменением свойств материала - переходом от одного механического состояния к другому. В настоящее время достаточно много критериев предельного состояния,

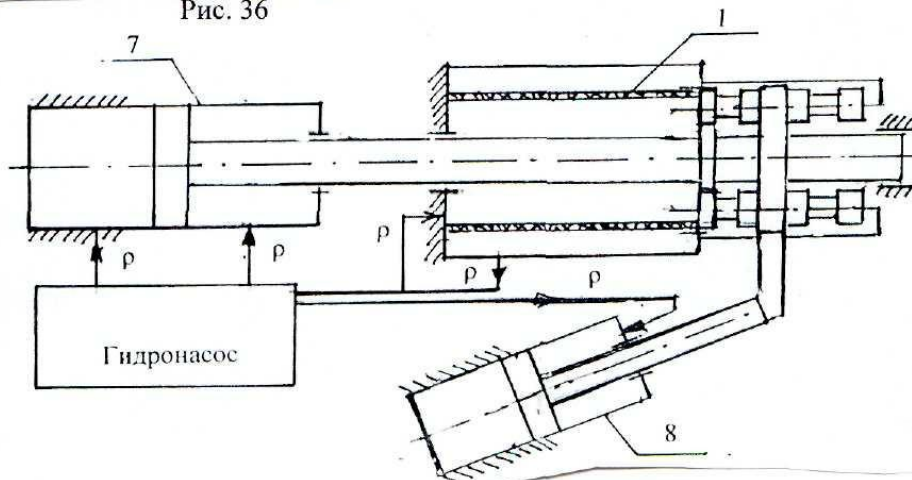


Рис. 37

Выбранный критерий предельного состояния проверяется экспериментально. В том случае, если ни один из известных критериев предельного состояния не подтверждается экспериментами, необходимо разработать новый критерий предельного состояния для данного материала. Одним из экспериментов по проверке критериев предельного состояния в условиях плоского напряженного состояния является испытание до разрушения трубчатых образцов (рис. 36) при различных комбинациях внутреннего и внешнего давлений, растягивающих или сжимающих осевых усилий и скручивающего момента на установке, изображенной на рис.37. Первый гидроцилиндр 7 создает осевую сжимающую или растягивающую трубчатый образец силу, второй гидроцилиндр 8 создает скручивающий момент. По главным напряжениям, зависящим от давления P и осевого усилия N , создаваемого первым гидроцилиндром, проводится проверка или выбор критериев предельного состояния для данного материала.

3. ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТМАСС И РЕЗИН НА УСТАЛОСТЬ

3.1. Испытания на усталость

Усталостные испытания полимерных материалов [31-34] проводятся при действии на материал большого числа циклов нагружения. Особенность материала выдерживать заданное большое (или неограниченное) число циклов периодически меняющейся нагрузки характеризует его выносливость. Природа усталостного разрушения связана с наличием в реальном материале участков с неоднородным напряженным состоянием. В процессе периодически меняющихся нагружений в результате местных упрочнений образуются и распространяются трещины. Медленное развитие усталостной трещины в первом периоде разрушения, (занимающем до 90% времени по долговечности), заканчивается ускоренным разрушением во втором периоде.

Усталость материалов наблюдается при частоте нагружения выше 5 Герц и небольших напряжениях. Однако, разрушение может произойти и под действием больших напряжений, меняющихся с меньшей частотой. Это явление называется малоцикловой усталостью. Испытания на усталость проводят при различных видах деформаций, как по симметричным, так и по асимметричным циклам нагружения.

При усталостных испытаниях наблюдается с одной стороны упрочнение материала (особенно при высоких частотах нагружения), а с другой стороны - его нагревание вследствие больших гистерезисных потерь и низкой теплопроводности материала. Для нейтрализации саморазогревания применяют обдув образца холодным воздухом.

Усталостные свойства образца характеризуются кривыми Веллера - зависимостью $\sigma - \lg N$ при постоянной амплитуде напряжения для каждого образца и зависимостью $\varepsilon - \lg N$ при постоянной амплитуде деформации для каждого образца. Здесь N - число циклов до разрушения. В том случае, когда N чрезвычайно велико, определяют условный предел усталости - наибольшее напряжение, которое может выдержать данный материал в течение заданного базового числа циклов (обычно принимают $N_0=10^6$). Кривые Веллера строятся при различных частотах нагружения, температурах испытаний, размерах образца, концентрациях напряжений, средних напряжениях цикла.

При испытаниях на усталость образец не всегда доводится до разрушения, хотя весьма интересно в ряде случаев знать характер усталостного разрушения. Для изотропных ненаполненных пластмасс характерен излом, качественно совпадающий с изломом металлов при

разрушении и состоящий из двух зон: зоны усталостного разрушения с зеркальной поверхностью и зоны хрупкого разрушения ослабленного сечения с шероховатой поверхностью.

Для армированных пластиков характерно разрушение сразу по нескольким плоскостям, расположенным под определенным углом к оси образца. Характер разрушения зависит от отношения длины образца к его поперечным размерам: короткие образцы разрушаются путем сдвига, длинные - от действия нормальных напряжений.

Начало разрушения образца при усталостных испытаниях можно фиксировать с помощью нанесенного на поверхность образца, токопроводящего слоя. При появлении трещин в образце разрывается цепь, в которую включен участок этого слоя и подается сигнал на прекращение испытаний.

Следует отметить, что при исследовании образцов на усталость большое внимание требуется уделять постоянству температуры испытаний и отсутствию концентраторов напряжений в образцах (если не исследуется влияние этих факторов на усталость).

3.2. Испытания на усталость при растяжении–сжатии

Для усталостных испытаний пластмасс на растяжение - сжатие применяются как стенды и оборудование для статических испытаний, в которых к статической составляющей нагрузки (деформации) добавляется динамическая составляющая нагрузки (деформации), создаваемая вибратором, так и специальные машины для испытаний полимерных материалов на усталость типов ИРК, МВК -I2Т, МУИ - 6000, УКИ-10М, ИПР-5000, МК-2.

Для испытаний полимерных материалов на усталость при продольных деформациях, применяют образцы в форме "двойной лопатки" с уменьшенной базой (рис. 38). Это необходимо для того, чтобы отсутствовала деформация продольного изгиба. На рис.38 даны размеры образца для случая, когда максимальное сжимающее напряжение при усталостных испытаниях не превышает $0,5 \sigma_{В(СЖ)}$. На рис.39 приведена конструкция зажимов для образцов, испытываемых на усталость.

Испытания на усталость при растяжении - сжатии проводятся на установках, изображенных на рис.40 и рис.41. Число циклов нагружения N образца при испытаниях на установке, изображенной на рис.40, подсчитывается по частоте колебаний платформы вибростола f (колебаний в секунду) и времени работы установки до разрушения образца (T секунд).

$$N = f T . \quad (3.1)$$

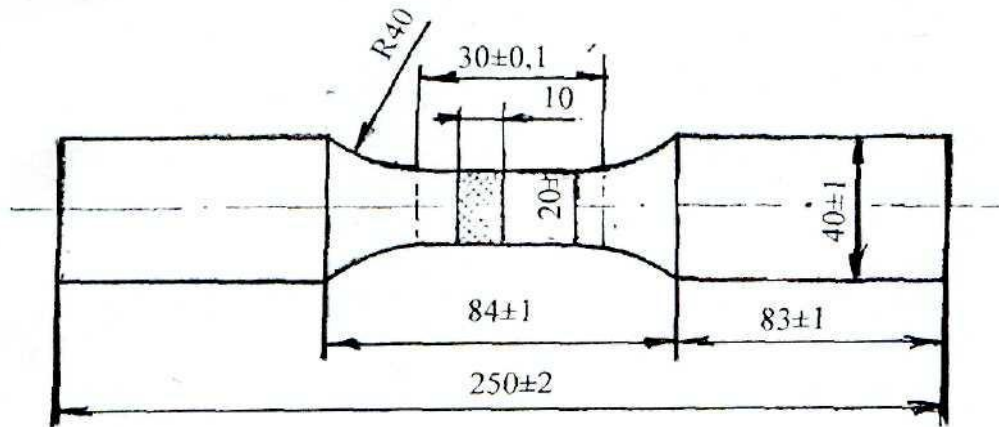


Рис. 38

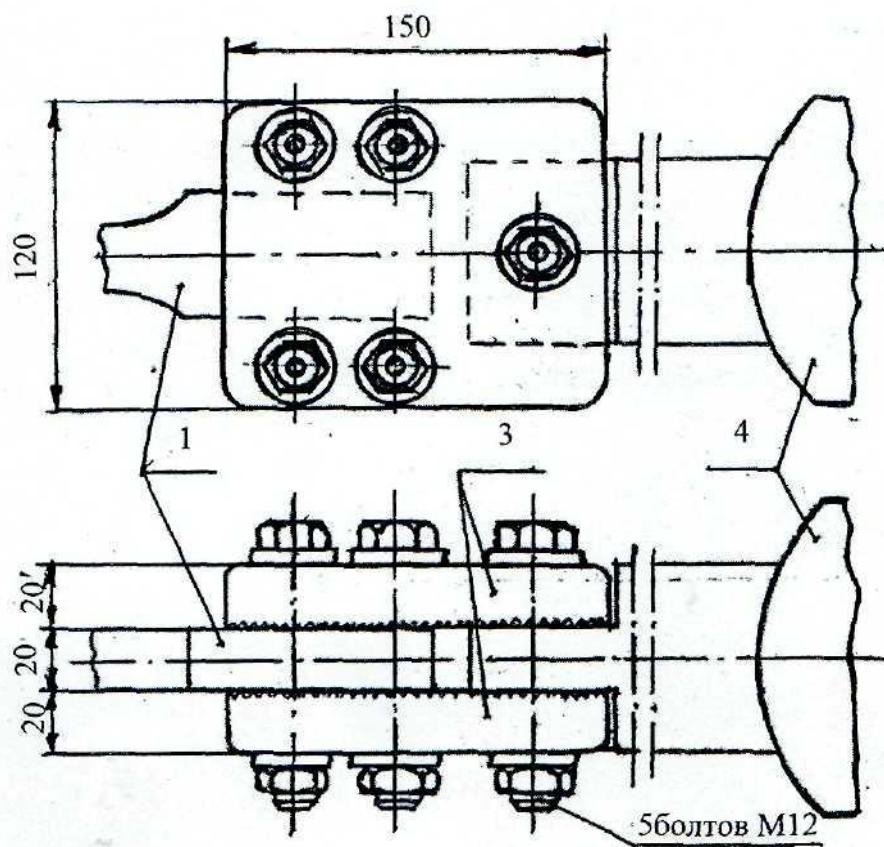


Рис. 39

Амплитуда колебаний нагрузки определяется по известным частоте и амплитуде вынужденных колебаний платформы и величине инерционной массы 7 :

$$A = \frac{A_0}{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}, \quad (3.2)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{EFg}{Ql}}$ - собственная частота колебаний системы с одной степенью свободы; $\omega = 2\pi f$ - круговая частота колебаний вибростола; g - ускорение силы тяжести см/сек²; Q - вес инерционной массы; A_0 - амплитуда колебаний платформы вибростола.

