

Министерство образования Российской Федерации

ТАМБОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В. П. Ярцев

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДЕТАЛЯХ И
КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Рекомендовано Учебно-методическим
объединением Российской Федерации
по образованию в области
строительства в качестве учебного
пособия для студентов, обучающихся
по специальности 290300
"Промышленное и гражданское
строительство" направления
"Строительство"

Издательство ТГТУ

Тамбов 2001

УДК 624.011.78 (075)

ББК Н56я73

Я 79

Рецензенты:

Доктор технических наук,
профессор Пензенской государственной архитектурно-строительной академии
Т. И. Баранова

Кафедра "Строительные материалы и специальные технологии"
Волгоградской архитектурно-строительной академии

ВВЕДЕНИЕ

В строительстве полимерные материалы используются всего лишь несколько десятков лет. При этом их применение сдерживается, в одних случаях, дефицитностью и дороговизной, в других – недостаточным знанием их свойств (в первую очередь долговечности, изменения физико-механических характеристик во времени).

Данное пособие преследует цель восполнения пробела в знаниях о работоспособности полимерных материалов в деталях и конструкциях зданий и сооружений; в нем рассмотрены основные методы испытания полимерных материалов; описаны приборы для определения долговечности в различных напряженных состояниях; приведены методики определения и расчета физических констант, связанных со строением полимера и определяющих его несущую способность.

Прямые физические методы исследования закономерностей разрушения и деформирования позволяют выявлять эти процессы на молекулярном уровне (начальной стадии) и регулировать их изменением химической или физической структуры полимерного материала.

Вопросы испытания полимерных конструкций практически не рассмотрены в отечественной и зарубежной литературе. В четвертом разделе данного пособия сделана попытка систематизировать основные методы испытания полимерных конструкций (ограждающих и несущих), а также целых сооружений (пневматических и гидротехнических). В пятом разделе показаны пути прогнозирования работоспособности деталей и конструкций в широком диапазоне основных эксплуатационных параметров.

Настоящее учебное пособие, по мнению автора, является первой попыткой комплексного изложения прикладных вопросов связанных с проблемой прогнозирования несущей способности как полимерных материалов, так и конструкций из них. Оно подготовлено как раздел курса "Обследование и испытание сооружений" и будет полезно для студентов специальности "Промышленное и гражданское строительство".

Большинство вопросов, рассмотренных в пособии, могут быть предложены для дальнейшего исследования студентам при изучении курсов "Основы научных исследований", "Конструкции из дерева и пластмасс", "Гидротехнические сооружения", а также при выполнении дипломных работ исследовательского характера. Учебное пособие может быть полезно также аспирантам и инженерам, занимающимся вопросами использования пластмасс в гражданском, промышленном и гидротехническом строительстве.

1 ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТМАСС

1.1 Особенности механических свойств полимерных материалов

Основные особенности механических свойств полимеров, отличающие их от обычных твердых тел, можно систематизировать следующим образом:

1 При высокоэластической или вынужденноэластической деформации объем образца изменяется мало (коэффициент Пуассона равен 0,3 – 0,4). Это свойство обусловлено тем фактом, что деформация не связана с изменением расстояния между атомами, а происходит в результате поворота звеньев цепи. Поскольку межатомные расстояния не меняются сохраняется плотность материала.

2 Из постоянства объема вытекает следующая связь между условным напряжением σ_y (отнесенным к первоначальному сечению образца) и истинным σ (отнесенным к сечению образца в момент деформации полимера)

$$\sigma = \sigma_y \left(1 + \frac{\varepsilon}{100} \right),$$

где ε – относительная деформация, выраженная в процентах.

При растяжении ($\varepsilon > 0$) истинное напряжение больше условного вследствие уменьшения поперечного сечения. При сжатии ($\varepsilon < 0$) сечение увеличивается, поэтому $\sigma < \sigma_y$.

3 Жесткость высокоэластичных материалов в тысячи раз меньше жесткости металлов. Причина этого в том, что деформация полимеров осуществляется за счет гибкости цепи, а не изменения межатомных расстояний. Даже застеклованные полимеры гораздо мягче металлов и многих кристаллических тел, ибо длинные молекулы менее плотно упакованы и могут разгибаться.

4 Полимеры способны к большим деформациям без разрушения, так как при разгибании цепи межатомные расстояния не изменяются. Это происходит при $T > T_{xp}$, даже если $T < T_{ст}$.

5 В высокоэластическом состоянии (эластомер) деформация полимера почти полностью обратима из-за наличия теплового движения [1]. После разгрузки образца уменьшение его деформации ($-\Delta\varepsilon$) приближенно описывается эмпирической формулой

$$-\Delta\varepsilon = \text{const} \lg t. \quad (1.1)$$

Даже застеклованный полимер (пластмасса) деформированный вынужденноэластически может восстанавливать свою форму при подогреве.

6 Полимерные материалы характеризуются очень высокой ползучестью – ростом деформации с течением времени при постоянной нагрузке.

Процесс описывается приближенной эмпирической формулой

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + a \lg t, \quad (1.2)$$

где ε_1 – деформация за единицу времени.

При этом скорость деформации V обратно пропорциональна времени

$$V = \frac{a}{t}. \quad (1.3)$$

Величина a практически постоянна при изменении времени в тысячу раз.

7 Релаксация напряжения в полимерах происходит медленно. Как правило этот процесс описывается формулой, аналогичной (1.1), иногда используется соотношение

$$\sigma = \frac{b}{t^n}, \quad (1.4)$$

где константа n заключена в пределах $1 > n > 0$. Релаксация значительно ускоряется с повышением температуры. Период релаксации определяется из соотношения

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}}, \quad (1.5)$$

где τ_0 , γ , U_0 – константы материала; U_0 – энергия активации характеризующая интенсивность межмолекулярного взаимодействия; γ – коэффициент эффективности действующего напряжения.

8 Формулы аналогичные (1.5), описывают и механическую долговечность пластмасс – время до разрушения или критической ползучести (образования шейки). При разрушении U_0 связано с энергией химических связей, а при ползучести – с суммарной энергией разрыва связей сегмента с его соседями.

9 Деформируемость полимеров существенно зависит от температуры (рис. 1.1). Жесткость данного полимера при изменении температуры в широких пределах может меняться в тысячи раз.

10 Связь напряжения с деформацией в полимерах на начальном участке может быть практически линейна как в застеклованном состоянии полимера, так и в высокоэластическом.

Это не означает, что в пределах такого участка деформация полимера упруга. Поскольку основной механизм деформации – не изменение межатомных расстояний, а перемещение звеньев, то даже на линейном участке деформация не вполне обратима. Частичная обратимость этой деформации имеет своеобразную природу: если в твердых телах обратимость полная, энергетическая, то высокоэластический материал обратим только геометрически – тело восстанавливает свою форму, но часть энергии теряется вследствие отставания деформации от напряжения (явление гистерезиса); в случае вынужденноэластической деформации обратимость условная, механическая – при переходе материала в равновесное состояние (в результате подогрева) деформация исчезает.

11 Высокоэластическая или вынужденноэластическая деформация, какой бы вид она не имела – одномерное или двумерное растяжение, сжатие, изгиб, кручение – является сдвигом (объем постоянен). Но вследствие различной ориентации молекул при этих видах деформации различны и характеристики деформируемости (модуль, скорость релаксации и т.д.).

Особый случай представляет всестороннее сжатие или растяжение: эластомер ведет себя как обычное твердое тело или жидкость, так как меняются расстояния между частицами, а гибкость цепей реализоваться не может. Специфика полимеров здесь почти полностью исчезает.

12 Температурные границы $T_{хр}$, $T_{ст}$, $T_{тек}$, характеризующие механические свойства полимеров – хрупкость, вынужденную эластичность, высокую эластичность – не являются константами данного материала. Они зависят от времени или скорости деформирования. Эта зависимость описывается приближенной формулой, вытекающей из соотношения (1.5)

$$1/T_i = A_i - B_i \lg V = C_i + B_i \lg t,^* \quad (1.6)$$

где индекс i показывает состояние полимера (хрупкость, стеклование, текучесть); T_i – абсолютная температура каждой точки перехода, выраженная в градусах Кельвина (К); A_i , B_i , C_i – константы, которые зависят не только от состава материала, но и от величины нагрузки.

13 Если полимер подвергается периодической нагрузке, то его поведение определяется величиной периода, то есть частотой нагружения. При этом, за время действия силы следует принять полупериод.

14 Механизм теплового расширения полимеров в высокоэластическом состоянии почти такой же как у жидкостей, а в застеклованном – как у твердых тел. Поэтому коэффициент линейного теплового расширения данного полимера в высокоэластическом состоянии больше, чем в застеклованном; в последнем случае он близок к значениям коэффициентов для металлов и минеральных стекол. Это является причиной большей усадки полимерных изделий, по сравнению с усадкой пресс-формы, и снижает прочность склейки полимера с твердыми телами.

15 Полимерные материалы невозможно охарактеризовать небольшим числом констант, которые описывали бы поведение материала в любых условиях, тогда как основные характеристики металлов [2] в пределах жаростойкости почти не меняются под влиянием внешних условий (скорость нагружения, температура, вид деформации).

* Формулы (1.1) – (1.6) неприменимы при $t \rightarrow 0$. с. 4 – 6.

Работая с полимерными материалами, необходимо знать их деформационные, прочностные, фрикционные характеристики, количественное влияние на них внешних условий, по возможности выразить это влияние при помощи формул и установить пределы инвариантности констант, входящих в формулы.

16 Для испытания пластмасс следует использовать методы двух категорий. Во-первых, нужен комплекс методов дающий общую характеристику основных свойств материалов. Во-вторых, необходимы специальные методы, которые позволили бы выявить влияние условий, имитирующих условия эксплуатации, на общие характеристики материала и определить их специфические свойства, которые существенны для данного типа изделий.

1.2 Предел прочности и текучести

Основной технической характеристикой при оценке несущей способности любых материалов является, так называемый предел прочности. Его численное значение для конкретного материала получают экспериментальным путем. Для этого используют разрывные машины, создающие в образцах различное напряженное состояние и работающие в режиме заданной скорости деформирования.

Как правило результаты автоматически записываются на диаграммной ленте в координатах напряжение – относительная деформация, рис. 1.2. При этом под напряжением понимают усилие действующее на единицу площади первоначального сечения образца

$$\sigma_y = \frac{P}{F_0}.$$

Оно называется условным напряжением. Действительное напряжение рассчитывают как отношение усилия к площади поперечного сечения образца в конкретный момент испытания:

$$\sigma = \frac{P_i}{F_i}.$$

Относительное удлинение измеряемого отрезка рабочей части образца определяют по формуле:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} 100 \%,$$

где l_0 – начальная длина рабочего участка; l – длина рабочего участка в конкретный момент испытания.

Начальный участок кривой зависимости напряжение – удлинение в первом приближении имеет линейный характер и отвечает упругой деформации образца, то есть согласно закону Гука

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E},$$

где E – модуль упругости, который определяется с помощью тангенса угла наклона начального участка.

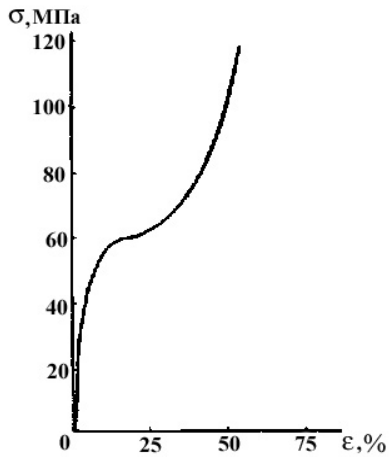


Рис. 1.3. Зависимость деформации от напряжения для полипропилена

На этой стадии рабочая часть испытуемого образца вытягивается на небольшую величину (порядка 1 %), которая после снятия напряжения полностью исчезает (деформация обратима).

Для большинства пластмасс, разрушающихся нехрупко, по мере роста напряжения деформация достигает такой величины, что она уже не может развиваться полностью обратимо. На рабочем участке образца появляется "шейка" – местное сужение поперечного сечения образца. На кривой зависимости напряжение – удлинение это проявляется в резком падении напряжения. Максимум на кривой $\sigma - \epsilon$ соответствует так называемому пределу текучести.

Дальнейший рост деформации рабочего участка образца происходит за счет перегруппировки и ориентации цепей аморфной и кристаллической фракций в направлении действующего усилия. На кривой $\sigma - \epsilon$ (рис. 1.2) появляется участок, параллельный оси абсцисс. При завершении ориентации рабочего участка испытуемого образца напряжение снова возрастает с увеличением деформации вплоть до разрушения образца. Напряжение при котором происходит разрыв образца называется пределом прочности при растяжении, а соответствующая ему деформация – относительным разрывным удлинением.

Зависимость напряжение – удлинение при сжатии несколько отличается от аналогичной зависимости при растяжении (см. рис. 1.3). Так, относительная деформация при сжатии значительно меньше, а предел текучести определяется не максимумом, а точкой перегиба кривой $\sigma - \epsilon$. При этом величина напряжения в ходе испытания непрерывно возрастает.

В зависимости от физического состояния испытуемого материала (температуры испытания) и скорости его деформирования кривые $\sigma - \epsilon$ имеют различный вид и резко различающиеся значения "пределов" прочности и текучести, см. рис. 1.4.

Как видно из рис. 1.4, с увеличением скорости деформации предел текучести возрастает, а относительное удлинение при разрыве падает. Характерные данные, показывающие влияние скорости деформирования на "пределы" прочности и текучести, разрывное удлинение и модуль упругости [3] приведены в табл. 1.1. При повышении температуры наблюдается обратная картина.

На рис. 1.5 показана зависимость "предела" текучести полипропилена от логарифма температуры [4]. В интервале от 25 °С до точки плавления она представляет собой семейство

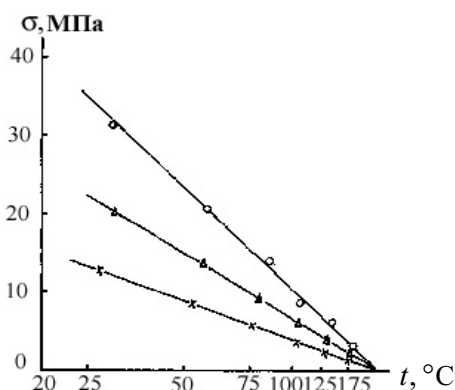


Рис. 1.5 Температурная зависимость предела текучести для

прямых с углом наклона, симбатным степени кристалличности. Таким образом пределы прочности и текучести не являются константами материала. Поэтому делать выводы о несущей способности того или иного полимерного материала по указанным параметрам без учета условий эксплуатации практически невозможно. Однако для деформируемых с невысокой скоростью изделий, постоянно работающих при комнатной температуре, несущая способность достаточно точно рассчитывается в пределах упругой зоны материала.

Таким образом пределы прочности и текучести не являются константами материала. Поэтому делать

выводы о несущей способности того или иного полимерного материала по указанным параметрам без учета условий эксплуатации практически невозможно. Однако для деформируемых с невысокой скоростью изделий, постоянно работающих при комнатной температуре, несущая способность достаточно точно рассчитывается в пределах упругой зоны материала.

Учитывая релаксационный характер механических свойств полимерных материалов, необходимо достаточно строго соблюдать временной режим испытаний. Обычно постоянную скорость взаимного перемещения рабочих органов испытательной машины выбирают так, чтобы продолжительность испытания составляла 0,5 – 2 минуты. Поскольку различные виды пластмасс сильно отличаются по максимально возможным деформациям, что особенно проявляется при растяжении, устанавливают несколько постоянных скоростей испытания, например, 1, 5, 25, 50, 100, 500 мм/мин при растяжении, чтобы охватить весь диапазон материалов – от хрупких до эластичных.

1.1 Влияние скорости деформирования полимеров на их прочностные и деформационные характеристики

Полимер	Скорость деформирования V, мм/с	Предел текучести и σ_T , МПа	Предел прочности при растяжении σ_R , МПа	Относительное удлинение при разрыве ϵ , %	Модуль упругости E, МПа
Ацетат целлюлозы	5	28,4	33	27,5	2140
	15	72,9	79,1	17,8	4000
Найлон	5	49	69,3	293	1030
	15	78,4	78,4	127	2000
Полистирол	5	–	52,2	1,9	3520
	15	–	67,4	2,2	4990

По кривой $\sigma - \epsilon$, кроме указанных выше показателей (пределы прочности и текучести, разрывное удлинение, модуль упругости), можно определить следующие характеристики полимеров:

1 Предел пропорциональности, то есть напряжение, при котором начинается заметное искривление зависимости $\sigma - \epsilon$.

2 Истинную прочность в момент разрыва, то есть разрывную силу, отнесенную к площади поперечного сечения шейки $F_{ш}$ в момент разрыва.

Максимальное удлинение шейки $\epsilon_{ш}$ при разрыве. Оно может быть рассчитано в предположении постоянства объема по формуле

$$\epsilon_{ш} = 100 \left(\frac{F_0}{F_{ш}} - 1 \right).$$

При определении предела пропорциональности и модуля упругости используется способ, основанный на приближении начального участка к линейности путем перестройки кривой $\sigma - \epsilon$ в координаты $\sigma_1 - \epsilon$:

$$\sigma_1 = \sigma \left(1 + \frac{\epsilon}{100} \right)^m \sim \sigma \left(1 + m \frac{\epsilon}{100} \right)^m,$$

где $m \geq 1$ – подбирается эмпирически.

1.3 Ползучесть

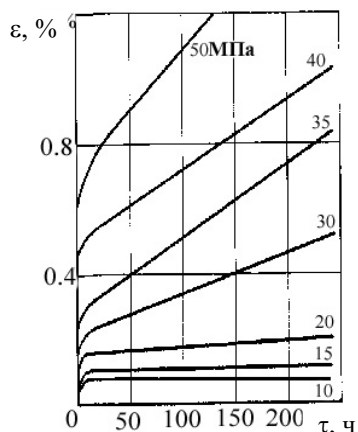


Рис. 1.6 Кривые ползучести винипласта

Под ползучестью понимают увеличение деформации материала со временем под действием постоянной нагрузки или напряжения. Ползучесть проявляется как частный случай общей зависимости деформации ε от напряжения σ , температуры T и времени t при условии, когда σ и T постоянны. Кривые ползучести, полученные растяжением винипласта [5] при заданных постоянных напряжениях и комнатной температуре, показаны на рис. 1.6. Полная кривая ползучести обычно делится на три характерных участка (рис. 1.7) – начальной, установившейся и критической ползучести.

Для оценки ползучести используют: 1) деформацию, накопленную за данное время

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0},$$

где l_1 – длина образца в данный момент; l_0 – его начальная длина;
2) среднюю скорость ползучести

$$V = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{t_2 - t_1},$$

где ε_1 и ε_2 – деформация соответственно за время t_1 и t_2 ;
3) коэффициент ползучести

$$K = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1}.$$

Кроме того результаты испытания на ползучесть представляют в виде графиков $\varepsilon - \lg t$ или $\lg \varepsilon - \lg t$, причем во многих случаях при сжатии или растяжении в тех или других координатах получается прямолинейная зависимость, что удобно для экстраполяции и прогнозирования. В большинстве практических случаев не требуется знать характер развития ползучести, а необходимо установить время t_k достижения области критической ползучести (когда начинается резкое увеличение скорости деформации). Это время при заданном напряжении и температуре называется деформационной долговечностью.

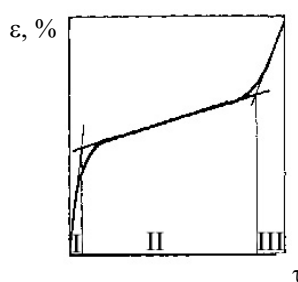


Рис. 1.7 Полная кривая ползучести полимера:
I – участок начальной;
II – установившейся;
III – критической ползучести

Для общей характеристики материалов обычно ограничиваются определением ползучести при растяжении и сжатии. Ползучесть при растяжении и постоянной нагрузке используют для оценки жестких материалов, а при постоянном напряжении – для оценки материалов сильно деформирующихся (более чем на 10 %) при нагружении. Постоянство напряжений поддерживают приспособлениями автоматически уменьшающими нагрузку пропорционально уменьшению поперечного сечения образца. Испытательная нагрузка при исследовании ползучести составляет 10 – 90 % (наиболее часто 25 – 40 %) от значения прочности, полученного при кратковременных испытаниях на растяжение. Испытания при

растяжении производят на таких же образцах, какие используют при кратковременных статических испытаниях.

В связи с сильной зависимостью ползучести от температуры, колебания последней должны быть минимальными (иногда $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для испытания пластмасс на ползучесть можно использовать серийные приборы РПУ-1 (0,1) (растяжение при температурах до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ при максимальных постоянных нагрузках соответственно 10 и 1 кН) и установки с изменяющейся в ходе опыта нагрузкой для испытаний при программируемом нагружении.

При ползучести происходит и разрушение материала (преобразование надмолекулярной структуры, появление и рост микротрещин). До настоящего времени не ясно какой процесс (разрушение или деформация) первичен, а какой – вторичен. Если деформация протекает быстрее чем разрушение, это приводит к макроползучести; в обратном случае происходит разрушение тела. Пластификация полимера ускоряет, а ориентация замедляет ползучесть.

1.4 Долговечность и длительная прочность

Долговечность (прочностная) τ – характеристикой полимерных материалов. до разрушения образца. Долговечность τ

Для определения значений долговечности экспериментальные данные удобно откладывать в координатах $\lg \tau - \sigma$, рис. 1.8. Из этого же графика определяют и длительную прочность как значение σ_{τ} при данном времени нагружения τ . Зависимость прочности от времени действия нагрузки проявляется для всех материалов, но особенно резко – для полимеров. До выявления этой зависимости процесс разрушения рассматривался как критическое явление, наступающее при достижении предела прочности. Такие представления не отражали истинной природы разрушения. Развитие этого процесса следует рассматривать с момента приложения нагрузки. В материале образца происходит постепенное накопление нарушений, что и определяет время его жизни (долговечность). Временная (кинетическая) концепция разрушения

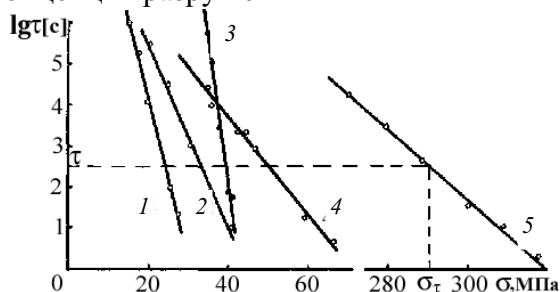


Рис. 1.8 Зависимости долговечности полимеров от напряжения: 1 – полистирол; 2 – полиметилметакрилат; 3 – полисульфон при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – полипропилен при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 – полиэтилен при $120\text{ }^{\circ}\text{C}$

зависимости $\lg \tau - \sigma$ получают на образцах при заданных постоянных напряжениях поддерживаемых с помощью устройств в соответствии с требованиями испытания деформацией ϵ . Ускоренные испытания для логарифмической зависимости обычно определяют

Рис. 1.8. Зависимости долговечности полимеров от напряжения: 1 – полистирол; 2 – полиметилметакрилат, 3 – полисульфон) полипропилен – при -40°C ; 5 – полиэтилен – при 120°C

устраняет физическое понятие предела прочности и объясняет эту характеристику как технический параметр. А именно для некоторых материалов при комнатной температуре (рис. 1.8), для других с понижением температуры ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, зависимость $\lg \tau - \sigma$ становится достаточно крутой (рис. 1.9). Это создает впечатление наличия пороговой величины разрушающего напряжения.

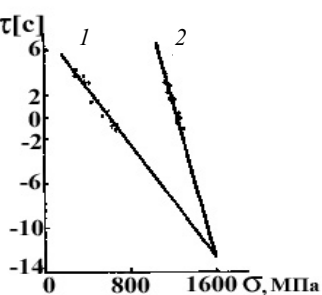


Рис. 1.9 Зависимость долговечности полиакриламида (ориентированное волокно) от напряжения при разных температурах: 1 – $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – $110\text{ }^{\circ}\text{C}$

Отсутствие предела прочности – один из основных практических результатов изучения долговечности полимеров.

Экспериментально разрывной машине в режиме напряжений. Постоянство результатов развивающейся в процессе разрыва. Длительную прочность одновременно с

ползучестью (если последняя представляет интерес). Требования к условиям испытаний и к образцам в обоих случаях одинаковы.

1.5 Твердость

Под твердостью пластмасс обычно подразумевают их способность сопротивляться внедрению других тел. Существует несколько методов определения твердости [6] по:

- 1) глубине отпечатка (Бринелю, Викерсу, Шору и др.);
- 2) сопротивлению материала царапанию (Бирбауму, Моху);
- 3) коэффициенту отскока или упругому восстановлению материала (ASTM D785).

Испытания по Роквеллу являются комбинацией 1 и 3 методов.

Чаще всего твердость оценивают отношением силы внедрения индентора к размеру отпечатка, образовавшегося при внедрении. Размеры отпечатка определяют обычно, когда образец находится под нагрузкой. При определении твердости вначале дают небольшую предварительную нагрузку для установления начального положения индентора на образце. Затем прилагается основная нагрузка и образец выдерживают под ее действием некоторое заданное время. По индикатору измеряется глубина внедрения, после чего основная нагрузка снимается. При одинаковой общей схеме многочисленные методы определения твердости пластмасс различаются по значениям нагрузок и глубин внедрения, времени приложения нагрузки и форме индентора.

В странах СНГ и большинстве европейских государств определяют твердость по Бринелю (НВ), используя формулу:

$$НВ = P / \pi Dh,$$

где P – сила, приложенная к шарик; D – диаметр шарика; h – глубина внедрения шарика в поверхность материала.

Глубина внедрения h сферического индентора в плоскую поверхность образца [7] равна

$$h = \left[\frac{3}{4} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \right]^{2/3} P^{2/3} R^{-1/3},$$

где E_1 , E_2 , μ_1 , μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона шарика и исследуемого материала соответственно; R – радиус шарика.

Если $E_1 \gg E_2$, то модуль упругости исследуемого материала можно рассчитать по глубине внедрения:

$$E_2 = \frac{3(1-\mu_2^2)P}{4h^{3/2}R^{1/2}}.$$

При внедрении сферы в плоскую поверхность радиус контактного круга составляет

$$r = \left[\frac{3}{4} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3} P^{1/3} R^{2/3}.$$

Давление в центре площади контакта можно найти из соотношения

$$P_k = \frac{3P}{2\pi r^2}.$$

Это давление в 1,5 раза превышает среднее давление по всей площади контакта.

Все указанные формулы выведены для образцов с толщиной значительно превышающей диаметр шарика.

Глубина внедрения зависит от толщины исследуемого образца [8]. Внедрение в тонкие образцы меньше. Если радиус индентора в 5 раз меньше толщины образца, то глубина внедрения не зависит от толщины [9].

Стандарты обычно регламентируют максимально допустимые глубины внедрения шарика. В этом случае для внедрения шарика можно использовать ряд последовательных

нагрузок, соотношение которых определяется отношением максимальной глубины внедрения к минимальной. Это обеспечивает перекрытие всего диапазона твердостей без дублирования. В стандарте это отношение приблизительно равно 2,7; нагрузки составляют 49, 127, 358, 961 Н, а глубины внедрения – от 0,13 до 0,35 мм. Хорошую сопоставимость данных для различных материалов обеспечивает метод определения твердости по Бринелю при одинаковой для всех материалов глубине внедрения равной, согласно ГОСТа, 0,3 мм. В методике ИСО объединены метод с одним шариком и разными нагрузками и метод с применением разных шариков, а также дана формула вычисления твердости, не зависящей от нагрузки.

В США и некоторых других странах определяют твердость по Роквеллу – непосредственно по глубине отпечатка после снятия нагрузки, что позволяет оценивать твердость прямо по шкале прибора. Поскольку для сопоставления твердостей необходимо знать диаметр внедряющегося шарика и силу, вызывающую внедрение, их кодируют, указывая рядом с показателем твердости наименование шкалы. Шкалы *R* и *L* обозначают, что твердость определялась при переходе от предварительной нагрузки 100 Н к общей 600 Н на шариках с диаметром 12,7 мм и 6,35 мм соответственно; шкалы *M* и *E* обозначают переход нагрузок от 100 Н к 4 кН на шариках с диаметрами 6,35 мм и 3,17 мм соответственно. Поскольку чем больше твердость, тем меньше глубина внедрения, показатель твердости определяют как разность между числом 150 и числом делений шкалы (цена деления 0,002 мм), на которое произошло углубление шарика при приложении основной нагрузки.

При экспресс-испытаниях, не требующих большой точности, определяют твердость по Шору с помощью затупленной иглы (усеченный конус). Показатель твердости в этом методе определяют по условной шкале (из 90 делений) в зависимости от глубины проникновения иглы в материал под действием силы, создаваемой стандартной пружиной. Среди методов определения микротвердости наиболее разработано и распространено определение твердости на приборе ПМТ-3, где в качестве индентора используется алмазная пирамида.

В табл. 1.2 приведены значения твердости полимерных материалов, определенные различными методами.

1.2 Твердость ряда пластмасс, измеренная различными методами

Материал	По Бринелю, МПа	По Роквеллу			По Бирбауму
		<i>R</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	
Полиэтилен низкой плотности	–	–151	–25	10	–
Политетрафторэтилен	35	–	–	–	–
Полиэтилен высокой плотности	–	–	–	20	–
Полиметилметакрилат	190	–	–	95	–
Ацетат целлюлозы	60	68	25	115	11,3
Полиамид 6.6	130	102	70	120	11,1
Поликарбонат	–	–	75	120	–
Поливинилхлорид	130	105	60	123	10,1
Ударопрочный полистирол	–	–	20 – 80	75	–
Полистирол	250	109	66	124	10,3
Полиформальдегид	–	–	94	120	–
Поливинилиденхлорид	–	38	–	92	8,3
Нитрат целлюлозы	140	78	23	112	9,8

Отвержденная полиэфирная смола	–	91	72	124	13,5
Отвержденная феноло-формаль-дегидная смола	475	–	–	–	–
Фенопласт с минеральным наполнителем	400	128	–	124	21,2
Отвержденная меламиноформальдегидная смола	425	130	–	129	32,4
Полиэтилентерефталат	–	–	94	120	–

Известно [10], что твердость металла и его сопротивление разрыву находятся в тесной зависимости. Для пластмасс такой зависимости не существует. Твердость пластмасс колеблется значительно меньше, чем металлов, и не связана с показателями прочности на разрыв. Она зависит от основных компонентов, входящих в состав пластмассы, и от степени полимеризации или поликонденсации связующей системы. Твердость пластмасс, как и другие физико-механические характеристики, существенно зависит от температуры (см. рис. 1.10).

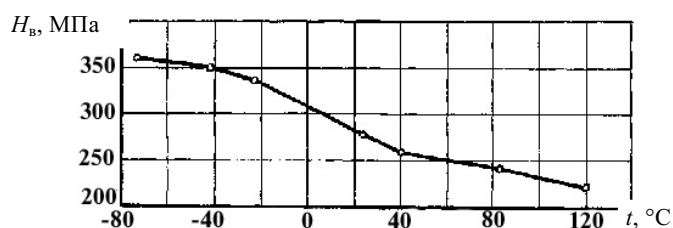


Рис. 1.10 Зависимость твердости волокнита от температуры

Рис. 1.10. Зависимость твердости волокнита от температуры. ределения твердости лакового покрытия [11]. мерой твердости служит затухание колебаний маятника [12] (что основано на связи декремента затухания с твердостью подушки) – эффект, обнаруженный еще Менделеевым [13] при изучении колебания весов и положенный им в основу дифференциального (склерометрического) маятника.

1.6 Хрупкость

Хрупкость полимеров – это способность стеклообразных и кристаллических полимеров разрушаться при малых деформациях (до реализации вынужденной высокоэластичности).

Единой количественной характеристики не существует, так как хрупкое поведение реализуется при определенном сочетании нагрузки, (продолжительности) нагружения. Граница, разделяющая области хрупкого разрушения и высокоэластичности, определяется вынужденной температурной зависимости (хрупкой прочности) и предела высокоэластичности (рис. 1.11); называется температурой хрупкости.

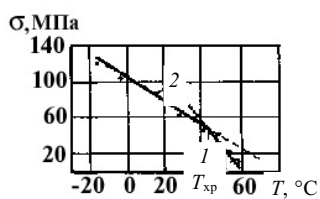


Рис. 1.11
Температурные зависимости предела вынужденной эластичности (1) и хрупкой прочности (2) при сжатии полистирола

оценивают по значению ударной оценка неоднозначна, поскольку при вязкости остается неизвестной разру- Молекулярная природа хрупкого характером теплового движения образующих макромолекулу. На основании данных ядерного магнитного резонанса (ЯМР) полагают, что при температурах, соответствующих хрупкому разрушению осуществляются лишь крутильные колебания отдельных звеньев, тогда как при более высоких температурах возможно групповое перемещение звеньев, затрудняющее разрушение, обусловленное термофлуктуационным распадом химических связей.

На практике полимерные материалы считаются хрупкими, если они проявляют хрупкость при комнатной температуре и времени нагружения не более нескольких секунд. Применение хрупких полимерных материалов возможно в исключительных случаях, если они обладают какими-либо ценными немеханическими свойствами. Для снижения хрупкости такие материалы часто модифицируют введением каучуков (ударопрочный полистирол, фенольно-каучуковые композиции). При конструировании изделий из хрупких полимерных материалов важен выбор формы изделия, при которой в нем не возникают локальные концентрации напряжения приводящие к растрескиванию. Воздействие агрессивных сред повышает хрупкость, если только среда, например, слабый растворитель, не приводит к ликвидации поверхностных трещин.

При испытаниях на хрупкость образец нагружают с постоянной скоростью при различных температурах и определяют, при каких температурах материал начнет разрушаться, не достигнув заданной деформации (ГОСТ 10995-64). Учитывая эластичность материалов и размеры образцов, выбирают такую деформацию, которая обеспечивает наилучшую воспроизводимость результатов.

За температуру хрупкости принимают ту, при которой разрушается 50 % образцов. Критерием разрушения служит деление образца на две части или появление на нем трещин. Температура хрупкости зависит от вида деформации. Большинство методов определения температуры хрупкости основано на проведении испытаний при изгибе. В различных стандартах эти определения производят: 1) сжатием петли; 2) обматыванием вокруг стержня по винтовой линии (британский стандарт); 3) смятием цилиндра из пленки вдоль продольной оси. Наиболее часто применяют консольный изгиб. При изгибе на одной поверхности удается получить в малом объеме образца большие деформации растяжения, которые приводят к его разрушению. Однако размеры деформаций на поверхности образца сильно зависят от его толщины. Для испытания образцов разной толщины используют растяжение. Образцы пленочных материалов, где важно определить хрупкость в разных направлениях, вырезают с разной ориентацией относительно осей анизотропии и определяют показатель для каждого направления.

При повышении скорости деформации повышается температура хрупкости. Стандарты ASTM и ИСО рекомендуют испытания при сравнительно высокой скорости (2 м/с)

характеристики не поведение реализуется при температуры и скорости Граница, разделяющая вынужденной точкой пересечения кривых разрушающего напряжения

вынужденной абсцисса этой точки Иногда хрупкость вязкости, однако, такая определении ударной шающаяся деформация.

разрушения связана с кинетических единиц,

английский стандарт – при малой. ГОСТ 10995-64 предусматривает две скорости (0,075 и 2 м/с) с тем, чтобы можно было определить не только температуру хрупкости, но и тенденцию её изменения с изменением скорости (разница между двумя вариантами, предусмотренными ГОСТ 10995-64, достигает 10 – 20 °С). Испытания проводят в жидкой или воздушной среде.

1.7 Теплостойкость и термостойкость

Теплостойкость характеризует способность пластмасс сохранять свои механические свойства при непрерывном повышении температуры и выражается температурой при которой под действием заданной нагрузки деформация достигает определенного значения. Методика определения теплостойкости состоит в следующем. Образец, находящийся под деформирующей нагрузкой, непрерывно нагревают со скоростью около 1 °С/мин. Температура при которой деформация достигает заданного значения (рис. 1.12) характеризует теплостойкость. Оценивая теплостойкость по измерению деформаций при растяжении в общую деформацию заметный вклад вносит тепловое расширение.

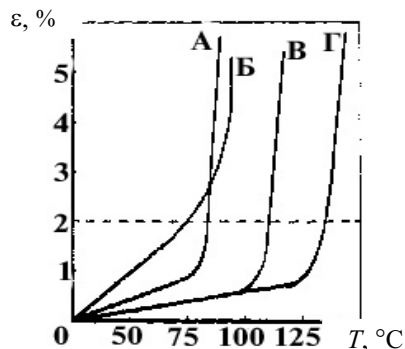


Рис. 1.12 Определение теплостойкости по термомеханическим кривым (скорость нагрева 2 °С/мин):

- А – жесткий поливинилхлорид (напряжение в образце 350 Па);
- Б – полиэтилен низкой плотности (напряжение 350 Па);
- В – сополимер стирола и акрилонитрила (175 Па);
- Г – пластифицированный ацетат целлюлозы (175 Па).

Теплостойкость оценивают температурой при которой удлинение достигает 2 % [14]

должен сильно размягчиться, чтобы игла могла внедриться на глубину 1 мм. Поэтому показатель теплостойкости по Вика обычно значительно превышает теплостойкость, определенную другими стандартными методами (см. табл. 1.3).

1.3 Теплостойкость некоторых полимеров измеряемая различными методами

Полимер	Теплостойкость по Вика, °С	По Мартенсу, °С
Поливинилацетат	37	–
Винипласт	90 – 95	65 – 70
Политетрафторэтилен	100 – 110	–
Полиметилметакрилат	105 – 115	60 – 80

Поливиниловый спирт	120	–
Поли-2,5-диметилстирол	142 – 149	112 – 125
Полипропилен	149	–
Поликарбонат на основе дифенилпропана	150 – 160	115 – 125
Поли- α -капроамид	160 – 180	50 – 55
Поли-4-метилпентен-1	179	–
Полистирол	–	80

Теплостойкость существенно зависит от нагрузки и длительности ее воздействия: чем больше нагрузка и время ее действия, тем ниже теплостойкость. При этом для стеклообразных полимеров теплостойкость не может превышать температуру стеклования, для кристаллических – температуру плавления.

Часто оценивают теплостойкость материалов при различных нагрузках. Предусмотренные ГОСТом три нагрузки позволяют оценивать не только теплостойкость, но и характер ее падения с увеличением нагрузки.

Более общим методом оценки теплостойкости может служить определение области температур и напряжений, в которой пластик остаётся твердым в течение определенного времени. При этом образец подвергают одноосному сжатию до заданной деформации, после чего повышают температуру с постоянной скоростью. На графике зависимости напряжения от температуры наблюдается максимум, обусловленный тем, что сначала напряжение в материале увеличивается, вследствие теплового расширения, а затем падает из-за размягчения и резкого ускорения релаксационных процессов. Варьированием нагрузок определяют кривую, представляющую собой геометрическое место максимумов; эта кривая разграничивает область напряжений и температур, в которой теплостойкость сохраняется и область, соответствующую потере теплостойкости. Для полимеров различных классов положение этой кривой существенно различается, рис. 1.13.

