

УДК 539.3

Каюмов Р.А. – доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: kayumov@mail.ru

Страхов Д.Е. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: strahov@kgasu.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВО ВРЕМЕНИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

АННОТАЦИЯ

Разработана методика экспериментального определения деформативных характеристик полимерного материала с памятью формы. Построены экспериментальные зависимости деформации от времени при разных температурах и нагрузках и соответствующие регрессионные функции. Определены коэффициенты температурно-временной редукции, позволившие прогнозировать поведение рассматриваемого полимерного материала при других температурах. Полученная модель проверена на контрольном образце.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: композитные материалы, муфты, эффект памяти формы, температурно-временная аналогия, температурно-временная редукция, поведение во времени, прогнозирование деформации.

Kayumov R.A. – doctor of physical and mathematical sciences, professor

Strahov D.E. – candidate of technical sciences, associate professor

Kazan State University of Architecture and Engineering

PREDICTION OF DEFORMATION IN THE TIME OF POLYMER MATERIALS AT DIFFERENT TEMPERATURES

ABSTRACT

A method for experimental determination of deformation characteristics of polymer material with shape memory. Experimental plots of deformation versus time for different temperatures and loads and the corresponding regression function are worked out. The coefficients of temperature-time reduction that will predict the behavior of the polymer material under consideration at other temperatures are determined. The resulting model is tested on a control sample.

KEYWORDS: composite materials, couplings, the shape memory effect, the temperature-time analogy, temperature-time reduction, behavior in time, predicting the deformation.

Развитие современной техники тесно связано с производством композитных материалов (КМ) и изделий из них, а также с созданием новых КМ с внедрением их в различные отрасли промышленности.

К новым композитным материалам относятся материалы с эффектом памяти формы, используемые для соединения разнородных труб муфтами из этих материалов. Одной из актуальных задач при этом является задача прогнозирования деформации таких муфт во времени, причем при различных температурах.

При выборе исходных материалов использована конструктивная идея сочетания алифатических и ароматических фрагментов [1] в процессе формирования эпоксидных полимеров, обеспечивающих свойства термоусаживаться [2]. В качестве составляющей, включающей алифатические (эластичные) фрагменты, использован реакционноспособный эпоксиэпоксикаучук – олигоэпоксиуретан (ПЭФ-3АГ), так как введение каучуков в ЭП оказывает существенное влияние на их упруго-деформационные и релаксационные свойства [3-6]. Установлено [1], что стабильный эффект термоусадки обеспечивается при содержании в жесткой матрице 15-25 % ЭК, при значениях молекулярных масс эпоксиполимеров в интервале 1200-1900 кг/кмоль. В качестве отверждающей системы был использован отвердитель аминного отверждения – диэтилентриаминометилфенол (УП-583Д), сочетающий в строении алифатические и ароматические фрагменты. Рассмотренные эпоксиполимеры имели соотношение эпоксиднодиановый олигомер – 80 %, олигоэпоксиуретан – 20 % [7].

Образцы для проведения испытаний имели вид лопаток с поперечным сечением 0,5x0,2 мм и рабочей длиной 30 мм.

Испытания проводились на разрывной машине МРС-500, при одноосном растяжении с различными температурами и напряжениями. Нагрев образцов осуществлялся в муфельной вертикально расположенной термокамере с тремя секциями нагревателя и отверстиями для захвата образцов (тип КК-1М).

С помощью регуляторов напряжения устанавливались токи в секциях термокамеры, так, чтобы обеспечивался наименьший градиент температур по высоте рабочего пространства.

Наблюдение за образцами и измерение их деформации осуществлялось через предусмотренные в корпусе термокамеры застекленные смотровые окна.

Деформации образцов измерялись при помощи двух катетометров (КМ-8), предназначенных для измерения вертикальных отрезков, в одной плоскости в местах, недоступных для непосредственного измерения, с пределом основной допускаемой погрешности $\pm 0,0015$ мм.

При проведении замеров сравнивалась измеряемая длина (расстояние между двумя точками объекта) со шкалой прибора путем последовательного визирования зрительной трубы на граничные точки измеряемого отрезка.

