

6. Н. В. Козлова, Ф. Ф. Сухов, В. П. Базов, Заводск. лаб., 31, 968, 1965.
7. К. П. Яковлев, Математическая обработка результатов измерений, ГИТЛ, 1950.
8. Н. Дрейпер, Г. Смит, Прикладной регрессионный анализ, «Статистика», 1973.
9. К. Наканиси, Инфракрасные спектры и строение органических соединений, «Мир», 1965
10. В. В. Федоров, Теория оптимального эксперимента, «Наука», 1971.

УДК 541.64:539.3

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИМЕРОВ

*А. И. Брагинский, Ю. В. Зеленев*

Рассмотрены теоретические основы расчета характеристик ползучести полимеров с помощью интегродифференциального уравнения Вольтерра второго рода. Описано устройство установки и методика проведения на ней измерений деформации образцов во времени. Приведены полученные кривые ползучести при разных напряжениях для различных полимерных композиций.

Получившая широкое распространение теория наследственности Больцмана – Вольтерра и некоторые позднейшие исследования [1] позволили определить динамические характеристики полимерных материалов по кривой нагружения – зависимости относительной деформации  $\varepsilon$  от времени  $t$  при постоянной нагрузке  $P$  с момента нагружения. Поведение вязкоупругого материала в данном случае описывается интегродифференциальным уравнением Вольтерра второго рода, где в качестве ядра уравнения принимается детально табулированная функция  $R(t) = Al^{-\beta t} t^{\alpha-1}$  ( $l$  – длина образца). Параметры функции памяти  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  и упругая постоянная  $E$  определяются по методике, рассмотренной в [1], из квазистатического эксперимента на описанной ниже установке. Решение подобной задачи для прогиба  $W$  балки длиной  $l$ дается рядом

$$W(x, t) = \frac{f_0 g_0 l^3}{6EI} \left( \frac{3x^2}{l^2} - \frac{x^3}{l^3} \right) \sin(pt + \gamma_0) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \varphi_j(x) \sin(pt + \gamma_j),$$

где собственная частота  $f_0$  выражается соотношением

$$f_0 = \sqrt{\frac{1}{[\Gamma_c(p) - 1]^2 + \Gamma_s^2(p)}}; \quad \gamma_0 = \arctg \frac{\Gamma_s(p)}{\Gamma_c(p) - 1};$$

$$a_j = \frac{b_j}{\sqrt{\{\lambda_j^2 [1 - \Gamma_c(p)] - p^2\}^2 + \lambda_j^4 \Gamma_s^2(p)}}; \quad \gamma_j = \gamma_0 - \arctg \frac{\lambda_j^2 \Gamma_s(p)}{\lambda_j^2 [1 - \Gamma_c(p)] - p^2}.$$

Здесь  $p$  – частота вынужденных колебаний,  $a$  – амплитуда колебаний,  $\lambda_i$  – собственные числа краевой задачи и  $\gamma$  – коэффициент динамичности,  $g_0$  – амплитудное значение нагрузки  $Q = g_0 \sin \omega t$  ( $\omega$  – круговая частота), приложенной нормально к нейтральной линии и к главной оси инерции сечения стержня,  $I$  – момент инерции сечения,  $\Gamma_s$  и  $\Gamma_c$  – соответственно синус и косинус Фурье – образы, относящиеся к слабосингулярным ядрам,  $x$  – координата точек нейтральной линии,  $\varphi_j(x)$  – собственные функции упругой задачи, являющиеся линейными функциями тригонометрических и гиперболических синусов и косинусов.

Предлагаемая установка (рис. 1) позволяет определять относительное удлинение в зависимости от времени при постоянной нагрузке.

Измерения относительного удлинения полимерного образца на данной установке проводятся при помощи тензосопротивления 8, приклеиваемого к образцу. Термо-компенсационное тензосопротивление приклеивается на контрольный образец, помещаемый в непосредственной близости от испытуемого образца. Полимерный образец 3 зажат в специальном приспособлении 2. Другой конец при помощи эксцентриковой системы 7 нагружается массой 4. За несколько секунд до нагружения включается измерительный канал установки, состоящий из измерительного тензосопротивления 2, термо-компенсационного тензосопротивления, тензоусилителя «Топаз-2» 9 и светолучевого магнитоэлектрического осциллографа Н-117 10.