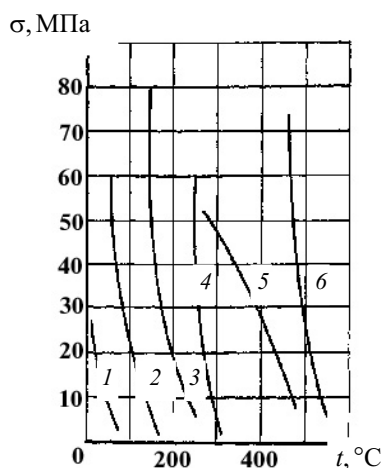


Рис. 1.13 Границы теплостойкости по напряжению и температуре для полиметилметакрилата (1), поликарбоната (2), полиакрилата (3), полиамида (4), полипиромеллитимида (5), натрийсиликатного стекла (6)

Поскольку размягчение – процесс протекающий во времени, то физически обоснованной характеристикой теплостойкости может быть продолжительность τ_f действия постоянного напряжения σ , в течение которого деформация образца не превышает заданную величину. При поддержании постоянной деформации ϵ характеристикой теплостойкости может служить время τ_p , в течение которого напряжение в образце остается выше заданного значения. Значения τ_f и τ_p зависят от температуры и величин σ и ϵ . Оценка теплостойкости по τ_f и τ_p весьма трудоемка и может быть рекомендована только для исследовательских целей.

Теплостойкость может повышаться следующими способами: усилением меж- и внутримолекулярного взаимодействия за счет насыщения макромолекулы полярными группами, ароматическими ядрами, конденсированными циклами; упорядочением надмолекулярной структуры, в частности повышением степени кристалличности; использованием исходных мономеров с симметричной структурой; образованием поперечных химических связей и увеличением степени сшивания; введением активных наполнителей и др.

Термостойкость полимеров – это их способность сохранять неизменным химическое строение при повышении температуры. Изменение химического строения полимеров при нагревании может быть связано как с их деструкцией, так и со структурированием, причем оба эти процесса, как правило, сосуществуют; процесс, проходящий с большей скоростью, определяет характер химических превращений. Для оценки свойств эластомеров термин термостойкость обычно не используют.

Термостойкость определяют методами термогравиметрии и дифференциального термического анализа. При использовании термогравиметрии испытания проводят как в изотермических, так и в неизотермических условиях, то есть при непрерывном повышении температуры с определенной скоростью. В этом случае количественной характеристикой термостойкости является (табл. 1.4) температура T_0 при которой начинается интенсивная потеря массы образца или температура при которой потеря массы составляет определенную долю от исходной массы образца, например, 0,5 ($T_{0,5}$).

Таблица 1.4

Полимер	T_0 , °C	$T_{0,5}$, °C
Поливинилхлорид	170	270
Полипропилен	300	380
Поли(2,2-м-фенилен-5,5-добензоксазол)	300	530
Полистирол	310	365
Полиэтилен	320	405
Поливинилфторид	350	390
Политетрафторэтилен	400	500
Поли-м-фенилен-2.5-оксадиазол	410	550
Полиарилат терефталевой кислоты и фенолфталеина	440	550

Поли-(<i>n</i> -бифениленоксид) – 1, 3, 4 – оксадизол	470	650
Пиррон, полученный из пиромеллитового ангидрида и 3, 4, 3, 4 – тетраминодифенилового эфира в растворе полифосфорной кислоты	510	900*
Полипиромеллитимид	520	1000*

* При нагревании до этой температуры не достигается потеря половины массы образца

Термостойкость зависит от продолжительности выдержки полимера при повышенной температуре. Поэтому более полная характеристика термостойкости может быть получена при термической термогравиметрии, когда определяют изменение массы во времени при постоянной температуре. Такие измерения в широких интервалах температур и длительностей их воздействия позволяют оценить термостойкость в любом температурно-временном режиме.

При использовании метода дифференциального термического анализа, основанного на том, что химические превращения полимера сопровождаются тепловыми эффектами, возможно более точное определение температуры начала интенсивных химических превращений макромолекул.

Особое значение при характеристике термостойкости имеет среда в которой находится полимер. В инертном газе полимеры, как правило, более устойчивы к нагреванию, чем на воздухе. Присутствие кислорода ускоряет деструкцию (термоокислительную). В ряде случаев в присутствии кислорода наблюдается увеличение массы образца, вследствие присоединения кислорода к полимеру.

Необходимо обратить внимание на то, что под термостойкостью полимера иногда понимают температуру при которой начинают заметно изменяться его механические свойства. Поскольку эти изменения могут быть обусловлены как химическими, так и физическими изменениями структуры полимера, эта температура может быть характеристикой как термостойкости, так и теплостойкости, прямой связи между которыми не имеется. Действительно, для многих твердых полимеров (полиэтилен, полипропилен, полиметилметакрилат, полистирол) потеря теплостойкости (размягчение) происходит при значительно более низких температурах, чем потеря термостойкости. В этом случае верхний температурный предел работоспособности полимерного тела определяется его теплостойкостью, а не термостойкостью. Для ряда полимеров (например, полипиромеллитимидов) потеря теплостойкости и термостойкости происходит почти при равных температурах. Для некоторых полимеров (целлюлоза, поли-*n*-фениле, полиметилиденфталид) термостойкость теряется при температурах, при которых материал остается теплостойким вплоть до химического изменения. Работоспособность такого полимерного тела ограничивается термостойкостью.

Для повышения термостойкости в полимеры вводят стабилизаторы, в частности, антиоксиданты, которые замедляют термическую и термоокислительную деструкции.

1.8 Ударное разрушение

Существует большая группа испытаний, позволяющих оценить механические свойства материалов при ударном воздействии со скоростью 2 – 4 м/с. Эти испытания проводят на маятниковых копрах, рис. 1.14. Образец, расположенный на опорах разрушается под действием свободно падающего маятника, вращающегося вокруг горизонтальной оси. Так как измерение усилий и деформаций при этих скоростях усложняет испытания, обычно определяют работу, затраченную на разрушение (по разности энергий маятника до и после удара по образцу). Энергия удара расходуется на зарождение трещины и на ее развитие.

В СНГ и других странах это испытание проводят при ударном изгибе образца свободно лежащего на двух опорах, ударом молота по его середине (по Шарпи). При этом определяют ударную вязкость по формуле

$$a = A / F,$$

где A – работа затраченная на разрушение образца, F – площадь поперечного сечения образца в месте надреза.

Ударная вязкость определяется как прочностными, так и деформационными свойствами материала, поскольку работа разрушения представляет собой интеграл напряжений σ по деформациям l

$$a = \int_0^{l_p} \sigma dl = c \sigma_p l_p, \quad (1.7)$$

где l_p – предельная деформация при ударе, σ_p – ударная прочность, C – ко-эффициент, значения которого определяются видом диаграммы $\sigma - l$ и изменяется от 0,5 до 1. Отсюда ясно, что неверно отождествлять ударную вязкость с ударной прочностью.

При хрупком разрушении (малые значения l_p) ударная вязкость мала; при переходе от хрупкого разрушения к пластическому ударная вязкость резко увеличивается.

Влияние на ударную вязкость температуры, состава и структуры материала также зависит от того, как эти факторы влияют на σ_p и l_p . При повышении температуры σ_p уменьшается, а l_p растет, и их произведение (интеграл) может изменяться по-разному. Наполнение упрочняет материал, но уменьшает его предельную деформируемость, пластификация – наоборот. Большие значения ударной вязкости, как видно из формулы (1.7), означают, что материал и достаточно прочен, и эластичен, а малые значения, что материал либо непрочен, либо очень хрупок.

Испытания при очень малой энергии разрушения ведут при скорости движения маятника около 2 м/с (не стандартизована); наиболее часто используется скорость 2,9 м/с; при большой ударной прочности материала – 3,8 – 4,0 м/сек. Для определения влияния концентраторов напряжения на разрушение эластичных материалов испытывают образцы с надрезом на 1/3 толщины. Геометрия образца оказывает существенное влияние на ударную вязкость. Для тонких образцов ударная вязкость больше, чем для толстых.

В США, Англии и других странах используют испытания на ударный изгиб консольно закрепленного образца с надрезом, по Изоду, (рис. 1.5).

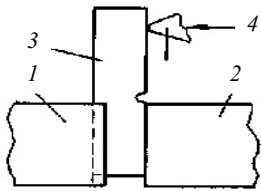


Рис. 1.15 Схема крепления образца при испытании на ударный изгиб по Изоду:

- Изоду:**
 1 – неподвижная опора;
 2 – подвижная опора;
 3 – образец; 4 – ребро ударного молота маятника

При высокой пластичности (например, в случае некоторых термопластов) определение ударной вязкости затруднительно: образцы при ударе не разрушаются, а лишь прогибаются. В таких случаях ударную вязкость a_n определяют на образце с надрезом, сделанным примерно на 1/3 его толщины. Отношение $k = a_n / a$ называется коэффициентом ослабления. В общем случае при наличии надреза разброс значений при определении ударной вязкости значительно меньше, чем без надреза, так как фиксирует очаг разрушения.

Разрушение пластичных материалов можно осуществить и без надреза, путем многократного ударного изгиба, определяя зависимость a от числа ударов; при этом материал характеризуется значением a_m соответствующим определенному числу ударов (обычно порядка $10^5 - 10^6$). Отношение a_m / a характеризует сопротивление утомлению при ударе; при $5 \cdot 10^5$ ударах его значение может изменяться от 0,001 до 0,3. Состав материала меньше влияет на a_m , чем на a . В табл. 1.5 приведены значения ударной вязкости некоторых пластмасс.

Достаточно широко проводят специальные испытания на удар: по Динстату (для малых образцов); на ударное растяжение образцов, не разрушающихся при изгибе; на ударный прорыв пленки падающим шаром. Испытание на удар по Динстату состоит в определении работы разрушения при ударе молотом по пластине размером 10×15 мм (толщина 1,5 – 4,5 мм) вдоль линии ее закрепления в зажиме.

Таблица 1.5

Материал	a , кДж/м ²	a_n , кДж/м ²	a_m , кДж/м ²
Поликарбонат на основе бисфенола А	150	40	–
Полигексаметиленсебацинамид	40 % образцов не разрушается	3	–
Полиамид П-АК7	100 % образцов не разрушается	3	–
Полиэтилен низкой плотности	100 % образцов не разрушается	16	2
Полипропилен	80	–	–
Политрифторхлорэтилен	80 % образцов не разрушается	8	–
Политетрафторэтилен	100 % образцов не разрушается	23	–
Полиметилметакрилат	15	–	4
Винипласт	170	15	–
Аминопласты	5 – 11	1 – 2	–
Волокнит на основе хлопковой целлюлозы	10	9	–

Фенопласт К-18-56	4	3	1
Фенопласт, модифицированный каучуком (ФКП-1)	11	4	1
Стеклопластик АГ-4С	100	–	4

(a , a_n , a_m – соответственно образцы без надреза, с надрезом и после нагружения $5 \cdot 10^5$ ударами)

Ударная вязкость, в отличие от прочности, может служить лишь для сравнительной оценки материалов и не используется в инженерных расчетах. Ее значение сильно зависит не только от формы и размеров образца, но и от геометрической схемы испытания. Так, при повороте стандартного бруска на 90° значение a изменяется в 1,5 – 2 раза. Менее чувствительна к габаритам поперечного сечения ударная работа ударного разрушения Z :

$$Z = \frac{\Delta A}{W} = \frac{6\Delta A}{bh^2} = \frac{6A}{h} \approx \sigma_{\max},$$

где W – момент сопротивления поперечного сечения образца; σ_{\max} – максимальное напряжение в момент разрушения образца, эквивалентное прочности при изгибе. На некоторых копрах, помимо устройств для регистрации работы разрушения, устанавливают датчики и электронные регистраторы для измерения деформации образца при ударе и записи кривой усилие – время.

1.9 Релаксация напряжений

Релаксация напряжений характеризует поведение материала при длительных механических воздействиях. Для оценки релаксации напряжений используют различные методы. Они зависят от жесткости полимера.

В случае эластичных материалов измерения производятся на простых приборах. Для жестких полимеров они несколько усложняются. Это связано с необходимостью точных измерений напряжений и малых деформаций, а жесткость образца соизмерима с жесткостью прибора, поэтому незначительные деформации прибора и проскальзывание образца в зажимах приводят к значительной погрешности.

Испытания на релаксацию напряжений наиболее часто проводят при постоянной деформации растяжения или сжатия (последний вид нагружения нередко оказывается предпочтительным, так как в этом случае можно исследовать малые количества материала и избежать методических трудностей, связанных с креплением образца).

Для исследования релаксационных свойств образец деформируют на заданное значение, которое затем поддерживают строго постоянным; падение напряжения регистрируют во времени. Релаксационные свойства материала наиболее полно характеризуются семейством

кривых напряжение – время, полученных при разных значениях деформаций и температуры. Кривые напряжение – время выражают аналитически и графически.

Общие принципы поведения полимеров при релаксации напряжений могут быть проиллюстрированы с помощью простых моделей. Основное отличие моделей от реальных полимеров обусловлено временем их деформирования. В моделях процессы деформирования охватывают период в пределах одного десятичного порядка, тогда как в полимерах – в пределах нескольких десятичных порядков.

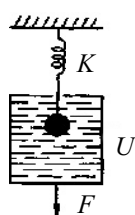


Рис. 1.16
Релаксация
напряжения в
вязкоупругой
модели
Максвелла ($\tau = 1$
с)

Простейшей моделью, иллюстрирующей релаксацию напряжений,

является модель Максвелла, рис. 1.16. Она описывается уравнением

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = e^{-Et/\eta} = e^{-t/\tau},$$

где $\tau = \eta / E$ – время релаксации.

Аппаратура для испытаний на релаксацию напряжений должна отвечать следующим требованиям: силоизмеритель должен обладать максимальной жесткостью, чтобы не исказить кривую релаксации напряжений, а нагружающее устройство должно обеспечивать максимально быстрое приложение нагрузки, свободное от инерционных перегрузок (для определения релаксации напряжений при малых временах). Образцы для испытания, рабочие органы испытательных машин и условия испытания обычно выбирают в зависимости от вида деформации, как при определении вида зависимости напряжение – деформация. Из серийных приборов, выпускаемых в СНГ для испытания на релаксацию напряжения, используют релаксометр осевого сжатия и универсальные испытательные машины с электронным силоизмерителем.

Хотя испытания на релаксацию напряжений пока не стандартизированы, их широко применяют как при разработке пластмасс, так и при инженерной оценке (например, при испытании уплотняющих материалов).

1.10 Усталостная прочность

Усталостное разрушение материалов связано с циклическими изменениями деформаций или напряжений. Усталость характеризуется выносливостью – числом N циклов нагружения до разрушения при заданном σ . Напряжение σ_N при котором происходит разрушение материала после заданного числа циклов (для полимеров обычно $10^6 - 10^7$ циклов), называется усталостной прочностью. Зависимость между N и σ_N в режиме $\sigma = \text{const}$ или между N и ϵ_N в режиме $\epsilon = \text{const}$ обычно выражают графически в виде кривых усталости (см. рис. 1.17). Часто эти зависимости могут быть выражены аналитически. Так, для эластомеров практически при всех нагрузках справедливо соотношение:

$$\sigma_N = \sigma_1 N^{-1/\beta}, \quad (1.8)$$

где σ_1 – разрушающее напряжение при однократном нагружении (исходная прочность), β – эмпирический показатель, обычно достаточно стабильный в широком диапазоне изменения N ; для резин $\beta = 2 - 10$.

Формуле (1.8) соответствует линейность кривой усталости в координатах $\lg \sigma_N - \lg N$. Эта формула справедлива и для определения выносливости многослойных резин и резинотканевых материалов до отслаивания. В режимах $\epsilon = \text{const}$ и $W = \text{const}$ усталость описывается аналогичными выражениями, причем β практически не зависит от режима испытания.

Для волокон и пленок при не слишком малых нагрузках, а также пластмасс при небольших частотах линейность кривой усталости наблюдается в координатах $\sigma_N - \lg N$, что может быть выражено в виде формулы

$$\sigma_N = \sigma_1 - A \lg N,$$

где A – эмпирическая константа.

Для пластмасс выносливость может быть выражена и в виде соотношения

$$N = C e^{D/\sigma_N},$$

где C и D – эмпирические константы.

Количественной характеристикой сопротивления усталости может служить также коэффициент усталостной прочности $K = \sigma_N / \sigma_1$, причем $0 \leq K \leq 1$. Поскольку практически любая нагрузка может привести к усталостному разрушению полимерного

материала при достаточно большом N , K может принимать значения от 1 до 0.

Если при многократном нагружении фиксируется накопление остаточных деформаций $\varepsilon_{\text{ост}}$ (например, при изгибе волокон или сжатии пластмасс) усталость характеризуется деформационной выносливостью $N_{\text{деф}}$ – числом циклов нагружения до достижения заданного значения $\varepsilon_{\text{ост}}$. Для $N_{\text{деф}}$ справедливо эмпирическое выражение

$$N_{\text{деф}} = \left(\varepsilon_{\text{ост}} / \varepsilon'_{\text{ост}} \right)^{\varphi},$$

где $\varepsilon_{\text{ост}}$ – остаточная деформация при однократном нагружении, φ – эмпирическая константа, аналогичная β в формуле (1.8).

1.11 Фрикционные свойства

Под фрикционными понимают свойства материала, проявляющиеся при трении и характеризующиеся коэффициентом трения и показателем износостойкости. Эти же показатели характеризуют и антифрикционные свойства. Износ тесно связан с характером трения и с противоусталостными свойствами материала. Интенсивность трения определяет не только скорость разрушения соприкасающихся поверхностей при их взаимном перемещении, но и силу, необходимую для этого перемещения, связанного с преодолением адгезионных связей и с многократной деформацией пластмасс в области контакта их с микровыступами (шероховатостью) контртела.

Коэффициент трения μ характеризует сопротивление двух тел, соприкасающихся под воздействием нормальной силы, перемещению друг относительно друга под воздействием тангенциальной силы $\mu = F/P$, где F и P – соответственно тангенциальная и нормальная силы. При испытании на трение унифицируют не только внешние условия (нормальную нагрузку, температуру), но и опорную поверхность (контртело), условия ее контакта с испытуемым телом (шероховатость, смазку), кинетику (время покоя или скорость движения) и кинематику; (скольжение, качение, а также качение с заданным проскальзыванием). В СНГ стандартизировано определение коэффициента трения пластмасс при скольжении по стали со скоростью 0,3 м/с. Испытание можно производить на машине типа Грассели, используемой для испытания резин. Кроме того, имеется стандартный метод для испытания тормозных материалов, в том числе пластмасс, на фрикционную теплостойкость. При этом определяют коэффициент трения при вариации скоростей и нагрузок в диапазоне характерном для работы тормозов.

Истирание (износ) характеризует интенсивность разрушения поверхностного слоя пластмасс при трении. Поэтому при испытании на этот показатель унифицируют те же факторы, что и при трении. Истирание I выражают убылью линейных размеров или объема ΔV образца на единице длины пути трения ΔL или за счет единицы работы трения W :

$$I_w = \frac{\Delta V}{W}, \quad I_m = \frac{\Delta V}{\Delta L}, \quad I_h = \frac{\Delta h}{\Delta L}.$$

Широко распространены разнообразные специальные методы на сопротивление истиранию (износостойкость), проводимые с учетом условий работы материала в том или ином виде изделий (в зубчатых передачах, землеройных машинах транспортных механизмах горнорудного оборудования, тормозах, подшипниках покрытиях полов и др.). Некоторые из этих методов стандартизованы. Износостойкость пластмасс оценивают по истиранию на поверхностях с острыми (абразивные зерна) и тупыми (металлическая сетка) выступами.

В СНГ стандартизовано испытание на абразивное истирание пластмасс при их скольжении по шлифовальной шкурке со скоростью 0,3 м/с. Это испытание может быть проведено на серийных машинах типа Шоппер, АПГИ или МПИ-2. Кроме того, пластмассы можно испытывать на истирание при их скольжении по стали и

чугуну при разных скоростях и нагрузках, а также при качении с 25 % проскальзыванием.

В США для испытаний пластмасс на истирание применяют следующие стандартные методы: 1) истирание абразивным полотном с закрепленными абразивными частицами; 2) истирание с незакрепленным абразивом, насыпанным на чугунный диск; 3) истирание на машине (колесо Табера), где износ осуществляется двумя абразивными дисками; мера износа – потери объема, а для прозрачных пластиков – изменение доли рассеиваемого света после истирания; 4) истирание струей абразива для пластмасс с глянцевой поверхностью.

Все эти стандартные методы основаны на использовании абразивных частиц, которые вызывают микрорезание пластмасс. Стандартные испытания, вызывающие тенденцию к усталостному истиранию, можно производить по методике, согласно которой истирание материала характеризуют величинами I_1 и α , входящими в формулу $I = I_1 p^\alpha$. Эта формула связывает износ I с давлением p (I_1 – значение износа при давлении, принятом за единицу, α характеризует влияние давления на истирание). При усталостном истирании $\alpha > 1$, при абразивном истирании $\alpha = 1$; в последнем случае износ можно определять при любой нагрузке, не вызывающей существенного разогрева.

2 МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТМАСС. ВЫЯВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ

2.1 Стенды для определения долговечности при растяжении

Изучение долговечности полимерных материалов при одноосном растяжении проводится на многопозиционном стенде, позволяющем одновременно испытывать 6 – 12 образцов.

Принцип работы приборов данного типа прост (см. рис. 2.1). К образцу, нижний конец которого закреплен в неподвижном захвате, а верхний – в подвижном захвате, через рычаг прикладывается груз. Под действием груза рычаг поворачивается и поворачивает сидящий с ним на одной оси блок. На блок наматывается гибкая тяга, соединенная с подвижным захватом, которая передает нагрузку на испытуемый образец.

Простой рычаг в виде круга служит лишь для увеличения плеча. С. Н. Журков и его последователи применяли фигурный рычаг, профиль которого выполнен с таким расчетом, чтобы при повороте рычага его плечо уменьшалось, компенсируя уменьшение сечения образца при его удлинении в целях сохранения постоянного напряжения при заданной нагрузке. Рычаг рассчитывается в предположении сохранения объема материала, то есть значения 0,5 для коэффициента Пуассона [14], [15].

Однако для пластмасс, в отличие от резин, такое допущение неверно. К тому же, при хрупком разрушении удлинение образца и изменение его сечения ничтожно, поэтому отпадает необходимость в фигурном рычаге. То же относится и к определению времени допустимой ползучести. Что же касается времени до образования шейки (критическая ползучесть), то удлинения существенны и объем твердых полимерных материалов изменяется.

Рычаг тщательно балансируется положением противовеса или натяжением гибкой тяги. Автоматическая запись деформационных кривых, по которым рассчитывается долговечность, производится с помощью электронного 12-точечного потенциометра.

Запись сразу двенадцати кривых обеспечивается за счет поочередного автоматического подключения к потенциометру каждого из двенадцати датчиков. Таким образом можно записывать кривые при временах испытания существенно больших, чем период обегания скользящим контактом потенциометра всех датчиков деформации. При небольших долговечностях (порядок секунд) образец разрушится раньше, чем датчик, фиксирующий деформацию данного образца, будет снова подключен к потенциометру. Поэтому при малых долговечностях из потенциометра вынимается шестеренка, приводящая в движение печатающий механизм. Каждый из датчиков подключается к потенциометру поочередно, а диаграммная лента пускается с максимальной скоростью. Деформационные кривые в этом случае записываются с помощью пера.

Для создания повышенных или пониженных температур образец помещают в цилиндрическую термо-камеру. Такая форма камеры устраняет градиент температуры между образцами. Стабильность температуры во времени составляет $\pm 1^\circ\text{C}$.

Стенд для испытания полимерных материалов на долговечность при низких температурах. Данный стенд позволяет определять долговечность полимерных пленок при температурах в интервале от 0 до -196°C . Принципиальная схема его представлена на рис. 2.2. Испытания полимеров проводятся в среде газообразного азота с точностью измерения и регулирования температуры $\pm 1^\circ\text{C}$. Малый объем криокамеры (230 см^3) со специальным прижимным устройством позволяет сосудом Дьюара объемом 15 л поддерживать температуру -184°C в течение 150 мин.

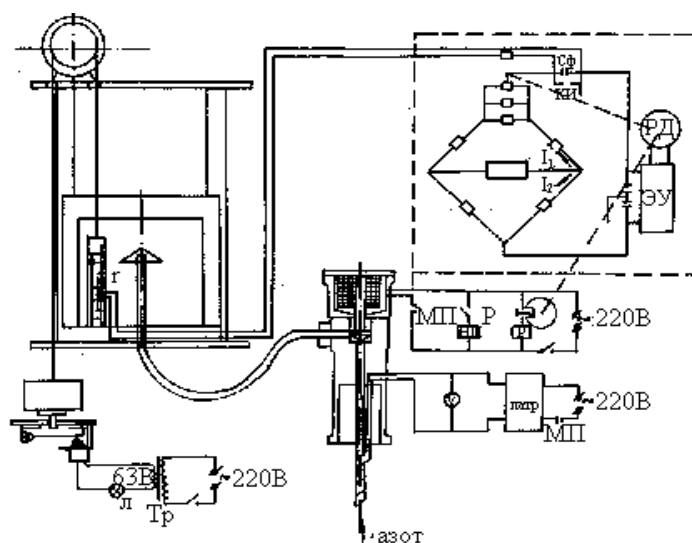


Рис. 2.2 Принципиальная схема устройства для измерения долговечности полимеров

при низких температурах

Для измерения температуры ниже 0 °С обычно применяют платиновые термометры сопротивления ГР21 или ГР22, но в данном случае их использовать невозможно из-за малых размеров криокамеры. Поэтому выбрана компенсационная схема (рис. 2.2), в качестве датчика в которой используется термопара, а вторичного прибора – потенциометр. Градуирование хромель-копелевой термопары проведено согласно [16].

Для регулирования температуры использована следующая автоматическая схема [17] (рис. 2.2). На горловине сосуда устанавливается электромагнитный клапан, а внутри сосуда помещается нагреватель для испарения азота. Через трубку, на которую намотан нагреватель, азот поступает в клапанное устройство. Клапан, втянутый в соленоид, дает возможность газообразному азоту пройти через соединительную трубку и поступить в камеру. С помощью воронки он направляется на образцы. Так как образцы расположены по диаметру, то градиент температуры между ними практически отсутствует.

Принцип работы испытательной секции прост: к образцу, нижний конец которого закреплен в неподвижном захвате, а верхний в подвижном, через тягу и ролик прикладывается груз. Данный вариант испытательной секции устраняет, во-первых, возможность возникновения поперечных напряжений в образце за счет свободного подвеса зажимов (рис. 2.3), а во-вторых, крутящий момент с помощью направляющих пластин. Так как при хрупком разрыве изменением поперечного сечения образца можно пренебречь, то, следовательно, напряжение в образце в процессе испытания постоянно.

Стенд позволяет одновременно испытывать 6 образцов при нагрузках от 0 до 0,3 кН при минимальной долговечности 1 с. Допустимая относительная погрешность величины расчетной нагрузки равна +3 %. Для плавного нагружения образца в стенде предусмотрено специальное рычажное устройство. Момент обрыва образца фиксируется с помощью системы сигнализации, состоящей из шести лампочек, шести концевых выключателей и понижающего трансформатора, подающего напряжение 6,3 В. При обрыве образца груз, опускаясь через стальную пластину, нажимает на кнопку концевого выключателя и замыкает его контакты. На панели загорается лампочка порядковый номер которой соответствует номеру испытываемого образца.

2.2 Стенд для определения долговечности при сложных видах статического нагружения

Изучение долговечности при изгибе, сжатии и срезе [18] проводились на стандартном стенде, предназначенном для испытания твердых тел на кратковременный изгиб [19]. Этот стенд представляет собой гидравлическое устройство с вариацией скоростей нагружения и маятниковым силоизмерителем с пределами измерения до 0,5; 1 и 2,5 кН.

При испытаниях на длительный изгиб образец при достижении заданной нагрузки фиксируется. Необходимую нагрузку P , задаваясь напряжением σ , находят по известным

формулам: для изгиба $P = \frac{4\sigma\pi b h^2}{L}$, для сжатия

$P = \frac{\sigma\pi d^2}{4}$ и среза $P = \sigma\pi dh$ или $P = \sigma bh$, где L

– длина образца, b – ширина, h – высота, d – диаметр.

Для испытаний на длительное сжатие¹ и срез изготовлены специальные накладки (см. рис. 2.4). При срезе они выполнены в двух вариантах: в виде поршня в цилиндре (рис. 2.4, б), обеспечивающего срез испытуемого материала по замкнутому контуру (окружности), и в виде гильотинных ножей (рис. 2.4, в), обеспечивающих срез по плоскости (прямой линии). Для наблюдения за ходом образования и прорастания трещин

а)

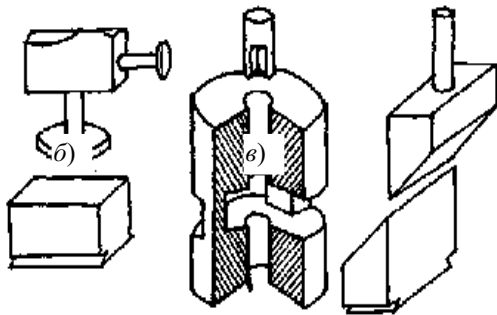


Рис. 2.4 Приспособления для испытания

пластмасс на долговечность:
а – при сжатии; б, в – при срезе

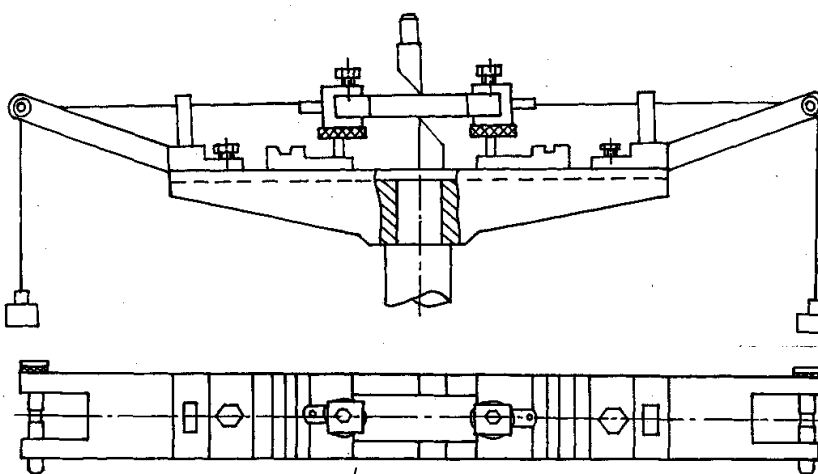
в зоне нагружения используется микроскоп, который установлен на штативе в непосредственном контакте с образцом.

Установка для испытания хрупких пластмасс на длительное кручение представляет собой шестипозиционное механическое устройство рычажного типа [20]. Для создания повышенных температур используется накладная термокамера, конвективно подающая тепло к испытываемым образцам. Равномерность обогрева всех шести образцов достигается радиальным расположением испытательных секций. Постоянство температуры образца в процес

процес
точнос

Пр
предст
закреп
стержн

По
практи
шквив
окруж
дюралл
равном



и из рис. 2.5. Образец
ром в утонении 2 мм. Для
ю диаметру и шлифуется

качения, что позволяет
ение производится через
и угла закручивания по
). Шкив изготовлен из
вливаются 6 одинаковых

Рис. 2.6 Устройство для испытания пластмасс на долговечность

при одновременном растяжении и срезе: 1 – подвижной столик; 2 – направляющие; 3 – образец; 4 – подвижные зажимы

На стенде для испытания твердых тел¹ и изгибе можно определять долговечность пластмасс при одновременном растяжении и срезе [21]. Для этого (рис. 2.6) на подвижном столике 1 с двух сторон установлены направляющие 2, по которым скользит тросик с грузом P . Подвешенные с двух сторон одинаковые грузы уравнивают образец 3, закрепленный в подвижных зажимах 4. Срез осуществляется гильотинным ножом по середине рабочего

¹При испытании на сжатие образцы большинства пластмасс при нагружении не разрушаются, а образуют "бочку", которая с ростом нагрузки расширяется, т.е. напряжение в процессе испытания изменяется. Разрушение при сжатии наблюдается [18] только для несовместимых механических смесей.

участка образца. Приложение растягивающей нагрузки с двух сторон исключает сжатие в области среза. Варьируя напряжения растяжения и среза, можно изменять долю каждого компонента напряжения, обеспечивая их заданное соотношение.

2.3 Установка для прецизионного определения скорости ползучести

Для записи кривых ползучести обычно используются механические устройства и электрические датчики деформаций (емкостные, индукционные) [22]. Последние имеют чувствительность порядка $2 \cdot 10^{-4}$ мм, что достаточно для прецизионного определения скорости ползучести. Однако в ряде случаев электрические методы измерения неудобны из-за нестабильности работы и нелинейности характеристик датчиков.

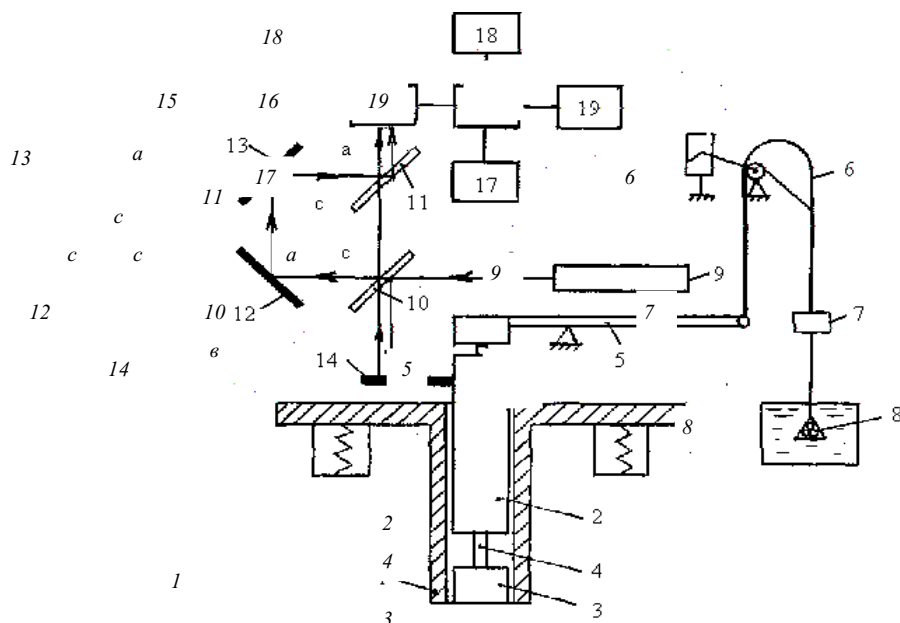


Рис. 2.7 Схема установки: 1 – цилиндр; 2 – подвижный пуансон; 3 – неподвижный пуансон; 4 – образец; 5 – рычажное устройство; 6 – фигурный рычаг; 7 – груз; 8 – масляный демпфер; 9 – лазер; 10; 12 – неподвижные зеркала; 11; 13 – юстировочные зеркала; 14 – подвижное зеркало; 15 – фотоприемник; 16 – усилитель; 17 – осциллограф; 18 – самописец; 19 – частотомер

В физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе для регистрации скорости ползучести использован интерферометр смещения Майкельсона [23], который введен в обычную установку для исследования ползучести (при $\sigma = \text{const}$) в режиме сжатия [24]. Схема установки показана на рис. 2.7.

Механическая часть установки состоит из цилиндра 1 с пуансонами 2 (подвижный) и 3 (неподвижный), между которыми устанавливается образец 4. Подвижный пуансон шарнирно соединен с рычагом нагружающего устройства 5. Усилие на образец передается через фигурный рычаг 6. Образцы имеют форму цилиндра с отношением диаметра к длине 1:2. Кривые ползучести записываются на диаграммную ленту барабана с часовым механизмом.

Непрерывная регистрация скорости ползучести в процессе деформации производится интерферометрической приставкой. Приставка состоит из лазера 9, двух неподвижно закрепленных зеркал 10, 12, двух юстировочных зеркал 11, 13 и подвижного зеркала 14. Последнее закреплено на подвижном пуансоне, связанном с образцом. Лазерный луч делится полупрозрачным зеркалом 10 на два равных по интенсивности пучка, один из которых (С) посылается на неподвижные зеркала 12, 13, а другой (В) – на подвижное зеркало 14. На полупрозрачном зеркале 11 оба луча вновь соединяются в один. Суммарный пучок интерферирующих лучей направляется на фотоприемник.

При деформации образца зеркало 14 движется вместе с пуансоном, и свет, отраженный от него, изменяет частоту (луч α) вследствие эффекта Доплера. Интерференция исходного луча (C) и луча, испытавшего доплеровский сдвиг (α), приводит к появлению низкочастотных биений в луче ($C\alpha$), которые в фотоприемнике 15 преобразуются в электрические колебания частоты. Сигнал с фотоприемника через усилитель 16 подается на осциллограф 17, самописец 18, частотомер 19.

Скорость движения зеркала 14 (скорость ползучести v) связана с частотой колебаний ν формулой

$$v = (\lambda_0 / 2) \nu,$$

где λ_0 – длина волны луча (6328 А). Низкие частоты (до 1 Гц) записываются на ленту самописца. Более высокие частоты регистрируются с помощью осциллографа или частотомера. По числу колебаний на интерферограмме N определяется деформация $\Delta l: l = (\lambda_0 / 2)N$.

Величина наименьшей деформации, которую можно зафиксировать составляет $1,5 \cdot 10^{-4}$ мм. Точность измерения абсолютной деформации $4 \cdot 10^{-5}$ мм. Минимальная скорость определяется временем за которое достигается эта деформация.

Средние скорости ползучести ($10^{-2} - 10^{-5}$ мм/с) записываются на скоропишущем самописце типа КСП-4. Большие скорости ползучести, соответствующие частоте от 10 Гц до десятка килогерц, регистрируются на осциллографе. Используя частотомер ЧЗ-33 можно получать непрерывный ряд значений числа колебаний в секунду, следующих, например, через секунду, т.е. непрерывную последовательность скоростей ползучести. Это важно при выявлении тонкой структуры кривой ползучести и для ряда опытов по определению параметров ползучести.

2.4 Установка для определения микродолговечности

При испытании полимерных материалов до разрушения в режиме постоянства приложенного напряжения время нагружения должно составлять менее 10 % времени испытания. Для малых долговечностей – от тысячных долей секунды до нескольких секунд – необходима высокая скорость нагружения при значительном уменьшении переднего фронта силового импульса или демпфировании собственных колебаний образца [25], обеспечивающих статический режим нагружения. При этом установка должна иметь минимальную инерционность, обладать необходимой жесткостью и высокой точностью измерения контролируемых параметров. Эти факторы учтены в установке чертеж которой, совмещенный с функциональной схемой, представлен на рис. 2.8.