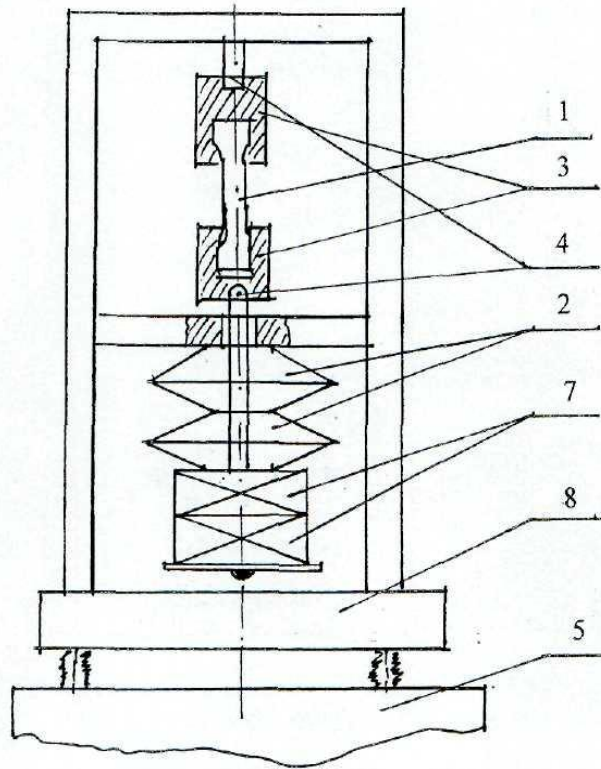


Рис. 40

Установка, изображенная на рис.41, позволяет исследовать усталостные свойства пластмасс при различных температурах с помощью термокриокамеры. Статическая составляющая нагрузки от 7 кН до 10 кН создается рычажной системой, динамическая составляющая нагрузки с амплитудой до 6 кН создается механическим вибратором, состоящим из двух сцепленных шестерен 7 с эксцентрично навешенными грузами 8. Частота нагружения 25 - 100 Гц. Число циклов от начала испытаний до момента разрушения образца отсчитывается счетчиком импульсов 9.

По результатам усталостных испытаний строятся кривая Веллера. Так, например, кривая Веллера для ортогонально армированного материала АГ-4-С при пульсирующем растяжении с частотой 200 циклов в минуту приведена на рис.42.

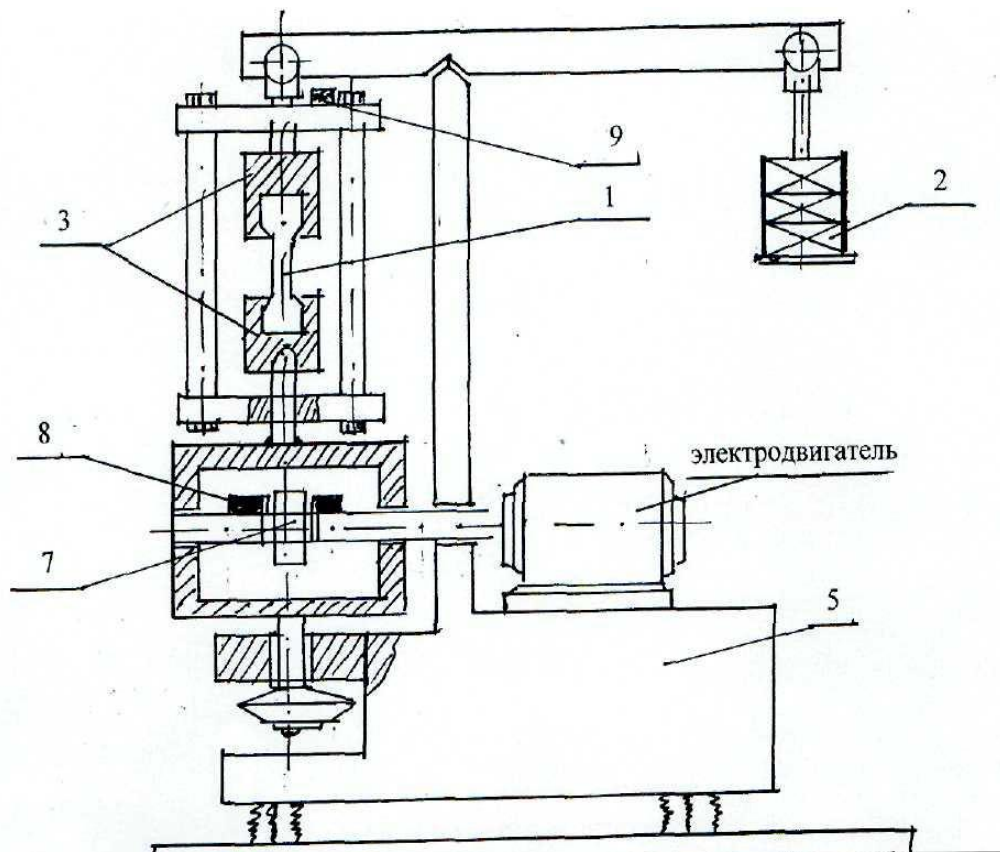


Рис.41

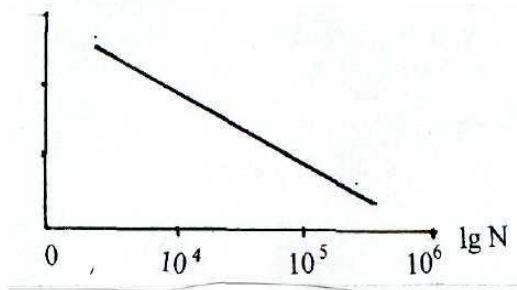


Рис.42

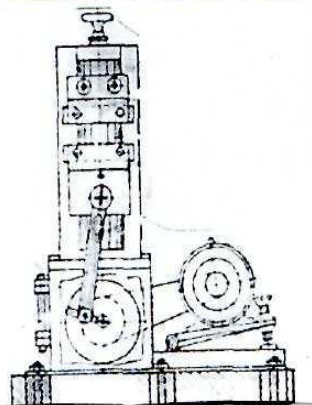


Рис.43

Для усталостных испытаний резин на растяжение используют специальные машины, одна из которых – МРС – 2 изображена на рис. 43. Образцы для испытаний такие же, как и при испытании резин на растяжение (см. п.2.4). В основном применяются образцы типа I с длиной рабочего участка 25 мм. Если образцы типа I не обеспечивают разрушение на рабочем участке, то применяют образцы типа II. Для резин с относительным удлинением менее 300% применяют образцы типов V и VI. Образцы должны испытываться не ранее, чем через 16 часов и не позже 28 суток после вулканизации.

Испытания проводят или при статической деформации, равной нулю (метод I), или при некоторой заданной статической деформации растяжения (метод II). При испытаниях на машине МРС – 2 частота деформации постоянна и равна 250 или 500 циклов в минуту. С помощью приспособления в зажимы машины устанавливаются от 8 до 16 образцов. Затем включают электродвигатель и многократно растягивают образцы и для каждого образца фиксируют продолжительность испытаний до появления первой трещины или до полного разрушения.

По результатам испытаний определяют динамическую выносливость резины N , равную числу циклов деформации до разрушения.

$$N = v t, \quad (3.3)$$

где v – частота деформации, а t – продолжительность испытания образца.

Аналогично проводятся испытания для определения коэффициента усталостной выносливости резин при многократном растяжении. Испытания проводят при динамических деформациях $\varepsilon_0 = 200, 175, 150, 125, 100, 75$ и 50% , начиная максимальной деформации, которую выбирают из условия: $25 + \varepsilon_p/4 > \varepsilon_0 > \varepsilon_p/4$. Испытывают при 3 – 4 значениях деформаций, при этом значение N должно находиться в пределах $10^3 - 10^6$ циклов. Усталостную выносливость резины определяют как и выше, по формуле (3.3). Заранее, с помощью прибора ЭДМ – 1, находят зависимость удельной энергии цикла W от деформации

$$\varepsilon = \frac{l_H - l_B}{l_D} 100, \quad (3.4)$$

где l_H и l_B – расстояния между метками на образце до и после разрушения. По результатам испытаний строят график зависимости $\lg N - \lg W$.

Коэффициент усталостной выносливости n_W находят по формуле

$$n_W = \lg N / \lg \frac{W_H}{W}. \quad (3.5)$$

Значение W_p определяют экстраполяцией прямой $\lg N - \lg W$ к $\lg N = 0$.

3.3. Испытания на усталость при изгибе

При проведении испытаний пластмасс на усталость при изгибе применяется образец в форме "двойной лопатки" (рис.44). Для сильно анизотропных материалов допускается использование призматического образца, изображенного на рис.45. Испытание пластмасс на усталость при чистом изгибе в диапазоне температур от -120°C до $+600^\circ\text{C}$, произво-

дится на установке, изображенной на рис. 46. Испытывается образец (рис.44 или рис.45) на многократный чистый изгиб в одной плоскости в режиме заданной деформации с целью определения предела выносливости при данной температуре испытаний. Деформация меняется во времени по закону, близкому к синусоидальному с частотой циклов $f = 25 \pm 2.5$ Гц и ниже и с коэффициентом асимметрии цикла $r = -1$. Коэффициентом асимметрии цикла называется величина

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3.6)$$

где σ_{\max} и σ_{\min} - максимальное и минимальное значения напряжений цикла.

Расстояние ℓ_0 между кромками зажимов в установке (рис.46) выбирается в зависимости от толщины образца h из табл.7.

