

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

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Абдуллин И.Ш. – доктор технических наук, профессор

E-mail: abdullin_I@kstu.ru

Гришанова И.А. – кандидат технических наук, доцент

Федорова М.А. – бакалавр

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Адрес организации: 420015, Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

Прогнозирование деформации во времени высокопрочных полиэтиленовых волокон при различной температуре

Аннотация

Разработана методика экспериментального определения деформативных характеристик высокопрочного полиэтиленового волокна. 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, высокопрочное полиэтиленовое волокно, температурно-временная аналогия, температурно-временная редукция, поведение во времени, прогнозирование деформации.

Потребность в композитных материалах с набором специфических свойств тесно связана с развитием современной техники в различных наукоемких областях новых технологий.

К одним из новых композитных материалов относятся материалы с использованием высокопрочных полиэтиленовых волокон, применение которых возможно в различных отраслях промышленности и военной технике. Одним из важнейших преимуществ этих материалов перед существующими аналогами (стеклопластики, углепластики, органопластики) является более низкая плотность $\sim 0,97$ г/см³ и, как следствие, более высокие удельные показатели основных механических характеристик, что влечет за собой значительное уменьшение веса готовых изделий. Также к преимуществам высокопрочных полиэтиленовых волокон можно отнести минимальный коэффициент трения, резкое увеличение прочности в области отрицательных температур, химическую и биологическую инертность, а также уникальные диэлектрические свойства [1, 2].

Одной из актуальных при этом является задача прогнозирования деформации высокопрочных полиэтиленовых волокон во времени, причем при различных температурах. Необходимость в проводимых исследованиях обусловлена оптимальностью выбора состава полимерной матрицы для создания композитного материала, работающего как «единое целое», т.е. без растрескивания полимерной матрицы в течение времени, в процессе приложения нагрузок, близких к критическим.

Объектом исследований являлось многофиламентное высокопрочное полиэтиленовое волокно. Количество нитей в многофиламентном пучке составляло 900 шт., с диаметром филаменты 17 мкм и общей площадью сечения 0,242 мм².

Образцы для проведения испытаний имели размеры от 180 до 200 мм с рабочей длиной 50 мм (рис. 1 а).

Испытания проводились на разрывной машине MPC-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 $\pm 1,5$ мкм (рис. 1 б).

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

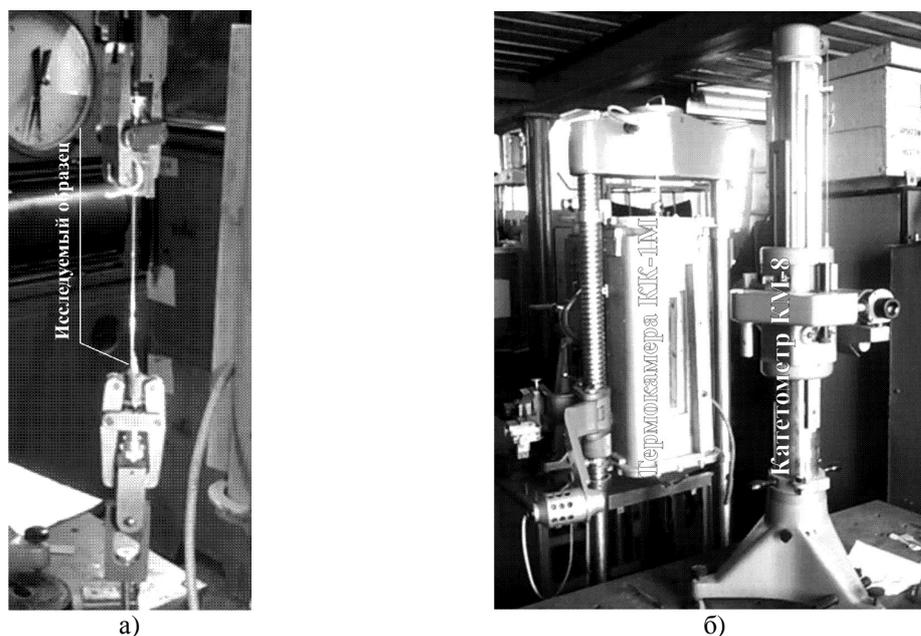


Рис. 1. а) исследуемый образец; б) установка для проведения испытаний

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 [3, 4].

При использовании метода аналогий задача прогнозирования ползучести для заданных значений температуры и напряжений сводится к отысканию коэффициентов редукиции на основе проведенных экспериментов, устанавливающих соответствующие масштабы времени деформирования. Для описания процесса поведения полимера была принята модель наследственно-упругого материала с ядром ползучести Абея:

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

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.

