

УДК 678.01 : 53+678.55

**ЗАВИСИМОСТЬ НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛИФОРМАЛЬДЕГИДА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ
И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ**

Ф. А. Ахмедов, М. А. Колтунов, П. В. Козлов

Механические характеристики полимерных материалов существенно зависят от температур и скоростей деформирования или нагружения. В данной работе приводятся результаты исследований зависимости прочностных свойств полиформальдегида от скорости деформации и температуры.

Плоские образцы из полиформальдегида изготавливали на литьевой машине при давлении 1200 кг/см² и температуре 190—195°. Время выдержки под давлением 5 сек, время охлаждения 5 сек. Площадь поперечного сечения образца 0,3 см, длина рабочей базы 4 см. Степень кристалличности 75%. Кривые растяжения получены на испытательной машине РМИ-250 при скоростях перемещений: $u_1 = 10$, $u_2 = 50$, $u_3 = 100$, $u_4 = 250$, $u_5 = 500$ мм/мин, что соответствует скоростям деформаций $\varepsilon_1 = 25$, $\varepsilon_2 = 125$, $\varepsilon_3 = 250$, $\varepsilon_4 = 625$, $\varepsilon_5 = 1250$ 1/мин. Деформацию образцов измеряли двумя телескопическими микроскопами, снабженными моноокулярами с микрометрическим механизмом (с ценой деления 0,0167 мм) и посадочными сменными объективами с фокусным расстоянием 250 мм. Измерение перемещений производили одновременно двумя микроскопами, а деформацию образца рассчитывали по разнице показаний микроскопов, причем погрешность измерений составляла 0,04%.

Диаграммы растяжения полиформальдегида в условиях квазистационарных режимов показаны на рис. 1. Каждая кривая ($\sigma - \varepsilon$, ε) получена в результате усреднения семи—восьми экспериментальных кривых, причем усреднение проводили по напряжениям по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sigma_k^2 / n}$$

Здесь n — число исследованных образцов. Заметим, что разброс экспериментальных данных не превышал 2%.

Из рис. 1 видно, что с увеличением скорости деформации кривые растяжения располагаются выше; предел текучести, предел пропорциональности и разрывное напряжение возрастают; деформация разрушения, наоборот, уменьшается с увеличением скорости деформации, что свидетельствует о наличии релаксационных процессов у деформируемого полиформальдегида.

В табл. 1 даны значения механических характеристик полиформальдегида в зависимости от скорости деформации.

В силу того, что экспериментальные кривые растяжения для разных скоростей деформаций отличаются друг от друга таким образом, что кривые подобны, можно считать, что в области умеренных нагрузок полиформальдегид обладает линейными [1] свойствами; следовательно, к нему

можно [4] применить связь между напряжениями и деформациями в форме уравнения Больцмана — Вольтерра

$$\sigma(t) = E(\varepsilon_k) \varepsilon(t) - E(\varepsilon_k) \int_{-\infty}^{t=\varepsilon/\varepsilon_k} R(t-s) \varepsilon(s) ds. \quad (1)$$

Здесь пределы интегрирования зависят от скорости деформации. $E(\varepsilon_k)$ — модули упругости, определенные из кривых растяжения при постоянной скорости деформации, ε_k — параметр уравнения, а $R(t-s)$ — ядро релаксации, определенное из экспериментальных кривых релаксации. Как видно из опытных кривых (рис. 1), во второй стадии растяжения при почти неизменном напряжении осуществляется быстрый рост деформаций с образованием «шейки» вплоть до разрушения образца.