Работа измерительного канала заключается в следующем. При нагружении образца в нем возникают напряжения  $\sigma$ , которые воспринимаются измерительным тензодатчиком. В другое плечо измерительного моста включается термо-компенсационный датчик. Сигнал, снятый с измерительного моста и пропорциональный деформа-

ции измерительного тензосопротивления и полимерного образца, поступает на тензоусилитель 9, а после усиления на шлейфовый светолучевой осциллограф 10, в котором он фиксируется на светочувствительную бумажную ленту. Осциллограф Н-117 дает возможность записывать полученный сигнал в широком диапазоне скоростей (0–15 м/сек), что позволяет зафиксировать значение ползучести образцов как в начальный момент времени, так и через весьма продолжительное время после нагружения [2]. Покоящееся на раме 1 установки приспособление, предназначенное для нагружения полимерного образца, состоит из фланца 5 (опирающегося на два эксцентрика), на который устанавливаются нужные гири дискообразной формы. При

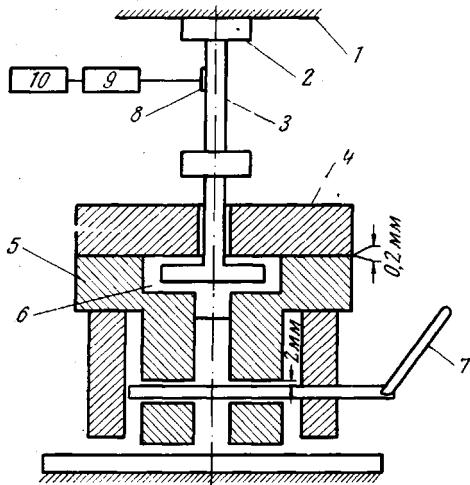


Рис. 1

Рис. 1. Схематическое изображение установки для изучения ползучести твердых полимеров

Рис. 2. Кривые ползучести для композиционного полимерного материала на основе эпоксидной смолы при  $\sigma=5$  (1); 3 (2) и  $1 \text{ кГ/см}^2$  (3)

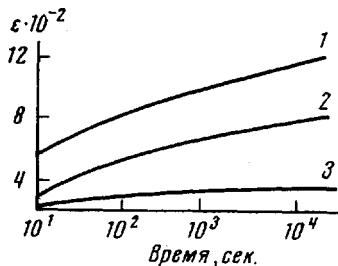


Рис. 2

вращении эксцентриков фланец перемещается попрерменно вверх и вниз. На свободный конец образца закрепляется тарелка с цилиндрическим стержнем 6, позволяющим устанавливать на ней различные по величине и по массе грузы. Тарелка входит во фланец, который установлен в наивысшей точке. Зазор между тарелкой и фланцем устанавливается в пределах 0,2 мм. После этого на фланец помещается необходимый груз. При повороте эксцентрика фланец опускается и груз ложится на тарелку. Вследствие того, что зазор между фланцем и тарелкой, а следовательно, и грузом, составляет 0,2 мм, удара при соприкосновении груза и тарелки не происходит.

Градуировку измерительного канала проводили на тензобалке равного напряжения при нормальных условиях в термовлагобарокамере при  $20^\circ$ , атмосферном давлении и влажности 80%. Измерения кривой ползучести проводили в диапазоне температур  $-90 - +60^\circ$ . Для повышения точности измерения температуры рядом с испытуемым образцом помещали контрольный образец из того же полимерного компаунда, в который равномерно по всей длине вводили четыре хромель-копелевые термопары. Измерение температуры проводили потенциометром Р-308. С целью термостабилизации установку помещали под колпаком из тонколистовой меди.

Из приведенных на рис. 2 кривых ползучести, полученных для компаунда на основе эпоксидной смолы при  $20^\circ$ , следует, что изменение напряжения даже в небольших пределах оказывает влияние на деформационные свойства полимерного материала.

Установка показала устойчивую работу во всем указанном температурном диапазоне.

Московский областной педагогический институт им. Н. К. Крупской

Поступила в редакцию  
10 I 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Колтунов, Механика полимеров, 1967, 5.
2. Ю. В. Зеленев, А. Г. Новиков, Заводск. лаб., 36, 255, 1970.