Установка предназначена для испытания плоских образцов в виде двусторонней лопатки с начальной длиной рабочего участка 20 и 40 мм. Нагружатель – электромагнитного типа. В кольцевом зазоре электромагнита 1 помещена легкая подвижная катушка, которая при пропускании через нее тока втягивается во внутреннюю полость магнита и при помощи тяги растягивает образец 14, закрепленный в зажимах 2. Для обеспечения постоянства напряжения, возникающего в образцах разной длины, достаточно изменить исходное положение катушки в кольцевом зазоре с помощью гайки. Подвижная катушка имеет три обмотки – рабочую, компенсационную и корректирующую. Величина развиваемого нагрузателем усилия определяется силой тока, протекающего в рабочей обмотке. Нагружатель развивает усилие до 50 Н при испытаниях длительностью более нескольких секунд и до 100 Н при кратковременных испытаниях (длительностью менее 1 с).

Постоянство механического напряжения в образце при его деформировании обеспечивается за счет того, что часть витков рабочей обмотки выходит из кольцевого зазора электромагнита и при этом нагрузка, действующая на образец, уменьшается. Требуемый закон уменьшения нагрузки обеспечивается подбором числа витков в секциях этой обмотки.

Питание рабочей обмотки осуществляется от управляемого выпрямителя. Включение последовательно с рабочей обмоткой дросселя позволяет испытывать образцы при постоянной скорости нагружения. При импульсном нагружении цепь рабочей обмотки замыкается через тиристорный ключ, управляемый от генератора импульсов.

Компенсационная обмотка, служащая для компенсации веса подвижных частей установки, питается через стабилизированный выпрямитель. Развиваемое ею усилие не зависит от величины деформации образца, так как при любом положении подвижной катушки в кольцевом зазоре электромагнита обмотка находится в однородном магнитном поле. Эта обмотка может быть и рабочей, когда в процессе испытания необходимо поддерживать постоянство действующего на образец усилия. Рабочая обмотка в этом случае не используется. Модуляцией тока в рабочей и компенсирующей обмотках обеспечиваются статический и динамический режимы нагружения образца.

Корректирующая обмотка служит для управления передним фронтом силового импульса нагружения [26]. Она обеспечивает минимальное начальное время нагружения при измерении долговечности и ползучести, а также демпфирует собственные колебания образца, если он находится в хрупком или стеклообразном состояниях. Коррекция силового импульса производится следующим образом. Электролитический конденсатор заряжается через ограничительное сопротивление от регулируемого источника питания ИП-2 до напряжения зафиксированного вольтметром. При срабатывании реле конденсатор разряжается через корректирующую обмотку. Если ток разряда совпадает по направлению с током в рабочей обмотке, то происходит уменьшение длительности переднего фронта силового импульса; при обратном направлении начинается демпфирование. Направление тока разряда изменяется переключателем. Постоянная времени разряда регулируется резистором. Параметры коррекции – напряжение на вольтметре и сопротивление – подбираются экспериментально и зависят от вязкоупругих свойств испытуемого материала. Реле конденсатора управляется от двухлучевого осциллографа. Длительность переднего фронта силового импульса зависит от веса подвижных частей прибора. Для его уменьшения тяга электромагнита и упоры 11 выполнены из дюралюминия. Подвижная катушка изготовлена из электроизоляционного материала, что исключает возникновение вихревых токов, также увеличивающих длительность переднего фронта импульса нагружения.

Нижний зажим испытательной секции жестко соединен с динамометром 4. В основу его конструкции положен принцип тензометрии. Упругим элементом является стальная пластина. Диапазон регистрируемых усилий определяется жесткостью упругого элемента. Собственная частота колебаний датчика 1-5 кГц. Динамометр питается от звукового генератора ГЗ-10, регистрация усилий осуществляется через тензометрический усилитель ТА-5 двухлучевым осциллографом С-18.

1

8

11

9

6

12

5

3

10

15

14

2

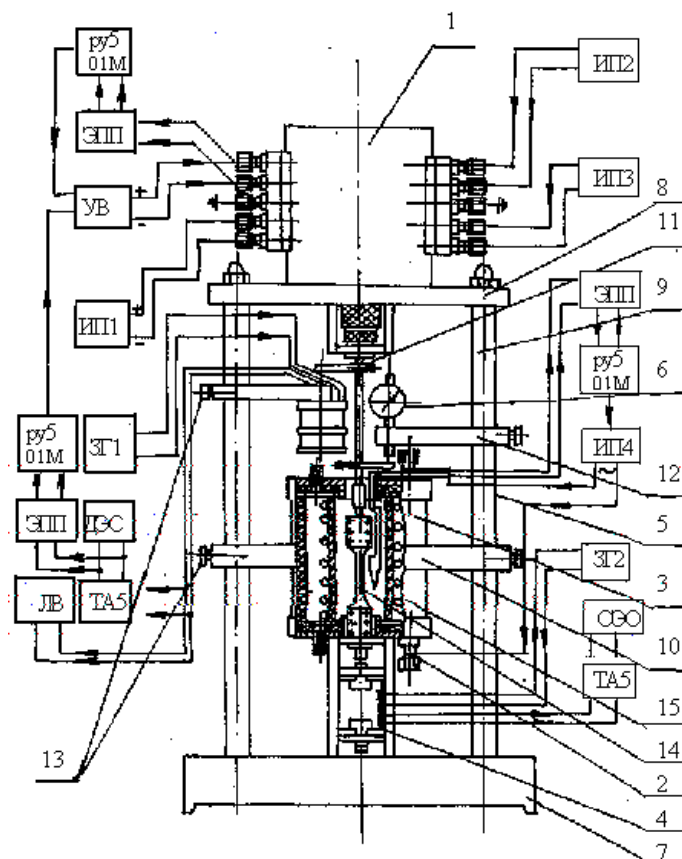


Рис. 2.8 Схема установки с электромагнитным нагружателем для исследования долговечности полимеров:

ЭПП – электронный потенциометр; ИП – источник питания; ЗГ – звуковой генератор; УВ – управляемый выпрямитель; ЛВ – ламповый вольтметр; ДЭО – двухлучевой электронный осциллограф; РУ5-01М – программное регулирующее устройство; ТА-5 – тензометрический усилитель

Деформация образца измеряется индуктивным датчиком 5. Его ферритовый сердечник перемещается при растяжении вместе с тягой электромагнита и измеряет индуктивность катушки датчика деформации. Сердечник крепится на упоре 11. Для тарирования датчика деформации используется индикатор часового типа 6 с точностью измерения 0,001 мм. Датчик рассчитан так, чтобы обеспечить линейную зависимость деформации на длине до 10 мм. Он собран по схеме дифференциального моста. Питание его осуществляется от звукового генератора ГЗ-10, регистрация деформаций – ламповым вольтметром ЛВ-ВЗ-40 или через тензоусилитель ТА-5 двухлучевым осциллографом С-18. При необходимости регулирования величины тока в рабочей обмотке электромагнита в зависимости от деформации, регистрацию и запись перемещения можно проводить электронным потенциометром, далее через программное устройство РУ5-01М регулируется управляемый выпрямитель ИП-1, питающий рабочую обмотку.

Нагревание и охлаждение образца [27] производится в термокриокамере 3; температура контролируется термопарой 15. При необходимости камера с шасси 10, датчик деформации и индикатор часового типа перемещаются вместе с кронштейном 12 по колонне 9 и закрепляются в нужном положении винтами 13. Электромагнит установлен на основании 8, а вся установка смонтирована на основании 7.

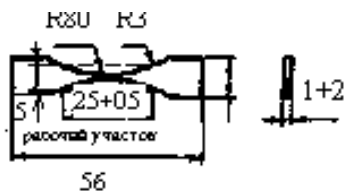
Таким образом установка позволяет проводить испытания полимеров при разных режимах нагружения: с постоянной скоростью, импульсном, по заданной программе; в широком интервале времен испытания – от 10^{-4} с до нескольких часов; при высоких и низких температурах.

2.5 Влияние геометрии и размера образца на разброс экспериментальных результатов

При испытаниях на долговечность при разрушении и деформировании вопрос о достоверности результатов связан со значительным разбросом отдельных значений времени достижения критического события. Этот разброс может достигать сотен раз измеряемой величины долговечности одинаковых образцов, испытываемых при идентичных условиях. При таком разбросе, определяемом главным образом неоднородностью структуры и состава исследуемых материалов, надежное прогнозирование величины долговечности представляет значительные затруднения. Отсюда возникает необходимость в отыскании способов снижения разброса.

Вероятность разрыва химических связей в однородном образце [28] при одноосном растяжении одинакова по всему объему рабочего участка. Поэтому область, путь и время разрушения образца связаны со случайной вариацией структуры, то есть локальной прочности материала, а также условий разрушения. Для снижения случайности в распределении долговечности вокруг вероятнейшего значения в образцах намечается область предпочтительного разрушения. Она представляет собой наименьшее сечение на рабочем участке двусторонней лопатки. В отличие от стандартных образцов с концентратором напряжения (резким утонением середины), в данных образцах производится плавное утонение всего рабочего участка (см. рис. 2.9). Радиус кривизны продольной грани образца подбирается опытным путем из условия возникновения минимальной концентрации напряжения.

При оценке влияния геометрии образца на разброс опытных данных [29] проводились специальные испытания на одинаковых образцах без утонения и с утонением (по 50 – 70 штук в серии). Образцы испытывались при тщательном поддержании постоянства условий опытов (технологии изготовления образцов, поддержание постоянных параметров эксперимента - напряжения и температуры). При испытаниях образцов с утонением, когда они разрушаются вне наименьшего сечения, значения долговечности не учитываются, считая эти образцы заведомо дефектными.



Образец для испытания пластмасс на долговечность при растяжении

Примеры полученных кривых распределения образцов по долговечности показаны на рис. 2.10. Как видно из этого рисунка, они, как и приведенные в [25], имеют симметричную форму относительно среднего логарифмического значения, близкую к классической (гауссовской). При этом ширина кривой распределения для образцов с утонением значительно меньше (на порядок), чем для образцов без утонения, а на полувысоте она составляет менее половины порядка. Существенно, что исходное среднее значение долговечности в

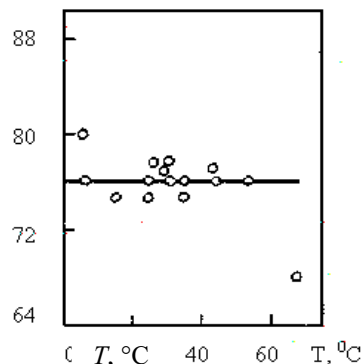
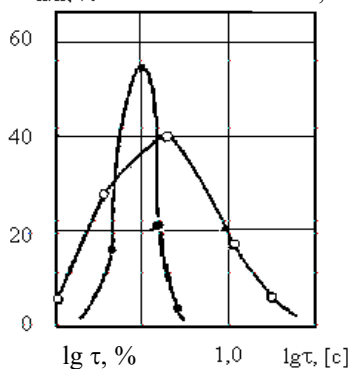
обоих случаях близкое.

$\Delta n/n, \%$

$\Delta n/n, \%$

$\Delta d/d, \%$

$d/d_{исх}, \%$



**Рис. 2.10 Кривые
распределения хрупко
разрушенных образцов из
тролкомпозиции на основе
целлюлозы по долговечности
при
 $\sigma = 50$ МПа и $T = 293$ К**

**Рис. 2.11 Относительный
диаметр образцов ПВХ в
шейке перед разрывом в
зависимости от
температуры. Исходный
диаметр – 2,5 мм**

Важную роль при исследовании прочностных характеристик играет масштабный фактор. При изучении деформационных характеристик он практически не проявляется. Так при широкой вариации исходного диаметра образца [30] даже при изменении температуры (до релаксационного перехода) изменение предела текучести σ_B одинаково, поскольку стабильно уменьшается сечение образца при образовании шейки (рис. 2.11). Это явление существенно отличается от поведения материала при разрушении, когда увеличение размеров образца снижает его удельную прочность вследствие повышения вероятности наличия дефектов (особенно на поверхности), которые являются очагами (т.е. первичными центрами) разрушения. Поскольку при деформировании решающую роль играет вся масса образца, то наличие отдельных дефектов не играет роли. Что же касается разрушения, то как показали А. П. Александров и С. Н. Журков [31], что вероятность наличия дефектов на поверхности пропорциональна линейному размеру d поверхности и прочность равна

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{A}{d},$$

где d и A – эмпирические коэффициенты.

В связи с тем, что дефекты могут группироваться по размерам, возникли представления о различных уровнях прочности и долговечности [32]. Этот эффект проявляется в волокнах и пленках в виде нескольких максимумов на кривых распределения прочности и долговечности. Причина в том, что полимерные цепи, ориентированные вдоль оси микрофибрилл, образуют дискретные участки не только в поперечном, но и в продольном направлении, поскольку они состоят из чередующихся кристаллических и аморфных участков. По их границам возникают субмикротрещины, длина которых близка к поперечным размерам фибрилл. Для блочных образцов пластмасс такие мелкие трещины маскируются более крупными. Поэтому дискретные уровни прочности не проявляются и кривая распределения имеет нормальный вид с одним максимумом [25].

2.6 Методы выявления и расчета физических констант, определяющих несущую способность полимерного материала

Экспериментальное определение силовых, температурных и временных границ несущей способности пластмасс сводится к выявлению формулы, связывающей эти границы между собой, и расчету констант материала, входящих в эту формулу. Поскольку легко задавать напряжение и температуру, то удобно определять время достижения искомого предельного состояния – хрупкого разрушения, критического деформирования или ползучести. Поэтому на практике определяют долговечность под нагрузкой – прочностную или деформационную при ряде заданных напряжений и температур, т.е. $t(\sigma, T)$.

Хрупкое разрушение. Время до хрупкого разрушения образца (прочностная долговечность) определяется при разных видах нагрузки (одноосное растяжение, поперечный изгиб, срез, сжатие, кручение или их комбинация) под постоянным напряжением, т.е. практически при постоянной нагрузке, так как изменение рабочего сечения образца мало.

Время нагружения для заданного напряжения не превышает 5 – 10 % от времени сопротивления разрушению даже при небольшой долговечности. А поскольку при выявлении констант материала в любом случае оперируют с $\lg t$, этим временем можно пренебречь. Нагружение образцов производится после достижения заданной температуры и установления стабильного во времени (с разбросом не более ± 1 °С) температурного режима.

Вынужденно-эластическое деформирование. Время до начала резкого роста

деформации, соответствующее началу критической ползучести образца (деформационная долговечность), определяется по деформационным кривым, автоматически регистрируемым на приборе. Таких кривых может быть три типа: кривая ползучести $\varepsilon(t)$ при заданных температуре и напряжении, термомеханическая (точнее – термомеханическая) кривая $\varepsilon(T)$ при заданных напряжении и времени его действия и кривая $\varepsilon(\sigma)$, отвечающая обычной кривой $\sigma(\varepsilon)$ при заданных температуре и времени нагрузки.

Резкое возрастание деформации и соответствующий загиб на кривой ползучести $\varepsilon - t$ наблюдаются через критическое время $t_{кр}$ после приложения нагрузки; на термомеханической кривой $\varepsilon - T$ при температуре, равной температуре размягчения $T_{кр}$, и на кривой напряжение – деформация при напряжении равном пределу вынужденной эластичности $\sigma_{кр}$.

Деформационная долговечность может быть найдена путем определения: зависимости $t' = t_{кр}$ (полученного из кривой ползучести $\varepsilon - t$) от температуры и напряжения; зависимости $T'_{кр}$ (полученной из термомеханической кривой $\varepsilon - T$) от напряжения и времени его действия, причем время выражают как функцию от $T_{кр}$ и σ ; зависимости предела вынужденной эластичности $\sigma_{кр}$ (полученного из кривой $\sigma - \varepsilon$) от времени и температуры, причем опять-таки время выражают как функцию от температуры при разных значениях напряжения $\sigma_{кр}$.

Значения долговечности, определенные из независимых опытов по указанным деформационным кривым совпадают при одинаковых внешних параметрах испытания и T .

Вид формулы долговечности целесообразно выявлять, нанося опытные данные в координатах $\lg \tau - 1/T$, то есть строить в аррениусовой системе координат. При этом получается семейство изобар, то есть пучок прямых линий (рис. 2.12), поскольку разрыв любых связей имеет термофлуктуационную природу. Но расположение этих прямых может быть различным. Согласно формуле должен получиться пучок, сходящийся в точку (полюс)

$$\tau = \tau_m \exp \left\{ \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} \right] (T^{-1} - T_m^{-1}) \right\}, \quad (2.1),$$

где τ – время достижения критического события; σ – напряжение; T – температура; τ_m , U_0 , γ , T_m – физические константы материала. Структура этой формулы говорит о том, что отсчет обратной температуры идет не от $1/T = 0$, а от $1/T_m$, т.е. существует некоторая предельная температура T_m , выше которой материал не работает, причем его долговечность τ_m минимальна. Эта же формула может быть написана несколько иначе

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right] = \tau_m \exp \left(- \frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT_m} \right) \exp \left(\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \right).$$

Здесь наглядно видно, во-первых, что по сравнению с формулой Журкова-Александрова [25] не зависящая от температуры предэкспонента гораздо меньше, чем $\tau_0 = 10^{-12}$ с, и, во-вторых, что эффективная энергия активации $U = U_0 - \gamma \sigma$ сохраняет то же значение, что и в упомянутой формуле. В самом деле

$$\ln \tau = \ln \tau_m - \frac{U}{RT_m} + \frac{U}{RT}.$$

Следовательно, по-прежнему энергия активации $U = \frac{d \ln \tau}{R d T^{-1}}$ [25].

Расчет термофлуктуационных констант. Для определения физических констант материала τ_m , U_0 , γ и T_m экспериментальные данные обрабатываются в координатах $\lg \tau - 1/T$. Если они описываются формулой (2.1), то образуют семейство прямых линий, сходящихся в пучок (рис. 2.12). Каждая прямая линия этого семейства изобар отвечает заданному напряжению. Каждая точка на прямой обычно является логарифмически усредненным результатом 6 – 12 образцов.

На рис. 2.12 любой пучок прямых сходится в полюс. Из его координат, $1/T_m$ и $\lg \tau_m$, определяют две константы: T_m и τ_m . Для отыскания остальных двух констант, U_0 и γ , определяют значения эффективных энергий активации $U(\sigma)$ из наклона прямых на графиках

$\lg \tau - 1/T$ по равенству

$$U(\sigma) = 2,3R \frac{\Delta \lg \tau(\sigma)}{\Delta(1/T)}.$$

Для каждой заданной нагрузки вычисляют величину U и строят зависимость $U(\sigma)$ (рис. 2.13). Если формула (2.1) справедлива, эта зависимость изображается прямой. Из расположения этой прямой определяют оставшиеся две константы: γ равно тангенсу угла наклона, а U_0 – ординате прямой $U - \sigma$ при ее экстраполяции к нулевой нагрузке.

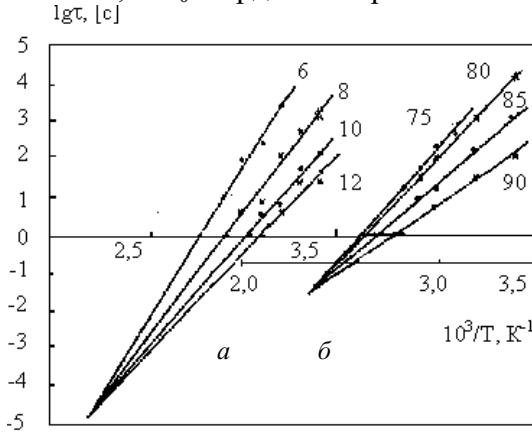


Рис. 2.12 Зависимость долговечности от обратной температуры при различных напряжениях (числа у прямых):
a – при одноосном растяжении полиэтилена с 60 % асбоволокнистого наполнителя; *б* – при изгибе

Следует иметь в виду, что формула (2.1) линеаризуется и при построении по тем же данным семейства изотерм в координатах $\lg \tau(T) - \sigma$:

$$\ln \tau = \ln \tau_m + \left(\frac{U_0}{R} \right) (T^{-1} - T_m^{-1}) - \left(\frac{\gamma}{R} \right) (T^{-1} - T_m^{-1}) \sigma.$$

При этом тоже образуется пучок прямых, сходящихся в полюс, с той же ординатой $\lg \tau_m$, но с абсциссой $\sigma_m = U_0 / \gamma$. Однако в этой системе координат незаметно наличие четвертой константы T . Лишь изменяются углы наклона прямых: для каждой изотермы вместо $1/RT$ будут постоянные значения $R^{-1}(T^{-1} - T_m^{-1})$. Но при этом изменяются фактические значения γ .

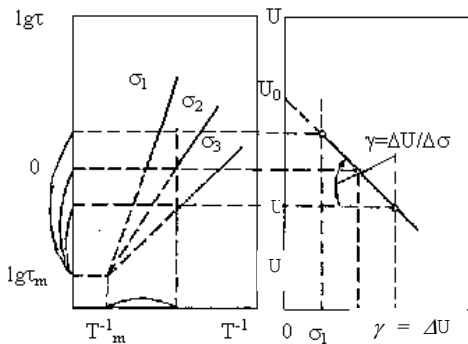


Рис. 2.13 Схема определения физических констант при разрушении образцов в различных напряженных T_m^{-1} со T^{-1} ниях (за исключением износа)

Значения констант формулы (2.3) U , t_* определяют из семейства прямых $\lg t - 1/T$, а константу m – из семейства параллельных прямых в координатах $\lg t - \lg \sigma$.

Для формулы (2.2) константы U и B по-прежнему определяют из семейства прямых в координатах $\lg t - 1/T$. А поскольку зависимость $\lg t - \sigma$ нелинейна, то константу m определяют как угол наклона семейства прямых (изотерм) в координатах $\lg t - \lg \sigma$. Практически удобно значения констант t_* и B определять в координатах $\lg t - 1/T$ при

Если семейство прямых в координатах $\lg t - \sigma$ и $\lg t - 1/T$ не сходится в полюс, то формула (2.1) не выполняется и следует искать иную зависимость, связывающую три границы работоспособности. В таких случаях при разных заданных нагрузках по-прежнему получают систему прямых в координатах $\lg t - 1/T$, поскольку термофлуктуационный механизм разрыва связей универсален. Но часто эти прямые параллельны, то есть влияние нагрузки иное, она не влияет на энергию активации.

При этом обычно реализуются два варианта формул:

$$t = B\sigma^{-m} \exp\left[\frac{U}{RT}\right], \quad (2.2)$$

$$t = t_* \exp\left(\frac{U}{RT}\right) \exp(-\beta\sigma), \quad (2.3)$$

некотором заданном напряжении σ_0 , $1/T = 0$ и соответствующем времени t_0 по формулам

$$B = t_0 \sigma_0^m; \quad t_m = t_0 \exp(\beta \sigma)$$

или в координатах $\lg t - \sigma$ и $\lg t - \lg \sigma$ при одной или нескольких заданных температурах и $\sigma = 0$.

Если долговечность так зависит от нагрузки, что исключает конечное значение τ при $\sigma = 0$, то наиболее физически обоснованным является выражение

$$\tau = \tau_m \exp\left(\frac{U_0}{RT}\right) \operatorname{sh}^{-1}\left(\frac{\gamma \sigma}{RT}\right). \quad (2.4)$$

Эта формула описывает результаты конкуренции двух противоположных процессов – разрыва связей и их рекомбинации, ибо скорость процесса разрушения может быть схематически представлена как разность скоростей этих двух процессов

$$v = v_1 - v_2 \sim \exp\left[-\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}\right] - \exp\left[-\frac{U_0 + \gamma \sigma}{RT}\right] \sim \exp\left(-\frac{U_0}{RT}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{\gamma \sigma}{RT}\right).$$

Здесь первое слагаемое отвечает скорости разрыва цепей, а второе – скорости их воссоединения, которое, как и разрыв, происходит благодаря тепловым флуктуациям, однако в отличие от него путем преодоления более высокого барьера ($U_0 + \gamma \sigma$), столь же повышенного за счет того же механического поля ($\gamma \sigma$), сколь он понижен для процесса разрыва ($U_0 - \gamma \sigma$).

При достаточно больших напряжениях вторым слагаемым можно пренебречь и эта формула приобретает вид эквивалентный выражению (1.4). Напротив при достаточно малых значениях напряжения, когда $\gamma \sigma \ll RT$, гиперболический синус, как и обычный синус, равен его аргументу, так что

$$v \sim \left(\frac{\gamma \sigma}{RT}\right) \exp\left(-\frac{U_0}{RT}\right).$$

Это выражение, подобно (2.4), означает, что при $\sigma \rightarrow 0$ время разрушения бесконечно велико.

Поскольку время ожидания критического события обратно пропорционально его вероятности или скорости, то в результате долговечность описывается формулой (2.4), в которой $\tau \rightarrow \infty$ при $\sigma \rightarrow 0$. В этом случае ставится под сомнение возможность трактовки U_0 как изначальной энергии активации, имеющей при разрушении полимеров смысл энергии активации их термодеструкции. Ведь U_0 получается по формуле (1.4) как результат экстраполяции к $\sigma = 0$ величины $U(\sigma)$. В действительности же опасения о возможности расчета U при $\sigma = 0$ отпадают, если воспользоваться правилом Лопиталя для раскрытия неопределенности при дифференцировании гладких функций [33].

Таким образом, практически следует определять $U(\sigma)$ по наклонам изобар в координатах $\lg \tau(\sigma) - 1/T$ и далее находить U_0 путем экстраполяции $U(\sigma)$ к $\sigma = 0$. При этом величину γ определяют из угла наклона прямой $U - \sigma$. Существенно, что неточность при проведении этой прямой, например, завышение ее угла, приводящее к завышению U_0 , настолько же завысит и γ . Поэтому отношение $U_0 / \gamma = \sigma_m$ не зависит от этой неточности, а именно этой величиной определяется прочность и в значительной мере – долговечность.

Разумеется, для точного прогноза предпочтительна статистическая обработка данных при расчете констант. Многомерный регрессионный анализ для статистических моделей длительной прочности в принципе позволяет установить минимальный объем эксперимента, необходимый для надежного определения констант формулы долговечности. Решение этой задачи проведено [34] на примерах трехпараметрических формул (1.4) и (2.2). А для физической четырехпараметрической формулы (2.1) процесс расчета крайне осложняется и его невозможно выполнить без компьютера.

3 ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТМАСС

3.1 Дилатометрия

Она основана на изменении объема тел при изменении температуры. С помощью дилатометрии изучают температурную зависимость линейного и объемного расширения полимеров, аномалии при плавлении, кристаллизации и стекловании, переходы одной кристаллической модификации в другую и конформационные переходы в расплавах полимеров. Указанные переходы исследуют чаще всего при постоянной скорости нагрева или охлаждения при помощи дилатометров различной конструкции.

Исследования твердых полимерных объектов проводят в объемных и линейных дилатометрах. В последних визуально или с помощью малоинерционных датчиков фиксируют изменения линейных размеров образца. Малые размеры образцов (нити, пленки, стержни) позволяют производить измерения при любых скоростях нагрева и охлаждения (до 100 °С/мин) в широком температурном диапазоне (от – 180 до 1000°С).

На рис. 3.1 показан оптический дилатометр. Он состоит из криотермокамеры специальной конструкции [19] и микроскопа с окулярным микрометром, установленных на теплоизолированном основании. Криотермокамера изготовлена из тугоплавкого металла. Основными ее частями являются массивный корпус с электронагревательными элементами и стальная планка, которая вкладывается в паз корпуса и укрепляется с помощью винта. Планка и паз тщательно отшлифованы.

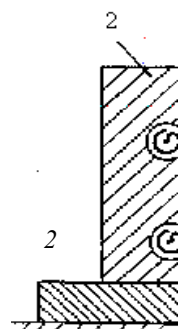


Рис. 3.1 Дилатометр (полимерный)
1 – образец; 2 – корпус; 3 – планка; 4 – основание; 5 – микроскоп с окулярным микрометром; 6 – термопара с пленкой

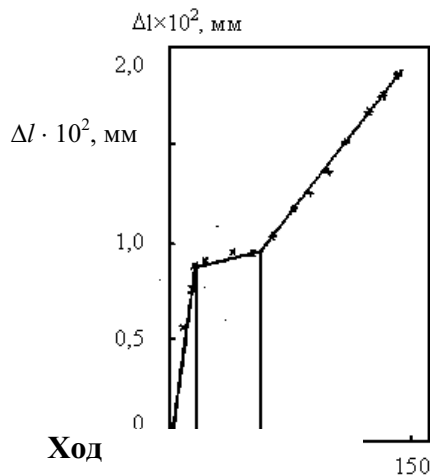
Образец в виде прямоугольной пластины помещается в паз и закладывается планкой. Один конец его фиксируется с помощью зажимного винта. Для наблюдения за удлинением образца на планке предусмотрена смотровая щель. Внутри корпуса под образцом для его освещения прорезан сквозной канал.

Линейная скорость нагрева задается автотрансформатором. Она выбирается с учетом прохождения релаксационных процессов в полимерах. Температура фиксируется термометром или термопарой. Охлаждение образца производят вентилятором. Причем скорость охлаждения выбирается равной скорости нагрева. Дилатометрические кривые можно строить как при нагревании образца, так и при его охлаждении.

Из дилатометрических кривых (рис. 3.2) по участкам можно рассчитать коэффициент линейного термического расширения

$$\alpha_i = \frac{\Delta l_i}{l_0 \Delta T_i},$$

где l_0 – первоначальная длина образца; $\Delta T_i = T_i - T_0$ – рассматриваемый интервал температур; Δl_i – удлинение образца в рассматриваемом интервале температур. Дилатометрические кривые показаны на рис. 3.2.



Ход дилатометрических кривых в области переходов зависит от структуры макромолекул и надмолекулярной структуры полимера, что позволяет исследовать характер переходов в сополимерах, разветвленных и сшитых полимерах, в системах полимер – полимер и полимер – низкомолекулярное вещество.

Из них могут быть определены температуры перехода. Данные дилатометрических исследований позволяют определять не только температуры фазовых переходов, но и исследовать влияние на них различных факторов (молекулярной массы, термической предыстории, скорости нагрева и т.д.).

3.2 Колебательная спектроскопия

Она основана на способности полимерного вещества взаимодействовать с полем электромагнитного излучения в инфракрасной области энергетического спектра, т.е. в области длин волн $\lambda = 1 - 25$ мкм. Для исследования структуры полимеров обычно изучают спектры поглощения из которых определяют, какая часть энергии падающего света с данной длиной волны поглощается при прохождении его через слой исследуемого вещества. Колебательные спектры могут быть получены методами ИК-спектроскопии и спектроскопии колебательного рассеяния-света (КР-спектроскопии). ИК-поглощение обусловлено изменением электрического дипольного момента системы колеблющихся атомов, а КР-эффект – изменением электрической поляризуемости той же системы атомов при колебании.

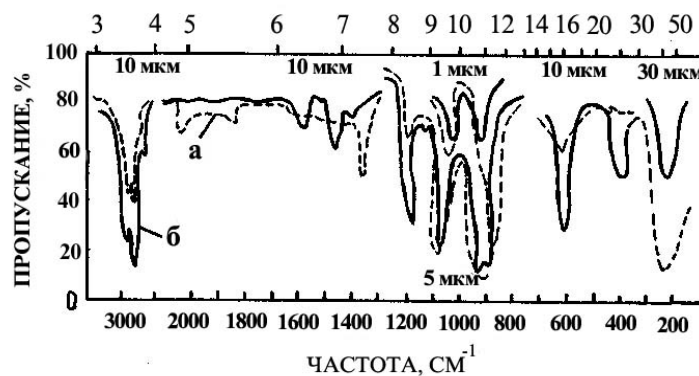


Рис. 3.3 ИК-спектр полиметилметакрилата

При исследовании полимеров метод ИК-спектроскопии играет ведущую роль, что обусловлено преимуществами его экспериментальной техники [35]. В спектрах регистрируется отношение интенсивности света I , прошедшего через образец, к интенсивности падающего света I_0 , а также оптическая плотность $D = \lg(I / I_0)$. Последняя пропорциональна толщине слоя вещества, концентрации поглощающих частиц и коэффициенту поглощения, который характеризует свойства поглощающих молекул.

ИК-спектр полимера состоит, как правило, из большого числа полос поглощения (см. рис. 3.3). Каждая полоса в спектре может быть охарактеризована положением, интенсивностью, шириной и типом поляризации. Положение полосы определяется длиной волны (λ) в максимуме поглощения; волновым числом (частотой ν), которое обратно пропорционально длине волны ($\nu = 1 / \lambda$) и измеряется в м^{-1} . Интенсивность полосы

характеризуется концентрацией химических групп, поглощающих свет с длиной волны λ , а также молекулярной структурой вещества. Различают интенсивность в максимуме поглощения и интегральную интенсивность (площадь под кривой поглощения), которая тесно связана с молекулярными процессами. Интенсивность в максимуме поглощения измерить легче и поэтому ее широко используют на практике. Полосы поглощения качественно делят на сильные, средние и слабые, в зависимости от высоты полосы в максимуме поглощения или от величины площади под ее контуром. Форма контура полосы поглощения связана с ее шириной. Ширину полосы можно измерять на уровне половины высоты ее в максимуме, при условии, что спектр изображен в шкале оптических плотностей D . Такую величину называют полушириной.

Если образец имеет какую-либо ориентацию, то, используя поляризованный свет, для каждой полосы в спектре можно определить тип ее поляризации и измерить дихроичное отношение [36].

Для спектральных исследований полимеров обычно используют интервал длин волн 1 – 25 мкм, но важную роль играет и далекая область ИК-спектра (до 250 мкм или 4000 м^{-1}). Серийные призмные одно – или двухлучевые спектрометры имеют достаточную разрешающую способность и чувствительность для большинства полимеров, так как полосы их поглощения, как правило, имеют полуширину не менее 1000 – 2000 м^{-1} . Однако, если полимерный образец состоит из макромолекул очень близких, но не одинаковых по химической и стерической структуре, может возникнуть необходимость разрешения нескольких близких по положению полос. В этом случае следует использовать спектрометры повышенной разрешающей способности.

Для регистрации ИК-спектров полимеров используют твердые образцы (пленки, таблетки, суспензии в вазелиновом масле и тонкие волокна), а также растворы. На двухлучевом приборе обычного типа исследуют образцы сечением 25 × 4 мм. Для измерений в области (4000 – 400 м^{-1}) пленки должны иметь толщину нескольких микрон. Тонкие полимерные пленки такого размера с достаточно однородными поверхностями и равномерными по толщине часто приготовить трудно. Поэтому такие образцы удобнее исследовать на однолучевом приборе, в котором можно использовать увеличенное изображение образца.

В ряде случаев в спектрах пленок, приготовленных из раствора и расплава, наблюдаются различия, и целесообразно исследовать пленки обоих типов. Наиболее полную информацию о полимере можно получить, исследуя ИК-спектры ориентированных пленок или волокон в поляризованном свете.

Собственные колебания межатомных связей в макромолекулах (колебательные спектры) лежат в инфракрасной (ИК) области оптического спектра. Для изучения силового возмущения межатомных связей путем механической нагрузки производилась прецизионная регистрация и сравнение ИК-спектров поглощения нагруженных и ненагруженных полимеров. Измерения проводились на спектрометрах типа UR-10, ИКС-14А и ИКС-12 в поляризованном свете. Для более надежного выявления измерений в спектрах были взяты достаточно высокопрочные образцы полимеров (моноволокна или пленки), что позволяло прикладывать к ним значительные растягивающие нагрузки (до 1000 МПа). Эксперименты, проведенные на ориентированных аморфно-кристаллических полимерах, показали, что нагружение полимеров вызывает изменение положения полос поглощения и искажает их форму [37]. Примеры подобных результатов представлены на рис. 3.4.

Они представляют собой полосы поглощения на частотах 930 см^{-1} (для капрона) и 975 см^{-1} (для полипропилена). Для каждого полимера обе полосы связаны с валентными колебаниями в скелетах макромолекул [35].

До нагружения контуры полос поглощения были практически симметричными. Под действием нагрузки (рис. 3.4) произошло общее смещение полос поглощения в сторону низких частот. Важно отметить, что величина этого смещения для разных участков контура полосы оказалась неодинаковой: сам пик сместился сравнительно мало, а наибольший сдвиг

имел место для низкочастотного края полосы.

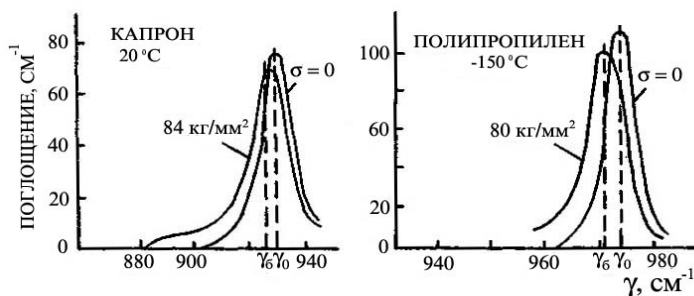


Рис. 3.4 Изменения в положении и форме полос поглощения в инфракрасном спектре полимеров при действии растягивающей нагрузки (полимеры ориентированы)

Эффект изменения полос поглощения оказался обратимым, то есть при снятии нагрузки положение полосы и ее форма восстанавливались. Характерно, что именно полосы поглощения, соответствующие валентным колебаниям связей в скелете полимерных молекул, под действием растягивающей механической нагрузки смещаются, как правило, в сторону низких частот.

Установлено, что для данного полимера при заданной внешней нагрузке сдвиг максимума полосы поглощения не зависит ни от структуры полимера (ориентации, кристалличности), ни от условий испытания (температуры, времени), а определяется лишь химическим строением цепей и формой (типом) колебаний [38]. Эти данные подтверждают, что эффект смещения полос поглощения не связан с изменением межмолекулярного взаимодействия, а обусловлен всецело механической деформацией валентных углов и связей, образующих скелет макромолекул.

Наблюдаемый эффект изменения полосы поглощения интерпретируется следующим образом [38]. Под действием внешней силы напрягаются практически все молекулы в образце – растягиваются все межатомные связи в скелетах молекул. Растяжение связей вызывает ослабление взаимодействия атомов, уменьшение энергии связи и, как следствие этого, уменьшение частоты колебания связей. Таким образом, общий сдвиг поглощения в сторону меньших частот качественно свидетельствует о напряжении связей.

При количественном анализе ИК-спектров полимеров трудно избежать ошибок, связанных с макроскопическими дефектами образца, однако большинство искажающих факторов можно учесть при количественной обработке результатов. Часто спектр полимера представляет собой размытую картину. Низкое качество спектра обусловлено макроскопическими дефектами или несовершенной молекулярной структурой образца. Выводы о структуре и свойствах полимера по таким спектрам следует делать с большой осторожностью и путем устранения дефектов в образцах необходимо добиваться улучшения качества спектра.