Решением уравнения (1) будет

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \frac{\sigma(t)}{E(\varepsilon_k)} + \\ &+ \frac{1}{E(\varepsilon_k)} \int_0^{t=\varepsilon/\varepsilon_k} K(t-s) \sigma(s) ds, \end{aligned} \quad (2)$$

где $K(t-s)$ — резольвента уравнения (1) или ядро ползучести, которое по известному ядру $R(t)$ можно [2] определить из уравнения

$$\begin{aligned} K(t) &= R(t) + \\ &+ \int_0^t K(t-s) R(s) ds \end{aligned} \quad (3)$$

или из опытных кривых ползучести материала путем [3] численного или графического их дифференцирования. Заметим, что в линейности свойств материала можно убедиться, если кривые ползучести при разных уровнях напряжений будут подобны, так что для всех кривых ползучести ядро

Таблица 1

Экспериментальные значения некоторых механических характеристик полиформальдегида при разных значениях скорости деформации

$\dot{\varepsilon}$, 1/мин	$E \times 10^4$, kG/cm^2	σ_n , kG/cm^2	σ_p , kG/cm^2	ε_s , %	ε_n , %
25	2,51	364	603 ± 4	8,0	1,5
125	4,68	381	612 ± 4	7,0	0,9
250	6,31	395	621 ± 3	6,1	0,75
625	9,12	423	626 ± 3	4,3	0,4
1250	12,02	436	631 ± 3	3,0	0,2

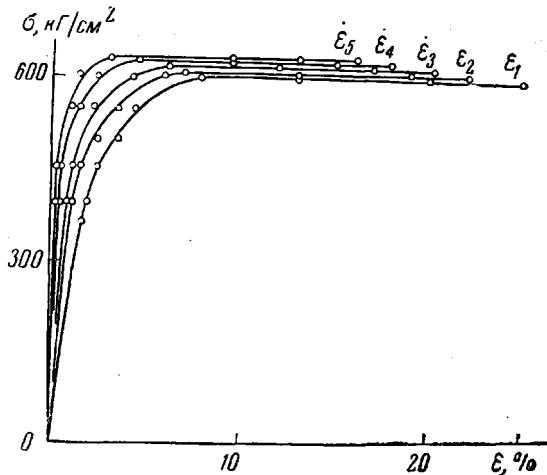


Рис. 1. Диаграммы растяжения при нормальной температуре и при разных скоростях деформаций

$K(t)$ будет одним и тем же. Это может иметь место до определенного уровня напряжений, превышая который ядро станет другим, и материал, следовательно, будет вести себя как нелинейный, к которому применять линейную связь в формуле (1) уже нельзя. Удобно судить о линейности материала и по значению податливости $I = \varepsilon / \sigma_0$, которая должна быть постоянной для всех кривых ползучести, полученных при некоторых режимах нагружения для достижения σ_0 , в одинаковые моменты времени. Анализ значений характеристик полиформальдегида, снятых с кривых растяжения, полученных при разных скоростях деформирования, показывает, что модуль упругости E , предел пропорциональности σ_n , разрушающее напряжение σ_p , а также деформация пропорциональности ε_n и текучести ε_s у полиформальдегида зависят от скорости деформирования и могут быть аппроксимированы

жения σ_0 , в одинаковые моменты времени. Анализ значений характеристик полиформальдегида, снятых с кривых растяжения, полученных при разных скоростях деформирования, показывает, что модуль упругости E , предел пропорциональности σ_n , разрушающее напряжение σ_p , а также деформация пропорциональности ε_n и текучести ε_s у полиформальдегида зависят от скорости деформирования и могут быть аппроксимированы

формулой с достаточной для инженерной практики точностью *

$$y = ae^{-bx} + c, \quad (4)$$

где y — механическая характеристика полимера, а a , b , c — параметры аппроксимации. Так, модуль упругости ($y = E$) согласно (4) представляется в виде

$$E = E_\infty - (E_\infty - E_0)e^{-bx}, \quad (5)$$

где E_∞ — модуль упругости при весьма больших скоростях ($\dot{\varepsilon} \rightarrow \infty$) деформирования (его можно называть динамическим модулем), а E_0 — модуль при весьма малых ($\dot{\varepsilon} \rightarrow 0$) скоростях деформирования (статический модуль).