Таблица 7

h мм	3	4	5	6	7	8	9	10
ℓ_0 мм	38	46	52	56	60	64	68	72

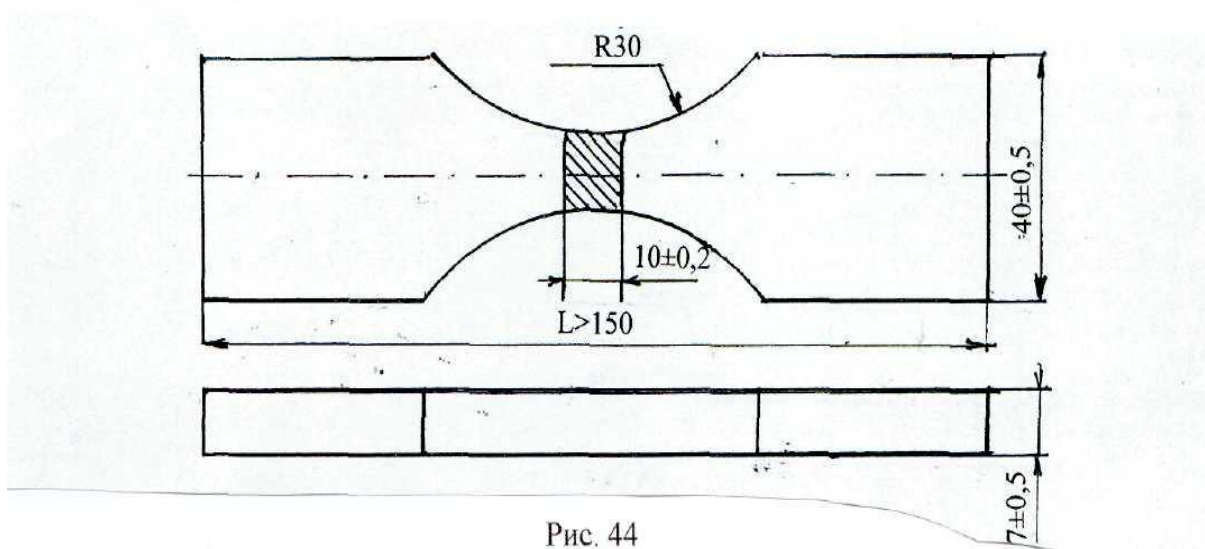


Рис. 44

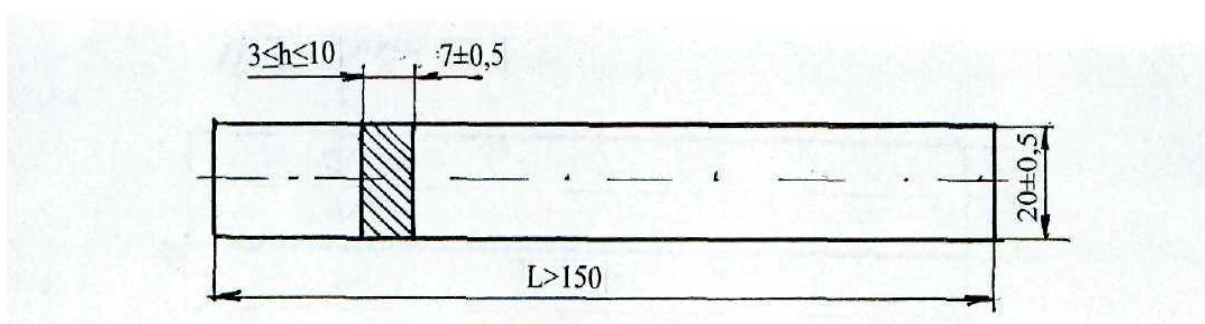


Рис. 45

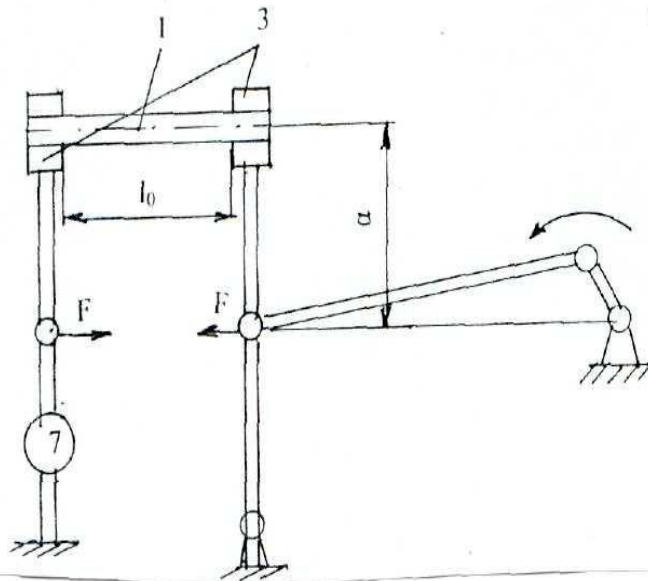


Рис. 46

Испытания проводят, начиная с высоких ступеней нагружения, постепенно переходя к более низким. Разность между σ_{\max} для двух последних ступеней нагружения должна быть не более 10% от предела выносливости. Начальную нагрузку F_{\max} , соответствующую σ_{\max} для установки, изображенной на рис.47, вычисляют по формуле

$$F_{\max} = \frac{\sigma_{\max} b h^2}{6a + 3h} \quad (3.7)$$

Через 20 мин. после начала испытаний фиксируют нагрузку и температуру. Если температура образца в течение 20 мин. не стабилизируется, то разрушение образца фиксируется как тепловое. Испытание прекращают в случае разрушения (излома или частичного повреждения) или при снижении напряжения на 15%.

Испытания пластмасс на усталость при консольном и чистом изгибах могут проводиться на установках, изображенных на рис.47 и 48.

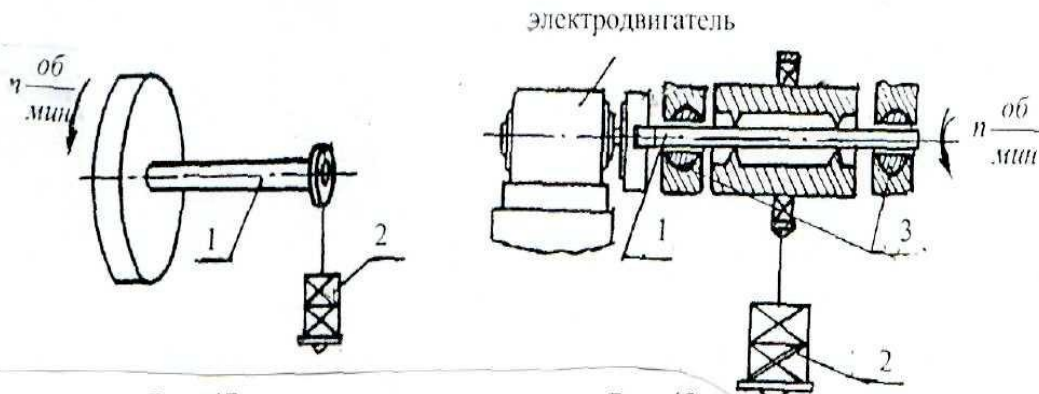


Рис. 47

Рис. 48

Для резин проводят испытания на усталость при знакопеременном изгибе с вращением. Вулканизированный образец (рис.49) закрепляется (рис.50) одним концом во вращающемся от двигателя цанговом зажиме 3, а другим в свободно вращающемся цанговом зажиме 7. Изменяя положение зажима 7 в полукруглых пазах 8, можно установить заданную начальную деформацию наружного слоя изогнутого образца

$$\varepsilon_0 = \frac{R_1 - R_0}{R_0} 100, \quad (3.8)$$

где R_0 и R_1 — радиусы нейтральной оси и наружного слоя образца. Деформация в пределах от 10 до 30% подбирается такой, чтобы число циклов до разрушения было не менее $160 \cdot 10^3$ и не более 10^6 . Обычно испытывают несколько образцов при разных температурах, для чего их помещают в термокамеру. По результатам испытаний определяют, [34], динамическую выносливость по (3.3).

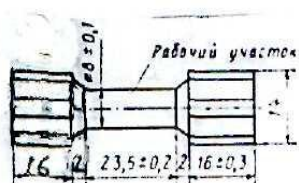


Рис. 49

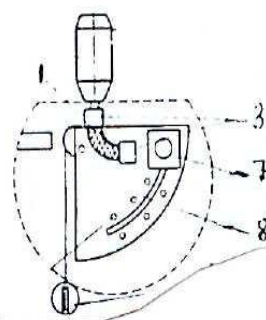


Рис.50

4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТМАСС

4.1. Испытания на удар

Динамические методы испытаний полимерных материалов проводится в связи с тем, что условия эксплуатации полимеров приводят к необходимости изучения сопротивления этих материалов динамическим нагрузкам. Известно, что большинство материалов в условиях динамического воздействия ведет себя совершенно иначе, чем при статическом нагружении. Поэтому, для более полного выяснения прочностных и деформационных резервов материала, необходимо применять динамические методы исследования. Эти методы позволяют также изучать характеристики материала, недоступные статическим методам исследования, например, обнаруживать структурные изменения материалов.

Для того, чтобы выявить способность материала сопротивляться нагрузкам, приложенным с большой скоростью, производят ударные испытания в режимах однократного и многократного ударов. Высокая скорость деформации при ударе способствует хрупкому разрушению материала. Кроме того, известно, что концентраторы напряжений (отверстия, вырезы, выточки) в образцах, подвергающихся удару, создают в ряде случаев напряженное состояние, близкое к всестороннему растяжению, что способствует хрупкому разрушению. Поэтому наиболее опасными по отношению к хрупкому разрушению условиями работы деталей конструкций являются ударные нагрузки при наличии концентратора напряжений. Некоторой условной постоянной, характеризующей сопротивление материала хрупкому разрушению является ударная вязкость материала - отношение величины работы затраченной на разрушение образца к наименьшей площади поперечного сечения образца. Ударная вязкость не имеет ничего общего с физической вязкостью и относится к числу сравнительных характеристик материала.

Исследование ударного растяжения - сжатия проводят на ротационных копрах, на маятниковых копрах, имеющих специальное приспособление, на пневматических копрах и на копрах с падающей бабой. При испытании определяется величина U_R (Дж/м²) - удельная работа предельной продольной деформации образца, соответствующая началу разрушения

$$U_R = \frac{\left(1 + \frac{A_2}{A_1}\right) \left(1 + \frac{E_d}{J} \frac{h}{\ell}\right)}{bh\ell} A_p, \quad (4.1)$$

где A_p - общая работа, затрачиваемая на разрушение образца; E_d - динамический модуль упругости; J - величина, характеризующая контактные деформация и представляющая собой усилие, которое нужно приложить в

месте контакта для получения единичной деформации; A_1 - энергия, соответствующая началу разрушения; A_2 - энергия местного разрушения; b , h , l - размеры образца.

При ударном растяжении рекомендуется пользоваться призматическими образцами $250 \times 15 \times h$ мм.