3.3 Электронный парамагнитный резонанс

Это явление резонансного поглощения энергии электромагнитных волн парамагнитными частицами, помещенными в постоянное магнитное поле. Спектры электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) получают с помощью радиоспектрометров при постоянной частоте переменного поля. Изменяя напряженность постоянного магнитного поля, находят его резонансное значение, при котором детектируется сигнал поглощения ЭПР.

В спектрометре ЭПР исследуемый образец помещают в объемный резонатор, сверхвысокочастотные электромагнитные колебания в котором возбуждаются генератором. Резонатор настроен на частоту генератора и располагается между полюсами электромагнита, напряженность поля которого плавно изменяется в области резонансного значения. Поглощение энергии сверхвысокочастотного магнитного поля регистрируется либо на

экране осциллографа, либо на самописце. Обычно записывается первая производная dI / dH , где I – интенсивность линии поглощения. Для определения концентрации радикалов при исследовании химических процессов важно записывать интегральную функцию $I(H)$.

К настоящему времени появилось уже много работ по применению метода ЭПР для изучения строения и химических свойств свободных макрорадикалов, возникающих при механическом разрушении полимеров [39].

ЭПР-спектроскопия основана на изучении переходов между зеемановскими уровнями парамагнитных частиц. Обычные органические соединения, в том числе и полимеры, не являются парамагнитными веществами. Только разрыв ковалентных связей приводит к появлению парамагнетизма. Спаренные валентные связи становятся разделенными. Поэтому у свободных радикалов появляется некомпенсированный магнитный момент ЭПР.

Рис. 3.5 Схема расщепления энергетического уровня: ***a*** – парамагнитной частицы; ***б*** – контур линии

Если поместить парамагнитные частицы в постоянное магнитное поле напряженностью H , то в простейшем случае последние выстроятся либо вдоль (эти частицы будут обладать наименьшей энергией), либо навстречу (и эти будут иметь наивысшую энергию) направлению магнитного поля. Разница в энергии этих двух ориентаций и определяет условие парамагнитного резонанса, то есть частицы будут поглощать энергию высокочастотного поля, если его магнитная компонента направлена перпендикулярно к постоянному полю, а частота ν удовлетворяет условию резонанса (рис. 3.5)

$$h\nu = \Delta E = g\beta H,$$

где h – постоянная Планка, β – магнетон Бора ($0,927 \cdot 10^{-20}$ эрг/с); g – фактор – коэффициент, показывающий как сильно расщепляются энергетические уровни под действием магнитного поля.

Если не спаренный электрон обладает только спиновым (вращением вокруг собственной оси) моментом количества движения, то g -фактор равен 2,0023, если электрон имеет и орбитальный момент количества движения, и орбитальный магнитный момент, то g -фактор будет иметь другое значение. Для углеводородных радикалов g -фактор близок к чисто спиновому значению, небольшие отличия характерны лишь для радикалов с локализацией электрона на гетероатомах.

При наличии резонансных условий происходит поглощение высокочастотной энергии. Это обусловлено тем, что в состоянии теплового равновесия заселенность n_1 верхнего зеемановского уровня меньше нижнего n_2 в соответствии с законом Больцмана

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right).$$

Поэтому преобладают переходы с нижнего уровня на верхний (поглощение энергии), причем интенсивность поглощения оказывается тем большей, чем больше разность населенностей, то есть чем больше вызванное магнитным полем расщепление уровней ΔE .

В современных ЭПР-спектрометрах резонанс наблюдают посредством медленного изменения магнитного поля электромагнита при постоянной частоте ν . При этом обычно для повышения чувствительности применяется еще одна (малая) модуляция магнитного поля, в результате чего регистрируемый сигнал приобретает специфический вид: он представляет собой необычную линию или спектр поглощения (рис. 3.5, б), а первую производную от спектра по магнитному полю (рис. 3.5, в). ЭПР-спектрометры строятся в основном на частоте 3-сантиметрового или 8-миллиметрового диапазона волн. Резонанс от свободных радикалов наблюдается соответственно в полях $H_{3\text{см}} \approx 3500$ или $H_{8\text{мм}} = 12000$ э.

Магнитное взаимодействие между неспаренным электроном с ядрами соседних атомов называют сверхтонким. Сверхтонкое взаимодействие, дающее характерную сверхтонкую структуру спектров, определяет аналитические возможности ЭПР-спектроскопии. Число

линий в спектре, величина расщеплений и соотношение интенсивностей линий зависят от химического и физического строения макрорадикалов. Тщательный анализ формы спектров электронного парамагнитного резонанса и особенно их сверхтонкой структуры дает возможность устанавливать строение радикалов. Естественно, что при таком анализе приходится привлекать всю совокупность данных, известных из литературы, по радикалам разного происхождения.

Итак, после краткого изложения основ ЭПР-спектроскопии можно сделать следующие заключения о возможностях этого метода: первое – обнаружение парамагнитного сигнала в полимере, подвергнутом механическому воздействию, означает распаривание валентных электронов, разрыв ковалентной связи, то есть рождение свободных радикалов. Второе – анализ сверхтонкой структуры спектра позволяет установить строение радикалов. И третье – по интегральной интенсивности можно определить концентрацию радикалов, так как величина сигнала ЭПР пропорциональна их числу.

Рассматривая проблему изучения разрушения полимеров на молекулярном уровне прямыми методами, отметим, что ЭПР как метод исследования был применен одним из первых и дал важные результаты о распаде напряженных молекул, о строении "механических" радикалов, о реакциях, ими инициированных и о кинетике накопления радикалов в нагруженных полимерах в зависимости от напряжения, температуры и времени.

На рис. 3.6 показаны примеры записей спектров ЭПР-полимеров при разных нагрузках. В исходных образцах ЭПР-сигналы практически отсутствовали, следовательно, свободных радикалов в заметном количестве образцы до нагружения не содержали. Нагружение производилось растягивающим усилием при комнатной температуре. Нагружаемый образец находился непосредственно в резонаторе ЭПР-спектрометра. Оказалось, что нагружение вызывает появление четкого ЭПР-сигнала [40]. Примеры данного эффекта приведены на рис. 3.6 для двух ориентированных полимеров: капрона (синтетический полимер) и шелка (естественный полимер). В обоих случаях возрастание напряжения приводит к усилению сигнала. Подобные результаты были получены и для других полимеров: полиэтилена, полиэтилентерефталата и т.д. [11]. Эти данные показали, что в нагруженных полимерах задолго до разрыва образцов происходит распад химических связей, приводящий к появлению и накоплению свободных радикалов.

3.4 Ядерный магнитный резонанс

Это явление резонансного поглощения энергии радиочастотного излучения ядрами атомов вещества, помещенного в постоянное магнитное поле. Для получения спектра ампулу с веществом (рис. 3.7) помещают в высокочастотную катушку и затем плавно изменяют напряженность магнитного поля. В момент прохождения области резонанса в образце поглощается энергия, что приводит к изменению напряжения на обмотке высокочастотной катушки, которое регистрируется в виде спектра. Применяют также метод, в котором высокочастотное поле действует не непрерывно, а короткими мощными импульсами. При этом изменяется намагниченность вещества, связанная с магнитными моментами ядер. В процессе восстановления намагниченности наблюдается сигнал, несущий информацию о спектре ЯМР образца. Соотношение между этим сигналом и характеристиками линий спектра описывается преобразованием Фурье. Этот метод позволяет резко увеличить чувствительность.

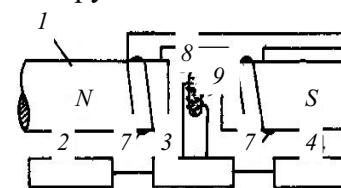


Рис. 3.7 Блок – схема ЛМР:

- 1 – магнит; 2 – генератор частоты;
- 3 – электрический мост (усилитель и детектор);
- 4 – катушка развертки;
- 5 – блок развертки;
- 6 – катушки развертки образца;
- 7 – катушка развертки образца;
- 8 – катушка развертки образца;
- 9 – высокочастотная катушка.

ЯМР является одним из методов, способных давать информацию об аморфных и кристаллических участках в полимере отдельно [42]. В спектре жесткого резонанса (ЖР) для аморфно-кристаллических полимеров при температурах выше температуры их стеклования достаточно четко выделяются две компоненты: широкая и узкая. [43] (рис. 3.8). Появление двух компонент в спектре обусловлено резкими различиями интенсивности характера молекулярного движения в кристаллических и аморфных областях полимера.

Ширина ЯМР-спектра твердого полимера определяется, в основном, магнитным взаимодействием между протонами. Это взаимодействие приводит к тому, что любой из резонирующих протонов оказывается под действием двух магнитных полей: внешнего поля

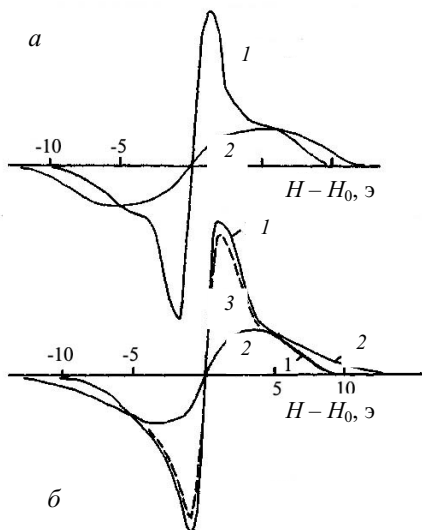


Рис. 3.8 Спектры ядерного магнитного резонанса (правая производная по магнитному полю H) для ориентированного капрона:

- а) влияние изменения температуры образца: 1 – +130 °С, 2 – +27 °С;
 б) влияние нагрузки на образец: 1 – $\sigma = 0$; 2 – 360 МПа; 3 – после снятия нагрузки (температура –130 °С)

(H) ЯМР-спектрометра и внутреннего локального поля (ΔH), созданного соседними протонами. Локальные внутренние поля, естественно, не являются неизменными по величине. Для разных протонов они различаются, поскольку различаются расположение и расстояние между атомами. Кроме того, локальные поля либо складываются, либо вычитаются из внешнего для ориентированного капрона поля ($H \pm \Delta H$). Это приводит к тому, что резонансное поглощение электромагнитных волн, строго определяемое напряженностью магнитного поля, фактически размывается, а линия поглощения приобретает некую ширину. Так в широкорезонансном (ШР) спектрометре, работающем на частоте 30 МГц, резонанс протонов наблюдается при напряженности поля 7000 э, а резонансная линия для твердого полимера из-за действия внутренних локальных полей размывается по полю примерно на 10 – 15 э. Это и есть "широкая" компонента спектра поглощения. Такое происходит для жесткого материала, когда магнитное окружение статично, неизменно во времени, если же интенсивность молекулярного движения достаточно велика и происходят частые изменения расположения и взаимной ориентации атомов, то локальные поля усредняются во времени, а их эффективное значение уменьшается и может даже стать нулевым. В действительности нулевые значения внутренних полей достигаются лишь для жидкостей, где ширина линий ЖР становится очень малой (тысячные доли эрстеда). В полимерах же наиболее интенсивная форма молекулярного движения — сегментальная подвижность —

вызывает не полное, но весьма заметное уменьшение эффективного локального поля, в результате чего широкие линии сужаются примерно до 1 – 2 э. Эту узкую компоненту ЯМР-спектра связывают с аморфными областями полимера, где происходит интенсивное сегментальное движение. Из теории следует, что эффективное сужение линии поглощения происходит при условии, когда частота молекулярного движения становится сравнимой с шириной самой линии (выраженной в единицах частоты). Поэтому широкая компонента ЯМР-спектра полимера переходит в узкую, когда частота сегментального движения достигает величины порядка 10^4 гц. Это означает, что узкие компоненты можно наблюдать лишь при достаточно высоких температурах (например, для капрона выше 70 °С).

Метод ЯМР находит обширное применение при изучении в различных телах прежде всего вопросов теплового движения, подхода твердых тел к точкам плавления и т.п. Для полимеров методом ЯМР изучаются вопросы стеклования, переходов от одних форм движения цепных молекул к другим и т.д.

Успешно применяется ЯМР и при изучении поведения полимера под нагрузкой.

Оказалось, что для ориентированных аморфно-кристаллических полимеров взятых при температурах, когда их аморфные области незастеклованы (так как при низких температурах узкая компонента в спектре ЯМР будет отсутствовать) (рис. 3.8, а), и находящихся под действием растягивающего напряжения вдоль оси ориентации, наблюдаются сильные изменения в ЯМР-спектре (рис. 3.8, б). После снятия нагрузки восстанавливается исходная картина. Видно, что в то время как широкая компонента в спектре почти не меняется, узкая – резко снижается [44]. Это означает, что в областях полимера с высокой подвижностью происходит под нагрузкой значительное снижение подвижности. Полимерное вещество замерзает, то есть наблюдается механическое стеклование. Натяжение полимера вызывает распрямление молекул. Конформационный набор резко уменьшается, подвижность падает, приближаясь к малой подвижности в кристаллических областях.

Применение метода ЯМР оказалось очень полезным для изучения поведения полимеров при деформировании и разрушении. Оно дает прямую информацию о натяжении молекул в аморфных областях под нагрузкой и подтверждает важную роль аморфной составляющей полимера в определении его прочностных свойств.

3.5 Рассеяние электромагнитного излучения

Для обнаружения трещин и определения их характеристик применяется рассеяние двух видов излучения: видимого света (длина волны $\lambda = 4000 - 6000 \text{ \AA}$) и рентгеновских лучей ($\lambda = 1 - 2 \text{ \AA}$). Отличаясь по длинам волн в тысячи раз, эти два вида излучений позволяют получать более надежные данные (проверяя друг друга), а также удачно дополняют друг друга, поскольку видимый свет легче дает информацию о неоднородностях с размерами в сотни-тысячи ангстрем, а рентгеновские лучи – о неоднородностях меньших размеров – десятки-сотни ангстрем.

В основе методов рассеяния излучения лежит теория рассеяния на одиночной неоднородности [45]. Согласно этой теории, рассеянное излучение в виде индикатрисы – распределения интенсивности рассеянного излучения по углам относительно первичного пучка – несет информацию о самой неоднородности: ее размерах, форме, ориентации (это заключено в угловых характеристиках рассеяния) и о природе неоднородности (это заключено в величине интенсивности рассеяния).

Формула для угловой зависимости интенсивности рассеянного рентгеновского излучения имеет следующий вид

$$dI(\varphi) \approx I_0 \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 V^2 (\eta_n - \eta_{cp})^2 \exp\left(-\frac{\pi l^2}{3 \lambda^2} \varphi^2 \right) d\omega.$$

где $dI(\varphi)$ – интенсивность, рассеянная под углом φ (угол между осью первичного пучка и линией: образец-приемник) в телесный, угол $d\omega$ (рис. 3.9), I_0 – плотность интенсивности первичного пучка, e и m_e – заряд и масса электрона соответственно, c – скорость света в пустоте, V_n – объем неоднородности, η_n и η_{cp} – электронная концентрация в "веществе" неоднородности и среды соответственно (для трещин — полостей в телах $(\eta_n - \eta_{cp})^2 = \eta_{cp}^2$, так как $\eta_n = 0$), l_n – размер неоднородности лежащей в плоскости, проходящей через первичный пучок и приёмник, λ – длина волны излучения.

Из формулы (3.1) видно, что интенсивность рассеяния резко зависит от размеров неоднородности ($V^2!$) и ее удельной рассеивающей способности: определяемой отклонением свойств "вещества" неоднородности от свойств среды $(\eta_n - \eta_{cp})^2$. Крутизна спада интенсивности рассеяния с углом определяется размерами неоднородности. Если неоднородность является анизотропной по форме (несферической), то рассеянное излучение распределяется анизотропно вокруг оси первичного пучка (азимутальное распределение рассеянной интенсивности) (рис. 3.10). При этом в направлениях, где размеры неоднородности больше, спад интенсивности рассеяния идет круче и в целом дифракционное "изображение" неоднородности оказывается на 90° повернутым в плоскости, перпендикулярной к первичному пучку, относительно "теневого" изображения (рис. 3.10).

Если неоднородности (ориентированные параллельно друг другу в случае их несферичности) расположены достаточно редко в пространстве (на расстояниях больших, чем их собственные размеры, и немалых по сравнению с длиной волны излучения), а также нерегулярно, то рассеяние от совокупности таких неоднородностей имеет индикатрису, совпадающую по форме с индикатрисой от одной неоднородности, а по интенсивности – пропорционально числу рассеивающих неоднородностей. Экспериментальная задача ставит цель промерить индикатрису рассеяния от объекта с неоднородностями (например, от полимера с субмикроскопическими трещинами, которые и являются самыми резко выраженными неоднородностями в твердом теле без примесей) и, применяя теорию рассеяния, получить сведения о неоднородностях.

Для субмикротрещин с размерами в сотни ангстрем рассеяние видимого света распространяется на весь диапазон углов рассеяния – до 180° , а для рентгеновского рассеяния индикатриса сосредотачивается в области углов порядка минут или десятков минут, т.е. в области малых углов. Эти обстоятельства и определяют схемы установок для измерения обоих видов рассеяния (рис. 3.11).

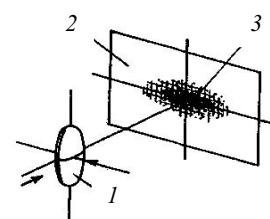


Рис. 3.10 Схема рассеяния на анизотропной по форме частице:
1 – частица;
2 – измерительная плоскость; 3 – дифракционное "изображение" частицы

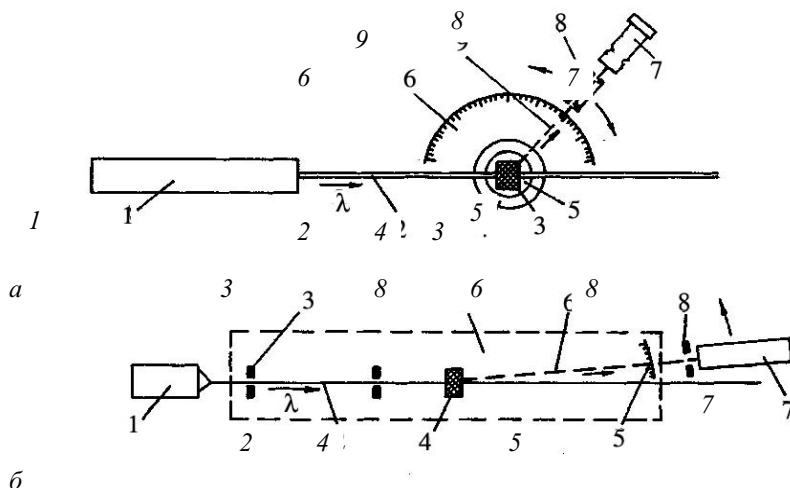


Рис. 3.11 Схемы установок для изучения субмикроскопических трещин в твердых телах методами рассеяния электромагнитных излучений:

а – установка для изучения рассеяния света: 1 – источник света (лазер);

2 – первичный сколлимированный луч; 3 – образец в цилиндрической кювете;

4 – кювета с иммерсионной жидкостью 5; 6 – лимб гониометра;

7 – фотоумножитель; 8 – коллиматор рассеянного излучения; 9 – регистрируемый

рассеянный луч; б – установка для изучения рассеяния рентгеновских лучей под малыми

углами: 1 – рентгеновская трубка; 2 – первичный луч, сколлимированный системой щелей

или диафрагм 3; 4 – образец; 5 – лимб гониометра; 6 – регистрируемый рассеянный луч; 7 –

счетчик квантов со щелью или диафрагмой 8

перед ним; 9 – эвакуированный объем

В установке для измерения рассеяния света целесообразно использовать в качестве источника излучения лазер, а для регистрации рассеянного излучения – фотоумножитель; для изучения рассеяния рентгеновских лучей под малыми углами – соответственно острофокусную рентгеновскую трубку и сцинтилляционный счетчик: кристаллофосфор и фотоумножитель.

Большим достоинством этих дифракционных методов является то, что можно изучать тела, находящиеся непосредственно под нагрузкой при различных температурах, в разных средах.

4 ИСПЫТАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1 Испытание ограждающих конструкций с применением пластмасс

Трехслойные плиты и панели состоят из трех частей: двух наружных слоев обшивок; промежуточного среднего слоя, играющего роль тепло- и звукоизолятора; обрамления, окаймляющего плиту по периметру и обеспечивающего надежную прочность плиты и крепление ее к несущим конструкциям.

По виду среднего слоя плиты и панели разделяют на сплошные и ребристые. Возможны также различные варианты и сочетания этих двух основных типов. На рис. 4.1 показаны поперечные сечения плит и панелей. При этом применяют различные материалы. Наиболее приемлемыми являются: для обшивок – стеклопластики, асбоцемент листовой, фанера, древесноволокнистые плиты, декоративнослоистый пластик, лакированная сталь, алюминий; для среднего слоя – пенопласты и сотопласты. Материалом для ребер служат древесина, фанера, древесноволокнистая плита, древесностружечная плита, стеклопластики, профилированный ас-боцемент.

При выборе материала для обшивок и среднего слоя следует учитывать, что обшивки кроме прочности должны обладать достаточной стойкостью против атмосферных воздействий, влаги, солнечной радиации, температуры, ветра, а средний слой – надлежащими пароизоляционными свойствами, теплостойкостью, биостойкостью. Обрамление обычно изготавливают из материала, однородного с обшивкой, чем достигается максимальное снижение температурных напряжений в конструкции. Теплопроводность обрамления должна соответствовать теплопроводности всей плиты или панели.

Элементы конструкции между собой соединяют на клеях с дублированием шурупами. Обычные размеры плит и панелей $6 \times 1,5$ м. Однако в отдельных случаях применяют плиты пролетом до 12 м. Они должны иметь усиление в виде шпренгеля из труб или прутков.

4.1.1 Основные виды дефектов в трехслойных конструкциях

Появление дефектов в составных конструкциях с применением низкомолекулярных полимерных материалов обусловлено свойствами применяемых материалов и технологией их изготовления.

Полная систематизация дефектов в трехслойных конструкциях дана в [46]. Для анализа влияния на несущую способность панелей можно выделить следующие основные типы дефектов.

Начальная погибь обшивок (рис. 4.2). Встречается практически во всех видах трехслойных конструкций. Направление начальной погиби может быть различным. Причиной этого дефекта является плохая выправка листов, нарушение технологии

профилирования, неравномерность распределения давления при склеивании, нарушение режимов вспенивания.

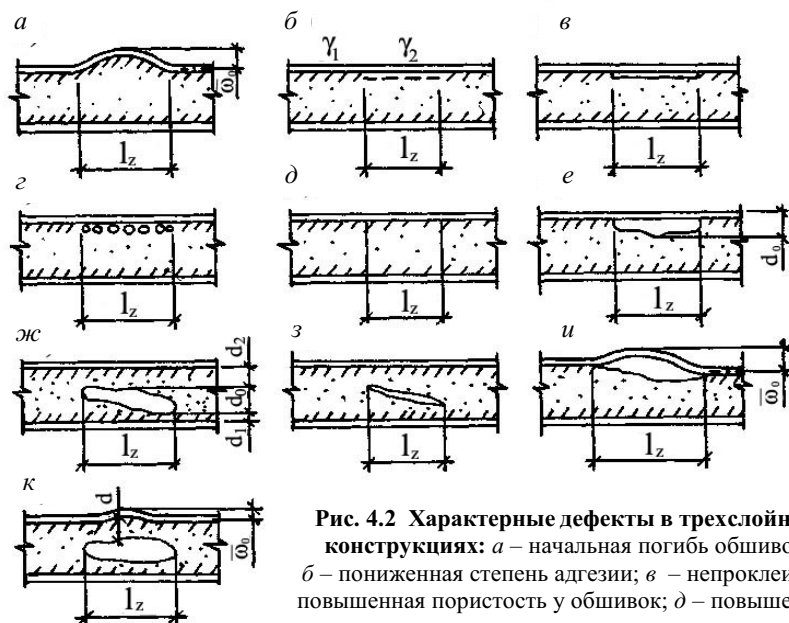


Рис. 4.2 Характерные дефекты в трехслойных конструкциях: *а* – начальная погибь обшивок; *б* – пониженная степень адгезии; *в* – непрочлеи; *г* – повышенная пористость у обшивок; *д* – повышенная пористость на всю толщину; *е* – газовые полости у обшивок; *ж*) – газовые полости внутри среднего слоя; *з* – усадочные трещины; *и*; *к* – комбинации различных

Начальная волнистость обшивок легко обнаруживается с помощью различного рода профилографов. Построенные гистограммы величин начальной погиби на каждую панель (рис. 4.3, *а*, где n – число дефектов на панель размером 1×3 м) показали, что распределение размеров дефектов подчиняется статистическим законам. Это принимается во внимание при исчислении средних значений начальных погибей для определенного типа панелей.

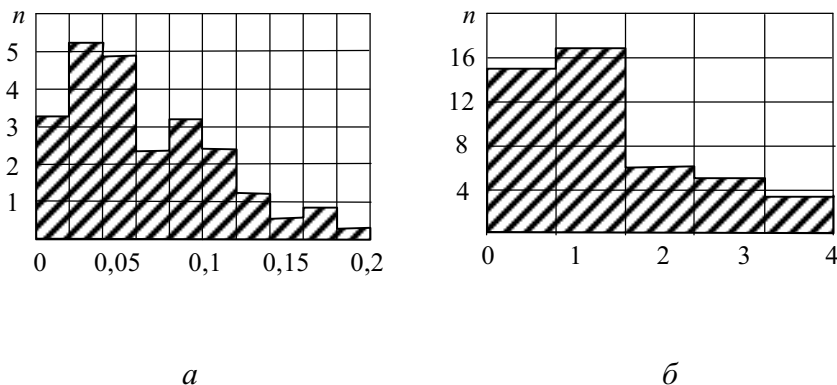


Рис. 4.3 Гистограммы: *а* – начальной погиби обшивок; *б* – характерного размера газовых полостей для панелей Воронежского завода алюминиевых конструкций

Результаты обследования показали, что величина средней начальной погиби обшивок зависит от принятых материалов обшивок и среднего слоя, а также от технологии изготовления конструкций. При тщательно отработанных процессах производства изделий величина начальной погиби может быть сведена к минимуму, который практически не влияет на прочность конструкций.

Нарушение адгезии пенопласта с обшивками (рис. 4.2, *б*). Встречается при любой технологии изготовления. Причины: возникновения дефектов этого вида – нарушение технологии приготовления и нанесения подложки на обшивки, плохая подготовка обшивок, нарушение режимов склеивания вспенивания. Частным случаем является полное отсутствие адгезии – непрочлеи (рис. 4.2, *в*).

Непрочлеи наблюдаются чаще всего в конструкциях изготавливаемых склеиванием обшивок со средним слоем.

Для панелей изготавливаемых вспениванием пенопласта в их полости, наиболее характерным дефектом является частичное нарушение адгезии обшивок к среднему слою. Прочность адгезионного соединения обшивок со средним слоем в зоне дефекта часто бывает настолько мала что при определении этого дефекта на прочность конструкции в целом, наличие адгезии можно не учитывать, т.е. дефект рассматривать как полный непроклей.

Степень адгезии обшивок к среднему слою определяется по испытаниям образцов на равномерный отрыв. Коэффициент адгезии принимается равным отношению предела прочности при равномерном отрыве обшивок от среднего слоя на дефектном участке к соответствующему пределу прочности образца на бездефектном участке

$$K_d = \frac{\sigma_2^p}{\sigma^p}.$$

Однако дальнейшие исследования показали, что эта величина может быть принята лишь как оценочная, а не расчетная. В ряде случаев испытания вообще не позволяют вычислить адгезионную прочность при равномерном отрыве (само понятие равномерный здесь условно, так как равномерного распределения напряжений при испытании образцов в силу целого ряда факторов достигнуть не удастся) в связи с тем, что разрушение образцов происходит по материалу среднего слоя, то есть определяется прочностью среднего слоя на растяжение, а не искомая характеристика.

Более объективным показателем степени адгезии является величина удельной энергии отрыва обшивок от среднего слоя, получаемая при испытаниях на неравномерный отрыв.

Обнаружение дефектов типа нарушение адгезии или полный непроклей – задача довольно сложная. Существующие методы пробного нагружения, вакуумный метод [47] и другие, с одной стороны, являются разрушающими, с другой стороны, не обеспечивают достаточно точного определения размеров и местоположения дефекта. Наиболее целесообразны в этом случае неразрушающие методы контроля, в том числе ультразвуковые.

Зоны повышенной пористости пенопласта. Могут располагаться непосредственно у обшивок (рис. 4.2, з), ухудшая тем самым их связь со средним слоем или распространяться на всю толщину конструкции (рис. 4.2, д), снижая сопротивление сдвигу. Этот тип дефектов характерен для изделий, изготовленных методом вспенивания пенопласта в полости панелей. Причиной его является нарушение режимов вспенивания.

Наиболее часто встречающимися разновидностями этого типа дефектов являются повышение пористости и нарушение закона распределения плотности пенопласта по толщине конструкции.

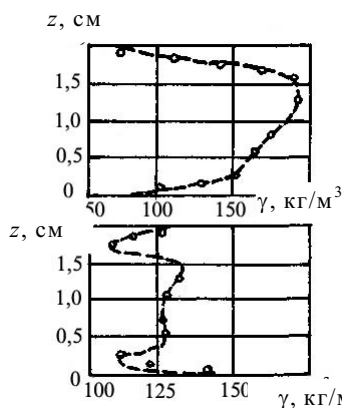


Рис. 4.4 Распределение плотности, пенопласта по толщине панелей

Повышение пористости пенопласта в небольшой по толщине области, непосредственно примыкающей к обшивкам. Такие дефекты возникают вследствие того, что вспенивающая композиция при подходе к обшивкам теряет свою подвижность и отверждение происходит без достаточного внутреннего давления. Повышенная теплопередача обшивок при заливке композиции также может служить причиной нарушения структуры пенопласта в зоне их примыкания.

Эта разновидность дефекта по своему влиянию на прочность трехслойные конструкции аналогична нарушению адгезии или понижению коэффициента упругого основания в зоне дефекта.

Нарушение закона распределения плотности пенопласта по толщине или площади конструкции. Для большинства заливочных пенопластов нормальным и с точки зрения работы среднего слоя вполне приемлемым является экспоненциальный

закон распределения плотности по толщине изделия [48]. Однако различие структуры пенопласта в отдельных по толщине зонах изменяет этот закон.

На рис. 4.4 показаны экспоненциальные зависимости распределения плотности пенопласта по толщине панелей, выпускаемых различными заводами. Значения плотности в

отдельных точках получены после разрезки среднего слоя на пластинки, а для более тонких изделий – после фрезеровки пенопласта на определенную толщину. Из рис. 4.3 видно нарушение закона распределения плотности по толщине. Микроскопический анализ подтвердил наличие повышенной пористости у обшивок изделия и на некотором расстоянии от них. Рассмотренное выше нарушение пористости у обшивок можно считать частным случаем нарушения закона распределения плотности пенопласта. Однако оба этих случая различаются по характеру нарушения структуры: в первом подразумевается нарушение пористости сравнительно небольшой толщины (примерно 1 – 3 структурных слоя), во втором, отмечается общее нарушение закона распределения плотности по всей толщине пенопласта.

Влияние нарушения закона распределения плотности по толщине среднего слоя на прочность изделия при небольшом градиенте плотности обычно невелико, и только резкое ее изменение в меньшую сторону может ощутимо снизить несущую способность конструкции. Неравномерность распределения плотности конструкции также начинает сказываться только при значительном снижении плотности на сравнительно больших участках.

Газовые раковины (полости) возникают в результате нарушения режимов вспенивания, могут располагаться как у обшивок (рис. 4.2, е), так и внутри среднего слоя (рис. 4.2, ж). В последнем случае обшивка оказывается подкрепленной слоем пенопласта.

Этот тип дефекта наиболее распространен и опасен для конструкций, изготавливаемых вспениванием пенополиуретана в полости изделия. Чаще всего газовые полости возникают в непосредственной близости от обшивок. При этом в случае сжатия тонколистовая обшивка трехслойной конструкции оказывается в самых невыгодных условиях, по сравнению с теми случаями когда она подкреплена пенопластом.

Характерные размеры дефектов в плане обычно колеблются от 2 до 30 см по толщине газовые полости бывают самых различных размеров, иногда на всю толщину изделия. Последний вид дефекта является самым опасным, конструкции с такими дефектами практически не подлежат эксплуатации.

Выявление дефектов типа "газовые полости" со всеми необходимыми для расчета параметрами (размерами в плане, глубиной залегания от обшивок и толщиной полости) возможно только с помощью неразрушающих методов контроля.

Усадочные трещины в материале среднего слоя (рис. 4.2, з). Они возникают при вспенивании в результате нарушения технологии приготовления компонентов и несоблюдения режимов отверждения. Этот дефект наиболее характерен для конструкций, изготавливаемых из заливочных пенопластов, обладающих хрупкими свойствами (например, фенольных пенопластов).

Усадочные трещины в целом аналогичны дефектам типа "газовые полости". Однако прочность изделия здесь чаще определяется не работой обшивок при ослаблении подкрепления, а влиянием концентрации напряжений в устьях трещин, что приводит к дальнейшему раскрытию трещин и в конечном итоге разрушению всей конструкции. Поэтому, дефекты типа "усадочные трещины" в материале среднего, слоя недопустимы.

Комбинированные дефекты (рис. 4.2, и, к) являются комбинацией двух или более дефектов. Наиболее характерны начальные погиби обшивок в зонах газовых раковин, непрочности и т.п. Они появляются из-за избыточного давления возникающего внутри среднего слоя и приводящего к изгибу малоэластичных обшивок. Дефекты такого типа представляют большую опасность и в конструкциях недопустимы.

Существуют и другие типы комбинированных дефектов – нарушение адгезии, сопровождающееся изменением плотности пенопласта; изменение закона распределения плотности пенопласта с газовыми раковинами и т.п.

Рассмотренные выше дефекты классифицированы с точки зрения технологического принципа (причины их появления) и визуальным признакам (виду, размерам, местонахождению) применительно к основным способам производства трехслойных конструкций. На основе проведенного анализа дефектов можно сделать вывод о том, что задачи их устранения полностью не решены. Поэтому, необходим полный контроль качества всех [49] выпускаемых изделий, первым этапом которого является дефектоскопия, то есть обнаружение дефектов и установление их типов и размеров, а вторым – оценка их влияния на

эксплуатационные свойства конструкций.

4.1.2 Определение физико-механических характеристик

Пенопласт в качестве среднего слоя позволяет активно включить его в работу всей конструкции. Связывая между собой обшивки и другие элементы конструкций, средний слой поддерживает их, обеспечивает совместную работу и препятствует потере устойчивости при сжатии и сдвиге.

Пенопласты представляют собой особый вид полимерных материалов в которых сочетаются твердая и газообразная фазы. Конструкции с использованием пенопластов, как правило, имеют дефекты. При этом они могут быть в виде микродефектов, связанных с нарушением структуры или сплошности в достаточно малых объемах, и макродефектов, значительно превышающих характерные размеры ячеек материала.

Это значительно осложняет определение физико-механических характеристик пенопластов. Методы испытаний пенопластов, приведенные в существующих ведомственных и отраслевых инструкциях, и зарубежные методики существенно различаются по способу испытаний, размерам образцов, времени приложения нагрузки и так далее.

Метод испытания на сжатие. Он состоит в определении модуля упругости, разрушающего напряжения (или напряжения при 10 % деформации). Такие испытания проводятся на образцах пенопласта в форме призмы или куба, вырезанных из среднего слоя конструкции.

Исследования ряда авторов [50] показали, что указанные характеристики значительно меняются по толщине конструкции и зависят от направления вырезки образца. Поэтому существующая методика вырезки образцов, приводящая к срезанию зон уплотнения материала около обшивок дает заниженные или завышенные значения.

Более объективную информацию можно получить при испытании образцов вырезанных из конструкции непосредственно с обшивками. Для наиболее распространенных толщин трехслойных строительных конструкций размеры образцов принимаются $50 \times 50 \times h$, мм.

Испытания проведенные на образцах, вырезанных с обшивками (рис. 4.5, кривая 1) и без обшивок (рис. 4.5, кривая 2), показали значительное различие в диаграммах $\sigma_z - \varepsilon_z$ и, следовательно, в значениях модуля упругости и условного предела прочности при сжатии. Экспериментальное распределение деформаций по грани образца определялось методом муаров от нерегулярных растров [66].

Метод испытания на растяжение. Определение механических характеристик пенопласта вырезанного из конструкции вдоль невозможно из-за малой толщины изделий. Поэтому испытание осуществляется на образцах, вырезанных перпендикулярно направлению вспенивания в соответствии с ГОСТ 17370-71.

Замер деформаций при испытании на растяжение можно проводить с помощью микроскопа или катетометра, а также используя метод муаров.

Метод испытания на сдвиг. Наиболее распространенными являются методы испытаний на сдвиг прямоугольных образцов, с приклеенными к поверхности металлическими пластинами и цилиндрических образцов на кручение [51]. Они имеют существенные недостатки. Главными из них является то, что образцы как и при испытаниях на сжатие, вырезаются из средней части конструкции. Использование образцов с обшивками при кручении невозможно из-за малой толщины конструкции. Поэтому был применен метод испытаний на сдвиг парных образцов.

В отличие от традиционных способов испытаний [51] предлагается вырезать образцы непосредственно с обшивками, то есть в качестве пластин, к которым прикладываются растягивающие усилия, использовать обшивки.

Основным недостатком такого метода испытаний является неравномерность распределения напряжений по длине образца. Испытания, проведенные с использованием метода муаров, показали, что для низко модульных пенопластов эта неравномерность незначительна и практически не сказывается на результатах.

Метод определения адгезии пенопласта к обшивке. В качестве основного показателя адгезионной связи используется величина предельных напряжений при разрушении связи между пенопластом и обшивкой. Образцы испытываются на равномерный отрыв. Однако эти результаты не могут быть использованы в расчетах, поскольку при отрыве обшивки от среднего слоя на краях возникает значительная концентрация напряжений. Кроме того, сами испытания не являются корректными из-за неравномерности распределения напряжений по площади образца. Для маложесткого среднего слоя разрушение чаще носит когезионный характер (по пенопласту) и не позволяет определить искомую характеристику.

В качестве величины, определяющей адгезионную связь среднего слоя с обшивками, целесообразно использовать удельную работу совершаемую при отрыве обшивки. При этом для того, чтобы приблизить условия эксперимента к реальной картине разрушения, предлагается проводить испытания на неравномерный отрыв по методике описанной в работе [52].

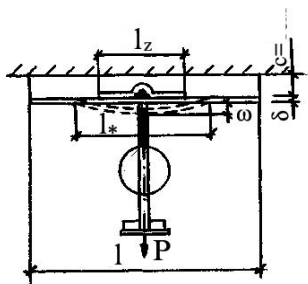


Рис. 4.6 Схема испытаний на неравномерный отрыв обшивки от среднего слоя

На рис. 4.6 представлена схема испытаний. Толщина пенопласта в образце принята минимальной, для уменьшения энергии деформации подстилающего слоя при изгибе обшивки. В центральной части образца делается дефект типа "трещина".