Зависимости деформации от времени при разных температурах и нагрузках, полученные в процессе испытания, представлены на рис. 1.

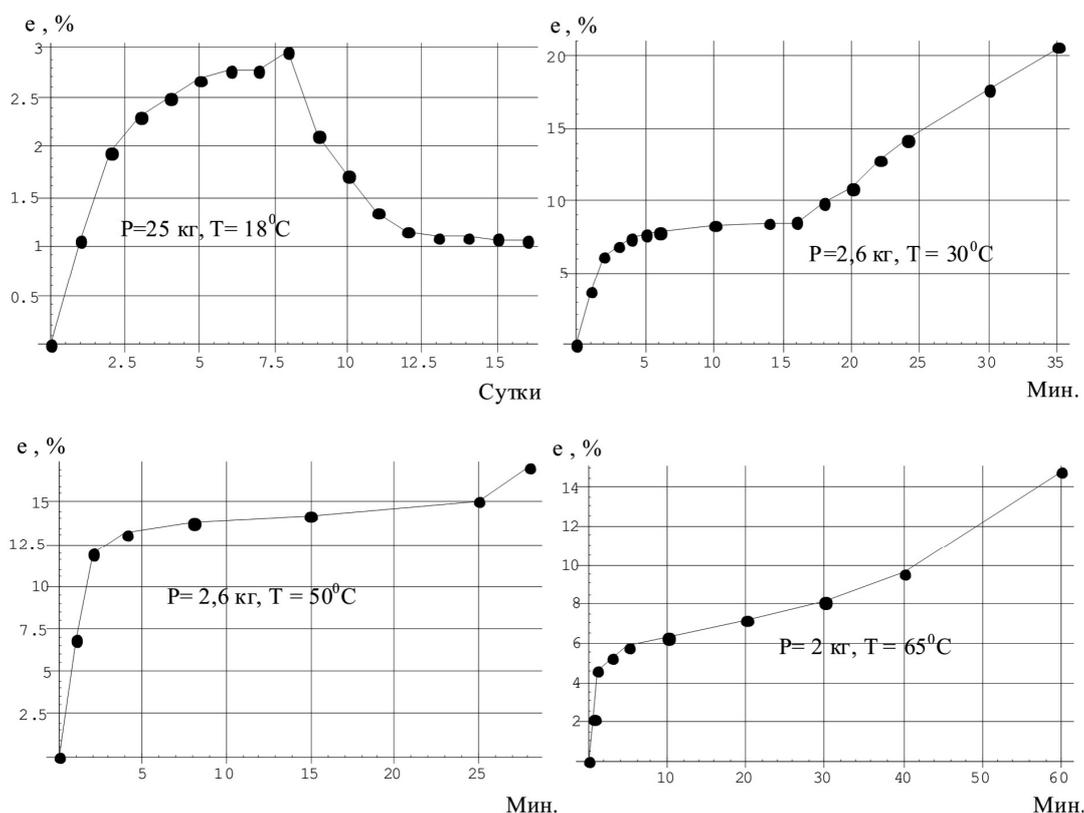


Рис. 1. Деформации образцов во времени при различной нагрузке и температуре

Для разработки модели деформирования использовались только первые два участка диаграммы – участок упрочнения и участок установившейся ползучести.

Для прогнозирования длительной ползучести выбран метод аналогий (суперпозиций), основанный на использовании факторов, ускоряющих релаксационные процессы. Согласно принципу температурно-временной аналогии, температура и время деформирования взаимосвязаны и взаимно эквивалентны [8].

При использовании метода аналогий задача прогнозирования ползучести для заданных значений температуры и напряжений сводится к отысканию коэффициентов редукции, на основе проведенных экспериментов, устанавливающих соответствующие масштабы времени

деформирования. Для описания процесса поведения полимера была принята модель наследственно-упругого материала с ядром ползучести Абеля:

$$e = \frac{s}{E} + \int_0^t \frac{C \cdot s(t)}{(t-t')^\alpha} dt', \tag{1}$$

где $C > 0, 0 < \alpha < 1$.