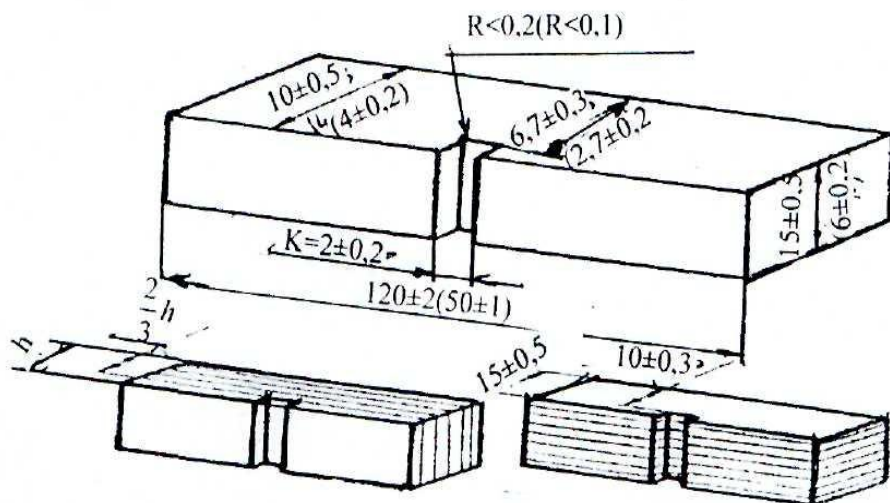


Рис. 51

Для испытаний на двухопорный ударный изгиб применяют образцы в форме брусков прямоугольного сечения без надреза и с надрезом со следующими размерами: образец 1 - $120 \pm 2 \times 15 \pm 0,5 \times 10 \pm 0,5$; образец 2 - $50 \pm 1 \times 6 \pm 0,2 \times 4 \pm 0,2$. Размеры приведены в мм. Чертеж образца и схема его установки приведены на рис.51 и рис.52.

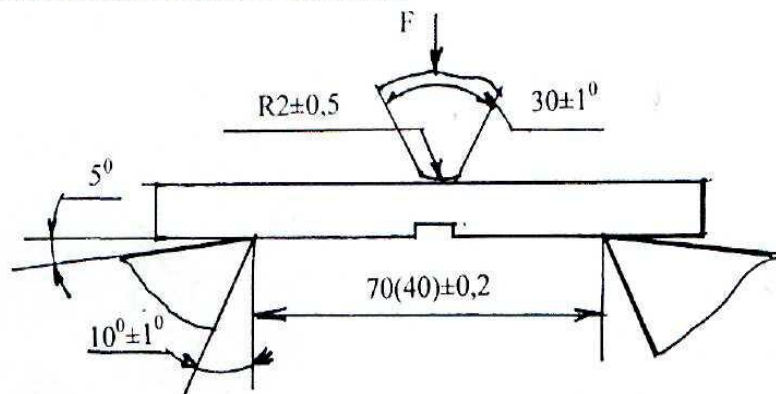


Рис.52

При изготовлении образцов из листовых материалов толщина образца должна быть равна толщине листа, и находиться в пределах от 5 до 10 мм для образца 1 и от 1 до 5 мм для образца 2. Глубина надреза должна быть такой, чтобы оставшаяся площадь поперечного сечения образца составляла $2/3$ площади образца без надреза. Образцы из листовых и слоистых материалов надрезают при минимальной толщине $h = 4 \pm 0,2$ мм.

При испытании образца на двухопорный ударный изгиб определяют:

1. Ударную вязкость образцов без надреза и с надрезом

$$a = \frac{\Delta A}{A}; \quad a_n = \frac{\Delta A_n}{A}. \quad (4.2)$$

2. Коэффициент ослабления ударной вязкости

$$K_{осл} = \frac{a_n}{a}. \quad (4.3)$$

Здесь ΔA и ΔA_n - величины работ, затраченных на разрушение образцов без надреза и с надрезом.

Метод испытания заключается в разрушении образца, установленного горизонтально на двух опорах, ударом поперек образца и не распространяется на пластмассы, образца из которых не разрушаются при испытании.

Испытание проводится на маятниковых копрах марок КДМ-10, КМР-01, КМИ-025. КМ-3. Удар по образцу производится посередине образца. Прибор устанавливают на жестком основании так, чтобы при ударе маятника по образцу не наблюдалось смещения прибора. Опоры на копре могут быть расположены строго вертикально (ниже оси качания маятника), а также под углом 5° и 15° к вертикальной оси.

Скорости движения маятника при ударе должны быть равны: $2,9 \pm 0,1$ м/сек при максимальной энергии удара, равной от 0,5 до 5 Дж; $3,8 \pm 0,2$ м/сек при максимальной энергии удара более 5 Дж. Потери энергии копра не должны превышать следующих значений:

Максимальная энергия удара в Дж	5 и более	от 0.5 до 5	менее 0,5
Величина общих потерь в процентах	0,5	1,0	2,0

Толщина образцов с надрезом измеряется в середине надреза. Работа, затрачиваемая на разрушение образца, должна быть не менее 10% и не более 80% запаса энергии, используемого маятником. Расстояние между опорами равно $40 \pm 0,2$ мм для образцов толщиной 5 мм и менее, и $70 \pm 0,2$ мм для образцов толщиной более 5 мм. При испытаниях образцов толщиной менее 10 мм и шириной менее 15 мм необходимо использовать прокладки, дополняющие применяемые размера образцов до указанных выше. Образцы с надрезом устанавливают так, чтобы удар приходился по стороне, противоположной надрезу, и чтобы плоскость удара совпадала с плоскостью симметрии надреза (рис.54).

Если шкала имеет деление в градусах, то величина затраченной энергии вычисляется по формуле:

$$\Delta A = PL \left[(\cos \beta - \cos \alpha) - (\cos \gamma - \cos \alpha) \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \gamma} \right], \quad (4.4)$$

где P - вес маятника в Н; L - длина маятника в м; α - угол зарядки маятника в град.; β - угол взлета маятника после разрушения образца в град.; γ - угол взлета маятника на холостом ходу в град.

Удар по образцу производится один раз. В тех случаях, когда образец не разрушается, он должен быть заменен другим для испытания на копре с большой энергии при сохранении той же скорости.

В том случае, когда по условиям изготовления образцов невозможно проводить испытания на двухопорный ударный изгиб, величины (4.2) и (4.3) определяют при испытаниях на консольный ударный изгиб по методам Изода и Шарпи.

В испытаниях по Изоду [35] используют образец в виде параллелепипеда размерами 12,7 x 12,7 x 63,5 мм, посередине которого нанесен V-образный надрез с углом при вершине 45°. Радиус в вершине надреза составляет 0,25 мм, толщина образца в узком месте равна 10,16 мм. Образец помещается между неподвижной опорой, противостоящей удару, и подвижной опорой, расположенной со стороны удара (рис. 53). Скорость маятника при ударе составляет 3,35 м/с.

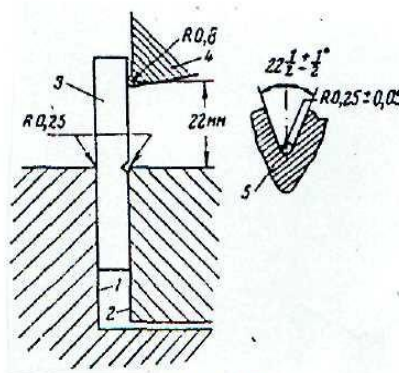


Рис. 53

Метод Изода имеет четыре разновидности: А, С, Д и Е. Метод А применяется в тех случаях, когда материал обладает высокой ударной прочностью и работой, затрачиваемой на отбрасывание части образца после разрушения, пренебрегают. В методе С для материалов с ударной прочностью менее 27 Дж/м эту работу вычитают.

Для ее определения устанавливают отделившуюся часть образца на оставшуюся и пускают маятник с той высоты, на которую он поднялся после разрушения. В методах А и С определяется ударная вязкость по Изоду как отношение работы, затраченной на разрушение образца к его ширине. В методе Д определяется чувствительность величины ударной вязкости к радиусу надреза, в методе Е определяется ударная вязкость на образце, который обращен к молоту ненадрезанной стороной. При ударе различают: полностью разрушенные образцы; шарнирно разрушенные образцы (одна часть образца не отделилась от другой, но легко поворачивается относительно нее); частично разрушенные образцы, в

которых трещина занимает не менее 90% сечения разрушения и неразрушенные образцы в которых трещин занимает менее 90% сечения разрушения. Испытания на двухопорный ударный изгиб по Шарпи [36] принципиально схожи с испытаниями по Изоду и дают практически такие же результаты

Для определения ударной вязкости тонких листовых материалов и пленок используется метод определения прочности падающим грузом.

Образец в виде пластины закрепляется в оправке диаметром 127 мм (метод А) или диаметром 38 мм (метод В). Установка (рис. 54) представляет собой стойку с вертикальными направляющими, по которым перемещается каретка 7 с закрепленными на ней грузами. Высота подъема груза h равна 66 см. В качестве показателя используют вес груза Q , который вызывает разрушение 50% испытываемых образцов.

Удар производится один раз, поэтому отскочившую после удара каретку стопорят. Ударник полусферической формы имеет диаметр 38 мм в методе А и диаметр 12,7 мм в методе В. Трещины появляются обычно на обратной стороне образца.

Энергия разрушения вычисляется по формуле

$$W = Q h . \quad (4/5)$$

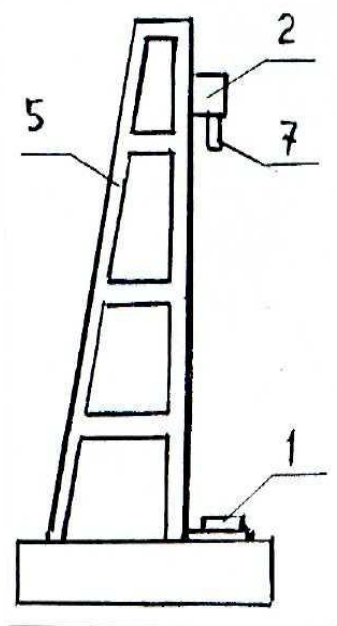


Рис. 54

4.2. Резонансные методы

Низко-, средне- и высокочастотные динамические испытания [37-38] используются для определения таких упругих постоянных материала, как:

1. Динамический (мгновенный) модуль упругости материала E_d соответствующий мгновенному значению деформации на данном уровне напряжений;

2. Логарифмический декремент колебаний δ , характеризующий демпфирующую способность материала. У пластмасс логарифмический декремент колебаний весьма велик, что позволяет эксплуатировать их даже в резонансной области;

3. Коэффициент поглощения ψ ,

$$\psi = \frac{\Delta P_m}{P_m} , \quad (4.6)$$

где ΔP_m - величина энергии, рассеиваемой за один цикл колебаний;

P_m - наибольшая потенциальная энергия цикла.

$$\text{При малом затухании} \quad \psi = 2\delta. \quad (4.7)$$

К низкочастотным динамическим испытаниям относятся испытания с частотой колебаний 10^{-1} - 10^2 Гц. Испытания с частотой менее 10^{-1} Гц относятся и квазистатическим.. В этом частотном диапазоне в основном используется метод свободных затухающих колебаний, с помощью которого определяют логарифмический декремент колебаний

$$\delta = 2 \ln \frac{a_m}{a_{m+1}}, \quad (4.8)$$

где a_m и a_{m+1} - две соседние амплитуды свободных затухающих колебаний, а также частоту колебаний, по которой находят динамический модуль упругости.