В процессе испытаний фиксируется нагрузка при которой рост дефекта прекращается, размер дефекта l_* соответствующий данной нагрузке и прогиб обшивки $\bar{\omega}$. Размер дефекта определяется с помощью измерительного микроскопа. Испытания показали, что удельная работа разрушения практически не зависит от начального размера дефекта.

Удельная работа разрушения при отслаивании обшивки

$$\gamma_0 = \frac{1}{b} \frac{\partial U_f}{\partial l_*} = \frac{1}{b} \frac{P^2 l_*^2}{384EI}$$

Характерная зависимость нагрузки от длины дефекта в процессе испытаний представлена на рис. 4.7.

Испытания для определения механических характеристик материалов обшивок проводятся традиционными методами при растяжении.

4.1.3 Испытания трехслойных образцов с дефектами

Основной задачей проведения кратковременных статических испытаний на трехслойных образцах с дефектами является подтверждение или уточнение выводов, сделанных в результате теоретического анализа.

Испытания проводятся на образцах с искусственно заложенными в них дефектами, что позволяет варьировать параметры дефектов и достаточно точно сравнивать с теоретическими данными.

Для всех видов испытаний в образцах моделировались дефекты двух основных типов:

непроклей – в виде тонкой щели толщиной 0,5 – 1 мм;

газовая раковина у обшивки в виде полости в пенопласте толщиной 5 – 8 мм. Для

обоих типов расчетная толщина подстилавшего слоя принималась $d = 0$;

внутренние газовые раковины – в виде полости в пенопласте толщиной 1 – 10 мм.

Испытание образцов на продольное сжатие. Образцы длиной 0,3 м (расчетная длина $l_p = 0,34$ м), шириной $b = 3$ см испытывались на продольное сжатие в специально разработанном приспособлении, обеспечивающем центрирование приложения нагрузки и шарнирность закрепления концов (см. рис. 4.8). Перед испытанием проводится отбраковка образцов с целью исключения влияния начальных погибей обшивок на их результаты.

В качестве силоизмерителя используется динамометр пружинного типа с ценой деления 10 Н. В процессе испытаний фиксируются прогибы образцов с помощью индикаторов

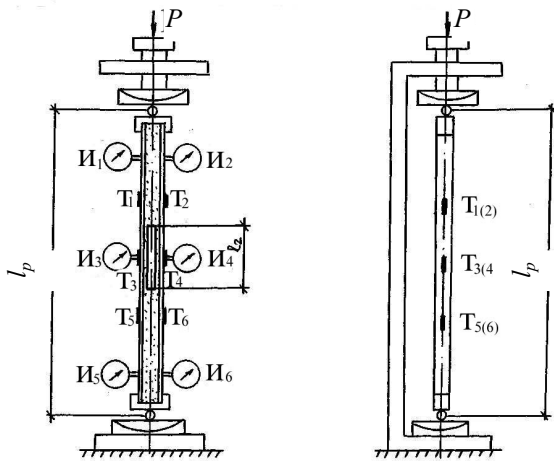


Рис. 4.8 Схема испытания образцов на продольное сжатие

размера дефекта, но и от его положения по длине образца. При приближении дефекта к опорным зонам влияние его на величину критической нагрузки возрастает.

При значительных размерах дефектов разрушение образцов происходит от локальной потери устойчивости одной из обшивок в зоне дефекта. Величина критической нагрузки зависит от размера дефекта, толщины подстилающего слоя и не зависит от положения дефекта по длине образца.

Испытание образцов на поперечный изгиб. Испытываемые образцы представляют собой балочки пролетом 0,3 и 0,4 м, шириной 3 см. В образцах моделировались те же дефекты, что описаны выше. При испытаниях в обшивках замеряются деформации с помощью тензосопротивлений (базой 21 мм) и прогибы индикаторами часового типа. Принимаются две основные схемы испытаний:

а) нагружение силой в середине пролета – дефект располагается в полупролете (рис. 4.9, а);

б) нагружение двумя силами с целью создания в средней части балки зоны чистого изгиба – дефект располагается между точками приложения сил (рис. 4.9, б).

Для обеих схем испытаний характер разрушения бывает двух видов:

– при размере дефекта меньше критического разрушение происходит в опорной зоне (реже под силой) по касательным напряжениям;

– при размере дефекта, превышающем критическую величину, наблюдается локальное выпучивание обшивки в зоне дефекта.

Экспериментальное изучение зависимости прогиба от нагрузки показывает, что эта зависимость носит линейный характер в докритической области. После достижения критических напряжений в обшивке эта зависимость становится нелинейной. Величина прогиба зависит как от размера дефекта, так и от его положения в пролете балки. При приближении дефекта к опорной зоне прогибы возрастают. Однако влияние дефектов на прогибы, так же как и на величину касательных напряжений, незначительно.

4.1.4 Испытания моделей трехслойных панелей с дефектами

Основной целью данных экспериментальных исследований является проверка некоторых теоретических положений на моделях трехслойных панелей, которые по физико-механическим характеристикам материалов обшивок и среднего слоя максимально приближены к реальным изделиям.

В качестве образцов для испытаний использовались трехслойные панели размером $1,5 \times 0,4 \times 0,1$ м [46]. В процессе изготовления в панелях закладываются искусственные дефекты

часового типа с ценой деления 0,01 мм, а также производится замер деформаций обшивок тензосопротивлениями базой 21 мм. Регистрации деформаций осуществляется автоматически измерителем деформаций АИД-4м.

Характер разрушения образцов зависит от вида и размера дефекта. Для бездефектных образцов, а также при дефектах достаточно малых размеров, разрушение происходит от общей потери устойчивости. Образец изгибался по кривой, близкой к синусоиде. Толщина подкрепляющего слоя ($0 \leq d \leq 1$ см) практически не влияла на результаты. При увеличении размера дефекта потеря устойчивости происходит по S-образной кривой в его зоне.

В обоих рассмотренных случаях величина критической нагрузки зависит не только от

двух типов:

а) типа непрочлея, т.е. отсутствие сцепления обшивки со средним слоем. Эти дефекты моделируются путем укладки двойного слоя тонкой фторопластовой пленки, смазанной техническим вазелином, в заданную зону перед вспениванием пенопласта;

б) типа внутренние газовые полости, т.е. пустоты в среднем слое. Моделируются путем укладки деревянных брусков обернутых фторопластовой пленкой в промежуток между обшивками перед вспениванием пенопласта. После изготовления бруски вынимались, образуя полость в среднем слое.

Панели испытываются на изгиб поперечной нагрузкой в специально разработанном приспособлении, обеспечивающем шарнирность опирания краев без их смятия и

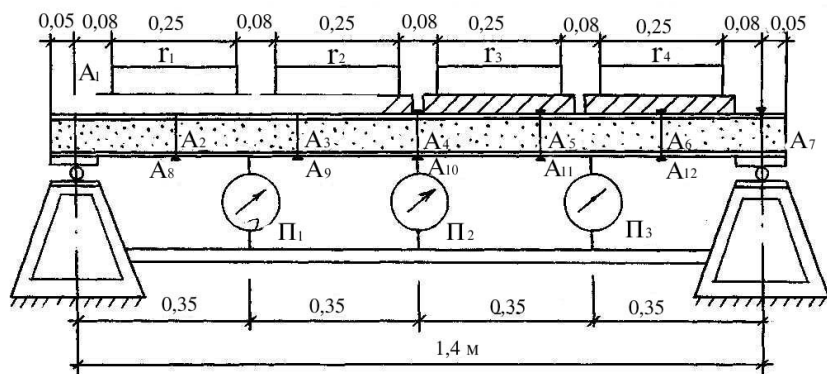


Рис. 4.10 Схема испытаний моделей трехслойных панелей на поперечный изгиб

возможность установки необходимых приборов. Схема испытаний приведена на рис. 4.10. Ступени загрузки составляют 50 – 260 Н (по мере приближения к разрушению модели нагрузка на ступень уменьшается).

В процессе испытаний измеряются деформации в верхней и нижней обшивках по двум сторонам панели с помощью тензометров ТА-2. Измерение прогибов осуществляется в трех точках по длине пролета прогибомерами 6-ПАО. Непосредственно в зоне дефекта, в различных точках по его площади наклеиваются тензодатчики сопротивления в продольном и поперечном направлениях. В качестве измерительной системы используется автоматический измеритель деформаций АИД-4м.

Наклеенные датчики позволяют следить за изменениями напряжений в обшивке по площади дефекта в процессе нагружения образца, и тем самым фиксировать наступление локального выпучивания. В процессе испытаний в помещении поддерживаются нормальные температурно-влажностные условия ($T = 18 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $W = 65 - 70 \%$).

4.1.5 Длительные статические испытания образцов и трехслойных панелей с дефектами

Задачей длительных статических испытаний является установление критерия разрушения сжатых обшивок при местной потере устойчивости.

Длительные испытания проводятся как на малых образцах, так и на моделях трехслойных панелей.

Для определения долговечности пенопластов в [53] предлагается шестипозиционный стенд. Станина его выполнена из двух равнопрочных уголков № 7 и в виде консоли жестко крепится к стене. Поскольку станина изолирована от фундамента, то вибрация стенда при ударе падающего груза исключена.

К стенке тавра крепятся шесть испытательных секции. Каждая секция (рис. 4.11) состоит из неподвижного 2 и подвижного 5 полуколец захвата, верхних 1 и нижних 6 тяг. Образец 3 надевается на полукольца 2 и 5. Неподвижное полукольцо 2 через тягу соединяется со станиной, а к подвижному полукольцу 5 подвешиваются грузы. Кольцевой образец (толщина 10 мм, внешний диаметр 60, внутренний 40 мм) имеет ряд преимуществ перед двусторонней

лопаткой, рекомендуемой ГОСТом: исключается возможность образования концентраторов напряжения, смятия образца в захватах, устраняется его перекокс и упрощается изготовление.

Время до разрушения при кратковременных испытаниях (до 100 с) фиксируется секундомером, а при более длительных – с помощью шестипозиционного милливольтметра. Для этого захваты изолируются от станины и включаются в плечи моста прибора. При обрыве образца полукольца со скользящими контактами 4 расходятся, цепь моста разрывается, что фиксируется на диаграммной ленте.

Для проведения испытаний при повышенных температурах используется конвективный обогрев. Нагреватель представляет собой асбестоцементную трубу диаметром 30 мм, с намотанной нихромовой проволокой. Труба помещается в коробчатый отражатель из никелированной жести. Температура регулируется с помощью ЛАТРа, а фиксируется термопарой и потенциометром.

В качестве трехслойных образцов используются балочки пролетом 0,4 м [46]. Образцы испытываются на поперечный изгиб двумя силами на установке для длительных испытаний. В средней части образцов моделируются дефекты типа непрочлей в виде тонкого пропила и дефекты типа "газовая полость".

Уровень нагружения принимается в пределах 0,6 – 0,9 от разрушающей нагрузки при кратковременных испытаниях. Для образцов, имеющих щель между обшивкой и средним слоем деформации выпучивания, развивающиеся во времени, были ограничены толщиной щели. Поэтому образцы при всех уровнях загрузки не достигли разрушения (рис. 4.12, а).

Для образцов с дефектами типа газовая полость локальные деформации обшивки ничем не ограничивались. При высоких уровнях загрузки прогиб развивался во времени, что приводило к разрушению образца (рис. 4.12, б).

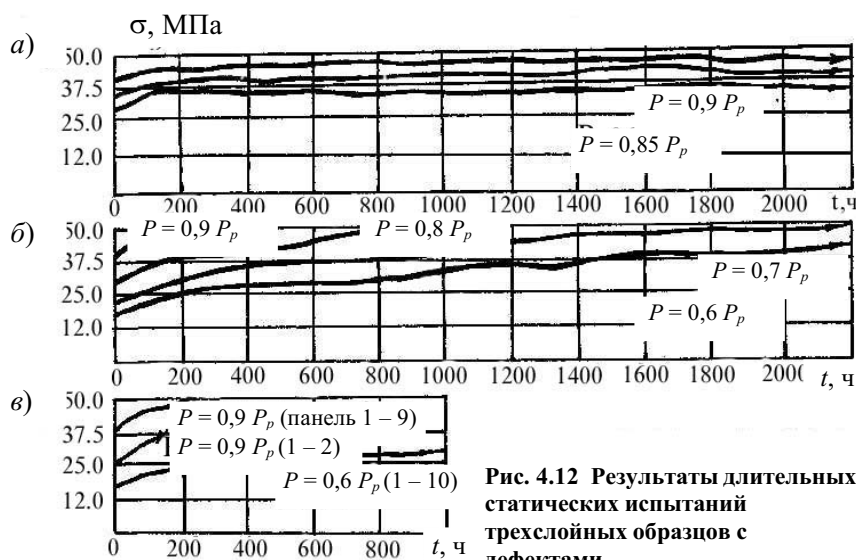


Рис. 4.12 Результаты длительных статических испытаний трехслойных образцов с дефектами

Длительные испытания проводятся также на моделях трехслойных панелей с дефектами [46]. Загружение осуществляется равномерно распределенной нагрузкой по всему пролету.

Наиболее интересные результаты получены [46] для панелей с дефектами не выходящими на края панелей. Результаты испытаний показали, что при уровнях загрузений, близких к критическим, длительная работа панелей невозможна. В начальный момент времени обшивка имеет уже некоторый прогиб, который развивается во времени. Рост прогиба сопровождается ростом размеров самого дефекта из-за процессов отслаивания (локальное выпучивание обшивок панелей происходило наружу). В течение короткого промежутка времени этот процесс приобретает лавинообразный характер, что приводит к разрушению панели (рис. 4.12, в). При меньших уровнях загрузки развитие локальных деформаций обшивок не происходит.

На рис. 4.12 показаны зависимости напряжений в обшивках от времени. Аналогичный характер носят и зависимости прогибов.

Длительные испытания позволяют сделать вывод о невозможности работы обшивок в зоне дефекта в закритической области деформирования. Поэтому за критерий прочности следует принимать критические напряжения локального выпучивания (или отслаивания).

4.2 Испытание ферм из пластмассовых труб

4.2.1 Фермы из стеклопластиковых труб

До настоящего времени они находятся в стадии экспериментального исследования. На рис. 4.13 представлены основные геометрические схемы и параметры ферм из стеклопластиковых труб.

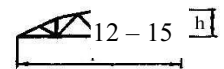
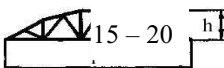
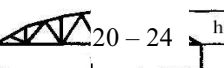
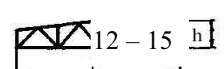
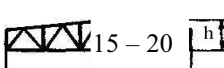
C $l, м$	$\frac{h}{l}$	$\frac{h}{l}$
 12-15 $\frac{h}{l}$	12-15	$\frac{1}{6}$
 15-20 $\frac{h}{l}$	15-20	$\frac{1}{6}$
 20-24 $\frac{h}{l}$	20-24	$\frac{1}{6}$
 12-15 $\frac{h}{l}$	12-15	$\frac{1}{6}$
 15-20 $\frac{h}{l}$	15-20	$\frac{1}{6}$

Рис. 4.13 Геометрические схемы и основные габариты ферм из стеклопластиковых труб

Для элементов решетки в этих фермах применяются трубы, имеющие высокую прочность при действии продольных сил. Узлы ферм выполняются на фасонках из стеклопластика, строительной или бакелизированной фанеры, древеснослоистого пластика, рис. 4.13. Элементы из труб могут сопрягаться с фасовками с помощью пробок, склеенных из фанеры или древеснослоистого пластика и обработанных с одной стороны на конус (см. рис. 4.14). Концы труб также обрабатываются на конус, но изнутри.

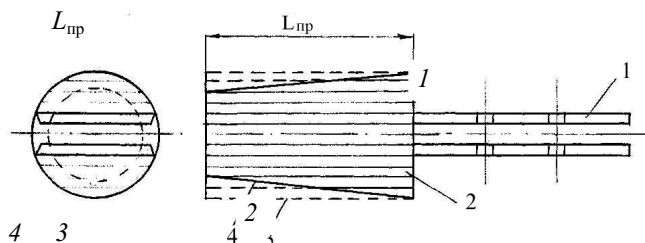


Рис. 4.14 Пробка: 1 – выпуски из ДСП-Б; 2 – фанера, фанерные плиты или ДСП-Б (склеенные); 3 – форма заготовки; 4 – обточка на конус

Пробки, с вклеенными при их изготовлении плоскими выпусками, склеиваются по конической поверхности с концами труб. При склеивании двух конических поверхностей

примыкание по всей поверхности получается плотным. Уклон конической поверхности к оси трубы рекомендуется принимать равным 1:10. В этом случае стык будет прочнее трубы. Выпуски из пробок соединяются с узловой фасонкой с помощью болтов. В химически агрессивных средах применяются болты из оцинкованной стали, древесностроительного пластика ДСП-Б или стеклопластика АГ-4С.

В зависимости от величины действующего усилия узловые фасонки могут быть одинарными или двойными. В последнем случае несущая способность болтов повышается за счет увеличения количества срезов. Стыки сжатых поясов могут решаться с помощью лобовых упоров труб и пробок.

В [54] предложены конструкции узлов стеклопластиковых ферм в двух вариантах. В первом варианте (рис. 4.15) фасонка из стеклотекстолита крепится к поясу фасонными деталями, выполненными также из стеклоткани в виде четвертей (квадрантов) или полуокружности. В месте крепления фасонки труба смазывается клеем и обертывается слоем стеклоткани, пропитанной клеем с напуском на фасовку. Затем устанавливаются фасонные детали и затягиваются болтами. Аналогично крепятся элементы решетки с той лишь разницей, что в последних делается прорезь по толщине фасонки.

Экспериментальная проверка крепления фасонных деталей к трубе по первому варианту показала высокую прочность и надежность узла. Фасонные детали могут изготавливаться путем контактной наклейки стеклохолста на оправку либо путем штамповки.

Во втором варианте [54] фасонка заготавливается заранее из двух половинок. Закругленными частями фасонка наклеивается на трубу и прижимается самонарезающими винтами. Решетка в этой конструкции узла выполняется из стеклопластиковых уголков (рис. 4.15).

4.2.2 Испытание пластмассовых труб внутренним давлением

Стеклопластиковые трубы в фермах работают при различных напряженных состояниях. Трубы верхнего пояса работают на сжатие с изгибом, нижнего пояса – на растяжение с изгибом, трубы решетки – на растяжение или продольный изгиб. Несущая способность труб во многом определяется наличием в них различных дефектов (полостей, раковин, неравномерное распределение наполнителя, разнотолщинность стенки и т.д.).

Для проверки соответствия труб эксплуатационным требованиям их подвергают длительным испытаниям постоянным внутренним давлением. Такие испытания, проводятся на специальных

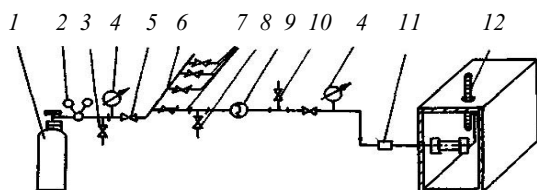


Рис. 4.16 Схема стенда для испытания труб на длительную прочность:

1 – баллон с азотом; 2 – редуктор давления; 3 – дроссель; 4 – образцовый манометр; 5 – вентиль; 6 – коллектор; 7 – отводы

на специальных многопозиционных стендах (см. рис. 4.16).

Внутреннее давление создается при помощи упругой сжимаемой среды – сжатого азота. Для поддержания постоянства давления стенды снабжены специальными устройствами.

Из-за разнотолщинности и овальности трубных образцов возникает вопрос о выборе расчетных геометрических параметров – толщины стенки и диаметра. Обычно в качестве последних принимают соответственно наименьшую толщину стенки, что гарантирует некоторый запас прочности, и среднее значение диаметра трубы. При гидростатических испытаниях значение испытательного давления вычисляется по формуле

$$P_{\text{исп}} = 2\sigma_{\text{исп}} \frac{S_{\text{min}}}{d_{\text{ср}} - S_{\text{min}}}, \quad (4.1)$$

где $P_{\text{исп}}$ – гидростатическое давление при испытании; $\sigma_{\text{исп}}$ – начальное контрольное напряжение; $d_{\text{ср}}$ – среднее значение наружного диаметра образца; S_{min} – наименьшая толщина стенки образца.

При определении тангенциальной деформации трубы в качестве длины рабочей части принимают длину окружности трубы.

Результаты гидростатических испытаний представляют в двойных логарифмических координатах в виде изотермических кривых длительной прочности, то есть кривых зависимости времени до разрушения образца от начального тангенциального напряжения. При испытании в режиме постоянной нагрузки имеет место изменение геометрических размеров образца вследствие ползучести и, следовательно, изменение истинного напряжения; поэтому очевидна некоторая условность такого построения, поскольку с равным правом можно было бы использовать любое текущее значение истинного напряжения.

Для элементов фермы работающих на продольный изгиб или растяжение используется гидравлический стенд на котором образец нагружается дополнительным осевым усилием. Испытательная секция такого стенда показана на рис. 4.17. Она встраивается в зажимы обычной разрывной машины или устанавливается на механический стенд, используемый для изучения ползучести и длительной прочности.

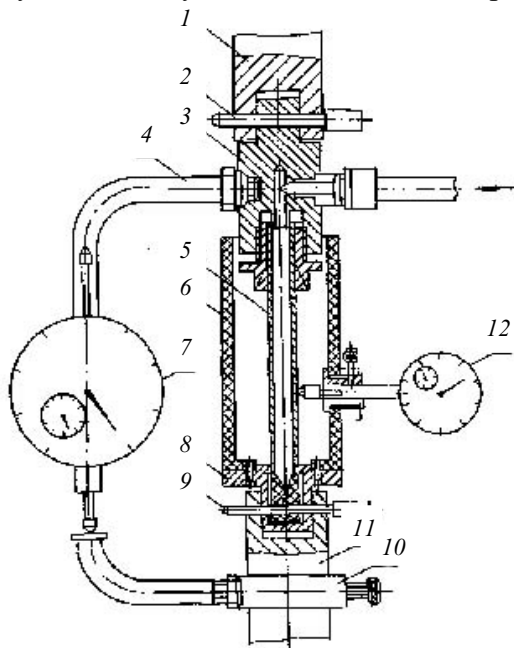


Рис. 4.17 Устройство для проведения комбинированных испытаний трубчатых образцов на разрывной машине:

- 1 – верхний зажим; 2 – соединительный штифт;
3 – распределитель; 4 – кронштейн; 5 –

Методика гидравлических испытаний пластмассовых труб достаточно проста. Перед испытаниями на образцы устанавливают зажимы, которые должны обеспечивать эвакуацию из патрубков воздуха, когда давление создается жидкостью. Патрубки заполняют рабочей средой, нагретой до температуры испытаний, и устанавливают на позиции стенда, где выдерживают при указанной температуре до нагружения не менее двух часов. Затем их нагружают в течение 20 – 60 с до испытательного давления.

При расчете испытательного давления по формуле (4.1) вводится коэффициент коррекции, который зависит от температуры рабочей жидкости. Величина возникающего в трубе напряжения обычно составляет некоторую часть изотермического предела текучести, который предварительно определяется при одноосном растяжении образцов (в виде колец или двусторонних лопаток).

Кривые долговечности некоторых пластмассовых труб представлены на рис. 4.18.

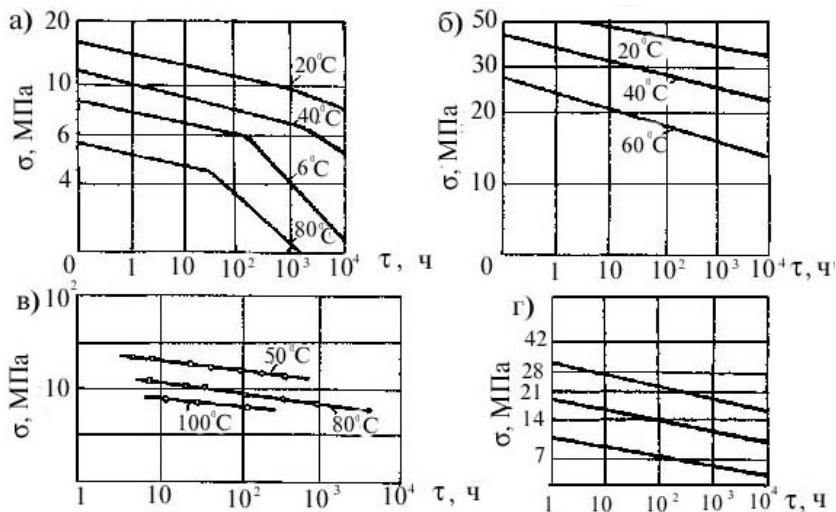


Рис. 4.18 Кривые долговечности труб из пластмасс:

- а) – полиэтилен высокой плотности, б) – винипласт,
в) – пластикат ПБ – 2, г) – АБС – пластик

В области хрупкого разрушения они описываются степенной функцией

$$\dot{\psi} = -A(\sigma/\psi)^{n_1},$$

где A_1 и n_1 – эмпирические постоянные не зависящие от напряжения.

Из рис. 4.18 видно, что для ряда пластмасс температура не влияет на константу n_1 .

4.2.3 Испытание узловых соединений ферм

Наиболее опасными сечениями в фермах являются узловые

соединения. Прочность соединения обычно проверяют в условиях сдвига и контролируют различные факторы, влияющие на качество шва (температуру, величину зазора, длину раструба, величину зоны склеивания или оплавления, изменения структуры материала в области шва и т.п.).

Обычное раструбное соединение моделирует соединение панелей в фермах из труб. Для испытания раструбного соединения применяется специальный образец, изображенный на рис. 4.19. Касательные напряжения возникают в соединении под действием крутящего момента при постоянном значении которого меняется со временем угол закручивания (ползучесть). При неизменном угле закручивания постепенно ослабевает начальный крутящий момент (релаксация напряжений).

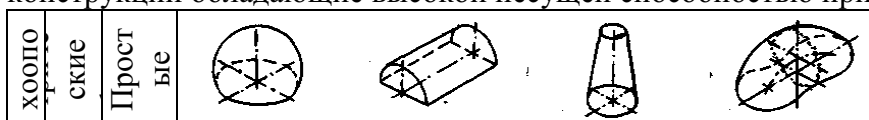
На рис. 4.19 образец моделирует сварное соединение труб. Для клеевого соединения канавки в образце не предусматриваются, и сдвиг осуществляется по всей поверхности контакта.

Фасонки узловых соединений проверяются на изгиб и срез по болтам, соединяющим их с поясами и элементами решетки. Прогнозирование длительной прочности пластмассовых болтов, работающих на срез, рассмотрено в [55].

4.3 Испытание пневматических конструкций

Пневматические строительные конструкции делятся на две группы: воздухоносные и воздухоопорные, отличающиеся друг от друга принципом статической работы, конструкцией и характером эксплуатации (рис. 4.20).

Воздухонесомые (надувные) конструкции – это пневмокаркасные сооружения несущая способность которых (сопротивление сжатию, изгибу, кручению) обеспечивается постоянным давлением воздуха в замкнутом объеме конструкций (стержней или панелей). Они представляют собой отдельные конструктивные элементы с высоким внутренним давлением воздуха требующим, соответственно, высокой степени герметизации. Если бы удалось достичь абсолютной герметичности, то это были бы идеальные строительные конструкции обладающие высокой несущей способностью при необычайной легкости.



		Составные				
		Сложные				
	Линзы (подушки)					
	канатами или тросами	пролетные				
		опорные				
	Воздухонесомые	Стержни				
Панели		ортогональные				
		Изотропные				

Рис.4.20 Общая классификация пневматических строительных конструкций

Воздухоопорные конструкции работают как оболочки, "лежащие" на воздухе, которому некуда выйти. Они "опираются" на воздух. Для противодействия внешним нагрузкам давление воздуха внутри оболочки несколько повышается по сравнению с атмосферным. Вследствие низкого (100 – 400 Па) давления воздуха и непрерывной его подачи вентилятором особой герметичности от оболочки не требуется. Воздухоопорные оболочки крепятся к опорному контуру (грунту или прилегающим жестким конструкциям).

Функциональное различие между воздухонесомыми и воздухоопорными конструкциями состоит в том, что первые являются сравнительно небольшими конструктивными элементами (балками, стойками, арками, панелями и др.), тогда как вторые настолько велики, что представляют собой целое здание, в котором можно жить и работать. Отсюда их эксплуатационное различие – давление воздуха в полезном пространстве, образованном воздухонесомыми конструкциями, равно атмосферному, а под оболочкой воздухоопорного сооружения превышает его.

Из этой классификации выпадает особый вид двухслойных покрытий, которые называются *пневмолинзами*, если они перекрывают круглый, овальный или многоугольный план, и *пневмоподушками* – при прямоугольном плане. Пневмолинзы по принципу статической работы относятся к воздухоопорному типу, а по отсутствию избыточного давления в эксплуатируемом пространстве, они ближе к воздухонесомым.

4.3.1 Материалы пневматических оболочек

Пневматические конструкции небольшого размера могут изготавливаться из неармированных полимерных пленок. Однако главным направлением в создании

воздухоопорных оболочек является применение текстильных материалов (подложка) с покрытиями из эластомеров или термопластов [56]. Первоначальные опыты по использованию неармированных пленок в сочетании с крупноячеистыми сетками из высокопрочных нитей не дали положительных результатов.

В качестве подложек обычно применяются технические ткани, тканые сетки (только при невысоких требованиях к прочности материала), ткани типа "малимо" и материалы с трикотажной основой. Эти материалы могут быть изготовлены из промышленных синтетических волокон – полиэфирных, полиамидных, поливинилспиртовых, из стекловолокна, из волокна "арамид" и т.п.

Для покрытий наибольшее распространение получили: из термопластов – пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ), политетрафторэтилен, из эластомеров – полихлоропрен.

В Западной Европе наиболее широко применяются ткани из полиэфирного волокна с покрытием из ПВХ; в Северной Америке используют ткани из полиамидного волокна с покрытием из полихлоропрена и стеклоткани с покрытием из политетрафторэтилена. В Японии применяются также ткани из поливинилспиртового волокна с покрытием из ПВХ. В странах Восточной Европы отдают предпочтение тканям типа "малимо" из полиамидного волокна с покрытием из ПВХ.

Все эти материалы имеют свои достоинства и недостатки. При необходимости оценки механических свойств материалов оболочек испытания проводятся при кратковременном и длительном нагружении. Что касается прочности швов оболочек, то она зависит не только от адгезии покрытия к подложке, но и от вида самого покрытия и его стойкости к воздействию среды.

В тех случаях когда не представляется возможным прямо использовать результаты испытаний следует руководствоваться общим подходом к учету свойств материала при расчете оболочек.

4.3.2 Определение эксплуатационных характеристик тканей с покрытием

Свойства таких комбинированных материалов зависят как от самой ткани, так и от вида ее покрытия. Механические характеристики материала оболочки (кратковременные и длительные) являются основными характеристиками ткани, тогда как покрытие определяет долговечность материала. Ряд свойств в равной степени зависит от обоих компонентов материала.

Кратковременные механические характеристики. Прочность и растяжимость ткани с покрытием определяется деформационно – прочностными характеристиками отдельных нитей. На рис. 4.21 показан пример такой характеристики для нитей из полиэфирного

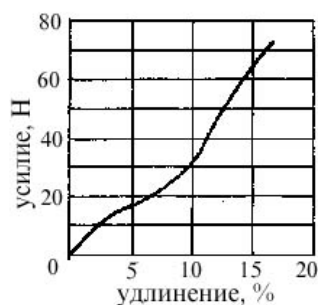


Рис. 4.21 Диаграмма усилие – удлинение для промышленных полиэфирных нитей 110 текс

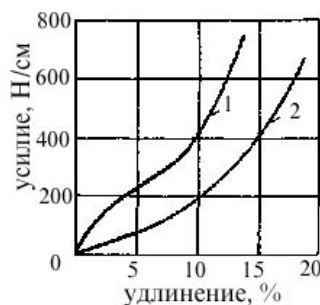


Рис. 4.22 Диаграмма усилие – удлинение для полиэфирной ткани с покрытием из ПВХ: 1 – основа; 2 – уток

волокна. Аналогичная зависимость между напряжением и деформацией получается и для ткани из таких нитей (см. рис. 4.22).

Из рис. 4.22 видно, что несмотря на одинаковую плотность нитей (число нитей в 1 см ткани) основы и утка, характеристики ткани в двух взаимно перпендикулярных направлениях различны. Это различие вызвано различной степенью искривления нитей основы и утка при переплетении ткани. Следовательно обработанная ткань характеризуется различием удлинений и модулей упругости в направлениях основы и утка.

Кроме прочности самой ткани, важное значение имеет прочность ее соединений (швов) [57]. Прочность шва зависит в первую очередь от его геометрии. На рис. 4.23 показаны типы швов, применяемых для оболочек из тканей. В табл. 4.1 приведены характеристики прочности этих швов (в абсолютных и относительных единицах) при комнатной температуре и при 70 °С. Из таблицы видно, что при более высокой температуре наблюдается заметное снижение прочности.

К показателям, требующим особого внимания при расчете и проектировании воздухоопорных конструкций, относится прочность соединений оболочки с анкерными устройствами. Она зависит не только от прочности ткани, но и от геометрии соединений и швов, которая может быть весьма разнообразной [57].

Поскольку в пневматических конструкциях материал оболочки подвергается двухосному растяжению, решающее значение имеет характеристика материала при таком напряженном состоянии. Соответствующие исследования проводили многие авторы [58]; особый интерес представляют результаты испытаний цилиндрических (трубчатых) образцов [58]. Установлено, что при двухосном деформировании ткани разрывные усилия и удлинения при разрыве уменьшаются по сравнению с одноосным растяжением, а кривая усилие – удлинение имеет более крутой наклон.

4.1 Прочность швов ткани по утку

Тип шва (рис. 4. 21)	Прочность шва, Н/см		Отношение прочности шва к прочности ткани в %	
	20 °С	70 °С	20 °С	70 °С
Сварной (высокочастотная сварка)	802	695	91	79
Замковый	470	372	53	42
Накладной четырехстрочный	550	447	62	51
Комбинированный	813	582	92	66

Кроме разрывной прочности и удлинения при разрыве – характеристик непосредственно используемых в расчете, существует еще ряд механических свойств, играющих важную роль для оценки качества композиционных материалов оболочек. В первую очередь к ним относятся прочность при раздире и прочность сцепления покрытия с подложкой. Важность этих показателей для практического применения тканей очевидна: прочность сцепления является фактором определяющим прочность швов оболочки, а прочность при раздире характеризует сопротивляемость ткани распространению локальных повреждений. На рис. 4.24 и 4.25 показаны схемы испытания образцов ткани для определения прочности сцепления покрытия с подложкой и прочности при раздире.

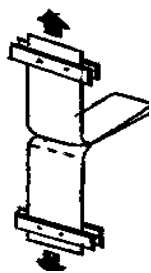


Рис. 4.24 Схема испытания для определения прочности

Как видно из рис. 4.25, существует несколько различных методов испытания образцов тканей на раздир; метод язычка (рис. 4.25, *a*), метод

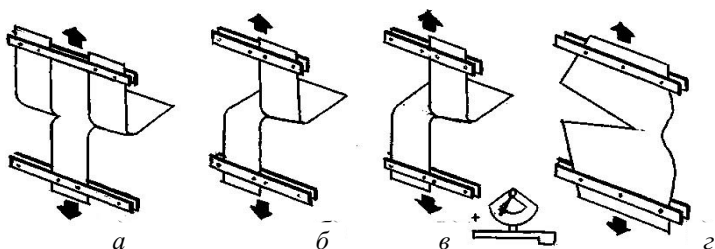


Рис. 4.25 Схемы испытаний для определения прочности ткани

при раздире методами: *a* – язычка; *b* – лапки;
v – маятниковый; *z* – трапеции

лапки (рис. 4.25, *b*), маятниковый метод (рис. 4.25, *v*), метод трапеции (рис. 4.24, *z*). Методы лапки, язычка и маятниковый основаны на одном и том же принципе: усилия прикладываются перпендикулярно к нитям ткани, прочность которых определяется; различие состоит в том, что в методе язычка раздир ткани производится по двум симметрично расположенным линиям, а в маятниковом методе – при большей скорости перемещения захвата. В отличие от этих методов при испытании по методу трапеции нити, прочность которых оценивается, располагаются параллельно направлению раздирающего усилия. Было установлено [59], что корреляция между значениями прочности ткани при раздире, полученными двумя принципиально различными методами, отсутствует.

На рис. 4.26 и 4.27 показаны зависимости прочности швов различных типов от прочности сцепления покрытия из ПВХ с подложкой; как видно из графиков максимальная прочность швов достигается при прочности сцепления 130 Н/5 см. Дать подобную оценку требуемого уровня прочности ткани при раздире невозможно; по – видимому, эти характеристики вообще нельзя прямо использовать в статических расчетах. Единственное, что рекомендуется, – это устанавливать для тканей, применяемых в оболочках, возможно более высокие требования по их сопротивлению раздиру.

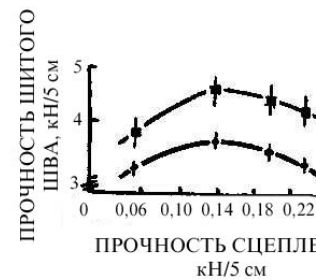


Рис. 4.27 Зависимость прочности шитых швов (основе) от прочности сцепления (адгезии) покрытия ПВХ с подложкой при температуре 20 °С
1 – накладной
четырёхсторонний шов
2 – замковый шов

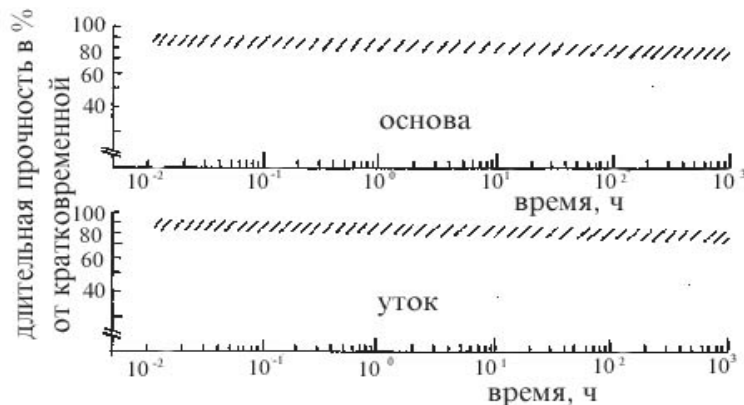


Рис. 4.28 Длительная прочность полиэфирной ткани (диолен 174 110 текс) с покрытием из ПВХ при температуре 23 °С

Длительные механические характеристики. На практике наиболее важной характеристикой материала оболочки является его длительная прочность или прочность при разрушении в условиях ползучести. Для определения этой характеристики образцы материала подвергают без перерывов действию постоянных по величине нагрузок до тех пор, пока образцы не разрушатся, и фиксируют время до разрушения. Чтобы это время было не слишком велико, нагрузки должны быть достаточно высокими; их следует принимать с таким расчетом, чтобы в течение первых 1000 ч испытания разрушилось не менее 10 образцов. Откладывая значения нагрузок и соответствующего им времени до разрушения образцов на графике в двойных логарифмических координатах, получают так называемую кривую разрушения в условиях ползучести; на рис. 4.28 показан пример такой кривой для ткани. Существует примерно линейная зависимость между логарифмами нагрузки и времени до разрушения образца. Используя эту зависимость, можно с достаточной точностью экстраполировать результаты испытаний на время до 10^5 ч (около 11 лет) и таким образом определить нагрузку не вызывающую разрушения материала в течение этого срока.