Здесь было принято, что $C = \text{const}, \alpha = \text{const}$. После обработки полученных экспериментальных данных построены регрессионные функции, описывающие поведение полимерного материала в виде (1). Графики регрессионных функций представлены на рис. 2. Для отыскания C и α был использован метод минимизации квадратичной невязки между экспериментальными и численными значениями деформаций в различные моменты времени.

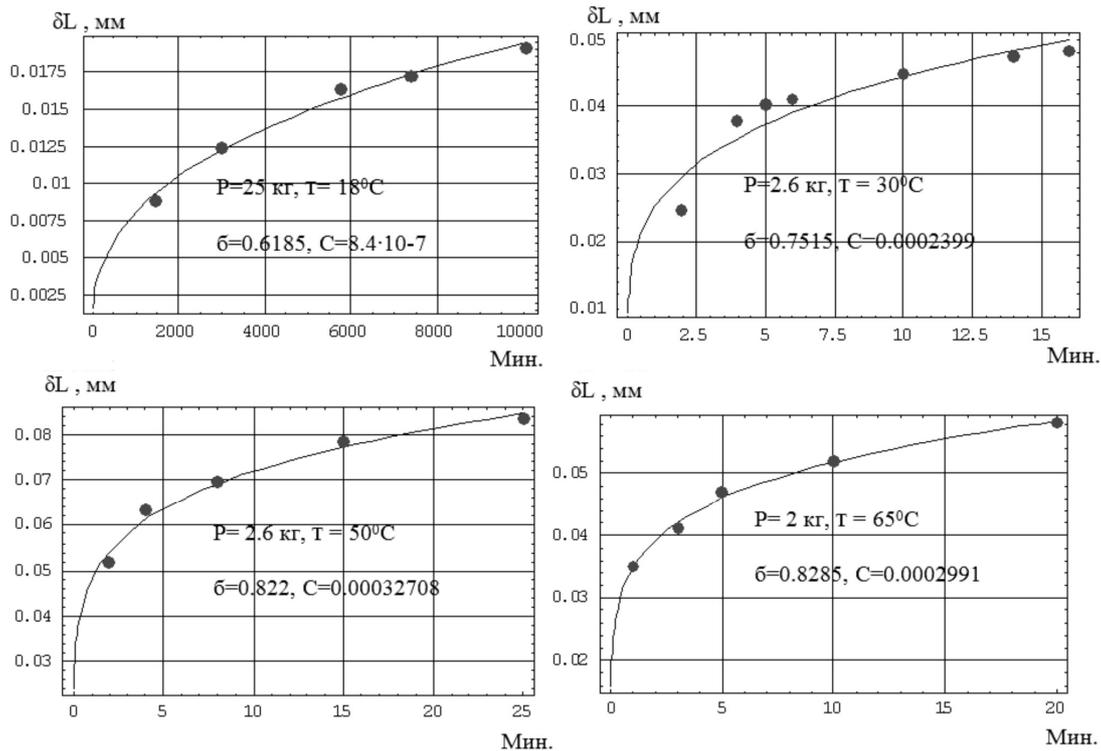


Рис. 2. Графики регрессионных функций при различных нагрузках и температурах

Для прогнозирования деформаций при различных температурах использовалось предположение о том, что материал является «простым». Это означает, что деформацию ползучести можно определить по следующей формуле:

$$e^{cr} = \int_0^{t^*} \frac{C(T_0) \cdot s(t^*)}{(t^* - t')^\alpha} dt', t^* = \frac{t}{a_T}. \tag{2}$$

Здесь a_T – коэффициент температурно-временной аналогии, T_0 – температура приведения, T – текущая температура.

Располагая коэффициентом редукиции, можно решать задачу предсказания поведения материала в условиях, наиболее близких к эксплуатационным, например для больших значений временного интервала или значений более высоких температур.

Для аппроксимации коэффициента температурно-временной редукиции выбрана зависимость в виде [8]:

$$\ln(a_T) = \frac{a_1(T - T_0)}{a_2 + (T - T_0)}, \tag{3}$$

где a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты.