Так как при использовании метода свободных колебаний желательна большая амплитуда, то этот метод реализуется, в основном, при изгибных или крутильных колебаниях, а также при колебаниях в вязких жидкостях. Обычно к образцу присоединяется сосредоточенная инерционная масса, на порядок превышающая массу образца. Изменение величины этой массы и размеров образца позволяет проводить испытания в необходимой области частот. Размеры образца должны быть малы по сравнению с длиной волны колебаний.

Погрешность метода свободных колебаний возникает за счет внешних потерь, вызываемых, например, сопротивлением воздуха, трением в опорах. Основное преимущество этого метода в простоте.

Среднечастотные динамические испытания проводятся с частотой $10^2 - 10^4$ Гц. В данном частотном диапазоне используется, в основном, метод вынужденных резонансных колебаний, которым можно пользоваться при очень малых амплитудах деформации ($\max \varepsilon \approx 10^{-5} - 10^{-8}$) на поверхности образца. По резонансной частоте колебаний и остроте резонансного пика определяют упругие постоянные материала (динамический модуль продольной упругости, модуль сдвига) и величина внутреннего трения.

Если образец нагружается синусоидальной силой заданной амплитуды, частота которой может меняться, а амплитуду колебаний записывают как функцию частоты, то график этой зависимости имеет максимум при резонансной частоте $f_{рез}$ и падает по обе стороны от этой точки. При самом низком внутреннем трении материала образца острота этого резонансного пика наибольшая, и, если Δf - изменение частоты вынуждающей силы, необходимое для изменения амплитуда от половины ее максимального значения по одну сторону резонансной частоты до

половины максимального значения по другую сторону, то $\frac{\Delta f}{f_{рез}}$ является

мерой внутреннего трения. Резонансный метод используется при продольных, изгибных и крутильных колебаниях. Его можно применять в том случае, когда, вследствие сильного демпфирования, свободные колебания очень быстро затухают.

При низких частотах испытаний, значения упругих постоянных, определенные динамическими методами, получаются близкими к соответствующим значениям, полученным статическими методами. При высоких частотах испытаний наблюдается расхождение между величинами упругих постоянных, найденными динамическими и статическими методами, обусловленное влиянием скорости деформации на механические свойства материалов.

Основным недостатком резонансного метода является то, что соединение управляющей системы с образцом может привести к изменению резонансной частоты и формы резонансного пика. Для учета этого эффекта проводится ряд измерений с меняющейся степенью связи.

Высокочастотные динамические испытания проводятся на частотах $10^5 \sim 10^9$ Гц. Осуществить опыты на частотах свыше 10^5 Гц не удастся, так как длина волны гиперзвука оказывается сопоставимой с межатомным расстоянием, что исключает возможность распространения упругой волны. Высокочастотные динамические испытания проводятся импульсным методом. На образец воздействуют ультразвуковыми волнами (продольными или поперечными - сдвиговыми) и измеряют время прохождения импульса. Этот метод ограничен уровнем очень малых напряжений в материале. Скорости распространения упругих волн зависят, в основном, от упругих постоянных материала и его плотности.

Скорости распространения продольных C_1 и поперечных C_2 упругих волн в материале соответственно равны

$$C_1 = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}; \quad C_2 = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1-\mu)}}, \quad (4.9)$$

где ρ - плотность материала, μ - коэффициент Пуассона.

Таким образом, зная скорости распространения волн, можно определить упругие постоянные материала E и μ .

Преимущества метода распространения волн заключаются в том, что необходимая область частот может быть перекрыта на одном образце, а также в простоте снижения внешних потерь на опорах.

Недостатки метода заключаются в сложности аппаратуры по сравнению с методами свободных и резонансных колебаний, а также, в том, что обработка и интерпретация результатов затруднительна, особенно для рассеивающей среды.

Исследование механических свойств полимерных материалов динамическими методами в диапазоне звуковых частот часто называют акустической спектроскопией полимеров. Зная зависимости акустических параметров полимеров от температуры и частоты, можно установить зависимости от температуры и частоты механических и деформационных свойств полимеров, связанных с найденными акустическими параметрами.

Основное преимущество всех динамических методов состоит в скорости и точности определения механических характеристик и возможности многократной проверки полученных результатов на одних и тех же образцах, так как динамические методы испытания являются неразрушающими методами.

Несмотря на то, что в большинстве случаев механические характеристики материала при динамических испытаниях находятся косвенным путем, иногда возможно непосредственно построить динамическую диаграмму напряжение - деформация. Это проводится для построения петли гистерезиса при колебаниях. Однако, при высоких скоростях нагружения, экспериментальное определение кривой $\sigma - \epsilon$ связано с большими трудностями, обусловленными наличием инерционных эффектов в измерительной аппаратуре.

Для определения динамических характеристик материала при растяжении - сжатии используются среднечастотные и высокочастотные методы. Так, например, при испытаниях стержня длиной l и плотностью материала ρ динамический модуль продольной упругости для каждой собственной частоты f_n определяется по формуле

$$E_d = \frac{4\lambda^2 f_n^2 \rho}{n^2} \quad (4.10)$$

На рис.55 показана типичная схема приспособления, используемого при применении высокочастотных методов. Осциллятор переменной частоты 7 соединен с ячейкой возбуждения 8. Это может быть пьезоэлектрический кристалл или магнитострикционный стержень.

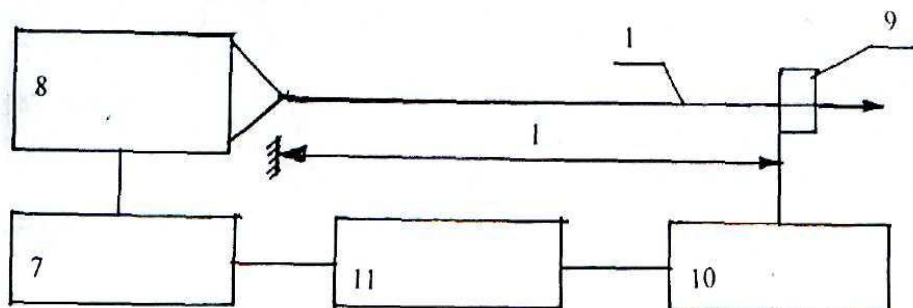


Рис. 55

Конец нити 1 прикреплен к колеблющейся ячейке возбуждения таким образом, чтобы в нити возбуждались продольные волны.

Детектором 9 является пьезоэлектрический кристалл, который связан с нитью зондом и может перемещаться вдоль нее. Усиленные электрические сигналы подаются на аналого – цифровой преобразователь 10 и в ЭВМ 11, где фазы и амплитуды двух синусоидальных колебаний сравниваются. Из ряда измерений разности фаз в зависимости от расстояния между детектором и ячейкой возбуждения определяют скорость волны в нити. Затухание может быть определено из изменений амплитуды с изменением расстояния между генератором и детектором.

Для определения динамических характеристик материала при испытаниях на изгибные колебания, наиболее часто используются средне-частотные (резонансные) методы. Так, при изгибных колебаниях, резонансным методом определяются динамический модуль упругости и коэффициент механических потерь при различных температурах материала (от -180°C до $+400^{\circ}\text{C}$). Испытание проводят при изгибных колебаниях образца со свободными концами на частотах $f=20 - 1000$ Гц при максимальной относительной деформации на поверхности $\varepsilon_{\text{max}} \approx 10^{-5} - 10^{-7}$.

Определение динамического модуля основано на измерении резонансной частоты основной формы вынужденных изгибных колебаний образца со свободными концами, имеющего круглое или прямоугольное поперечное сечение. Определение коэффициента механических потерь основано на измерении ширины резонансной кривой.

Перед проведением испытаний образцы взвешивают на аналитических весах со следующей точностью:

Вес образца	Точность взвешивания
До 1 г	0,001 г
От 1 г до 5 г	0,005 г
Свыше 5 Г	0,01 г

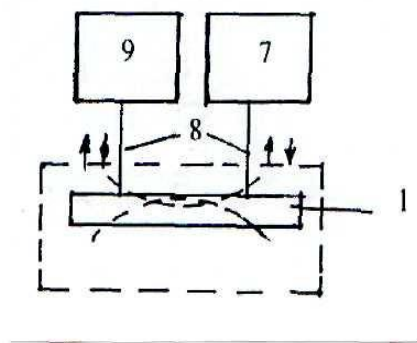


Рис. 56

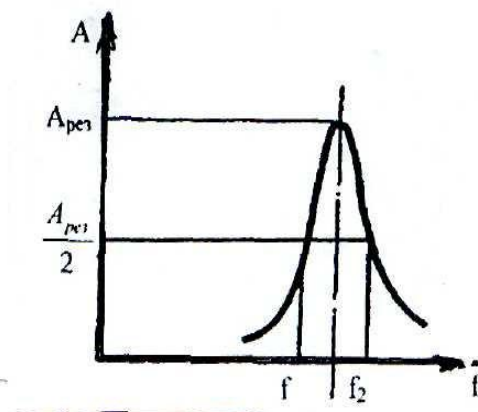


Рис. 57

Образец устанавливают в испытательную установку (рис. 56) так, чтобы слои его были расположены горизонтально. Изменением частоты колебаний возбуждателя 7 достигают резонансных колебаний образца, подвешенного на нитях 8 в точках, соответствующих узлам колебаний. Фиксируют резонансную частоту $f_{рез}$, записывают резонансную кривую (рис. 57).

Динамический модуль упругости E_d и коэффициент механических потерь η определяются по формулам:

Для прямоугольного образца
$$E_d = 0,96518 \cdot 10^{-6} \frac{Ql^3}{bh^2} f_{рез} \quad (4.11)$$

для круглого образца
$$E_d = 1,6385 \cdot 10^{-6} \frac{Ql^3}{d^4} f_{рез} \quad (4.12)$$

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_{рез}}, \quad (4.13)$$

где Q - вес образца в г; $\Delta f = f_2 - f_1$.