Аналогичные зависимости получены и при испытании швов оболочек, как видно из рис. 4.29, относящегося к комбинированному шву для ткани. Если при таких испытаниях определить удлинения ткани в момент разрушения, то обнаруживается, что их значения весьма близки к значениям кратковременных удлинений при разрыве и, по-видимому, не зависят от времени [58].

Длительные испытания материалов и швов необходимо проводить не только при комнатной, но и при повышенной температуре. Поэтому полная программа длительных испытаний является весьма обширной и требует значительного времени для ее реализации.

Анализ результатов испытаний при температуре 70 °С показывает, что длительная прочность материала при этой температуре практически равна кратковременной прочности при комнатной температуре, умноженной на произведение понижающих коэффициентов, соответствующих временной прочности при 70°С. Наличие такой закономерности позволяет отказаться от проведения длительных испытаний материала при повышенных температурах.

Кроме прочности при разрушении в условиях ползучести, важное значение имеют и другие характеристики материала. На рис. 4.30 показаны деформации ползучести ткани при длительной нагрузке. Как видно из рисунка, кривые ползучести в полулогарифмических координатах принимают постоянный, положительный наклон сразу после достижения некоторого начального удлинения, причем этот наклон не зависит от нагрузки.

Испытания при повышенных температурах не обнаружили существенного увеличения скорости ползучести [58]. Те же вязкоупругие свойства материала проявляются и при "обратных" условиях испытания, то есть при заданном постоянном удлинении; в этом случае усилия (напряжения) в материале уменьшаются со временем, как показано на рис. 4.31, где приведены результаты испытаний при циклическом изменении температуры.

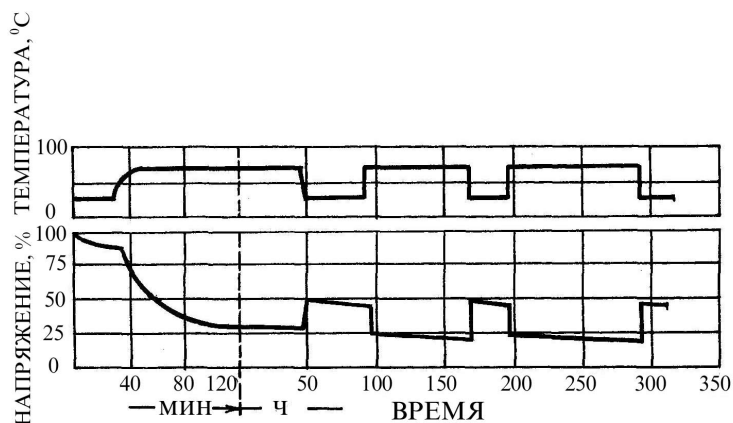


Рис. 4.31 Релаксация напряжений в ткани с покрытием из ПВХ (по утку); начальное натяжение – 178 Н/см

Это явление релаксации напряжений означает с практической точки зрения необходимость "подтягивать" оболочку спустя некоторое время после ее возведения (примерно через сутки), чтобы восстановить первоначальный уровень натяжения, обеспечивающий стабильность конструкции. Если на сооружение действуют повышенные температуры, может возникнуть необходимость повторно "подтянуть" оболочку после первого интенсивного теплового воздействия. В дальнейшем дополнительной корректировки натяжения оболочки уже не требуется.

В реальных условиях эксплуатации усилия в оболочке никогда не остаются постоянными, в связи с чем возникает вопрос о том как будет реагировать материал оболочки на переменные (повторные) нагрузки. Здесь могут быть рассмотрены два крайних случая; высокочастотная циклическая нагрузка, вызываемая сильными ветрами, и низкочастотная (длиннопериодная) нагрузка от снега. Оба вида воздействий подробно исследованы [60], причем установлено, что длительная прочность и деформативность материала существенным образом зависят от верхнего уровня нагрузки, так что для надежной оценки этих характеристик можно использовать результаты испытаний материала при постоянном напряжении, соответствующем верхнему уровню действующих нагрузок.

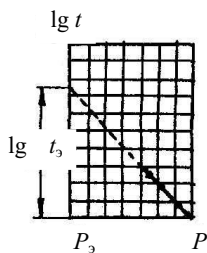


Рис. 4.34
Зависимость
долговечности
пленки при
разрыве от
давления
воздуха
в цилиндре

образцом измеряется манометром, стрела прогиба – индикатором.

Испытания на продавливание проводятся с постоянно возрастающим или заданным постоянным давлением. При длительных испытаниях фиксируется время от момента достижения заданного давления до разрушения образца. Разрушение образца происходит мгновенно при потере несущей способности. По результатам длительных испытаний строится график зависимости логарифма времени разрушения от давления (см. рис. 4.34). При экстраполяции полученной линейной зависимости на величину эксплуатационного давления определяется искомая долговечность пленки.

При постоянно возрастающем давлении процесс деформирования образца пленки можно разделить на две стадии. На первой стадии наблюдается общее деформирование образца (зависимость между давлением и стрелой прогиба является линейной); на второй стадии развиваются пластические деформации (преимущественно в верхней части сферы, где происходит резкое изменение толщины пленки).

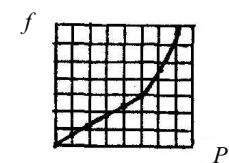


Рис. 4.35
Зависимость
прогиба
пленки от
давления
воздуха
в цилиндре

эксперименте, были организованы испытания материалов непосредственно в натуральных условиях [61]. Результаты испытаний представлены в обобщенном виде на рис. 4.36.

Моделируя реальные условия эксплуатации полимерные пленки испытывают в условиях раздува. Испытание пленок проводится на специальной установке под определенным избыточным давлением (см. рис. 4.32). Для испытания на продавливание воздухом используются образцы в виде круга (см. рис. 4.33). Площадь продавливаемой части 50 см^2 ; толщина пленки от 30 до 200 мкм. Образец помещается на кольцо пневматической камеры и герметично зажимается прижимным кольцом. Необходимый для разрушения воздух подается от компрессора или баллона. Избыточное давление под

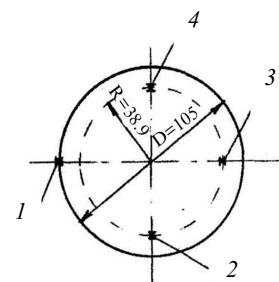


Рис. 4.32 Образец
пленки для испытания
на продавливание. (1,
2, 3, 4 – контрольные
точки раздува)

по результатам замеров стрелы прогиба при заданных ступенях давления строится график зависимости прогиба от давления, (см. рис. 4.35).

Атмосферостойкость При решении практических задач главным фактором является устойчивость материалов оболочек к воздействиям среды, характерным для района строительства. Поскольку эти воздействия весьма широко изменяются для разных географических зон и их крайне трудно воспроизвести в лабораторном

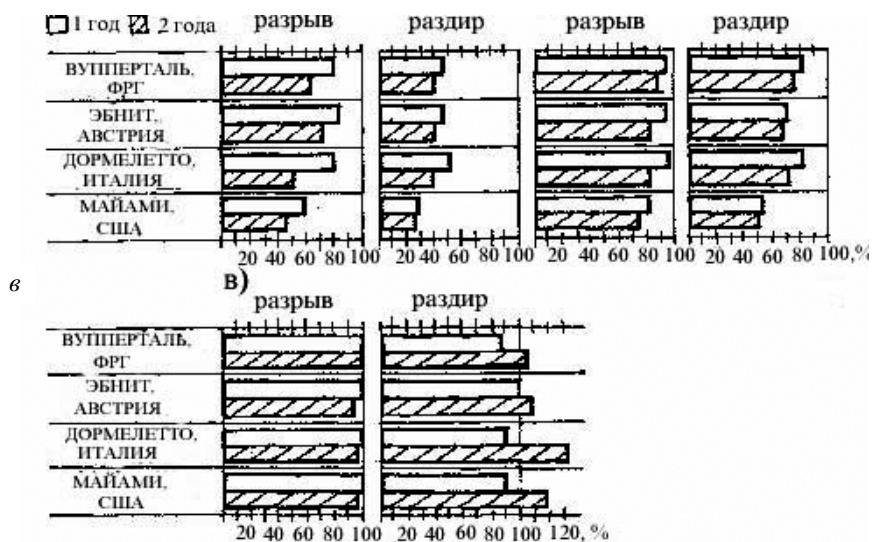


Рис. 4.36 Ползучесть полиэфирной ткани с покрытием из ПВХ при температуре 40 °С и различных нагрузках (ϵ – удлинение)

Из рис. 4.36 видно, что долговечность тканей существенно образом зависит от толщины покрытия в местах выступов переплетения нитей. Можно сделать вывод, что в этих местах толщина покрытия на экспонируемой (наружной) поверхности ткани должна быть не менее 150 мкм; при этом потеря прочности ткани не будет превышать 10 %.

Анализ разрушений [59] показывает, что более чем в 80 % всех случаев они не являются следствием разрушения материала оболочек, а связаны с неудовлетворительным обслуживанием, несоблюдением установленных нормами расстояний между сооружениями и т.д. При этом оболочки, как правило, разрушаются полностью – свидетельство того, что их сопротивление раздиру недостаточно для локализации местных повреждений. Сопротивление тканей раздиру может быть повышено при использовании специальной технологии их изготовления, например, путем введения в полиэфирную ткань волокна "арамид". При этом повышение прочности при раздире доходит до 50 %.

4.4 Испытание профилированных изделий из стеклопластиков

4.4.1 Листовые рулонные материалы

Плоские листы из светопропускающего полиэфирного стеклопластика используются в основном для изготовления клееных трехслойных панелей (см. раздел 4.1). Гофрированные листы (они составляют 70 – 80 % объема выпуска светопропускающих стеклопластиков) применяются самостоятельно в качестве ограждений промышленных зданий, теплиц, оранжерей, покрытий стадионов и т.п. В промышленном строительстве светопропускающие гофрированные листовые стеклопластики применяются для заполнения световых проемов в неотапливаемых зданиях (склады, ангары) и в зданиях с избыточными тепловыделениями в сочетании с асбестоцементными и металлическими листами, имеющими те же геометрические параметры гофров.

Из гофрированных листов можно получать не только плоские, но и сводчатые ограждения путем изгибания листов. Светопропускающий гофрированный стеклопластик нашел широкое применение в небольших сооружениях городской застройки; торговых киосках, навесах, ограждениях стоянок городского транспорта, верандах и т.п. Из него можно получать легкие быстровозводимые сооружения с разнообразной и стойкой окраской и вместе с тем с достаточной освещенностью помещения. Как правило, листы крепят к элементам легкого каркаса, выполненного из металла или древесины, причем в зависимости от архитектурного замысла ограждение может быть решено в виде плоской или криволинейной поверхности.

Листовой полиэфирный стеклопластик подразделяется на три типа: волнистый с продольной волной, волнистый с поперечной волной и плоский. Его выпускают неокрашенным и окрашенным в различные цвета.

Типоразмеры волн гофрированного листового стеклопластика приведены в табл. 4.2, а обозначения на рис. 4.37.

4.2 Типоразмеры и геометрические характеристики волн гофрированного листового стеклопластика

Размер волны*	Толщина, мм	Момент инерции, см ⁴	Момент сопротивления, см	Площадь сечения, см ²
200/54	1,5	11,83	4,37	3,70
	2,0	15,80	5,95	4,65
	2,5	19,73	7,30	6,18
167/50	1,5	8,60	3,44	3,17
	2,0	11,44	4,56	3,98
	2,5	14,32	5,72	5,28
125/35	1,5	3,13	1,78	2,32
	2,0	4,20	2,40	2,90
	2,5	5,22	2,96	3,88
115/28	1,5	1,82	1,29	2,08
	2,0	2,40	1,71	2,60
	2,5	3,03	2,16	3,48
90/30	1,5	1,69	1,13	1,74
	2,0	2,25	1,50	2,22
	2,5	2,81	1,85	2,90
90/27	1,5	1,35	1,00	1,58
	2,0	1,80	1,33	2,16
	2,5	2,25	1,67	2,63
78/18	1,5	0,51	0,56	1,41
	2,0	0,68	0,75	1,88
	2,5	0,85	0,93	2,35
75/20	1,5	0,61	0,61	1,19
	2,0	0,81	0,81	1,59
	2,5	1,01	1,01	1,99
60/14	1,5	0,24	0,34	0,98
	2,0	0,32	0,46	1,24
	2,5	0,40	0,57	1,54

* Выпускается также лист с профилем волны 36/8 мм, но он может рассматриваться только как декоративный

При производстве стеклопластикового гофрированного листа необходимо добиваться наибольшей несущей способности при минимальном расходе материала. Повышение несущей способности гофрированных листов возможно как путем повышения механических характеристик стек-лопластика, так и путем изменения формы и размеров гофра.

Основным видом нагрузки, воспринимаемой листом, является давление снега и ветра, приводящее к изгибу листа. При заданных длине S и толщине h гофра можно найти такие его очертания $y = f(x)$, при которых момент сопротивления W , определяющий прочность при изгибе, или момент инерции I , определяющий жесткость листа, были бы наибольшими. Эта задача решена методами вариационного исчисления и было найдено, что кривой, имеющей

наибольший момент сопротивления, является гиперболическая косинусоида, а кривой с наибольшим моментом инерции – эллиптическая синусоида.

Однако кроме вида функции надо найти такое отношение высоты полугофра к его ширине $c/a = \varphi$, чтобы при заданных равномерно распределенной нагрузке q и предельно допустимом относительном прогибе $\xi = f/l$ (в случае расчета по деформациям) или при заданном расчетном сопротивлении R_u (в случае расчета по прочности), а также известных толщине листа h и длине дуги гофра S перекрываемая листом площадь была наибольшей, то есть:

для обеспечения жесткости

$$2cl = k_{ж} S^2 \sqrt{\frac{E\xi h}{qS}} = \max,$$

для обеспечения прочности

$$2cl = k_n S^2 \sqrt{\frac{R_u h}{qS}} = \max,$$

где l – длина пролета гофрированного листа, опертого по балочной схеме; E – модуль упругости стеклопластика; $k_{ж}$. и k_n – параметры, зависящие от значений φ и формы гофра.

Гофрированные листы рассчитывают по обычным формулам сопротивления материалов как двухопорные или неразрезные балки с недеформируемым контуром. Предельные прогибы изгибаемых гофрированных листов зависят от величины пролета: при пролете до 1,5 м прогиб должен быть не более 1/75 пролета, при пролете до 3 м – не более 1/125 пролета.

Испытания светопрозрачного стеклопластика проводят по методикам описанным в разделе 1. В процессе эксплуатации наиболее важной характеристикой является светопропускная способность, поскольку стеклопластики подвергаются старению. Процессы старения полиэфирных смол значительно ускоряются в присутствии кислорода и озона воздуха. Кислород вызывает разрушение материала вследствие его окисления. Образующиеся при этом продукты расщепления сдвигают область поглощения лучистой энергии в сторону больших длин волн, что выражается в прогрессирующем пожелтении отвержденных полиэфирных смол с увеличением времени экспозиции.

Ультрафиолетовая радиация и кислород воздуха действуют в основном на полиэфирную смолу, вызывая ее пожелтение и определенное снижение прочностных показателей, а также выцветание некоторых типов красителей. Однако фотоокислительной деструкцией нельзя полностью объяснить такие явления происходящие при атмосферном старении светопропускающих стеклопластиков, как проступание стекловолокна на поверхности материала, возникновение сначала микротрещин, а затем и глубоких трещин, в которые свободно проникает влага, вызывая выщелачивание стекловолокна, расслоение и постепенное разрушение материала.

Наблюдение под микроскопом стеклопластика с явно проступившим рисунком стекловолокна показывает, что сцепление между смолой и стекловолокном оказывается в этом случае нарушенным. На границе раздела стекло – смола образуются пустоты, которые и создают впечатление проступания рисунка стекловолокна.

В данном случае появляются дополнительные границы раздела воздух – смола и воздух – стекло сильно отражающие свет. Микроскопические исследования полиэфирных стеклопластиков показывают, что отслоение смолы от стекла, появление трещин и последующее разрушение смолы происходят в результате ее перенапряжения. Это перенапряжение отвержденной смолы, заключенной в ячейки из стекловолокнистого наполнителя, объясняется различием в коэффициентах термического расширения полиэфирной смолы и стекла. Колебания температуры окружающей среды, вызванные действием солнечной энергии или другими причинами, постепенно расшатывают структуру такого гетерогенного материала как полиэфирный стеклопластик.

Различие во влагопоглощении смолы и стекла, а, следовательно, в изменении их размеров в связи с набуханием также вызывает напряжения на границе раздела стекло – смола.

Кроме перечисленных факторов поверхность стеклопластика подвергается в процессе наружной экспозиции абразивному действию пыли и случайных ударов.

4.4.2 Испытание гофрированного листа на поперечный изгиб

Испытание проводится по схеме двухшарнирной балки, нагруженной в середине пролета сосредоточенной силой (см. рис. 4.38).

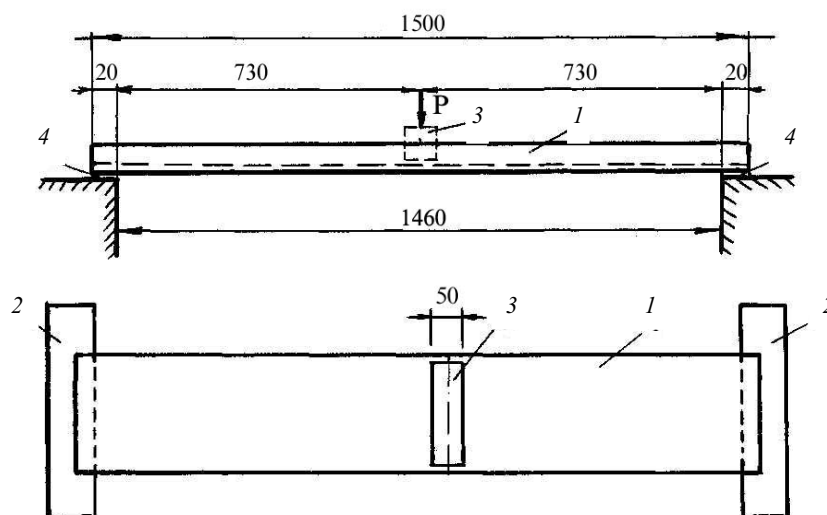


Рис. 4.38 Схема испытания профильного стекла на поперечный изгиб:

1 – профильное стекло, 2 – жесткие опоры, 3 – деревянный брус, 4 – войлочные прокладки

Величины внутренних усилий и прогибов волнистых листов определяют с помощью тензометров и прогибомеров как для стержневых изгибаемых элементов (балок). Хотя контур волнистых листов, особенно с крупными волнами, может под действием нагрузки претерпевать поперечные деформации, однако при соблюдении правил крепления листов уменьшение жесткости волны в результате поперечных деформаций настолько невелико, что в расчете может не учитываться.

Длинномерный волнистый лист работает как многопролетная неразрезная балка, что дает заметную экономию по сравнению с однопролетной схемой за счет снижения величин изгибающих моментов и особенно прогибов. Однако и при однопролетной схеме величины изгибающих моментов и прогибов могут быть снижены путем учета опорного момента, возникающего в результате упругого закрепления волнистого листа на опорах (рис. 4.39, в, г).

Влияние упругого закрепления на деформативность и напряженное состояние волнистого листа разрешается учитывать лишь в случаях, когда волнистый лист крепится к металлическим или железобетонным прогонам. Влияние упругого закрепления учитывают путем введения в расчет дополнительных одного или двух крайних пролетов, равных ширине прогонов b_n . Однако крайние опоры 4 (на рис. 4.39, в, г) пролета b_n нельзя считать абсолютно жесткими, и реакция этих опор должна, очевидно, вычисляться с учетом общей податливости крепежных элементов (болтов, шайб, подкладок).

Волнистые листы могут с успехом нести и вертикальные нагрузки, действующие в плоскости листа. В этом случае их рассчитывают на восприятие сдвигающих сил [62]. При расчете следует обращать особое внимание на крепление стеклопластика, которое должно

быть осуществлено в соответствии с расчетом на срез. Расчетный пролет для волнистого листа принимается равным расстоянию в свету между продольными элементами рамы.

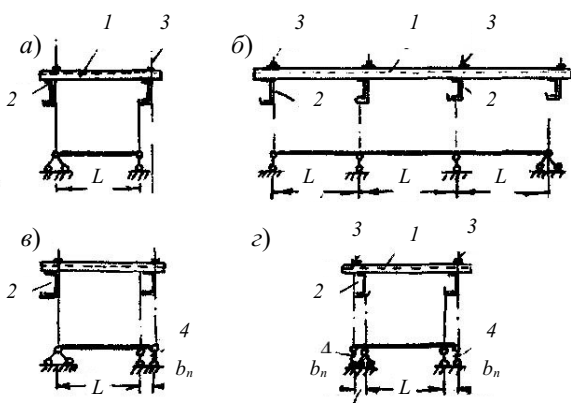


Рис. 4.39 Возможные расчетные схемы волнистого листа: а, б – без учета упругого закрепления на опорах;

в, г – с учетом упругого закрепления на опорах;
1 – волнистый лист; 2 – прогон;
3 – ось крепежного болта; 4 – податливая опора

4.4.3 Испытание внецентренно сжатых стержней уголкового профиля при длительном действии нагрузки

Для испытаний используется установка схема которой показана на рис. 4.40.

Динамометры для фиксирования приложенной нагрузки (рис. 4.41) имеют в верхней части специальную опорную пятку из высокопрочной стали. На опорную пятку передаются нагрузки от образца через конусные опоры. Тарирование динамометров производится на универсальной разрывной машине, позволяющей фиксировать нагрузки с точностью до 1 кг. При тарировании динамометры делятся на четыре группы, пропорционально количеству испытываемых образцов различной гибкости. Нагрузка от разрывной машины на динамометр передавалась через образец соответствующей гибкости.

Предельное состояние внецентренно сжатых стержней характеризуется или потерей устойчивости, или возникновением недопустимо больших деформаций. Экспериментально зафиксировать момент приближения критического состояния возможно путем измерения прогибов системы.

Для обычных стержней достаточно проводить измерения прогибов в двух или даже в одной точке опасного сечения. В тонкостенных стержнях деформированное состояние определяется смещениями двух точек линии центров изгиба по направлениям, параллельным главным осям инерции, и углами поворота сечений от закручивания. Поэтому необходимое количество точек, в которых измеряются перемещения, в этом случае возрастает. Для стержня уголкового профиля необходимо знать перемещения четырех точек поперечного сечения.

Перемещения (прогибы) измеряются тензорезисторным преобразователем. Основу преобразователя составляет упругий элемент в виде двухконсольной балки постоянного сечения, на который наклеены проволочные тензорезисторы с базой измерения 5 мм. Преобразователь подключается по полумостовой схеме к АИД-1м. Предварительное расчетное значение цены деления прибора 0,01 мм.

Упругие консоли выполнены из стали У-8А с последующей термической обработкой. Термообработка уменьшает влияние ползучести наклеенных датчиков. После этого тензорезисторный преобразователь подвергается механической стабилизации. Для этого замеряются прогибы образцов при кратковременных испытаниях (до 30 замеров в день в течение 30 или 60 суток).

Размещение тензорезисторов на упругом элементе в местах разнозначных деформаций позволяет компенсировать влияние температуры. Для защиты тензорезисторов от

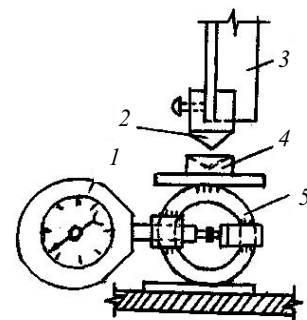


Рис. 4.41

Динамометр:

- 1 – индикатор часового типа 0,001мм;
- 2 – конусная опора; 3 – испытуемый образец;
- 4 – нижняя опорная пятка;
- 5 – упругое кольцо

механических повреждений и увлажнения они закрыты специальным кожухом из оргстекла. Схема преобразователя показана на рис. 4.42. Головки преобразователя при измерении перемещений (прогибов) образцов фиксируются при помощи двух реперов. Один репер, медная пластинка, наклеивается на внешнюю грань полки уголка. Пластинка имеет специальные лунки, которые удалены от обушка или пера на 2 мм. Разметка и нанесение лунок осуществлялись при помощи шаблона. Второй регулируемый репер расположен на подвижной рамке установки. Репер выполнен в виде латунного болта, что дает возможность регулировать диапазон измерения прогибов.

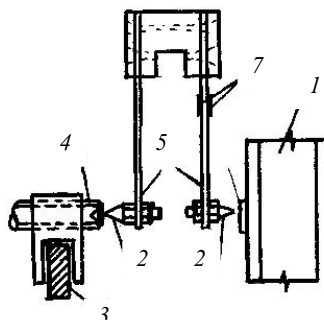


Рис. 4.42 Тензорезисторный преобразователь перемещений:

1 – испытуемый образец; 2 – измерительные головки; 3 –

В результате теоретических вычислений получены значения длительных коэффициентов устойчивости; для образцов гибкостью $\lambda = 109 - 0,88$; для образцов гибкостью $\lambda = 76 - 0,85$. Стержни гибкостью $\lambda = 55$ и $\lambda = 40$ имеют значения 0,82 и 0,80 соответственно.

Исходя из теоретических значений, выбираются значения длительных экспериментальных нагрузок. Для образцов гибкостью $\lambda = 109$ эти значения принимаются равными 0,95; 0,85; 0,80; 0,70 P_T (P_T – теоретическое значение кратковременной критической силы); для образцов гибкостью $\lambda = 76 - 0,95; 0,80; 0,75 P_T$. Стержни гибкостью $\lambda = 55$ и $\lambda = 40$ загружались до значений 0,90; 0,80; 0,70 P_T и 0,90; 0,75; 0,65; 0,50 P_T . При каждом уровне нагрузки испытывается не менее 3 образцов.

Важным вопросом при длительных испытаниях является время выдержки образцов под нагрузкой. Анализ литературных данных показывает, что процессы ползучести по истечению 180 – 200 суток после приложения нагрузки стабилизируются.

В процессе длительных испытаний прогибы измеряются в течение первых 3 суток 2 раза в день, в последующие 10 суток – 1 раз в день. Далее измерения проводятся 1 раз за 5 суток. Через месяц после приложения нагрузки отсчеты снимаются 1 раз в 10 дней.

Если со временем показания динамометров в результате ползучести образцов уменьшались на одно деление, то нагрузка добавлялась до первоначальной величины. Это позволяет поддерживать приложенную нагрузку с большой степенью точности, так как одно деление динамометра соответствует 1 – 3 % этой нагрузки.

Длительные испытания проводятся в помещении при температуре воздуха 20 ± 3 °С и его относительной влажности 65 ± 5 %.

Параллельно с основным опытом, где определяются прогибы образцов во времени, измеряются продольные деформации стержней. Для этого испытывается дополнительно по одному образцу на каждый уровень нагрузки. На этих стержнях по перьям и обушку укрепляются латунные репера. Деформации измеряются переносным компаратором на базе индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм.

4.5 Пластмассы в гидротехническом строительстве

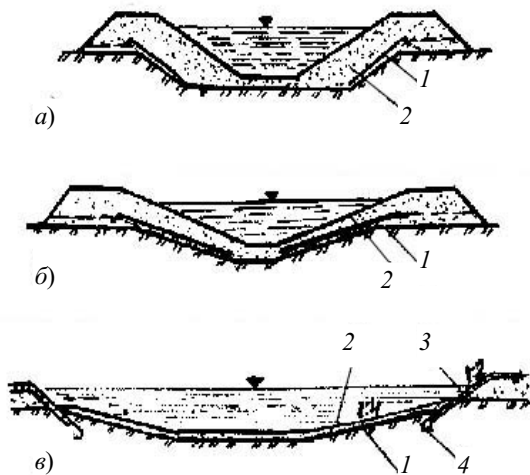


Рис. 4.43 Схемы защиты каналов пленочными облицовками:

а – траншейная;
б – периметрическая; *в* –
комбинированная:

1 – пленка, *2* – защитный слой грунта,
3 – железобетон, *4* – бетон

В гидротехническом строительстве пластмассы находят применение главным образом для повышения водонепроницаемости сооружений, создания конструкций и их элементов, при строительных и ремонтных работах.

4.5.1 Использование пластмасс для повышения водонепроницаемости сооружений

Проблема снижения потерь воды на фильтрацию из каналов, которые составляют до 60 % подаваемого в них расхода воды, имеет важное значение. Фильтрация воды при облицовке ложа каналов пластмассовой пленкой резко снижается, а КПД оросительных систем повышается с 0,5 до 0,8 – 0,9, улучшается мелиоративное состояние земель, сокращаются расходы на дренаж.

В качестве облицовки каналов применяются стабилизированные полиэтиленовые и поливинилхлоридные пленки. Устройство пленочной облицовки каналов возможно в любых грунтах, но особенно целесообразно в просадочных, где жесткие облицовки деформируются и довольно

быстро выходят из строя.

Пленочные облицовки обычно прикрывают защитным слоем грунта, поэтому их называют погребенными. Их устраивают по одной из следующих схем траншейной (рис. 4.43, *а*), периметрической (рис. 4.43, *б*) и комбинированной (рис. 4.43, *в*). Траншейную схему применяют в песчаных и глинистых грунтах, периметрическую – в любом грунте, комбинированную – для крупных каналов, где может сказываться разрушающее действие волны.

Облицовку канала составляют из отдельных полотнищ весом от 100 до 250 г, свариваемых из полос стабилизированной сажей полиэтиленовой: или поливинилхлоридной пленки, толщиной 0,2 мм. Сварка производится (воздушным) тепловым или контактным способом, а также инфракрасным излучением с использованием присадочного материала.

При повреждении защитного слоя или пленки необходим немедленный ремонт. Очистка каналов от наносов не должна приводить к разрушению защитного слоя.

Опыт эксплуатации облицованных пленкой водоемов, а также рассолохранилищ и шлакоотстойников показал хорошие результаты. Однако в тех отдельных случаях, когда пластмассовые облицовки в течение нескольких месяцев оставались открытыми (без защитного слоя и воды), они под действием солнечной радиации и сильных ветров разрушались [67].

Перед использованием пленки для облицовки водоемов проводятся широкие исследования по выбору оптимальной технологии, типа пленки и конструктивных решений. Результаты этих исследований сводятся в основном к следующему:

1 Главной причиной старения пленки является температурное разрушение, скорость которого зависит от температуры. Испытания тонких (0,085 – 0,15 мм) нестабилизированных полиэтиленовых и поливинилхлоридных пленок позволяют прогнозировать срок их службы в условиях подземного заложения при защите от механических повреждений и прямого

воздействия климатических факторов не менее 20 лет в центральных и до 15–20 лет в южных районах СНГ. При введении стабилизаторов срок службы тонких пленок увеличивается.

2 Срок службы толстых стабилизированных пленок (толщиной около 0,2 мм) можно предполагать равным 35 – 40 годам в центральных и 25 – 30 годам в южных районах СНГ.

3 Поливинилхлоридные пленки обладают худшими показателями, чем полиэтиленовые. Они быстрее стареют, не обладают достаточной морозоустойчивостью.

4 Полиэтиленовые стабилизированные пленки толщиной 0,2 мм, используемые в качестве поверхностных экранов, могут прослужить 3 – 4 года; поливинилхлоридные стабилизированные пленки толщиной 0,2 – 0,3 мм теряют свою эластичность и становятся хрупкими через 1 – 2 года.

5 Главную роль в увеличении долговечности погребенных пленочных экранов играет защита их от воздействия ультрафиолетового излучения и повышенных температур. С этой целью следует применять свето- и термостабилизированные пленки с добавлением 2 % сажи (независимо от того, укладываются ли они на поверхности или под защитный слой). В южных районах, кроме того, следует вводить специальные термостабилизаторы.

6 Полевые исследования повреждаемости пленочных материалов грызунами показали случайный характер этих повреждений; сорной растительностью пленочные экраны не повреждаются, за исключением некоторых сорняков в Средней Азии. Хорошие результаты дали уничтожение сорной растительности гербицидами на оросительных каналах в Голодной степи: после стерилизации откосов каналов атразином они в течение двух сезонов оставались свободными от сорняков.

Повышение эффективности облицовки может быть достигнуто применением более прочных пленок. Один из путей в этом направлении – армирование. Такие материалы испытывают в ряде стран. Например, в Англии [68] созданы многослойные пленки: нейлоновая, хлопчатобумажная или льняная ткань заключена между двумя слоями полиэтилена, стекловолоконистая ткань — между двумя слоями поливинилхлоридной пленки.

Гидроизоляция бетонных конструкций осуществляется пропиткой, окраской, распылением и приклеиванием пластмасс, а также нагнетанием пластмасс в трещины бетонной кладки сооружений.

Для пропитки бетонных конструкций используют жидкость с малой вязкостью, которая, заполнив поры бетона, быстро твердеет и не растворяется в воде.

Опыты с пропиткой бетонных образцов проводятся следующим образом. Образцы бетона предварительно высушиваются на глубину пропитки (20 – 25 см), затем нагретой до 60 °С жидкостью пропитывают образцы, жидкость полимеризуют (в полистирол). Образуется прочное нерастворимое в воде соединение. Лабораторные образцы, пропитанные полимером, испытывают под давлением.

Большое распространение имеют дешевые битумные и дегтевые смолы, особенно в сочетании с армирующими материалами (гидроизол, борулин, битумные маты), наносимые механическим способом в холодном состоянии. Однако они обладают текучестью, а при отрицательных температурах – хрупкостью. Для улучшения качества покрытия в указанные смолы добавляют эпоксидную смолу.

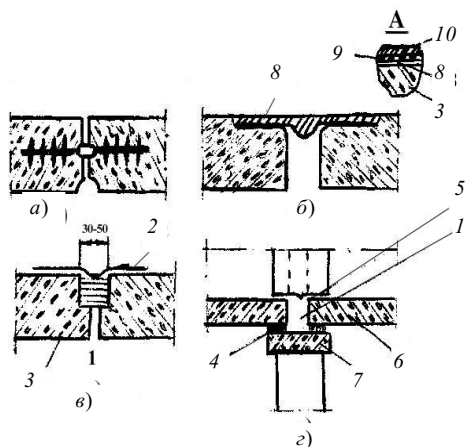
Железобетонные резервуары для хранения нефтепродуктов и агрессивных жидкостей защищают гидроизоляционными покрытиями на основе эпоксидных и полиэфирных смол. Твердение эпоксидных смол не связано с испарением растворителя, поэтому их надежная оплошность (в отличие от других лакокрасочных покрытий) может быть достигнута двумя – тремя слоями покрытия; они получают все большее применение для надежной защиты от фильтрации, испарения, действия мороза и агрессивных сред.

Для гидроизоляции бетонных поверхностей применяют неопрен, полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид, различные пасты, краски, лаки, мастики. Техника нанесения их на бетонную поверхность различна в зависимости от используемого материала и условия работы конструкции — грани плотин, водоводы, туннели и т.п.

Известны случаи применения армированных пластмассовых окрасок. В Калифорнии (США) применена облицовка из фурановой смолы, армированной стеклотканью. Хотя фурановые облицовки дороги, но они надежно защищают гидротехнические сооружения, работающие в условиях сильной агрессии воды.

Для повышения долговечности морских бетонных гидротехнических сооружений проведены лабораторные и натурные испытания композиций на основе эпоксидных смол, лака этиноль и перхлорвинилового смолы. После тщательной обработки поверхности наносят первый жидкий слой, который заполняет открытые поры и пропитывает бетон на некоторую глубину, что повышает адгезию покрытия к бетону. После полного высыхания и отверждения этого слоя наносят два – три слоя покрытия, причем в состав последнего слоя входят токсические вещества предохраняющие бетонную поверхность от обрастания и повреждения микроорганизмами. Для лучшего сцепления покрытия с бетонной поверхностью в композицию вводят поверхностно-активные вещества [69].

Для уплотнения деформационных швов (шпонок) гидротехнических сооружений используют профилированные резиновые полосы, а также полиэтилен, полиизобутилен, поливинилхлорид и другие пластмассы вместо асфальтовых, металлических и других материалов, не всегда удовлетворяющих требованиям долговечности и водонепроницаемости. Основные конструкции деформационных швов показаны на рис. 4.44.



Испытания деформационных швов проводятся в натуральных условиях. Так в результате шестилетней эксплуатации и наблюдений за работой различных уплотнений установлено: резиновые уплотнения обладают рядом преимуществ по сравнению с асфальтобитумными и другими уплотнениями.

В связи с большим распространением сборных железобетонных плит для крепления откосов каналов, берегов, земляных плотин возникает серьезная проблема надлежащего уплотнения швов между сборными плитами. Как показали натурные исследования облицовок ирригационных каналов [70] нарушение швов в них вызывает значительные потери воды (до 60 %), вторичное засоление и заболачивание земель.

Плиты облицовок подвергаются осадочным и температурным деформациям. Возможны [71] два решения швов (стыков):

1) жесткий, равнопрочный с плитами, для чего необходимы выпуски арматуры или специальные закладные металлические части, и высокопрочный цемент, в итоге шов получается многодельным и дорогим;

2) гибкий, обеспечивающий только герметизацию и не препятствующий температурным деформациям.

Второе решение является наиболее перспективным, поэтому ведутся исследования упруговязких, эластичных, долговечных и дешевых материалов-герметиков, способных к восприятию многократных знакопеременных нагрузок без нарушения их сплошности.

Герметики подразделяются на мастичные и рулонные. Мастичные герметики относительно дороги и дефицитны; наиболее приемлемы по стоимости полиизобутиленовые мастики. В [71] рекомендуют битумно-полимерный герметик для стыков сборных железобетонных плит для облицовок каналов (рис. 4.44, б) и сборных железобетонных лотков (рис. 4.44, з).

При отставании герметика от бетонных поверхностей или наличии воздушных пузырей дефектное место следует подрубить и залить заново.

Рулонные изделия заводского изготовления отличаются большим разнообразием исходных материалов и конструкций [72]: пористые и плотные эластичные профильные прокладки, уплотнители и ленты, компенсаторы из резины и эластичного поливинилхлорида, жгуты из порошлатов и прочие. Их широко используют в промышленном и гражданском строительстве. Однако в гидротехническом строительстве, предъявляющем повышенные требования к устойчивости и долговечности, эти изделия применяют относительно мало, главным образом в стыках сборных элементов.