Снова с использованием метода квадратичной невязки по результатам численного анализа трех экспериментов с температурами $T = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ получены оптимальные значения коэффициентов $a_1 = -16.7236$ и $a_2 = 1.35578$. За температуру приведения принято значение $T_0 = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

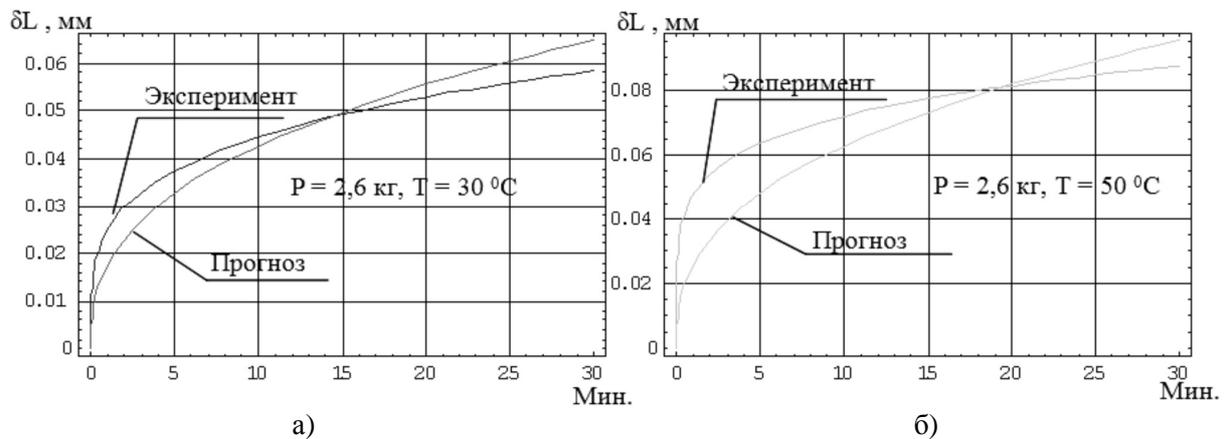


Рис. 3. Прогнозируемые зависимости удлинений, полученные из трех первых регрессионных функций с помощью коэффициента температурно-временной аналогии из условия минимизации невязки между ними

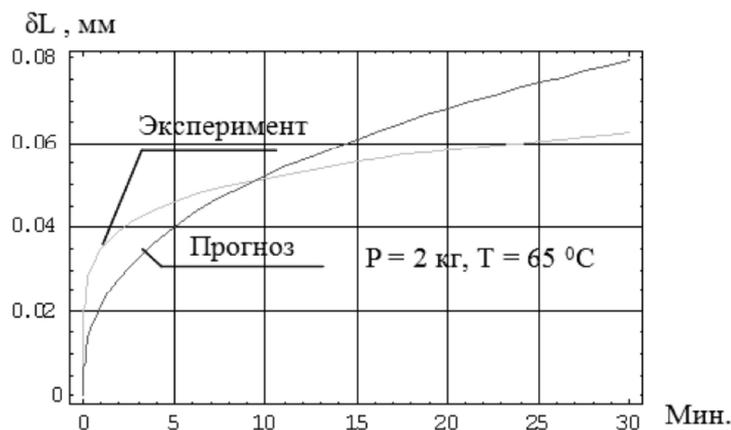


Рис. 4. Результаты сравнения регрессионной функции и прогноза для контрольного эксперимента

На рис. 3 а и 3 б приведены прогнозируемые зависимости удлинений при $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, полученные с помощью соотношения (2). На рис. 4 приведены результаты сравнения регрессионной функции и прогноза для контрольного эксперимента.

Полученные значения прогноза и экспериментов показывают, что порядок квадратичной невязки между экспериментальными и расчетными значениями деформаций одинаков для всех случаев.