Для определения динамических характеристик материала часто используется метод «колеблющегося язычка». На рис.58 приведена принципиальная схема прибора для определения модуля упругости и внутренних потерь при изгибных колебаниях консольного образца ("колеблющегося язычка"). Тонкий стержень 1, защемленный одним концом, колеблется в термокриокамере 7. Колебания возбуждаются электромагнитным вибратором 8, который работает от звукового генератора 9. С помощью метода "колеблющегося язычка" можно оценивать влияние на механические свойства полимеров типа и содержания пластификатора, вида и плотности пространственной сетки, наполнения, радиации, исследовать температурные зависимости динамического модуля упругости и тангенса угла механических потерь. В качестве системы измерения амплитуды колебаний используется электроконтактная система (непосредственный контакт токопроводящей системы на образце и наконечника). Иногда для этой цели используются оптические системы или емкостные датчики. Прибор работает в диапазоне частот 10-500 Гц, в интервале температур $-180 + 200^\circ\text{C}$. Динамический модуль упругости и тангенс угла механических потерь в этом случае вычисляются по формулам

$$E_g = \frac{48 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot \ell^4}{a_0^4 \cdot h^2} \left[f_r^2 + \frac{(\Delta f)^2}{8} \right], \quad \text{tg } \delta = \frac{\Delta f}{f_r} \left(1 - \frac{11 \Delta f}{32 f_r} \right) \quad (4.14)$$

где $a_0 = 1,875$ - корень частотного уравнения для основной частоты; f_r - резонансная частота; Δf - ширина резонансной кривой на высоте 1/2 (если максимальная резонансная амплитуда, выраженная в условных

величинах, приведена к единице); ρ - плотность материала образца.
Данные формулы можно использовать при $\text{tg } \delta \leq 0,8$.

Для исследования механических характеристик материала методом «колеблющегося язычка» строится полная резонансная кривая образца. Для этого, после закрепления образца в держателе, связанном с вибратором, изменяют частоту генератора, добиваясь сначала возрастания, а затем спада амплитуды изгибных колебаний стержня. В процессе эксперимента необходимо, чтобы резонансная частота вибратора была значительно выше резонансной частоты исследуемого образца.

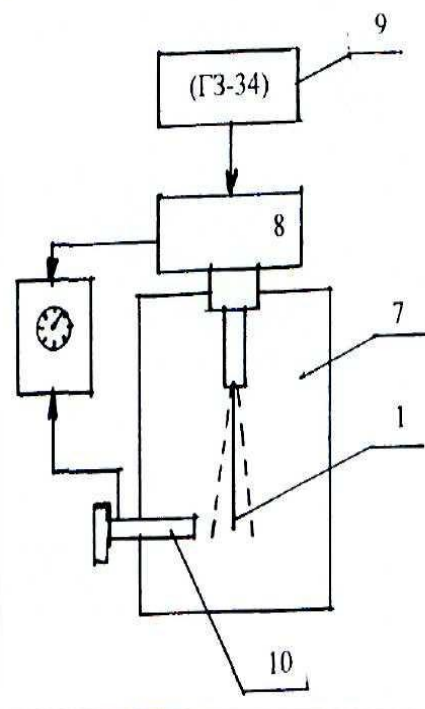


Рис. 58

5. ДРУГИЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТМАСС

5.1. Испытания пластмасс на твердость

Под твердостью понимается способность материала противостоять внедрению в него посторонних предметов. При испытаниях на твердость в поверхностный слой материала вдавливается индентор в виде шарика или конуса. Испытания пластмасс на твердость проводятся методами Бринелля, Роквелла, Шора, Барколя [39-42]. В отличие от испытаний металлов на твердость, где по показателям твердости можно определить другие механические характеристики материала, для пластмасс этого сделать не получается. Это связано с нелинейными физическими зависимостями между напряжениями и деформациями, что приводит к зависимости показателя твердости от величины приложенной нагрузки, глубины внедрения индентора. Поэтому показатель твердости для полимерных материалов, в основном, является сравнительной характеристикой.

Твердость по Бринеллю H_B при вдавливании шарика определяется по формуле

$$H_B = F / (\pi D h), \quad (5.1)$$

где: F - максимальная нагрузка, D - диаметр шарика, h - глубина внедрения.

Испытания проводят на твердомере, принципиальная схема которого приведена на рис. 59. Индентор представляет собой закаленный стальной шарик диаметром 5 мм. В ходе испытаний образец располагают на опорной плите прибора так, чтобы поверхность образца была перпендикулярна направлению приложения нагрузки. Прикладывают предварительную нагрузку, равную 9,81 Н и устанавливают индикатор, измеряющий глубину вдавливания, на ноль. Затем в течение 2 - 3 секунд прикладывают основную нагрузку. Испытательная нагрузка с учетом предварительной нагрузки должна быть равна 49,1 Н, 132Н, 358Н, 961Н. Нагрузка выбирается таким образом, чтобы глубина вдавливания лежала в пределах от 0,15 до 0,35 мм. Проводят не менее 10 измерений.

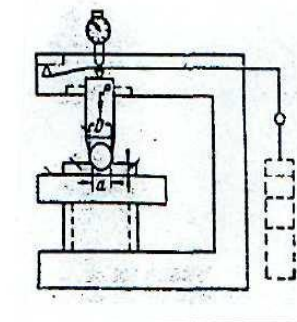


Рис. 59

Твердость по Роквеллу в отличие от твердости по Бринеллю определяется размерами отпечатка, оставленного индентором на поверхности материала. При этом надо учитывать, что для полимерных материалов характерна обратимость деформаций, и глубина отпечатка быстро уменьшается. Поэтому показатель твердости по Роквеллу выражается в условных единицах и зависит от глубины внедрения

индентора в материал. Принципиально прибор для измерения твердости по Роквеллу не отличается от прибора для измерения твердости по Бригеллю, но его указатель глубины внедрения калиброван в условных единицах твердости по Роквеллу. Измерение твердости производится следующим образом: прикладывается предварительная нагрузка, равная 98,1 Н, затем прикладывается основная нагрузка, величина которой зависит от диаметра шарика. Так, для шкалы твердости R (диаметр шарика равен 12,7 мм) и шкалы твердости L (диаметр шарика равен 6,35 мм), основная нагрузка равна 589 Н, а для шкалы твердости M (диаметр шарика равен 6,35 мм), основная нагрузка равна 981 Н. Затем основная нагрузка снимается и производится выдержка под предварительной нагрузкой и измерение глубины отпечатка. В методе Роквелла есть еще три шкалы для измерения твердости металлов. Чувствительность прибора уменьшается при неглубоком вдавливании шарика, поэтому обычно применяют маленький шарик и максимальную нагрузку. Рекомендуются показатели твердости от 0 до 100, а выше 115 показатель не учитывается. Если прибор не градуирован в единицах твердости по Роквеллу, то для шкалы твердости R показатель твердости можно найти по формуле

$$H_R = 130 - 500h, \quad (5.1)$$

где h – глубина отпечатка после снятия основной нагрузки в мм.

Твердость по Шору находится при внедрении в материал конических инденторов под действием калиброванной пружины. Применяются два типа инденторов: с углом вершины конуса 35° и усеченной вершиной (для прибора типа А) и с углом вершины конуса 30° и острой вершиной (для прибора типа Д). Усилие пружины находится по формулам:

для прибора типа А

$$F = 9,81 (56 + 7,66 h_A), \quad (5.2)$$

а для прибора типа Д

$$F = 9,81 (56 + 7,66 h_D), \quad (5.3)$$

где h_A и h_D – показатели твердости по шкалам твердомеров Шора типов А и Д. Шкала твердомеров Шора имеет 100 делений, причем, если твердость материала, измеренная на приборе типа А, превышает 90 единиц, то используют прибор типа Д, а если твердость материала, измеренная на приборе типа Д, меньше 20 единиц, то используют прибор типа А.

Твердость по Барколю находится при внедрении в материал конического индентора под действием нагрузки от 40 Н до 70 Н, которая может быть приложена нажатием руки. Применяются индентор с углом вершины конуса 26° и диаметром при вершин 0,157 мм. Шкала индикатора прибора имеет 100 делений, каждое из которых соответствует глубине внедрения 0,0076 мм. Прибор Бриколя часто используется для определения

твердости армированных пластиков. Минимальная толщина детали при измерении твердости равна 1,5 мм. Приборы Шора и Бриколя являются переносными.

Твердость резин находят как методом Бринелля, измеряя глубину погружения шарика под нагрузкой 10 Н в течение 30 секунд, так и методом Шора, с предварительной нагрузкой, равной 0,55 Н. Время замера – 3 секунды (в особых случаях – 15 с).

5.2. Испытания пластмасс на теплостойкость и морозостойкость

Теплостойкость и морозостойкость являются важными эксплуатационными характеристиками полимерных материалов. Они определяют верхнюю и нижнюю допустимые температуры применения того или иного материала. Теплостойкость пластмасс определяют по [43-45].

Теплостойкость по Мартенсу представляет собой температуру, при которой образец в виде бруска с размерами : $l = 120 \pm 2$ мм, $b = 15 \pm 0,5$ мм, $h = 10 \pm 0,5$ мм, под действием максимальных напряжений изгиба, равных $(5 \pm 0,05)$ МПа получает заданную деформацию.

Теплостойкость по Вика представляет собой температуру, при которой цилиндрический индентер с плоско отшлифованным с торца наконечником площадью 1 мм^2 , внедряется на глубину 1 мм под действием заданной нагрузки (от $10 \pm 0,1$ до $50 \pm 0,1$) Н.

За показатель морозостойкости принимается температура T_K , при которой жесткость полимера увеличивается в $1/k$ раз. Коэффициент K определяется как отношение деформации при данной температуре к деформации при температуре 20°C [46-49]. На температуру T_K влияют частота действия нагрузки (при периодическом нагружении) и время действия нагрузки (при статическом нагружении). По результатам испытаний определяется зависимость коэффициента морозостойкости от температуры.

Температура хрупкости материала определяется по [50-52], служит сравнительной характеристикой пластмасс при заданных условиях испытания и представляет собой температуру, ниже которой материал теряет свои пластические свойства.

Испытания проводятся в термокриокамере, скорость изменения температуры равна $50 \pm 5^\circ\text{C}$ в час.

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Для более полной и достоверной трактовки результаты экспериментов необходимо математически обработать. При этом встречается две задачи: первая - какова достоверность результатов, полученных при определенном количестве опытов, и вторая, обратная первой, - сколько требуется провести опытов, чтобы результаты их отклонялись от арифметически среднего значения на заданную величину.

В качестве конечного результата n опытов, в которых было получено X_i ($1 \leq i \leq n$) случайных значений измеряемой величины, принимается среднее арифметическое значение измеряемой величины

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i . \quad (6.1)$$

Первая задача дает возможность оценить точность величины \bar{X} при выданном числе опытов, то есть определить границы доверительного интервала для \bar{X} при заданной доверительной вероятности. Для этого необходимо определить следующие вероятностные характеристики:

а) среднее квадратичное отклонение случайной величины

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} ; \quad (6.2)$$

б) вариационный коэффициент

$$\mu = \frac{S}{\bar{X}} ; \quad (6.3)$$

в) показатель точности

$$\rho = \frac{\mu}{\sqrt{n}} . \quad (6.4)$$

Принимая нормальный закон распределения (распределение Лапласа- Гаусса) случайных величин и задаваясь определенным значением доверительной вероятности β , находим границы доверительного интервала \bar{X} по формуле:

$$X = \bar{X}(1 \pm \sqrt{2} p \Phi) , \quad (6.5)$$

где $\Phi(\beta)$ - интеграл вероятности. Значения функции $\Phi(\beta)$ табулированы, см. [53].