4.5.2 Использование пластмасс для создания конструкций и их элементов

Применение пластмасс в сочетании с бетоном осуществляется в виде полимербетонов, пластбетонов и стеклопластиковой арматуры. Появление новых видов бетона с включением пластмасс позволило повысить кавитационную стойкость, прочность, водонепроницаемость, водо- и износостойкость и некоторые другие свойства обычного цементного бетона.

В полимербетонах к цементному вяжущему в качестве добавок используются термопластичные материалы (поливинилацетат, поливинилхлорид, поливинилпропионат, полиакрилат и др.), терморезактивные материалы (фенолоформальдегидные, эпоксидные, полиэфирные, фурановые, карбамидные и другие смолы), а также натуральный и другие каучуки. Вследствие недостаточной водо- и теплостойкости, высокой деформативности бетонов с добавками термо- и эластопластов они не применяются для несущих конструкций, но используются для защитных покрытий, антикоррозионной облицовки, омоноличивания стыков, ремонтных работах и прочие. Полимерцементные растворы также могут быть использованы в качестве защиты и ремонта бетонных сооружений; их прочность на сжатие достигает 50 МПа и более, на растяжение и изгиб – соответственно 6 и 20 МПа.

Испытания составных балок, состоящих из железобетона и сталеполимербетона на поливинилацетатной эмульсии, в растянутой зоне показали, что трещиностойкость их повышается на 40 – 60 %. Испытания составных балок со сталеполимербетоном на эпоксидной смоле (с толщиной слоя смолы не больше толщины защитного слоя) также показали, что трещиностойкость увеличивается [73]. Высокая трещиностойкость и прочность составных балок, возможно, позволят в ряде случаев отказаться от предварительного натяжения арматуры.

Для получения *пластбетона* вяжущее – цемент, заменяется клеем, изготовленным на основе смол холодного отверждения (эпоксидные, фенолоформальдегидные и полиэфирные смолы, фур – фуrol – ацетоновый мономер ФА), то есть получается органоминеральный бесцементный бетон.

Пластбетон на основе мономера ФА морозостоек, водонепроницаем, при давлениях до 20 ат и обладает высокой стойкостью к различным химическим реагентам, повышенной деформативностью и эластичностью, устойчивостью против механического истирания и кавитационного разрушения. Наряду с положительными свойствами пластбетону на основе мономера ФА свойственны недостатки: ограниченная водостойкость, низкая теплостойкость, значительная затухающая ползучесть под нагрузкой, повышенный коэффициент линейного

расширения, плохая адгезия к незагрунтованному цементному бетону и стали [74]. Пока еще недостаточно выявлены долговечность пластбетона в водной среде и надежность его связи со старым бетоном.

Исследования пластбетона на полиэфирных смолах показали [75], что модуль его упругости равен в среднем $300\ 000\ \text{кг/см}^2$; усадочные деформации наиболее интенсивно развиваются первые 2 суток, затем они затухают; с увеличением возраста деформации ползучести при длительном нагружении уменьшаются; сцепление пластбетона с гладкой арматурой через 28 суток равно 7 МПа; длительное воздействие воды вызывает глубокие изменения в материале; предел прочности при сжатии через 240 суток пребывания в воде снижается на 45 % и более.

В [76] проведены исследования по применению синтетических смол для приготовления кавитационно-стойких пластбетонов. Это приобретает важное значение в связи со строительством высоконапорных водосбросных сооружений, где скорости достигают 40 – 50 м/с. При этом к пластбетонам предъявляются требования исключительной однородности, высокой эластичности, повышенной плотности и хороших диэлектрических свойств.

Исследования показали, что наибольшей стойкостью обладают пластбетоны на основе эпоксидной смолы ЭД-6. При соотношении эпоксидной смолы и пластификатора 1:0,5 кавитационная стойкость связующего наиболее высока и практически не зависит от вида пластификатора и скорости потока в интервале 26 – 33 м/с. Минералогический состав заполнителя не оказывает существенного влияния на кавитационную стойкость; последняя снижается с увеличением крупности заполнителя.

С учетом свойств и стоимости пластбетона, который пока в несколько раз дороже обычного бетона, его можно использовать в качестве защитного покрытия обычного бетона от кавитационного разрушения и интенсивного механического истирания (глубинные водосбросы, обделки высоконапорных туннелей и трубопроводов, поверхностные водосбросы с большим количеством донных наносов, дороги с интенсивным движением и т.п.), а также для создания некоторых тонкостенных сборных пластбетонных и армопластбетонных элементов, работающих в аналогичных условиях и при наличии агрессивной среды. Пластрастворы, особенно на основе эпоксидной смолы, целесообразно применять для ремонта бетонных поверхностей.

Применение *стеклопластиковой арматуры* связано как с соображениями общего порядка (дефицитность металла, уменьшение веса конструкции и др.), так и условиями эксплуатации (наличие блуждающих токов, агрессивной среды).

Для изготовления стеклопластиковой арматуры [77] можно использовать тонкое стеклянное волокно толщиной от 3 до 20 мкм с прочностью на растяжение от 13 до 20 тысяч кг/см^2 и эпоксидную или полиэфирную смолу, выполняющую роль связующего для образования арматурного стержня и улучшающую работу отдельных волокон, создавая упругую среду для них. Наряду с этим смола защищает их от агрессивного воздействия среды. Объемный вес стеклопластиковой арматуры равен около $1,9\ \text{т/м}^3$ (т.е. в 4 раза меньше объемного веса стальной арматуры); модуль упругости при растяжении равен 40000 – 50000 МПа.

В результате исследования стеклопластиковой арматуры установлено, что предел прочности на растяжение и модуль упругости снижаются с увеличением диаметра. Прочность арматуры при продолжительных нагрузках составляет около 65 % предела прочности при кратковременных нагрузках [78]. Испытания преднапряженных бетонных элементов со стеклопластиковой арматурой показали их высокую трещиностойкость, хорошее сцепление арматуры с бетоном и незначительные потери на релаксацию.

Опыты применения стеклопластиковой арматуры для преднапряженных оросительных лотков и напорных трубопроводов большого диаметра показали хорошие физико-механические свойства арматуры при сохранении обычной технологии изготовления.

4.5.3 Использование пластмасс для ремонтных работ

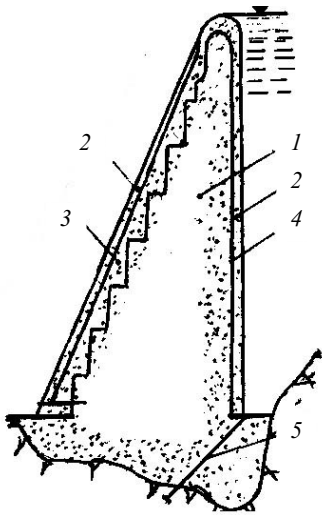


Рис. 4.45 Облицовка плотины Ментрог (Англия):

- 1 – бетон внутренней зоны;
- 2 – новая облицовка; 3 – дренаж;
- 4 – новая изоляция

Пластмассы успешно используются при ремонте и восстановлении поверхностей бетонных сооружений. Так, например, [72] применение полимерцементных растворов на основе поливинилацетатной эмульсии (ПВАЭ) для ремонта гидросооружений показали их хорошую водонепроницаемость (в 2 – 3 раза выше обычного бетона), механическую прочность, морозостойкость, высокую эластичность, противокоррозионную стойкость, хорошее сцепление с сухими и мокрыми бетонными и металлическими поверхностями. При этом полимерцементные защитные покрытия примерно в 2 раза снижают количество трещин, появляющихся в конструкциях под воздействием циклических нагрузок.

Исследования проводятся по двум основным направлениям:

- а) подбор состава окрасочных покрытий для ремонта конструкций, имеющих трещины шириной 0,05 – 0,1 мм;
- б) разработка составов штукатурных покрытий для ремонта конструкций, имеющих раковины, отколы и трещины с шириной раскрытия 0,1 – 0,5 мм и более.

Благодаря высоким противокавитационным свойствам пластбетона на основе эпоксидной смолы эти составы рекомендуются для устранения строительных дефектов (заделка раковин, выравнивание уступов) бетона. Перед нанесением покрытия поверхность защищаемого бетона очищается металлическими щетками, промывается водой под давлением, просушивается и один раз покрывается слоем грунтовочного состава. Обмазочные и штукатурные составы наносятся в раковины глубиной, до 10 – 15 мм штукатурными методами с затиркой поверхности нанесенного покрытия в течение 10 – 15 мин. Подготовленная поверхность раковин глубиной менее 50 мм покрывается грунтовочным составом (адгезионной обмазкой), затем заполняется ремонтным составом на всю глубину. При наличии раковин глубиной более 50 мм их поверхность покрывается слоем окрасочного состава, после чего на полную глубину заполняется обычной бетонной смесью, что обеспечивает прочное соединение старого бетона с новым.

Для ликвидации фильтрации бетонных плотин [68] используется трехслойное стеклопластиковое покрытие. На предварительно очищенную и выровненную при помощи цементного раствора с поливинил-хлоридом бетонную поверхность наносится покрытие из трех слоев: нижний и верхний слои из состава на основе полиэфирной смолы, средний – слой стекловолокна.

В арочной плотине Ментрог (Англия) высотой 27 м и длиной 1000 м была обнаружена фильтрация в швах, устранить которую не удалось ни цементацией, ни торкретированием [79]. После капитального ремонта (рис. 4.45) с использованием битумно-стеклопластиковой изоляции фильтрация существенно уменьшилась.

В США применяется такой метод заделки трещин в бетонных сооружениях, при котором в трещины после их промывки специальным раствором (ручным пистолетом) нагнетается быстротвердеющий раствор под давлением 21 атм. Раствор хорошо проникает в любые трещины, включая волосяные, шириной до 0,05 мм. После ремонта бетонные сооружения приобретают первоначальную прочность.

При необходимости защиты бетона теплогидроизоляционными покрытиями используются пеноэпоксиды. Они наносятся на подготовленную и отремонтированную бетонную поверхность. На бетон пеноэпоксидная гидроизоляция заливается за передвижную

опалубку или приклеиваются пеноэпоксидные плиты размером 200 × 50 × 5 см (пеноэпоксидным клеем), затем по верху плит приклеивается три слоя ткани (стеклопластиковой) и окрашивается светоотражающим составом. Такое покрытие выдерживает более 300 циклов замораживания и оттаивания.

5 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ И КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

Прогнозирование работоспособности осуществляется по косвенным параметрам (прочности, теплостойкости и др.) и в подавляющем большинстве не является достаточно надежным [85 – 92]. Использование математического аппарата очень сложно, поскольку органические строительные материалы являются многокомпонентными системами с многофакторной зависимостью от технологических и эксплуатационных характеристик.

В данной работе для прогноза работоспособности материалов использована термофлуктуационная концепция разрушения, описываемая формулой

$$\tau = \tau_m \exp\left\{\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{R}\right](T^{-1} - T_m^{-1})\right\}.$$

Проведенные исследования [64] влияния способа и параметров переработки материалов, вида напряженного состояния в процессах переработки и эксплуатации, состава материалов и действия внешней среды на прочностные и деформационные константы, определяющие границы работоспособности материалов, обобщены в табл. 5.1. Основываясь на результатах, приведенных в этой таблице, рассмотрены практические решения и рекомендации для прогнозирования работоспособности материалов в деталях и конструкциях.

5.1 Зависимость физических констант термопластов от разных факторов при хрупком разрушении (Р) и критическом деформировании (Д)

Фактор	U_0		τ_m		T_m		γ		Работоспособность	
	Д	Р	Д	Р	Д	Р	Д	Р	Д	Р
Пластификация	↓	=	↑	=	↓	↓	↓	↑	↓	↓
Наполнение		↑		↑	↑	↑↓	↓	↑↓	↑	↑
Химическая стабилизация	≈	↑	≈	=	≈	↑↓	≈	≈	≈	↑
Агрессивный фактор		≈↓		↑		↓		↑		↑↓
Полярность	↑	=	↓	=	↑	↑	↓	↓	↑	↑

Продолжение табл. 5.1

Фактор	U_0		τ_m		T_m		γ		Работоспособность	
	Д	Р	Д	Р	Д	Р	Д	Р	Д	Р
Кристалличность	↑	=	↓	=	↑	↑			↑	↑
Структурирование	↑	=	=	=	=		↑		↑	

Предварительная вытяжка	↑	=	=	=	≈	↑	↑	↓	↑	↑
Способ переработки		=		↑ ↓		↑↓		↑ ↓		↑↓
Вид нагрузки	=	=	=	=	=	=	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑↓

↑ – повышается; ↓ – снижается; = – неизменно; ≈ – почти неизменно

Из табл. 5.1 видно, что основные константы материала U_0 и T_m , будучи связаны только с атомномолекулярным строением и структурой материала при достижении им данного предельного состояния одинаковы при разных видах нагрузки и напряженного состояния. Величина τ_m в некоторых случаях зависит от размеров объекта, определяя путь магистральной трещины, например, при срезе.

Константа γ , являющаяся силовым фактором, связана с видом нагрузки. Важно, что одинаково относительное изменение γ для любых материалов. Все это открывает пути перехода от оценки образца к прогнозу работоспособности деталей посредством экспериментального определения γ непосредственно для них или для моделей.

5.1 Определение силового фактора для детали

Методика определения при хрупком разрушении или вынужденно-эластическом деформировании. Поскольку три константы одинаковы, то для определения γ и β можно воспользоваться простой методикой исключая вариацию температуры. Для этого следует провести ряд опытов с деталью или моделью при некоторой температуре T^* , заключенной в интервале температур эксплуатации.

Если же в этом интервале релаксационное состояние материала изменяется, то следует провести 2 – 3 опыта и в другом состоянии, при температуре T^{**} . Уравнение (2.1) при заданной температуре T^* принимает вид

$$\tau = A^* \exp(-\beta^* \sigma), \quad (5.1)$$

где

$$A^* = \tau_m \exp[(U_0 / RT^*)(1 - T^*/T_m)];$$

$$\beta^* = (\gamma / RT^*) (1 - T^*/T_m).$$

Проведя при температуре T^* несколько опытов по выявлению долговечности при разных нагрузках, откладывают эти данные в координатах $\lg \tau - \sigma$. Из угла наклона этой прямой находят β^* (а из отрезка на оси ординат – величину A^*). Зная эти коэффициенты для изделия при данной температуре, а также U_0 и γ для материала (из опытов при простом виде нагрузки), можно найти γ для детали

$$\gamma = 2,3\beta^*RT^*/(1-T^*/T_m). \quad (5.2)$$

В пригодности этой формулы для данного материала убеждает пересечение в одной точке (полюсе) семейства прямых $\lg \tau - 1/T$, относящихся к разным напряжениям.

Если же прямые $\lg \tau - 1/T$ параллельны друг другу, но зависимость $\lg \tau - \sigma$ по-прежнему линейна, то справедлива формула (2.3).

В этом случае силовой фактор β находят из прямой $\lg \tau = C - \beta \sigma$. Такая закономерность справедлива для деформирования не наполненных и слабокристаллических полиамидов и

полиалкилентерэфтататов, а также при хрупком разрушении этих полимеров, когда они высококристаллически, сильно наполнены или армированы.

Методика определения при сочетании разрушения и деформирования. Формула (2.2) описывает [80] деформационную работоспособность полукристаллических пластмасс (ПФА, ПЭ, ПП и др.) при больших напряжениях и прочностную работоспособность эластомеров. Так же как и для указанных выше случаев для определения γ' в формуле можно исключить вариацию температуры. Уравнение при заданной температуре T_* принимает вид

$$\tau = B^*/\sigma^n, \quad (5.3)$$

$$B^* = \tau_\infty [(U_0'/E_a)/\gamma']^n \exp(E_a/RT^*).$$

Экспериментальные данные обрабатывают в координатах $\lg \tau - \lg \sigma$. Они отвечают линейной связи $\lg \tau = B - n \lg \sigma$. Поэтому найдя для детали величину n (и убедившись в ее неизменности или внося коррективы), а также зная U_0' и E_a для материала, можно найти γ' для детали

$$\gamma' = (U_0' - E_a) B^{1/n} \exp(E_a/(nRT)). \quad (5.4)$$

Таким образом, найдя экспериментально 3 – 4 константы материала, можно прогнозировать его работоспособность в изделиях при любых напряжениях, температурах и временах их действия.

5.2 Прогнозирование несущей способности изделий из полисульфона

Модифицированный полисульфон марки ПСФ-180-1 представляет собой смесь фторопласта-4 и продукта поликонденсации дефинилпропана и фенолфталеина с 4,4-дихлордифенилсульфоном с добавками, улучшающими реологические характеристики, и двуокисью титана. Полисульфон перерабатывается литьем под давлением, экструзией и прямым прессованием в изделия конструкционного и электроизоляционного назначения, обладающих повышенной тепло- и огнестойкостью.

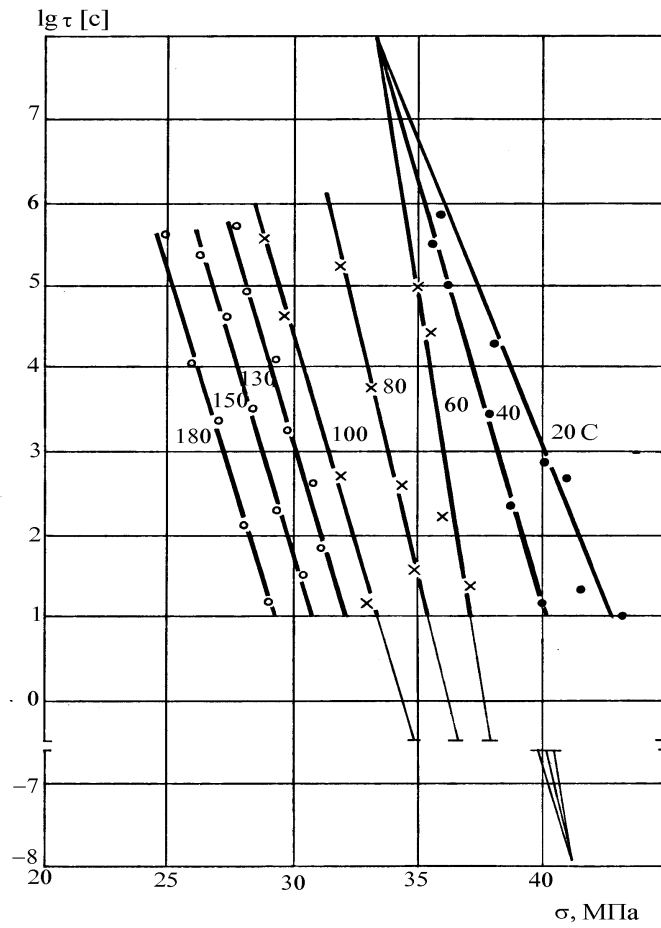


Рис. 5.1. Зависимости долговечности от напряжения при различных температурах (цифры у прямых) для полисульфона

Испытания образцов полисульфона проводились при длительном срезе и кручении [20, 81]. Образцы при срезе представляют прямоугольные пластины сечением 5 × 3 мм. При испытании на кручение – прямоугольные бруски квадратного сечения с длиной стороны 5 мм, в последних вытачивается галтель шириной 5 мм и минимальным сечением 2 мм.

Экспериментальные данные при срезе представлены на рис. 5.1. Как видно из этого рисунка они представляют собой семейство прямых с различным углом наклона. Все семейство можно разбить на три зоны с интервалами температур 20 – 60 °С, 60 – 100 °С, 100 – 180 °С. На дилатометрической кривой (рис. 5.2) температуры 70° и 104 °С выделяются как точки перехода.

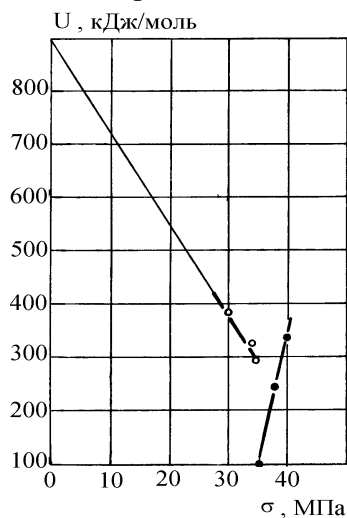


Рис. 5.4 Зависимость эффективной энергии активации разрушения от напряжения при срезе полисульфона (ПСФ-180-1)

В интервале 20 – 60 °С зависимости $\lg \tau - \sigma$ представляют собой обратный пучок (аналогичный ПЭ, ПП, эластомерам и ЦСП) и описываются эмпирическим уравнением [64].

В интервале 60 – 100 °С зависимости $\lg \tau - \sigma$ имеют вид прямого пучка и описываются уравнением (2.1).

В интервале 100 – 180 °С зависимости $\lg \tau - \sigma$ представляют собой семейство параллельных прямых, описываемых уравнением (2.3) [80].

Для расчета физических и эмпирических коэффициентов экспериментальные данные перестроены в координаты $\lg \tau - 1/T$, см. рис. 5.3. Из рисунка видно, что характер зависимости сохраняется. Рассчитанные из этой зависимости (а также из зависимости $\lg \tau - \sigma$) коэффициенты представлены в табл. 5.2.

На рис. 5.4 приведены зависимости $U - \sigma$, построенные в температурных интервалах 20 – 60 и 60 – 100 °С.

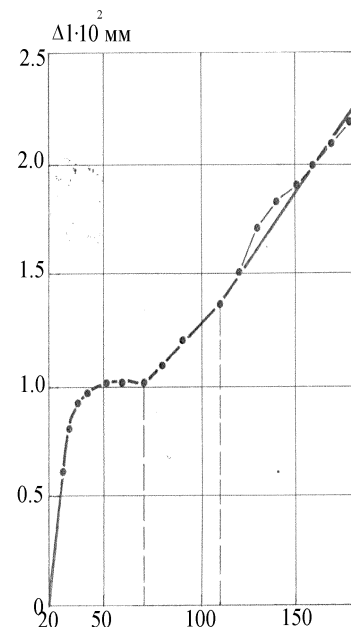


Рис. 5.2
Дилатометрическая кривая ПСФ-180-1

5.2 ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ЭМПИРИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В ПОЛИСУЛЬФОНА ПСФ-180-1

Температурный интервал, °С	U , кДж/моль	$\tau_{пр}^*$, с	γ , кДж / (моль · МПа)	β , [с] / МПа	$10^3/T_{пр}^{**}$, К ⁻¹
20 – 60	–1500	10^7	–49	–	3,6
60 – 100	890	10^{-8}	17	–	2,1
100 – 180	231	10^{-23}	–	1	–

$\tau_{пр}^* - \tau, \tau_m$;

$T_{пр}^{**} - T, T_m$

Для прогноза несущей способности изделий из полисульфона, работающих при статическом нагружении, необходимо разработать специальные стенды, моделирующие условия их работы под нагрузкой. Предварительно оценивается напряженное состояние изделия в процессе эксплуатации.

Держатель представляет собой тело вращения в виде двух цилиндров разных диаметров с прорезью в сплошном цилиндре, см. рис. 5.5. Доминирующие виды нагрузок, действующие на держатель, это сдвиг и кручение. Поэтому при разработке испытательного стенда в основу нагружающего устройства заложены указанные виды напряженного состояния.

На рис. 5.6 представлен общий вид испытательного стенда. Стенд состоит из опоры, двух стоек, шкива и вала с насадкой. Одна стойка является зажимом изделия, вторая – опорой нагружающего устройства. Изделие закладывается в отверстие испытательной секции и зажимается диском. В прорезь держателя вставляется клин насадки. Через шкив поддерживается груз, который создает в изделии заданную нагрузку.

Главными нагрузками при эксплуатации изделия "Гайка РП1-53" являются комбинации растяжения и изгиба, приводящие к разрушению стенки. Для испытания "гайки" разработан стенд рычажного типа.

Стенд состоит из статины, стойки, рычага и измерителя деформации. Последний представляет собой индикатор часового типа, установленный на специальном штативе. К рычагу с помощью винтов крепится специальная клиновидная насадка. При испытании она входит в прямоугольное отверстие "Гайки", раздвигая и изгибая ее стенки. "Гайка" опирается на металлическую подставку, выполненную по ее профилю.

Нагрузку можно регулировать, варьируя положение насадки по длине рычага.

Испытания изделия "Держатель" проведены при комнатной температуре на стенде, показанном на рис. 5.6. Для построения зависимости долговечности от нагрузки первоначально определяется критическая нагрузка. К изделию через шкив прикладывается нагрузка, которая ступенчато наращивается до момента разрушения. Разрушающая нагрузка считается критической. Далее в процессе испытания к изделиям прикладываются нагрузки, меньше критических и строится зависимость долговечности от нагрузки при комнатной температуре, см. рис. 5.7.

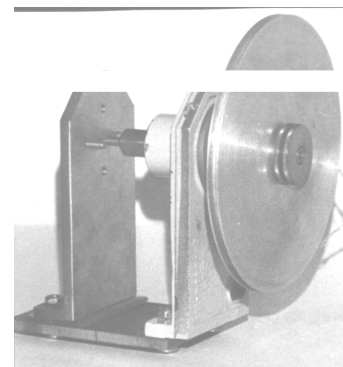


Рис. 5.6
Испытательный стенд для изделия "Держатель". Общий вид

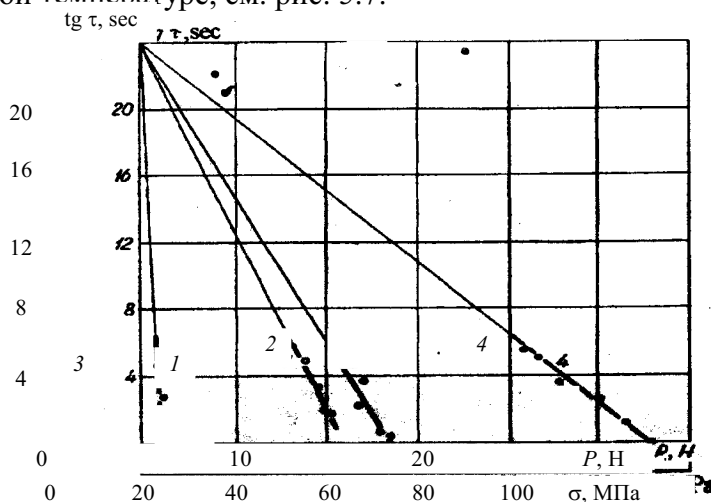


Рис. 5.7 Зависимость долговечности образцов (1, 2) и изделий (3, 4) из композита ПСФ-180-1 от напряжения (нагрузки) при комнатной температуре.

Образцы: 1 – испытаны при срезе; 2 – при кручении.

Изделия: 3 – держатель; 4 – гайка

Как видно из рис. 5.7, полученная зависимость имеет линейный характер в координатах $\lg\tau - P$. Каждая точка на этой зависимости является усредненным результатом шести измерений.

На этот же рисунок нанесены зависимости $\lg\tau - \sigma$ при кручении и сдвиге. Они сходятся в одной точке на оси ординат. Это важный физический результат. Он позволяет не раскрывая вида математической зависимости, описывающей экспериментальные результаты, прогнозировать долговечность изделия в широком диапазоне температур.

А именно, имея зависимость $\lg\tau - \sigma$ при вариации температуры для образцов при любом простом виде напряженного состояния и $\lg\tau - P$ при комнатной температуре для изделия, необходимо исходить из постоянства $\tau_{пред}(\lg A)$ и сохранения соотношения силовых коэффициентов β (тангенс угла наклона прямой $\lg\tau - \sigma$) при заданной температуре. Для расчета долговечности изделия значения коэффициентов $\lg A$ и β сводятся в табл. 5.3.

5.3 Значения физических коэффициентов долговечности образцов и изделий из полисульфона при вариации температуры

Температура, °C	20	60	100	180
$\lg A$	23,6	32,3	13,4	8,5
$\beta_{обр}$ при срезе	5,3	19,0	9,5	9,5
$\beta_{изд}$ "Держатель"	22,5	80*	40*	40*

* Рассчитано из соотношения $\beta_{обр} / \beta_{изд}$

Для примера рассчитана долговечность изделия при температуре 180 °C и нагрузке 0,1 Н. Расчет ведется по формуле

$$\lg\tau = \lg A - 2,3\beta P.$$

Из табл. 5.3 берутся значения $\lg A$ и β , тогда долговечность равна десятым долям секунды

$$\lg\tau = 8,46 - 2,3 \cdot 40 \cdot 0,1 = -0,74.$$

При температуре 60 °C и нагрузке 0,1 Н, долговечность равна более 100 лет

$$\lg\tau = 32,3 - 2,3 \cdot 80 \cdot 0,1 = 13,9.$$

Изделие "Гайка РП1-53" испытывается по той же методике, что и "держатель", но на другом стенде. Экспериментальные данные нанесены на рис. 5.7. Как видно из рисунка, полученная зависимость сходится в одну точку с вышеописанными. Таким образом величина $\lg A$ не зависит от вида напряженного состояния, технологии изготовления и масштабного фактора. Все эти параметры проявляются в изменении β . Величина β для "Гайки" равна 0,84 (с) / Н. Расчет долговечности ведется также как и для "Держателя".

5.3 Прогнозирование несущей способности изделий из полиалканимида

ПАИС-ЭК-1 представляет собой композиционный материал на основе полиалканимида, модифицированного при экструзии гранулированным стекловолокнистым наполнителем и тальком. Он перерабатывается методом литья под давлением в тонкостенные армированные детали сложной конфигурации электроизоляционного и конструкционного назначения.

Основные технические характеристики материала:

диапазон рабочих температур, °С	
удельная ударная вязкость, кДж/м ²	-60÷+200
разрушающее напряжение при растяжении, МПа	25
удельное сопротивление	80
объемное электрическое сопротивление, Ом·см	1·10 ¹⁵
электрическая прочность, кВ/мм	20
усадка, %	0,78÷1,4

Испытания образцов проводятся в режиме длительного среза. Образцы представляют собой пластины сечением 5 × 3 мм. Экспериментальные данные обрабатываются в координатах $\lg t - \sigma$, см. рис. 5.8.

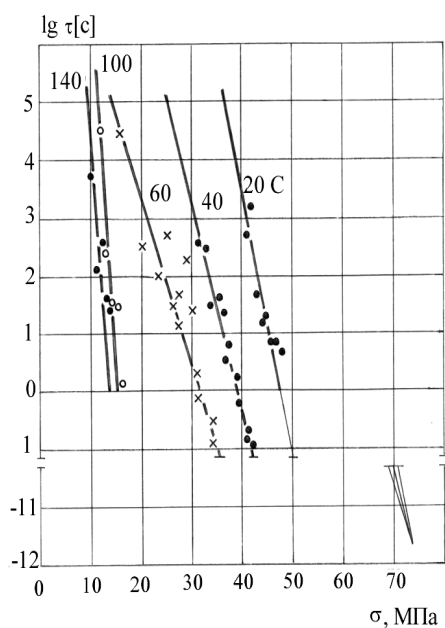


Рис. 5.8 Зависимость долговечности образцов из ПАИС-ЭК-1 от напряжений среза при

Как видно из рисунка, они представляют собой два семейства: одно – с параллельными прямыми, другое – в виде сходящегося пучка. Перестройка, по-видимому, связана со структурным переходом при изменении температуры. Для выявления температуры структурного перехода, как и для выше представленных композиций, построена зависимость линейного удлинения от температуры, см. рис. 5.9. Из рис. 5.9 видно, что температура излома на дилатометрической кривой совпадает с температурой изменения характера зависимости прямых долговечности (см. рис. 5.8)

Для расчета физических коэффициентов зависимости $\lg t - \sigma$ перестроены в координаты $\lg t - 1/T$, см. рис. 5.10. Вид зависимости сохраняется. Значения всех рассчитанных графоаналитически коэффициентов приведены в табл. 5.4.

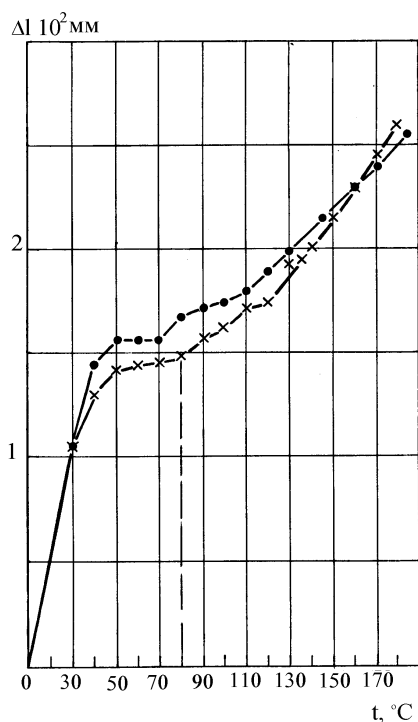


Рис. 5.9 Зависимость линейного удлинения от температуры для композита ПАИС-ЭК-1

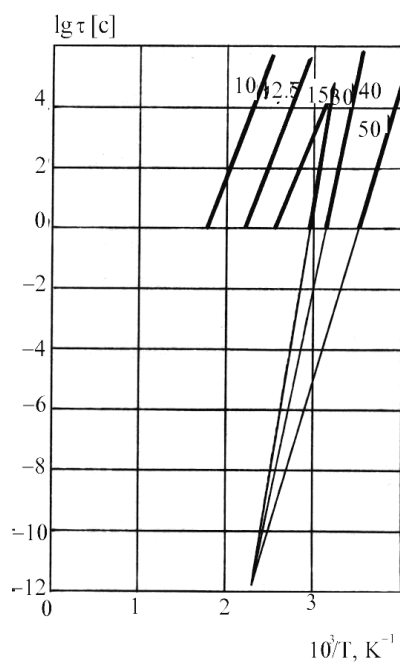


Рис. 5.10 Зависимость долговечности образцов ПАИС-ЭК-1 от обратной температуры при различных напряжениях сдвига. Цифры у прямых – напряжения в МПа

5.4 Значения физических коэффициентов ПАИС-ЭК-1

Температурный интервал, °С	U , кДж/моль	$\tau_{пр}$, с	γ , кДж / (моль·МПа)	β , [с] / МПа	$10^3/T_{пр}$, K ⁻¹
20 – 60	583	10^{-12}	8	–	2,3
100 – 140	143	10^{-16}	–	1,58	–

Изделие "Гайка РП1-53" работает в условиях двухосного растяжения стенок и сжатия основания. Стенд моделирует указанные виды напряженного состояния. Также как и для изделий из полисульфона, ступенчато нагружая, определяется критическая нагрузка.

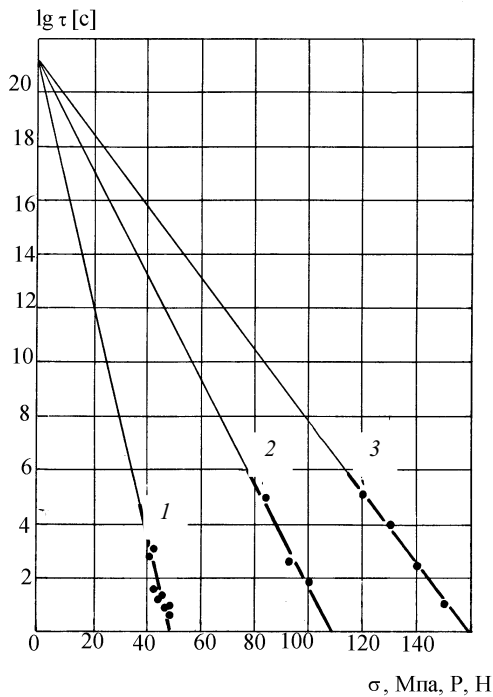


Рис. 5.11 Зависимость долговечности образцов (1) и изделий (2, 3) из композита ПАИС-ЭК-1 от напряжений (нагрузки) при комнатной температуре. Изделия: 2 – гайка; 3 – корпус

Далее, исходя из нее, выбирается ряд нагрузок. При каждой нагрузке испытывается 3 – 6 изделий. В координатах $\lg \tau - P$ строится графическая зависимость, см. рис. 5.11. На этот же рисунок нанесена зависимость $\lg \tau - \sigma$ при срезе образцов из композита ПАИС-ЭК-1. Как видно из рис. 5.11, обе зависимости пересекаются в одной точке на оси ординат.

Изделие "Корпус Пирон-2" работает в условиях растяжения и консольного изгиба. Эти виды напряженного состояния в изделии создаются накладками, показанными на рис. 5.12. Нагружение изделия производится с помощью механического пресса с динамометром.

Экспериментальные данные представлены на рис. 5.11. Также как и для образцов и "Гайки РП1-53", полученная зависимость $\lg \tau - P$ для "Корпуса Пирон-2" имеет линейный характер. При этом на оси ординат она пересекается в одной точке с двумя другими зависимостями.

Для расчета долговечности изделий из ПАИС-ЭК-1 в широком диапазоне нагрузок и температур из указанных на рис. 5.11 зависимостей рассчитываются коэффициенты $\lg A$ и β , которые заносятся в табл. 5.5. Помимо этого для материала (образцов) в табл. 5.4 внесены значения β при ряде температур, определенных из зависимости $\lg \tau - \sigma$, представленной на рис. 5.8.

Как и для изделий из полисульфона приведенные величины коэффициентов для изделий из ПАИС-ЭК-1 позволяют рассчитать для них долговечность при любой заданной нагрузке и температуре.

5.5 Значения физических коэффициентов долговечности ПАИС-ЭК-1 при вариации температуры

Коэффициент	Температура, °С			
	20	60	100	140
$\lg A$	21	8	20,6	18,4
$\beta_{\text{обр}}$	4,4	2,8	13,7	13,7
$\beta_{1\text{изд}}$	1,9	1,2*	5,9*	5,9*
$\beta_{2\text{изд}}$	1,2	0,8*	3,7*	3,7*

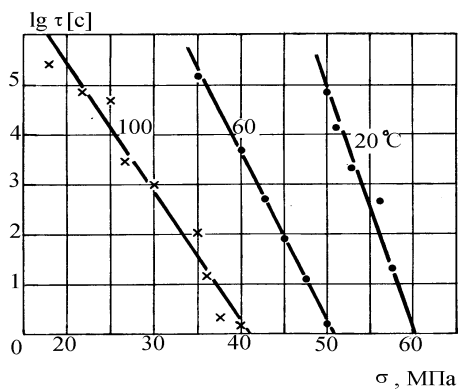
* Величины рассчитаны из соотношения $\beta_{\text{обр}} / \beta_{\text{изд}} = \text{const}$

Прессматериал ПАИС-104С представляет собой продукт совместной переработки полиалканимида, минерального наполнителя и специальных добавок. Он перерабатывается в изделия прямым и литьевым прессованием.

Основные технические характеристики материала:

диапазон	
рабочих температур,	-60 –
°С	+250
разрушающее	
напряжение при	
изгибе, МПа	66
ударная	
вязкость, кДж/м ²	
удельное	36
объемное	
электрическое	
сопротивление,	
Ом·см	1·10 ¹²
электрическая	
прочность, кВ/мм	
усадка, %	13000
	0,2 –
	0,4

Испытания на долговечность, как и для выше описанных материалов, проведены при срезе. Образцы представляют собой пластины 5 × 1,5 мм. Условия поддержания параметров испытания описаны ранее.