Таким образом, по результатам проведенных экспериментов и численного анализа можно считать, что рассматриваемый полимерный материал относится к классу «простых» материалов, что позволяет, зная коэффициент температурно-временной аналогии a_T , прогнозировать его поведение во времени при различных температурах и различном времени эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страхов Д.Е. Разработка эпоксидных композиций, технологий получения термоусаживающихся муфт, муфто-клеевых соединений трубопроводов на их основе // Дисс. на соискан. уч. ст. к.т.н. – Казань, 2004. – 140 с.
2. Білошенко В.О., Строганов В.Ф., Шелудченко В.І. Спосіб одержання виробів термоусадючої/ Патент Укр. № 10299, бюл. № 4, 1996.

3. Кадырмятова Ф.М., Готтлиб Е.М., Соколова Ю.А. и др. Об особенностях модифицирующего эффекта реакционно способных эпоксиуретановых олигомеров. / Высокомолек. соед. том. 23 б, 1981, № 4. – С. 311-313.
4. Готтлиб Е.М., Кисилева Р.С., Соколова Ю.А., Воскресенский В.А. Изучение динамических, механических свойств эпоксиполисульфидных компаундов. // Изв. вузов. Химия и хим. технология, 1975, т. 18, вып. 8. – С. 1270-1273.
5. Строганов В.Ф., Белошенко В.А., Строганов И.В., Страхов Д.Е. Влияние строения эпоксидных олигомеров на способность отвержденных полимеров к усадке. // Тез. докл. Седьмая междунар. конф. по хим. и физикохим. олигомеров. – Москва – Пермь – Черногоровка, 2000. – 235 с.
6. Строганов В.Ф., Страхов Д.Е., Строганов И.В., Сундуков В.И., Хакимов А.М. Физико-механические характеристики и ядерная релаксация в эпоксидных полимерах. / Тез. докл. Структура и динамика молекулярных систем. – Казань – Москва – Йошкар-Ола – Уфа, 2003. – 288 с.
7. Строганов В.Ф., Страхов Д.Е., Строганов И.В., Алексеев К.П. Композиция для изготовления термоусаживающихся изделий. / Патент РФ № 2253659, 2005.
8. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Д. Прогностика деформативности полимерных материалов. – Рига: Знание, 1975. – 416 с.

REFERENCES

1. Strakhov D.E. Development of epoxy compositions, technologies for producing heat-shrinkable sleeves, couplings, of adhesive joints of pipelines at their base / Diss. on soiskan. uch. Art. Ph. D. – Kazan, 2004. – 140 p.
2. Biloshenko V.A., Stroganov V.F., Sheludchenko V.I. / sposib oderzhaniya virobiv termousadoio / Patent Ukr. № 10299, Bul. № 4, 1996.
3. Kadyrmyatova F.M., Gottlieb E.M., Sokolova Y.A. etc. On the singularities of modifying effect of reactivity epoksiuretanovyh oligomers. Vysokomol. conn, 1981, tom. 23 b, № 4. – P. 311-313.
4. Gottlieb E.M., Kisileva R.S., Sokolova Y.A., Voskresenskij V.A. Study of the dynamic, mechanical properties of epoksipolisulfid compounds. Izvestija Vuzov Chemistry and Chemical Engineering. Technology, 1975, t. 18, v. 8. – P. 1270-1273.
5. Stroganov V.F., Beloshenko V.A., Stroganov I.V., Strakhov D.E. Effect of the structure of epoxy oligomers on the ability of cured polymers to shrinkage. Proc. Proceedings. Seventh Int. Conf. in Chemical Engineering and fizikohim oligomers. – Moscow – Perm – Chernogorovka, 2000. – 235 p.
6. Stroganov V.F., Strakhov D.E., Stroganov I.V., Sundukov V.I., Khakimov A.M. Physical and mechanical properties and nuclear relaxation in epoxy polymers. Proc. Proceedings. Structure and dynamics of molecular systems. – Kazan – Moscow – Yoshkar – Ola – Ufa, 2003. – 288 p.
7. Stroganov V.F., Strakhov D.E., Stroganov I.V., Alekseev K.P. Composition for the manufacture of heat-shrinkable products. Patent RF № 2253659, 2005.
8. Urzhumtsev J.S., Maximov R.D. prediction deformability of polymer materials. Riga: «Knowledge», 1975. – 416 p.