Пусть, например, $\beta = 0,997$. Находя из таблицы значение $\Phi(\beta)$, получим

$$X = \bar{X}(1 \pm 3p) . \quad (6.6)$$

Пусть среднее арифметическое значение случайной величины $\bar{X} = 10$, среднее квадратичное отклонение $S = 2$, проведенное число опытов $n = 16$. Тогда

$$\mu = \frac{S}{\bar{X}} = \frac{2}{10} = 0,2, \quad \rho = \frac{\mu}{\sqrt{n}} = \frac{0,2}{4} = 0,05 \quad X = 10(1 \pm 0,15), \quad (6.7)$$

то есть с вероятностью 0,997 случайные величины будут лежать в интервале $9,85 \leq X_i \leq 10,15$.

Решим обратную задачу - определим необходимое число опытов, результаты которых будут с доверительной вероятностью $\beta = 0,98$ ($\sqrt{2}\Phi = 2,32$) отклоняться от среднего арифметического значения на 15% .

$$\max \frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}} = \pm 0,15, \quad 2,32\rho = \pm 0,15, \quad \text{откуда } \rho_{\min} = \pm 0,0648. \quad (6.8)$$

Принимая $\mu = 0,2$ и учитывая, что $\rho = \frac{\mu}{\sqrt{n}}$, получим

$$n_{\min} = \frac{\mu^2}{\rho_{\min}^2} = \frac{0,04}{0,0042} \approx 10 \text{ опытов}. \quad (6.9)$$

Таким образом, необходимо провести как минимум 10 опытов для того, чтобы полученные результаты отклонялись от среднего арифметического значения искомой величины не более чем на 15% с вероятностью 0,98.

Следует отметить, что обработка результатов длительных экспериментов значительно сложнее.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПЛАСТМАСС

Наименование, марка	ρ , кг/м ³	$\sigma_{ВР}$, МПа	$\sigma_{ВСЖ}$, МПа	$\sigma_{ВИ}$, МПа	ϵ_p , %	E_p , МПа	$E_{И}$, МПа	H_B , МПа	$\alpha_{И}$, ($\alpha_{И}^H$), кДж/м ²	$\alpha_{Ш}$, ($\alpha_{Ш}^H$), кДж/м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пентапласт А1-А4; БГ –БГ4 И1-И3; ШО-Ш1	1390- 1410	40-55	85-95	65-85	10-15		900- 1200	80-110	80	24-140
Полиакрилаты суспензионные Дакрил ЛТП-1, СОТ, СОА блочные М-А; М-Т; СТ-1, СД; СБ; СЭП	1180- 1190 1140- 1200	60-80 62,3	100- 120	80-120 12,3	2-3 4-8	2700- 2900 3300	2590	170- 240 98-128		12-18(3) 8-20
Полиамиды ПА-6; МА-11; ПА-12; ПА-610; ПА-66 Полиамиды наполненные ПА-66-КС; ПА-6-210-КС	1100- 1130 1150- 1360	50-80 50- 140	55 55-120	65-120 45-220	100- 300	750- 3000		30-80 120- 250	5	100-310 15-75
Полиакрилаты ДВ-195; ДВ-342; Д-4	1200- 1250	70- 120	80-145	84-120	7,5	900- 1880	1750		1	150 (10-25)
Поливинилхлорид суспензионный винипласт	1060- 1400	40-60	80-100	90-120	10-25	3000- 4000		130- 160		4
Пластикат 4ОМ-40-8; В-60М; ИРМ-Т; ВШЛ-1; ПЛ-3(5) ИРЛ-40; 0-40	1500	8-18			130- 250			1		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Полиимиды	1200-1250	45-120			10-100	3200-5500	3200-5000	95		
Поликарбонаты ПК-ЭТ-3,5; ПК-ЛЭГ; ДАК-УП-1	1190-1200	56-78	77-95	77-120	50-100			103-160		25-30
Полипропилен ППНД-21003; ПНД-2101000; Топлен Т-111	920-930	20-40	11		200-1000		980-1670	40-70	(1,5-15) 10-20	33-60 (3-10)
Полистирол ПСМ-111; ПСС; ПСЭ-1; УПС, УПМ Сополимеры АБС	1040-1080 1040-1080	35-60 30-50		80-100	1,2-2,0 13-30		2000-3200	140-200	7-34	5,7-10 8
Полисульфаты ПСФ	1240-1250	20-35	100-110	110-120	50-100	2500-3500		40-70		
Полифениленоксид	1060	61-83	105-110	85-107	12-40	2500	2400	160-176	40-70 (5,8-8,7)	
Полиформальдегид ПФ-Э-4,5, ПФ-Л-10, ПФ-Л-30	1410-1430	68-71	110-130	100-120	15-25	2500-3000	3500	150-180	90-120 (7-12)	5,8-7,0
Полиэтилен ПЭВД ПЭНД	918-930 954-960	17-10 45-18	17-14 36-20	20-17 40-20	500-800 50-1200		120-260 650-930	17-25 49-60	(2,0-150)	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Полиэтилентерефталат ПЭТФ	1380-1400	50-290	80-100	70-90	60-180	3500-4500		95-100		15-30 (4-6)
Фторопласты Политетрафторэтилен Ф-4, Ф-3	2150-2240	14-40	11-65	10-80	20-500	410	460-1450	30-130		20-160
Этролы АЦЭ-43А; АБЦЭ-2М; СТП-2-73; КС	1150-1900	20-50		22-60	5-60		500-1200	30-80		4-100

Приложение 2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ПЛАСТМАСС

	ρ , кг/м ³	$\sigma_{ВР}$, МПа	$\sigma_{ВСЖ}$, МПа	$\sigma_{ВИ}$, МПа	ϵ_p , %	E_p , МПа	$E_{И}$, МПа	H_B , МПа	$\alpha_{уд}$, ($\alpha_{уд}^H$)
Полиэфирсы ПЭТФ ПБТФ	1170-1420	30-70	85-150	80-140	4-8	1650	1650	100-150	5-30 (12,5-6)
Фенопласты Волокнит, МДП, ДСП-В, ПТ-Н, РО, РМ, НМО	1300-2000	25-270	100-200	50-250	0,1-3,0	3000-18000	3000-18000	300-550	4-70
Аминопласты КФА, МФБ, КМФА	1600-2000	35-60	120-200	40-80	0,2-1,0			200-500	4-30
Эпоксидные смолы УП-284С	1800-2000	75-140	70-180	50-100	1,5-180	100-1000	100-1000	150-300	5-22
Кремнепласты	-	10-20	30-140	30-160				100-200	10-100

**Приложение 3. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КАУЧУКОВ И САЖЕНАПОЛНЕННЫХ РЕЗИН**

Группа по назначению	Тип каучук	ρ , кг/м ³	σ_p , МПа	ϵ_p , %	$\epsilon_{ост}$, %
Общего назначения	НК	910-920	24-34	600-800	25-40
	СКБ	900-920	13-16	500-600	10-45
	СКС	919-944	19-32	500-800	12-20
	СКИ	910-920	31,5	600-800	28
Специальные бензомаслостойкие		1225	20-26,5	450-550	10-20
	СКИ	943-986	22-33	450-700	15-30
	Тиокол	1300-1400	3,2-4,2	250-550	20-40
Химически стойкие	Бутил-каучук	920	16-24	650-800	30-45
Теплостойкие	СКТ	1700-2000	35-80	360	4
Тепло-химически стойкие	СКФ	1800-1900	7-20	200-400	2-10
Износостойкие	СКУ	1100-1300	2÷1-60	350-550	2-28

В приложениях 1 – 3 обозначено:

$\sigma_{вр}$, $\sigma_{всж}$, $\sigma_{ви}$ – временное сопротивление материала при растяжении, сжатии и изгибе;

ϵ_p и $\epsilon_{ост}$ – линейная деформация материала при разрыве и остаточная линейная деформация материала после разрыва;

E_p и $E_{и}$ – модуль Юнга материала, определяемый при испытании на растяжение и модуль Юнга материала, определяемый при испытании на изгиб;

H_B - твердость материала, определяемая по методу Бринелля;

$\alpha_{и}$, $(\alpha_{и}^H)$, $\alpha_{ш}$ ($\alpha_{ш}^H$) – ударные вязкости материала, определяемые по методам Изода и Шора на образцах без надреза (с нарезом).

Литература

1. Гурова Т.А. Технический анализ и контроль производства пластмасс /Т.А. Гурова. М.: Высшая школа, 1980. - 200 с.
2. Малкин А.Я. Методы измерения механических свойств полимеров /А.Я. Малкин, А.А. Аскадский, В.В. Коврига. М.: Химия, 1978. - 336 с.
3. ГОСТ 14359-69. Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования.– Введён 01.01.1970.–М.: Изд – во стандартов, 1969 . - 27 с.
4. ГОСТ 269-66 Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний. – Введен 01.07.1966.–М.: Изд–во стандартов,1966.-13с
5. ГОСТ 26365-84 Резина. Общие требования к методам усталостных испытаний – Введён 01.01.1986. – М.: Изд – во стандартов, 1984 . - 17 с.
6. ГОСТ 23326-78 Резина. Методы динамических испытаний. Общие требования– Введен 01.01.1980. Нормативные ссылки ISO 2856:1981, ГОСТ 10828-75. – М.: Изд – во стандартов, 1978 . - 21 с.
7. ГОСТ 24841-81 Эбонит. Общие требования к проведению физико-механических испытаний. – Введён 01.01.1983. – М.: Изд – во стандартов, 1981 . - 19 с.
8. ГОСТ 12015-66 Пластмассы. Изготовление образцов для испытания из реактопластов. Общие требования. – Введён 01.01.1967 . – М.: Изд – во стандартов, 1966 . - 17 с.
9. ГОСТ 12019-67. Пластмассы. Изготовление образцов для испытания из термопластов.–Введён 01.01.1967.–М.: Изд– во стандартов, 1967. - 18 с.
10. ГОСТ 28588.1-90 Резина. Подготовка проб и образцов для испытаний. Часть 1. Физические испытания. – Введён 01.07.1992. – М.: Изд – во стандартов, 1990 . - 21 с.
11. ГОСТ 12423-66. Пластмассы. Условия кондиционирования и испытаний образцов (проб). – Введён 01.07.1967. – М.: Изд – во стандартов, 1966 . - 27 с.
12. ГОСТ 19599-90 Пластмассы. Полиамиды. Ускоренное кондиционирование образцов для испытания. – Введён 01.01.1991. Взамен ГОСТ 19599-74. – М.: Изд – во стандартов, 1990 . - 16 с.
13. ГОСТ 3565-82 Металлы. Метод испытания на кручение. – Взамен ГОСТ 3565-58 ; Введен 01.11.83. – М.: Изд – во стандартов, 1982. - 25 с.