Таблица 2

Значение постоянных уравнения (4)
 a , b , c , для разных механических
характеристик полиформальдегида

Параметры	E	σ_n	σ_p	ε_n	ε_s
a	-11,7	-80	-36	1,7	8
b	0,0015	0,0025	0,003	0,0025	0,001
c	13,8	440	635	0	0

(сплошная линия) и ее аппроксимация по формуле (4) (пунктирная линия). Как видно, совпадение линий хорошее. На рис. 3 даны экспериментальные и аппроксимирующие кривые для σ_p , σ_n , ε_s , ε_n в зависимости от скорости деформации.

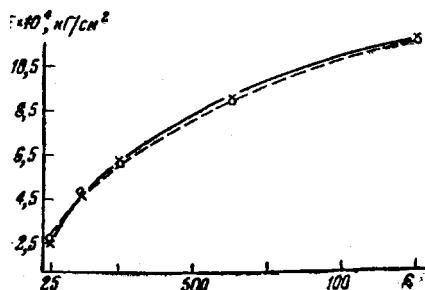


Рис. 2. Зависимость модуля упругости от скорости деформации

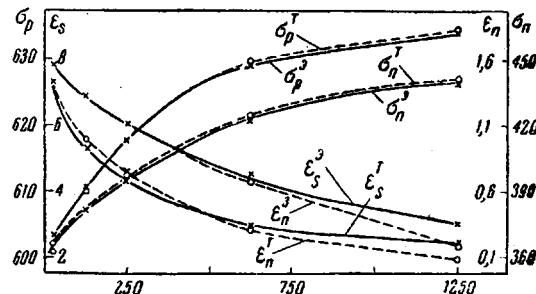


Рис. 3. Зависимость σ_p , σ_n , ε_s , ε_n от скорости деформации

Анализ зависимости (4) для других материалов [4] (например полиэфир ПН-1) показывает, что формула (4) достаточно хорошо отображает поведение механических характеристик полимеров в зависимости от режима нагружения. При этом обнаружено, что чем выше кристалличность полимера, тем слабее эта зависимость. У полиформальдегида влияние скорости на характеристики заметно слабее, чем у полизэфира ПН-1.

Анализ экспериментальных кривых и аппроксимирующих их с достаточной точностью формул позволяет сделать предварительное заключение о наличии предельных значений механических характеристик полимеров.

Рассмотрим теперь влияние температур на механические свойства полиформальдегида. Для исследования зависимостей разрывного напряжения и модуля упругости от температуры к обычной испытательной машине приспособлена нагревательная камера КН-150. Испытуемые образцы помещали в камеру для прогрева до опыта. Прогрев образцов осуществлялся в течении 20 мин. с постоянной скоростью нагрева, что обеспечи-

* Легко убедиться из анализа экспериментальных кривых, что формула (4) аппроксимации удовлетворяет требованию $\Delta \ln \Delta y = \text{const}$, т. е. условие применимости (4) соблюдено.

вало равномерное распределение температуры по всему образцу. Перепад температур по длине образца не превышал $0,3^\circ$. Постоянство заданной температуры поддерживали при помощи контактного термометра, точность измерений которого составляла $0,2^\circ$.

При некотором определенном режиме деформации ($\epsilon = 25 \text{ мин}^{-1}$) проведены испытания на растяжение при температурах от 20 до 150° . По данным этих опытов исследовали зависимости разрывного напряжения и модуля упругости от температуры. Исследование показывает, что до 60 — 65° зависимость разрывного напряжения от температуры весьма мала, а с последующим повышением температуры усиливается. Это хорошо иллюстрируется на рис. 4, из которого видно, что при 100° разрывное