Экспериментальные данные обработаны в координатах $\lg \tau - \sigma$ при заданных постоянных температурах, см. рис. 5.13. Из рисунка видно, что полученные зависимости представляют собой семейство сходящихся прямых, образующих пучок.

Рис. 5.13 Зависимость долговечности образцов из ПАИС-

Для выявления эффекта смещения полюса зависимости перестроены в координаты $\lg \tau - 1/T$, см. рис. 5.14. Представленное на рис. 5.14 семейство прямых описывается уравнением (2.1).

Величины всех коэффициентов, входящих в это уравнение рассчитаны графически. Так максимальная энергия активации определяется из зависимости $U - \sigma$ путем экстраполяции на ось ординат коэффициентов

кДж/моль, γ
 10^{14} с, $10^3/T_m = 1,0$.
 использованы долговечности
 Изделия из испытаны на пресса. Накладки, "Основание 2" нагрузки, возникающим в показаны на рис. Испытания вариации нагрузок. отдельного постоянной. Зави-нагрузки для представлены на линейный характер координатах, и ординат.

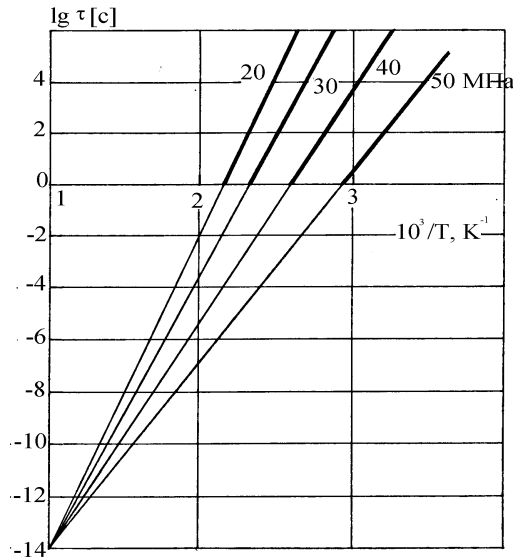


Рис. 5.14 Зависимость долговечности образцов из ПАИС-104С от обратной температуры при постоянных напряжениях сдвига

(рис. 5.15). Значения равны соответственно $U_0 = 297 = 3,1$ кДж/(моль·МПа), $\tau_m = 10^7$. Все эти величины будут ниже при расчете изделий из ПАИС-104С композита ПАИС-104С стэнде в виде механического создающие в изделиях Пирон-2" и "Корпус Пирон-близкие к реальным, процессе их эксплуатации, 5.16. изделий проведены при Нагрузка в процессе каждого испытания поддерживается симости долговечности от деталей и материала рис. 5.17. Они имеют в полулогарифмических сходятся в одну точку на оси

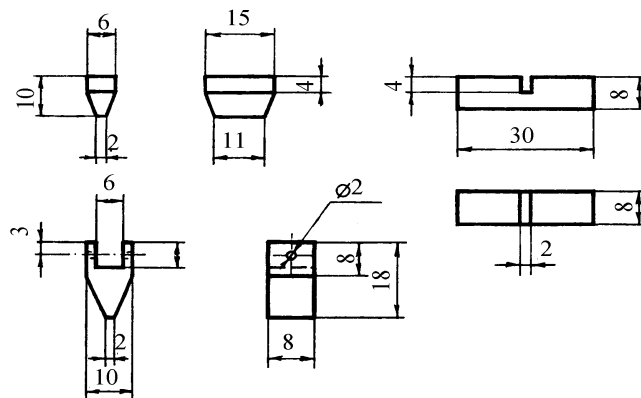


Рис. 5.16 Накладки для испытания пластмассовых изделий на долговечность

Описать зависимости $\lg \tau - P(\sigma)$, как и для всех ранее испытанных материалов и изделий, можно уравнением:

$$\tau = Ae^{-\beta P}$$

Физические коэффициенты A и β , определенные графоаналитически, приведены в табл. 5.6.

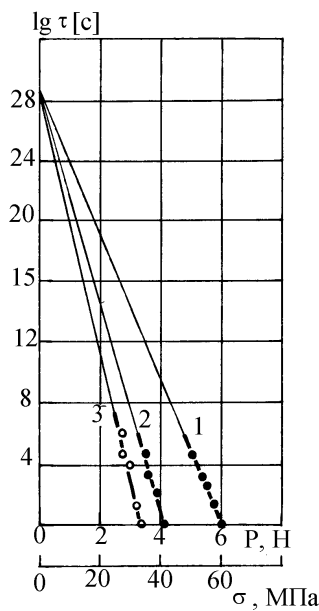


Рис. 5.17 Зависимость долговечности образцов (1) и изделий (2, 3) композита ПАИС-104С от напряжения

2 Нагрузка 2 Н и температура 100 °С

$$\lg \tau = -14 + \frac{71 - 164 \cdot 0,2}{2,3 \cdot 2 \cdot 373 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(1 - \frac{373}{1000}\right) = 0. \quad \tau = 1 \text{ с}$$

5.6 Значения физических коэффициентов долговечности ПАИС-104С

Коэффициенты	U_0 , кДж/моль	γ , кДж/(моль·МПа)	$\lg \tau_m$, [с]	$10^3/T_m$, К ⁻¹	LgA	β
Образцы	297	3,1	-14	1	29	4,9
Изделие 1	—	—	—	—	29	86
Изделие 2	—	—	—	—	29	70

5.4 Методика прогноза долговечности изделий в широком интервале нагрузок и температур

1 Для материала изделий проводятся испытания на долговечность при каком-либо простом виде напряженного состояния (растяжении, изгибе, срезе, кручении) в широком диапазоне нагрузок и температур. Экспериментальные данные обрабатываются в координатах $\lg \tau - \sigma$ и $\lg \tau - 1/T$. По виду полученной зависимости выявляется уравнение ее описывающее. Графически, аналитически и графоаналитически рассчитываются физические и эмпирические коэффициенты уравнения.

2 Для изделия, исходя из условий эксплуатации, выявляется напряженное состояние. При этом выбираются доминирующие компоненты, приводящие к разрушению отдельных элементов изделия.

Примеры расчета для заданных нагрузок и температур:

1 Нагрузка 1 Н и температура 20°С.

Для расчета уравнение (2.1) логарифмируется

$$\lg \tau = \lg \tau_m + \frac{U_0 - \gamma \sigma}{2,3RT} (1 - T/T_m). \quad (5.5)$$

Величина γ для изделия находится по уравнению (5.2)

$$\gamma = \frac{2,3 \cdot 86 \cdot 293 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{1 - 293/1000} = 164 \text{ (ккал·мм}^2\text{)/(моль·кг)}.$$

Подставляются величины коэффициентов и заданных параметров в уравнение (5.5)

$$\lg \tau = -14 + \frac{71 - 164 \cdot 0,1}{4,6 \cdot 293 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{293}{1000}\right) = 14,641.$$

Отсюда

$$\tau = 4,37 \cdot 10^{14} \text{ с}$$

3 По виду напряженного состояния и наиболее опасным его компонентам в изделии проектируется и изготавливается стенд, имитирующий реальные условия эксплуатации изделия. Один стенд с разными накладками может использоваться для испытания нескольких изделий, работающих в идентичных напряженных состояниях.

4 Для каждого испытываемого изделия определяется критическая нагрузка (разрушающая) при непрерывном или ступенчатом нагружении. Она аналогична пределу прочности при испытании образцов материала.

5 Исходя из критической нагрузки, выбирается нагрузочный диапазон испытания изделия. При каждой постоянной нагрузке и комнатной температуре испытывается по 3 – 6 изделий.

6 Экспериментальные данные для изделий обрабатываются в координатах $\lg t - P$.

7 Для образцов материала и изделия, изготовленного из него, все коэффициенты, кроме силового (структурно-механического), неизменны. Это позволяет, определив из зависимости $\lg t - P$ структурно-механический коэффициент, по уравнению для материала рассчитать долговечность изделия при любой заданной нагрузке и температуре.

8 Если уравнение долговечности для материала выявить сложно, то для расчета долговечности изделия можно пользоваться упрощенной методикой. Основой ее является постоянство $\lg A$ при заданной температуре, которое подтверждено для всех испытанных материалов и изделий из них.

9 Соотношение $\beta_{\text{изд}} / \beta_{\text{мат}}$ при различных температурах для одного материала величина постоянная. Поэтому зная величины $\beta_{\text{мат}}$ при разных температурах и имея $\beta_{\text{изд}}$ при одной температуре по уравнению

$$\tau = Ae^{-\beta P}.$$

можно рассчитать долговечность для изделий при любых заданных напряжении и температуре.

11 Исходя из постоянства $\lg A$ для изделия и материала при заданной температуре, для определения $\beta_{\text{изд}}$ можно ограничиться величиной критической нагрузки. Имея две точки на оси ординат и абсцисс, по углу наклона прямой их соединяющей определяется $\beta_{\text{изд}}$.

Огнестойкий композитный материал паронит на основе эпоксидно-каучуковой смеси и асбестового волокна широко используется в прокладках для герметизации соединений некоторых узлов двигателей внутреннего сгорания. При длительной эксплуатации прокладки чаще всего выходят из строя в результате образования трещин (нарушение герметичности).

5.5 Прогнозирование долговечности, прочности и термостойкости паронитовых прокладок

Точных методик расчета их работоспособности не создано, а приближенную оценку прочности проводят без учета изменения ее во времени. Для прогноза основных параметров работоспособности паронитовых прокладок предлагается [93] использовать уравнение (2.1), отражающее температурно-временной характер разрушения пластмасс.

Прочностные константы U_0 , τ_m , T_m и γ , входящие в уравнение (2.1), в отличие от обычных физико-механических характеристик получают в результате обработки экспериментальных данных по долговечности при различных температурах и напряжениях. Поэтому прогноз работоспособности изделий из паронита основан на постоянстве или изменении в строгом соотношении указанных констант.

Из листов паронита толщиной 2 мм параллельно и перпендикулярно направлению каландрования вырубали образцы в виде двусторонней лопатки. Испытания образцов проводятся в режиме одноосного растяжения при ряде заданных постоянных напряжений и температур. Для снижения разброса экспериментальных данных на рабочем участке образцов делается плавное утонение [29] (см. разд. 2.4). Результаты испытания образцов показаны на рис. 5.18.

Там же крестиком нанесена долговечность прокладки до ее разрушения при сжатии при температуре 20 °С и $\sigma = 15$ МПа. Для этого прокладки закладываются между двумя тщательно отполированными стеклянными пластинами толщиной 20 мм, установленными вертикально в коробчатый стальной каркас клиновыми деревянными вставками. Испытания проводятся на гидромеханическом прессе при фиксированном усилии (напряжении) и температуре. Разрушение прокладки фиксируется визуально в проходящем свете: критическим считалось время до начала образования трещин (появление тонкой световой полоски).

Из рис. 5.18 видно, что среднелогарифмическая долговечность прокладки такая же как образца, вырубленного перпендикулярно направлению каландрования и испытанного при той же температуре. Растягивающее напряжение, вызывающее разрушение лопатки, равно 14 МПа, что на несколько процентов меньше, чем при сжатии прокладки в соответствии с соотношением $\gamma_p / \gamma_{сж} = 1,05$ (см. табл. 5.2). Вся система точек образует семейство прямых веера изобар, которые описываются уравнением (2.1). Каждая точка представляет собой усредненный результат 12 измерений. Из зависимостей $\lg \tau - 1/T$ графоаналитическим способом определяются все указанные прочностные константы.

Значения всех констант приведены в табл. 5.7. Там же приведены значения аналогичных констант для электронита, близкого по составу парониту, но имеющего хаотически расположенный асбестовый наполнитель. Из таблицы видно, что максимальная энергия активации U_0 для паронита перпендикулярно каландрованию равна U_0 электронита и составляет 195 кДж/моль. При разрушении образцов из паронита параллельно направлению каландрования $U_0 = 390$ кДж/моль (рис. 5.8 и табл. 5.7), то есть наблюдается ранее обнаруженный эффект кратности энергии активации разрушения [64]. Из табл. 5.7 видно, что величина γ вдоль ориентации приблизительно в 2 раза меньше, чем поперек. Поскольку и U_0 больше вдвое, то прочность больше в 3,3 раза.

5.7 Значение прочностных констант и основных эксплуатационных параметров асбоволокнистых композитов

Композит	Направление ориентации волокна *	Константы				Эксплуатационные параметры**		
		U_0 , кДж/моль	γ , (кДж·м ²)/ (моль·Н)	$\lg \tau_m$, с	$10^3/T$, К ⁻¹	τ , с	σ , МПа	T , К
Паронит	Вдоль	390	5,4	-10	1,7	$6,5 \cdot 10^{19}$	47	41
	Поперек	195	11,3	-1,5	1,7	$3,8 \cdot 10^5$	14	39
Электронит	Нет	197	2,9	-0,8	2,2	$5,9 \cdot 10^9$	52	39

* Относительно прикладываемой нагрузки;

** τ при $\sigma = 10$ МПа и $T = 293$ К, σ при $\tau = 10^3$ с и $T = 293$ К, T при $\tau = 10^3$ с и $\sigma = 10$ МПа

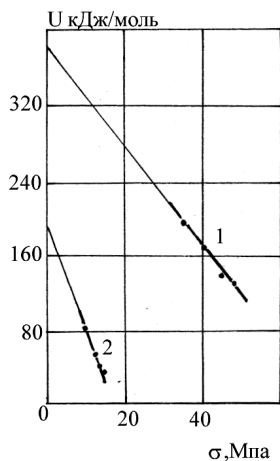


Рис. 5.19 Зависимость эффективной энергии активации от напряжения при разрушении паронита: 1 – параллельно; 2 – перпендикулярно направлению

Очень большие значения τ_m при разрушении паронита перпендикулярно направлению каландрования и электронуита U_0 , кДж/моль, также как и для некоторых реактопластов с порошкообразными и волокнистыми наполнителями [64].

Вторая координата полюса, величина смещения температуры полюса $1/T_m$, не зависит от направления ориентации паронита (см. рис. 5.18 и табл. 5.7).

Из табл. 5.1 следует, что вид напряженного состояния не влияет на константы U_0 , τ_m и T_m , а приводит к изменению только γ , причем соотношение γ для двух видов напряженного состояния – величина постоянная как для гомогенных, так и композитных полимерных материалов. Это открывает возможность перехода от экспериментальных данных, полученных на лабораторных образцах, к прогнозу эксплуатационных параметров паронитовых прокладок.

Итак, поскольку разрушение пойдет поперек оси ориентации, срок службы паронитовой прокладки может быть рассчитан по формуле

$$\lg \tau = [600(17 - \sigma) (1 - 0,0006T) / T] - 4,8, \quad (9.5)$$

где σ – напряжение, МПа; T – температура, К.

Кроме срока службы по уравнениям (2.2), (2.3) при заданных исходных параметрах (внешних условиях) можно рассчитать величины прочности и термостойкости.

Безметалльные конструкции обладают высокой коррозионной стойкостью и радиопрозрачностью; применяются в покрытиях над радарными и радиолокационными установками, производственными помещениями химической промышленности, складами агрессивных сыпучих материалов. Долговечность безметалльных конструкций определяется

5.6 Прогнозирование долговечности соединений деревянных элементов нагелями из АГ-4нС при вариации нагрузки и температуры

2.

Безметалльные конструкции обладают высокой коррозионной стойкостью и радиопрозрачностью; применяются в покрытиях над радарными и радиолокационными установками, производственными помещениями химической промышленности, складами агрессивных сыпучих материалов. Долговечность безметалльных конструкций определяется несущей способностью соединений элементов. Наиболее распространенными соединениями в деревянных конструкциях являются нагельные. Совместно с О. В. Умновой проведены исследования прочности и деформативности соединений на нагелях из АГ-4нС. Однонаправленный стеклопластик АГ-4нС состоит из алюмоборосиликатных непрерывных стеклонитей БС 84–400 и модифицированной фенолоформальдегидной смолы Р-2.

В отличие от остальных нагелей пластмассовые имеют резко выраженную температурно-временную зависимость прочности и деформативности. Поэтому исследования проведены при вариации температуры. Испытания проводились при растяжении двусрезных симметричных соединений деревянных элементов размерами $80 \times 20 \times 300$ мм с нагелем диаметром $d_n = 10$ мм. Нагель устанавливался в заранее просверленное отверстие на расстоянии $6d_n$ от торца.

Принято [82], что несущая способность нагельных соединений определяется по заданной деформации (равной двум упругим) при изгибе нагеля и смятии нагельного гнезда. Проведенные испытания показали, что при работе соединений за предельной деформацией ряд нагелей из АГ-4нС разрушилось срезом, что практически исключено для металлических нагелей [82]. Поэтому для прогнозирования долговечности соединений с нагелями из АГ-4нС использовали вышеописанную методику (см. раздел 5.4).

Для выявления зависимостей $\lg \tau - \sigma$ и $\lg \tau - 1/T$ образцы в виде пластин размерами $5 \times 3 \times 1,5$ мм, прессованные при температуре 150°C и давлении 10 МПа, испытаны при длительном срезе на рычажной установке, варьируя температуру и нагрузку. Каждое значение долговечности (времени до разрушения) при заданной температуре и напряжении определялось как среднее арифметическое 10 – 15 измерений. Обработка экспериментальных данных проводится статистическими методами на ЕС ЭВМ-1066. В результате обработки определяется вид зависимости $\psi(\lg \tau, \sigma)$, характеристики рассеяния и доверительные оценки. В устанавливаемой зависимости величине σ придается смысл аргумента, а τ рассматривается как функция. Если математически оба представления равнозначны, то, с точки зрения

физической интерпретации, первое предпочтительнее второго, так как при этом имеется ввиду, что механическое усилие задает скорость процессу разрушения. Для удобства вычислений в качестве случайной величины принимали $x = \lg t$. Результаты статистической обработки приведены в табл. 5.8.

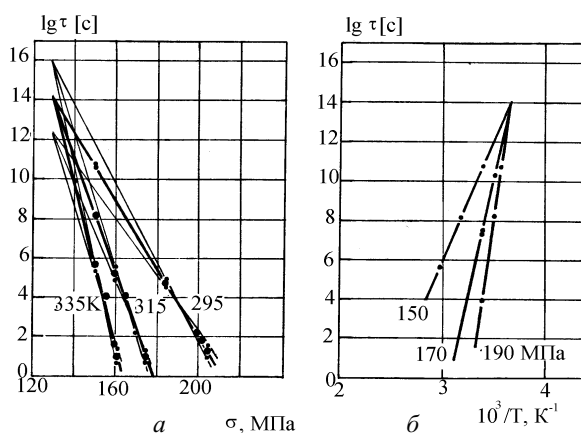


Рис. 5.20 Зависимость долговечности стеклопластика АГ-4нС от напряжения (а) и обратной температуры (б) при срезе

Вероятность, с которой случайная величина попадает в доверительный интервал, принята 0,95. Вид зависимости $\psi(\lg t, \sigma)$ определяется на основании метода наименьших квадратов [83]. Уже при наличии двух членов полинома получена достаточно хорошая корреляция (см. табл. 5.7). Исходя из результатов статистической обработки построены зависимости $\lg t - \sigma$ и $\lg t - 1/T$, см. рис. 5.20. Полученные зависимости имеют вид обратного пучка и описываются уравнением (4.1). Это, по-видимому, связано с вытяжкой стеклянных нитей под нагрузкой и доотверждением связующего при длительном действии повышенных температур [84]. Определенные графоаналитически коэффициенты уравнения (4.1) имеют следующие значения: $\tau_* = 10^{14}$ с, $U_* = -328$ кДж/моль, $\gamma_* = -2,52$ кДж / (моль·МПа), $T_* = 273$ К.

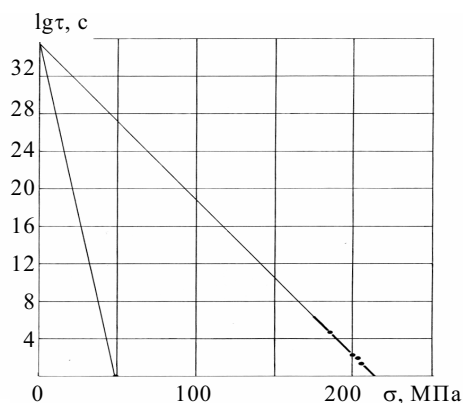


Рис. 5.21 Зависимости долговечности образцов (1) и нагелей (2) из АГ-4нС от напряжения среза при температуре 295 К

Выше установлено, что при изменении вида напряженного состояния меняется только γ_* . Тогда для нагеля его находят из уравнения

$$\gamma_* = 2,3\beta_*RT/(T_* / T - 1),$$

где β_* определяется как тангенс угла наклона зависимости $\lg\tau - N$, полученной при испытании нагельного соединения при комнатной температуре, см. рис. 5.21.

Покрытие в пневматических сооружениях работает в режиме двухосного статического растяжения [94 – 99]. Моделируя реальные условия эксплуатации полимерные пленки испытываются в условиях раздува. Испытание пленок проводится на специальной установке под определенным избыточным давлением (см. рис. 4.32). Для испытания на продавливание

5.7. Прогнозирование долговечности полимерных пленок в пневматических конструкциях

воздухом используются образцы в виде круга (см. рис. 4.33). Площадь продавливаемой части 50 см²; толщина пленки от 30 до 200 мкм. Образец помещается на кольцо пневматической камеры и герметично зажимается прижимным кольцом. Необходимый для разрушения воздух подается от компрессора или баллона. Избыточное давление под образцом измеряется

манометром, стрела прогиба – индикатором.

Испытания на продавливание проводятся с постоянно возрастающим или заданным постоянным давлением. При длительных испытаниях фиксируется время от момента достижения заданного давления до разрушения образца. Разрушение образца происходит мгновенно при потере несущей способности. По результатам длительных испытаний строится график зависимости логарифма времени разрушения от давления (см. рис. 4.34) при средней температуре эксплуатации. В разделе 4 описана методика определения долговечности пленки пневматических конструкций. Для учета влияния температуры используется методика описанная в разделе 5.4. А именно, определяются прочностные константы (или эмпирические коэффициенты) для испытываемой пленки при любом (удобном для испытания) виде напряженного состояния. Поскольку вид нагрузки влияет только на структурно-механическую константу (коэффициент), то его изменение легко измерить по соотношению β , см. рис. 4.33. Дальнейший расчет долговечности (а также прочности и термостойкости) проводится по уравнениям 2.1 (2.2 или 2.3) или по другим физико-эмпирическим уравнениям.

При постоянно возрастающем давлении процесс деформирования образца пленки можно разделить на две стадии. На первой наблюдается общее деформирование образца (зависимость между давлением и стрелой прогиба является линейной); на второй стадии развиваются пластические деформации (преимущественно в верхней части сферы, где происходит резкое изменение толщины пленки см. рис. 4.34).

Эта зависимость также имеет термофлуктуационную природу, а время до начала образования пластических деформаций должно описываться уравнением (2.1) или его модификациями (2.2), (2.3). Используя описанную выше методику можно прогнозировать и величину критического прогиба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительные материалы и конструкции из пластмасс в процессе производства и эксплуатации приобретают различные виды дефектов. При этом, в отличие от других строительных материалов, некоторые из них проявляются в полном изменении химической или физической структуры пластмассы в результате термо- или фотодеструкции. Их можно выявить только сложными физическими методами на молекулярном уровне.

При испытании пластмассовых конструкций необходимо широко использовать физическое моделирование. Причем переход от испытаний модели (или образца) к прогнозу несущей способности конструкции связан с изменением масштабного фактора (или структурно-механической константы).

Для выявления физических констант, определяющих несущую способность пластмассы (или конструкции из нее) в различных напряженных состояниях используют специальные механические или электромеханические многопозиционные (реже однопозиционные) стенды. Они просты в изготовлении и обслуживании, не требуют высоких затрат и могут использоваться в испытательных лабораториях строительных предприятий.

Некоторые ценные свойства пластмасс (стойкость к гниению или коррозии, водонепроницаемость, демпфирующая способность и др.) используются в подземном, гидротехническом и дорожном строительстве. При этом срок эксплуатации, надежность и несущая способность благодаря пластмассам существенно повышаются.

Предложена методика прогнозирования работоспособности деталей и некоторых конструкций из органических материалов работающих при сложных видах нагружения в широком интервале температур по величинам физических и эмпирических констант, полученных при испытаниях образцов в простом напряженном состоянии при заданной постоянной температуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Каргин В. А., Слонимский Г. Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. М.: Химия, 1967. 232 с.
- 2 Лихтман В. И., Шукин Е. Д., Ребиндер П. А. Физико-химическая механика металлов. М.: АН СССР, 1962. 564 с.
- 3 Козлов П. М. Применение полимерных материалов в конструкциях работающих под нагрузкой. М.: Химия, 1966. 362 с.
- 4 Уорд И. Механические свойства твердых полимеров: Пер. с англ. М.: Химия, 1975. 349 с.
- 5 Шуцкий С. В., Пуркин В. С. Винипласт. М.: Госхимиздат, 1958. 174 с.
- 6 Krautz F. G. *Advances in Chemistry*. v.99, 1971. p. 452.
- 7 Gruver R. M. U. S. Dept. Commerce Rept. AD, 1956. p.103536.
- 8 Stevens D. U. S. Dept. Commerce Rept. AD, 1962. p. 274332.
- 9 Dingman E. G. SPEI. v.17, 1961. p. 981.
- 10 Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчета на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 525 с.
- 11 Энциклопедия полимеров. Том 1. М.: Советская энциклопедия, 1972. С. 879.
- 12 Айнбиндер С. Б., Тюнина Э. Л., Цируле К. И. Свойства полимеров в различных напряженных состояниях. М.: Химия, 1981. 231 с.
- 13 Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М.: АН СССР, 1962. 210 с.
- 14 Журков С. Н., Томашевский Э. Е. Температурно-временная зависимость твердых тел // Журнал технической физики. 1955. Т. 25. С. 66.
- 15 Журков С. Н., Санфинова Т. П. Влияние термостабилизации на скорость разрушения карбоценных и гетероценных полимеров // Доклады АН СССР. 1955. Т. 101. С. 237.
- 16 Датчики для измерения температуры в промышленности. Киев: Наукова думка, 1972. 348 с.
- 17 Ярцев В. П., Курьянов В. В. Стенд для испытания полимерных пленок на длительную прочность при низких температурах // Заводская лаборатория. 1980. № 5. С. 467.
- 18 Ратнер С. Б., Ярцев В. П. Пути перехода от испытаний образца к прогнозу работоспособности деталей из пластмасс. М.: НИИТЭХИМ, 1982. 40 с.
- 19 Ярцев В. П. Влияние основных компонентов термопластов на их сопротивление механическому разрушению: Дис.... канд. хим. наук. М., 1977.
- 20 Ярцев В. П. Оценка долговечности пластических масс при кручении // Пластические массы. 1986. № 11. С. 49.
- 21 Ярцев В. П. Оценка долговечности пластических масс при одновременном растяжении и срезе // Пластические массы. 1988. № 5. С. 28.
- 22 Barker L. M. *Laser interferometry in shock-wave research.*- *Experim. Mechanics*, 1972. vol.12, № 5, p. 209.
- 23 Песчанская Н. Н., Пугачев Г. С., Якушев П. Н. Применение интерферометра для прецизионного определения и скорости ползучести // Механика полимеров. 1977. № 2. С. 357.
- 24 Брохин Ю. И., Ратнер С. Б. Производство и переработка пластмасс. М.: НИИТЭХИМ, 1977. № 2. С. 195.
- 25 Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.

- 26 Железнов В. И., Фальковский М. Г., Мальчевский В. А. Электромагнитный прибор для исследования физико-механических свойств твердых тел при одноосном растяжении // Заводская лаборатория. 1974. № 6. С. 745.
- 27 Ярцев В. П. Установка для исследования упругодеформационных свойств полимеров // Вестник машиностроения. 1986. № 6. С. 30.
- 28 Ратнер С. Б., Ярцев В. П. Прочность, долговечность и надежность конструкционных пластмасс. М.: НИИТЭХИМ, 1983. 76 с.
- 29 Ярцев В. П. Геометрия образца для испытания пластических масс на долговечность при одноосном растяжении // Пластические массы. 1983. №7. С. 57 – 58.
- 30 Лазуркин Ю. С., Фогельсон Р. Л. Влияние скорости нагружения на время релаксации саженаполненных резин // Журнал технической физики. 1951. № 2. С. 267.
- 31 Александров А. П., Журков С. Н. Явление хрупкого разрыва. М.: ГТТИ, 1933. 120 с.
- 32 Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. - М.: Химия, 1984. 279 с.
- 33 Ратнер С. Б., Ярцев В. П. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? М.: Химия, 1992. 320 с.
- 34 Валишин А. А., Карташов Э. М. // Высокомолекулярные соединения. 1989. № 7. С. 877.
- 35 Збинден Р. Инфракрасная спектроскопия высокополимеров / Пер. с англ. М.: Мир, 1966. 564 с.
- 36 Журков С. Н. и др. // Физика твердого тела. 1969. Т. II. С. 290.
- 37 Журков С. Н. и др. // Доклады АН СССР. 1967. Т. 176. С. 623.
- 38 Инграм Д. Электронный парамагнитный резонанс в свободных радикалах М.: Иностранная литература, 1961. 386 с.
- 39 Журков С. Н., Савостин А. Я., Томашевский Э. Е. // Доклады АН СССР. 1964. Т. 159. С. 303.
- 40 Томашевский Э. Е. Исследование закономерностей разрушения полимерных материалов с активными добавками при воздействии нагрузки и температуры: Автореферат дис. ... канд. Л.: ФТИ, 1966. 22 с.
- 41 Эндрю Э. Ядерный магнитный резонанс. М.: Иностранная литература, 1957. 284 с.
- 42 Слоним И. Я., Любимов А. Н. Ядерный магнитный резонанс в полимерах. М.: Химия, 1966. 356 с.
- 43 Егоров Е. А., Жиженков В. В. О связи механических свойств полимеров с кинетической гибкостью макромолекул // Механика полимеров. 1971. № 1. С. 24.
- 44 Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М.: Гостехиздат, 1951. 196 с.
- 45 Карапетян О. О., Гнубкин В. П., Дронов Ю. В. Контроль качества конструкций с наполнителем из пенопласта. Л.: Стройиздат, 1985. 200 с.
- 46 Горбунов А. И. Неразрушающие методы контроля клеевых соединений строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1975. 224 с.
- 47 Расчет конструкций с применением пластмасс / Под ред. В. Ф. Рас-са, С. Б. Ермолова. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1974. 178 с.
- 48 Тимашев С. А. Устойчивость подкрепленных оболочек. М.: Стройиздат, 1974. 256 с.
- 49 Методы физико-механических испытаний пенопластов. Труды НИИТЭХИМ. М.: 1976. С. 87.
- 50 Александров А. Я. и др. Конструкции с наполнителем из пено-пластов. М.: Машиностроение, 1972. 214 с.
- 51 Кардашов Д. А. Синтетические клеи. М.: Химия, 1976. 312 с.
- 52 Ярцев В. П., Инякин А. А. Установка для испытания пенопластов на длительную прочность // Заводская лаборатория. 1989. Т. 55. № 10. С. 71.

- 53 Гринь И. М. и др. Строительные конструкции с применением пластмасс. Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1968. 340 с.
- 54 Ярцев В. П. Влияние степени обжатия на прочность Влияние степени обжатия на прочность полиолефинов при объемной штамповке // Пластические массы. 1986. № 9. С. 36.
- 55 Пневматические строительные конструкции / Под ред. В. В. Ермолова. М.: Стройиздат, 1983. 439 с.
- 56 Krummheuer W. *Jornal of Coated Pabrics*. v. 8. 1972. p. 302.
- 57 Meffert B. Diss., RWTH Aacher, F.R.Germany, 1978.
- 58 Krummheuer W. Symp. "Beschichtete Chemiefaser – gewebe 1979" Institut für Kunststoffverarbeitung RWTH Aachen, p. 51.
- 59 Blumberg H., Krummheuer W. *Kunststoffe* v. 67, 1977. p. 772.
- 60 Blumberg H. Eurofabric 1978, edited by: Enka Ag. Wuppertal, F. R. Germany.
- 61 Горнов В. Н. Испытания волнистых листов с учетом сдвигающих усилий // Строительные материалы. 1965. № 9. С. 18.
- 62 Джоуш К. Д. Сооружения из армированного грунта: Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1989. 280 с.
- 63 Ярцев В. П. Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях: Автореф. дис... д-ра техн. наук. Воронеж, 1998. 42 с.
- 64 Барбакадзе С. В., Муроколи С. Расчет и проектирование строительных конструкций и сооружений в деформируемых средах. М.: Стройиздат, 1989. 472 с.
- 65 Панин В. Ф. Конструкции с сотовым заполнением. М.: Машиностроение, 1982. 152 с.
- 66 Панасенко Г. А. Исследование пленок из пластмасс для облицовки водоемов при воздействии климатических факторов // Гидротехническое строительство. 1967. № 1. С. 23.
- 67 Применение пластмасс в гидротехническом строительстве за рубежом: Сб. науч. тр. М.: Оргэнергострой, 1966. 118 с.
- 68 Гидроизоляция и антикоррозионная защита сооружений: Сб. науч. тр. М.: Энергия, 1967. 87 с.
- 69 Исследования по широкому применению в ирригационном и мелиоративном строительстве материалов из полимеров: Сб. науч. тр. М.: ШИИГМ, 1967. 112 с.
- 70 Стабников Н. В. Битумно-полимерные герметики для уплотнения швов. М.: Энергия, 1968. 184 с.
- 71 Пшеницын П. А. Применение полимерных материалов для защиты и ремонта бетона. М.: Энергия, 1968. 118 с.
- 72 Давыдов С. С., Соломатов В. И., Швидко Я. И. Влияние вида наполнителя на прочность и трещиностойкость составных балок // Бетон и железобетон. 1969. № 5. С. 39.
- 73 Воскресенский В. А., Соколова Ю. А. Оценки физико-механических свойств пластбетона // Бетон и железобетон. 1964. № 2. С. 28.
- 74 Логинов В. С. Пластбетон на основе полиэфирных смол // Бетон и железобетон. 1964. № 5. С. 17.
- 75 Сахаров В. И. Синтетические смолы для изготовления кавитационно-стойких пластбетонов // Гидротехническое строительство. 1967. № 10. С. 36.
- 76 Фролов Н. П. Получение стеклопластиковой арматуры на основе эпоксидных и полиэфирных смол // Бетон и железобетон, 1963. № 5. С. 11.
- 77 Берг О. Я., Нагевич Ю. И. Механические свойства стеклопластиковой арматуры // Бетон и железобетон. 1964. № 12. С. 35.
- 78 Стольников В. В. Методы гидроизоляции пластин за рубежом // Гидротехническое строительство. 1969. № 1. С. 24.
- 79 Бунина Л. О. Исследование взаимосвязи предельных параметров деформирования кристаллических полимеров: Дис. ... кан. техн. наук. М., 1974.

- 80 Ярцев В. П., Федченко В. А. Оценка долговечности пластических масс при сложных видах статического нагружения. // Пластические массы. 1982. № 8. С. 57.
- 81 Конструкции из дерева и пластмасс / Под. ред. Г. Г. Карлсена и Ю. М. Слицкоухова. М.: Стройиздат. 1986. 560 с.
- 82 Математические задачи обработки эксперимента: Сб. трудов МГУ / Под ред. В. Я. Галкина, П. Н. Заикина. М.: МГУ, 1984. 232 с.
- 83 Малинин И. Н. Исследование деформаций и прочности стеклопластика АГ-4с: Отчет о НИР. Институт гидродинамики Сибирского отделения АН СССР. 1963. 128 с.
- 84 Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация. М.: Высшая школа, 1976. 245 с.
- 85 Айнбиндер С. Б., Тюнина Э. Л., Цируле К. И. Свойства полимеров в различных напряженных состояниях. М.; Химия, 1981. 231 с.
- 86 Берлин А. А., Вольфсон С. А., Ошмян В. Г., Ениколоков И. С. Принципы создания композиционных полимерных материалов. М.: Химия, 1990. 237 с.
- 87 Ван-Клеверен Д. Свойства и химическое строение полимеров. М.: Химия, 1976. 414 с.
- 88 Бабаевский П. К., Кулик С. Г. Трещиностойкость отверженных полимерных композиций. М.: Химия, 1991. 336 с.
- 89 Рэддок Д. Разрушение твердых полимеров / Под ред. Б. Розена. М.: Химия, 1971, 500 с.
- 90 Ханин М. В., Зайцев Г. Л. Изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов. М.: Химия, 1990. 253 с.
- 91 Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982. 232 с.
- 92 Ярцев В. П., Воробьева Н. В. Прогнозирование долговечности, прочности и термостойкости паронитовых прокладок. // Машиноведение. 1986. № 1. С. 86 – 89.
- 93 Пневматические строительные конструкции / Под ред. В. В. Ермолова. М.: Стойиздат, 1983. 493 с.
- 94 Krummheuer W. *Jornal of Coated Fabrics* V. 8. 1972. p. 302.
- 95 Meffert B. *Diss., RWTH Aachen, F. R. Germany.* 1978, 156 p.
- 96 Krummheuer W. *Symp. "Beschichtete Chemiefasergewebe. 1979" Institute fur Kunststoffverarbeitung RWTH Aachen.* p. 51.
- 97 Blumberg H., Krummheuer W. *Kunststoffe* V.67, 1977. – p. 772.
- 98 Blumberg H., Eurofabric. 1978. edited by: Enka Ag. Wuppertal, F. R. Germany.

5.8 РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

T, К	$\sigma \times 10^{-3}$, МПа	N	\bar{X}	Средне-квадрат. ошибка	Дисперс. SS	Станд. отклон. SR	Довер. интегр. DX	Коэф. $\phi\phi$. А	Коэф. ϕ . В	Откл.	Коэф. корреляции	Уравнение $y=A+Bx$
Т-295	18,5	6	4,756	0,18009	0,0324	0,0379	0,1889	36,31517	-1,70544	0,059586	0,86622	$y=36,315-1,705x$
	20,00	12	2,2029	0,6962	0,48469	0,3160	0,4421					
	20,25	13	1,8544	0,40508	0,16409	0,2184	0,2461					
	20,5	11	1,2910	0,49155	0,24162	0,3808	0,3305					
Т-315	16,0	7	5,2005	0,20821	0,04335	0,0400	0,3311	51,024	-2,858	0,116702	0,891232	$y=51,024-2,858x$
	16,5	7	4,0913	0,31339	0,0982	0,0766	0,778					
	17,0	11	2,2432	0,50666	0,2566	0,2258	0,3406					
	17,5	10	1,3422	0,44643	0,1993	0,3326	0,319					
Т-335	15,0	7	5,6645	0,11268	0,0127	0,0199	0,1792	68,719	-4,20092	0,017166	0,83429	$y=68,712-4,201x$
	15,5	8	4,0204	0,40255	0,16205	0,1001	0,3373					
	16,0	11	1,5729	0,61957	0,38386	0,3939	0,4166					
	16,1	7	0,9876	0,4326	0,1872	0,4381	0,4006					