14. ГОСТ 22840-90. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования. – Введен 01.05.90. – М.: Изд – во стандартов, 1990 . - 29 с.

15. ГОСТ 22845-90. Машины для испытания материалов на ползучесть, длительную прочность и релаксацию. Общие технические требования. – Введен 01.05.90. – М.: Изд – во стандартов, 1990 . - 34 с.

16. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. – Введён 01.12.1980. Взамен: ГОСТ 11262-76. – М.: Изд – во стандартов, 1980. - 23 с.

17. ГОСТ 9550-81. Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе. – Введён 01.07.1982. Взамен ГОСТ 9550-71. – М.: Изд – во стандартов, 1981 . - 29 с.

18. ГОСТ 14236-81. Плёнки полимерные. Метод испытания на растяжение. – Введён 01.07.1981. Взамен ГОСТ 14236-69 . – М.: Изд – во стандартов, 1981 . - 21 с.

19. ГОСТ 270-75. Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении. – Введён 01.01.1978. Взамен ГОСТ 270-64. – М.: Изд – во стандартов, 1975 . - 22 с.

20. ГОСТ 11053-75 Резина. Метод определения условно-равновесного модуля. – Взамен ГОСТ 11053-60 ; Введен 01.09.76. – М.: Изд – во стандартов, 1975 . - 19 с.

21. ГОСТ 4651-82. Пластмассы. Метод испытания на сжатие. – Введён 01.07.1983. Взамен ГОСТ 4651-78. – М.: Изд – во стандартов, 1982. - 18 с.

22. ГОСТ 4648-71. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. – Введён 01.01.1973. Взамен ГОСТ 4648-63 . – М.: Изд – во стандартов, 1971 . - 22 с.

23. ГОСТ 17302-71. Пластмассы. Метод определения прочности на срез. – Введён 01.01.1973. Взамен ГОСТ 10044-38 . – М.: Изд – во стандартов, 1971 . - 14 с.

24. ГОСТ 24778-81 Пластмассы. Метод определения прочности при сдвиге в плоскости листа. – Введён 01.07.1982 . – М.: Изд – во стандартов, 1981 . - 20 с.

25. ГОСТ 23016-78 Резина. Метод определения сопротивления раздиру на образцах-полосках. – Введен 01.07.1980. Нормативные ссылки ГОСТ 269-66, ГОСТ 7762-74, ГОСТ 11358-74. – М.: Изд – во стандартов, 1978. - 19 с.

26. ГОСТ 262-93 Резина. Определение сопротивления раздиру (раздво-енные, угловые и серповидные образцы) . – Введён 01.01.1995. Взамен ГОСТ 262-79. – М.: Изд – во стандартов, 1993. - 20 с.

27. ГОСТ 26128-84 Пленки полимерные. Методы определения сопротивления раздиру.– Введён 01.01.1985 . – М.: Изд – во стандартов, 1984 . - 16 с.

28. ГОСТ 13537-68. Пластмассы. Метод определения сопротивления раскалыванию.– Введён 01.07.1968. – М.: Изд – во стандартов, 1968.- 21 с.

29. ГОСТ 18197-82. Пластмассы. Метод определения ползучести при растяжении. – Введён 01.07.1983 . Взамен ГОСТ 18197-72 . – М.: Изд – во стандартов, 1982 . - 25 с.

30. ГОСТ 9982-76 Резина. Методы определения релаксации напряжения при сжатии.– Введен 01.01.1978. изменяет ГОСТ 9982-62, ГОСТ 11099-64 в части метода определения напряжения. – М.: Изд – во стандартов, 1976 . - 18 с.

31. ГОСТ 20990-75 Пластмассы ячеистые эластичные. Метод определения усталости при циклическом сжатии.– Введён 01.07.1976. – М.: Изд – во стандартов, 1975 . - 15 с.

32. ГОСТ 261-79 Резина. Методы определения усталостной выносливости при многократном растяжении.– Введён 01.07.1981. Взамен ГОСТ 261-74. – М.: Изд – во стандартов, 1979 . - 16 с.

33. ГОСТ 20418-75 Резина. Методы определения теплообразования, остаточной деформации и усталостной выносливости при многократном сжатии. – Взамен ГОСТ 10952-64. нормативные ссылки ГОСТ 10828-75. Введён 01.07.1977.– М.: Изд во стандартов, 1975 . - 24 с.

34. ГОСТ 10952-75 Резина. Методы определения усталостной выносливости при знакопеременном изгибе с вращением.– Взамен ГОСТ 10952-55 ; Введен 01.03.76.–М.: Изд – во стандартов, 1975. - 22 с.

35. ГОСТ 19109-84 Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду.– Введён 01.07.1985. Взамен ГОСТ 19109-73. – М.: Изд – во стандартов, 1984 . - 19 с.

36. ГОСТ 4647-80. Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи.– Введён 01.06.1981. Взамен ГОСТ 4647-69 . – М.: Изд – во стандартов, 1980 . - 21 с.

37. ГОСТ 20812-83 Пластмассы. Метод определения механических динамических свойств с помощью крутильных колебаний .– Введён 01.01.1984. Взамен ГОСТ 20812-75.–М.: Изд–во стандартов, 1983.-23 с.

38. ГОСТ 10828-75 Резина. Метод определения динамического модуля и модуля внутреннего трения при знакопеременном изгибе с вращением.– Взамен ГОСТ 10828-64. Введён 01.07.1977. – М.: Изд – во стандартов, 1975 . - 26 с.

39. ГОСТ 4670-91. Пластмассы. Определение твёрдости. Метод вдавливания шарика.– Введён 01.01.1993. Взамен ГОСТ 4670-77. – М.: Изд – во стандартов, 1991 . - 20 с.

40. ГОСТ 24622-91 Пластмассы. Определение твердости. Твердость по Роквеллу .– Введён 01.01.1993. Взамен ГОСТ 24622-81. – М.: Изд – во стандартов, 1991 . - 21 с.

41. ГОСТ 24621-91 Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору) .– Введён 01.01.1993. Взамен ГОСТ 24621-81.– М.: Изд–во стандартов, 1991.- 19 с.

42. ГОСТ 263-75 Резина. Метод определения твердости по Шору А.– Введён 01.01.1977. Взамен ГОСТ 263-53.–М.: Изд–во стандартов, 1975. - 20 с.

43. ГОСТ 21341-75. Пластмассы и эбонит. Метод определения теплостой-кости по Мартенсу . – Введён 01.01.1978. Взамен ГОСТ 15089-69, ГОСТ 272-41. – М.: Изд – во стандартов, 1975 . - 23 с.

44. ГОСТ 12021-84. Пластмассы и эбонит. Метод определения температуры изгиба под нагрузкой.– Введён 01.07.1985. Взамен ГОСТ 12021-75. – М.: Изд – во стандартов, 1984 . - 24 с.

45. ГОСТ 15088-83. Пластмассы. Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика. – Введён 01.01.1985. Взамен ГОСТ 15088-69, ГОСТ 15065-69.–М.: Изд – во стандартов, 1983 . - 20 с.

46. ГОСТ 22346-77 Пластмассы ячеистые эластичные. Метод определения коэффициента морозостойкости.– Введён 01.01.1978. – М.: Изд – во стандартов, 1977 . - 19 с.

47. ГОСТ 408-78 Резина. Методы определения морозостойкости при растяжении .– Введён 01.01.1980. Взамен ГОСТ 408-66. – М.: Изд – во стандартов, 1978 . - 16 с.

48. ГОСТ 13808-79 Резина. Метод определения морозостойкости по эластическому восстановлению после сжатия.– Взамен ГОСТ 13808-68. Введен 01.01.1982. Нормативные ссылки ГОСТ 13608-68, ГОСТ 269-66. – М.: Изд – во стандартов, 1979 . - 21 с.

49. ГОСТ 12967-67 Резина пористая. Метод определения коэффициента морозостойкости. – Введен 01.01.1968. Нормативные ссылки ГОСТ 11721-78, ГОСТ 17299-78, ГОСТ 18300-87, ГОСТ 24104-88, ГОСТ 28498-90. – М.: Изд – во стандартов, 1968 . - 19 с.

50. ГОСТ 16782-92. Пластмассы. Метод определения температуры хруп-кости при ударе. – Введён 01.07.1993. Взамен ГОСТ 16782-83 . – М.: Изд – во стандартов, 1992 . - 18 с.

51. ГОСТ 258-75 Эбонит. Метод определения хрупкости на маятниковом копре.– Введён 01.07.1976. Взамен ГОСТ 258-41. – М.: Изд – во стандартов, 1975 . - 20 с.

52. ГОСТ 7912-74 Резина. Метод определения температурного предела хрупкости .– Введён 01.01.1976. Взамен ГОСТ 7912-56. – М.: Изд – во стандартов, 1974 . - 19 с.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	5
1.1. Общие требования к механическим испытаниям полимерных материалов	5
1.2. Классификация механических испытаний образцов из полимерных материалов	9
1.3. Общие обозначения, принятые в учебном пособии	9
2. СТАТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	11
2.1. Виды статических испытаний	11
2.2. Испытание пластмасс на растяжение	13
2.3. Испытание полимерных пленок на растяжение	20
2.4. Испытание резины на растяжение	21
2.5. Испытания пластмасс на сжатие	26
2.6. Дополнительные результаты испытаний на растяжение или сжатие	29
2.7. Испытания пластмасс на изгиб	30
2.8. Испытания пластмасс на срез, сдвиг и скалывание	33
2.9. Испытания на раздир и раскалывание	37
2.10. Испытания пластмасс на ползучесть, релаксацию и длительную прочность	38
2.11. Сложное сопротивление полимерных материалов	43
3. ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТМАСС И РЕЗИН НА УСТАЛОСТЬ	45
3.1. Испытания на усталость	45
3.2. Испытания на усталость при растяжении–сжатии	46
3.3. Испытания на усталость при изгибе	50
4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТМАСС	54
4.1. Испытания на удар	54
4.2. Резонансные методы	58
5. ДРУГИЕ ИСПЫТАНИЯ ПЛАСТМАСС	65
5.1. Испытания пластмасс на твердость	65
5.2. Испытания пластмасс на теплостойкость и морозостойкость	67
6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ	68
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	69
ПРИЛОЖЕНИЯ	70
Литература	74