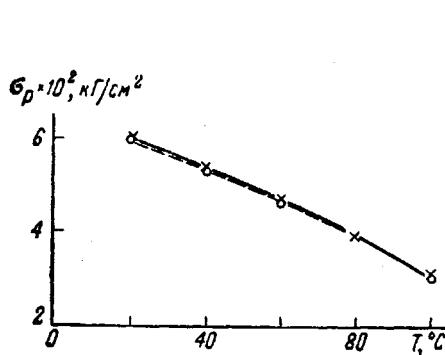


Рис. 4. Зависимость разрывного напряжения от температуры

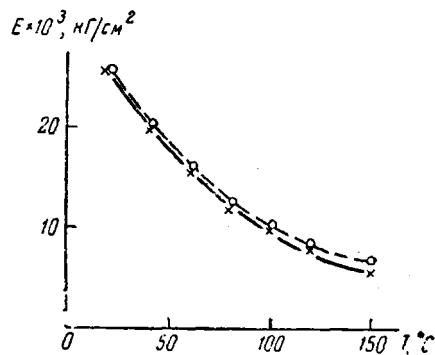


Рис. 5. Зависимость модуля упругости от температуры

напряжение почти в два раза уменьшается и становится равным 310 кг/см^2 . На рис. 4 сплошной линией представлена экспериментальная зависимость. Эта кривая получена усреднением шести экспериментальных кривых, причем отклонение от усредненной кривой не превышало 5% . Зависимость разрывного напряжения от температуры в исследованной области температур хорошо аппроксимируется параболической функцией вида

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = a + b \frac{T}{T_0} + c \frac{T^2}{T_0^2}, \quad (6)$$

где σ_0 и T_0 — масштабы измерения напряжения и температуры соответственно. В нашем случае $\sigma_0 = 100 \text{ кг/см}^2$; $T_0 = 10^\circ$; a , b , c — константы, которые для полиформальдегида имеют следующие значения: $a = 6,65$; $b = -0,32$; $c = -0,0025$.

На рис. 4 пунктирной линией изображена кривая, полученная по формуле (6).

На рис. 5 показана зависимость модуля упругости от температуры. Сплошная линия соответствует экспериментальным данным (усреднялись шесть экспериментальных кривых), а пунктирная линия изображает параболическую функцию вида

$$\frac{E}{E_0} = a + \beta \frac{T}{T_0} + \gamma \frac{T^2}{T_0^2},$$

где E_0 и T_0 — масштабы измерения модуля упругости и температуры ($E_0 = 10^4 \text{ кг/см}$; $T_0 = 10^\circ$); a , β , γ — некоторые константы. В припятых значениях E_0 и T_0 для полиформальдегида a , β , γ имеют следующие значения: $a = 31$; $\beta = -3,1$; $\gamma = 0,1$.

Параболическая аппроксимация зависимостей разрывного напряжения и модуля упругости от температуры применима [3] и для других полимеров.

Выводы

1. Весь набор механических свойств полиформальдегида зависит от скорости деформации, а эта зависимость имеет экспоненциальный характер.

2. Каждый механический параметр имеет экстремальные значения в зависимости от скорости деформации.

3. Зависимости разрывного напряжения и модуля упругости полиформальдегида от температуры в пределах $0 < T < T_{пл}$ могут быть представлены параболической функцией.

Московский государственный
университет

Поступила в редакцию
17 VI 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Ильин, Пластичность, Изд. АН СССР, 1963, стр. 76—144.
2. Э. Гурса, Курс математического анализа, т. 3, Изд. технико-теоретич. литературы, 1934, стр. 12—14.
3. М. А. Колтунов, В. Н. Безухов, Вестн. Моск. ун-та. Серия механико-математическая, 1962, № 6, 51.
4. М. А. Колтунов, Влияние режимов нагружения на механические свойства стеклопластиков. Докл. на 2-й Всес. конф. по применению пластмасс в машиностроении, Рига, 1964.

DEPENDENCE OF SOME MECHANICAL PARAMETERS OF POLYMERS ON THE TEMPERATURE AND THE DEFORMATION RATE

F. A. Akhmedov, M. A. Koltunov, P. V. Kozlov

Summary

The dependence of the tensile strength, proportionality limit and other mechanical properties on the deformation rate and the temperature has been experimentally investigated. The entire set of mechanical properties of polyformaldehyde depends on the deformation rate, the dependence being of an exponential character. The tensile strength, proportionality limit and elasticity modulus increase with increase in deformation rate. The tensile strength and elasticity modulus are parabolic functions of the temperature.