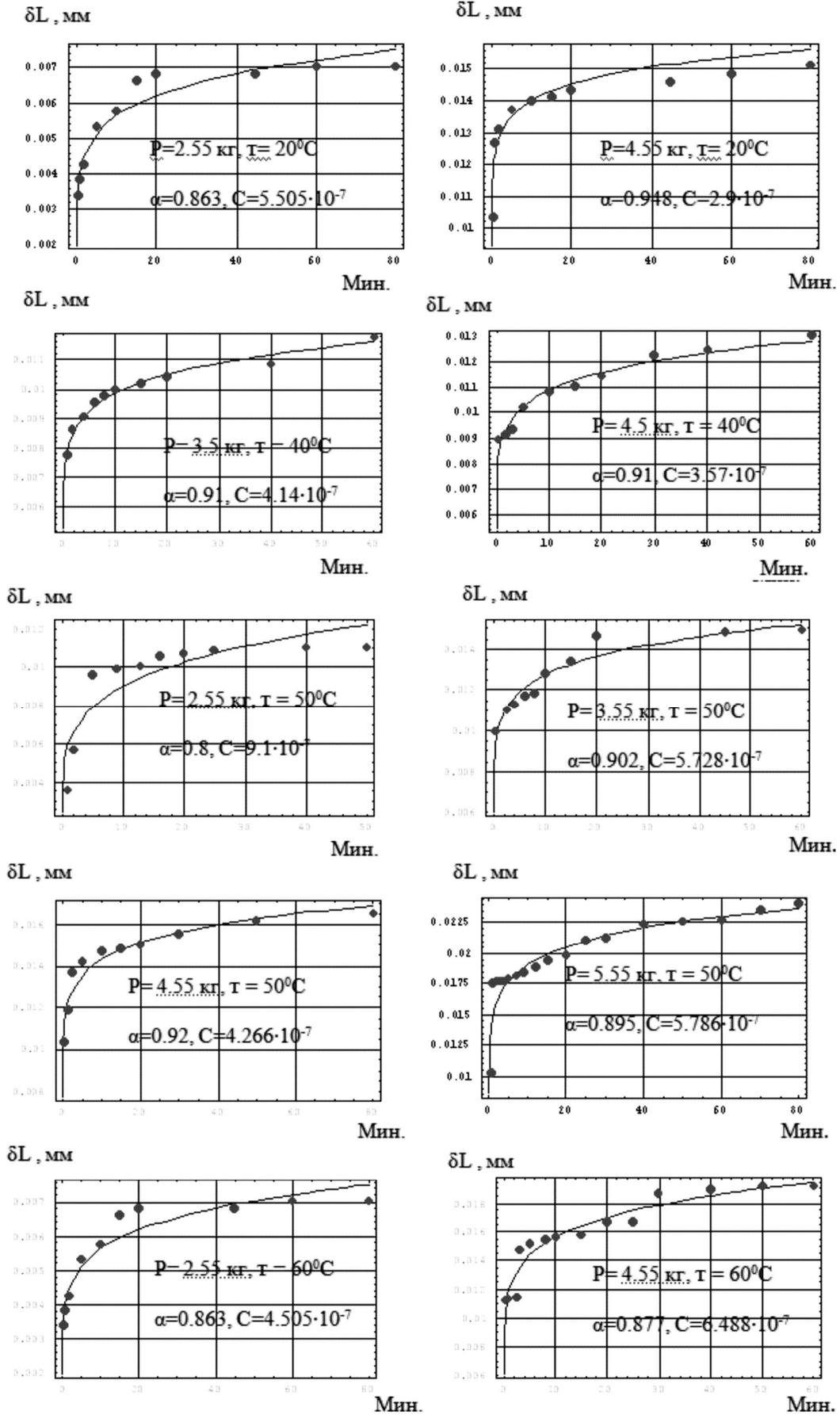


Рис. 2. Графики регрессионных функций при различных нагрузках и температурах

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

$$e^{cr} = \int_0^{t^*} \frac{C(T_0) \cdot s(t^*)}{(t^* - t^*)^a} dt^*, \quad t^* = \frac{t}{a_T} \quad (2)$$

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

Располагая коэффициентом редукции, 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 редукции выбрана зависимость в виде [4]:

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

где a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты.

Снова с использованием метода квадратичной невязки по результатам численного анализа трех экспериментов с температурами $T = 20$ °С, 40 °С, 50 °С и 60 °С получены оптимальные значения коэффициентов $a_1 = -9.98492$ и $a_2 = 250$. За температуру приведения принято значение $T_0 = 20$ °С.

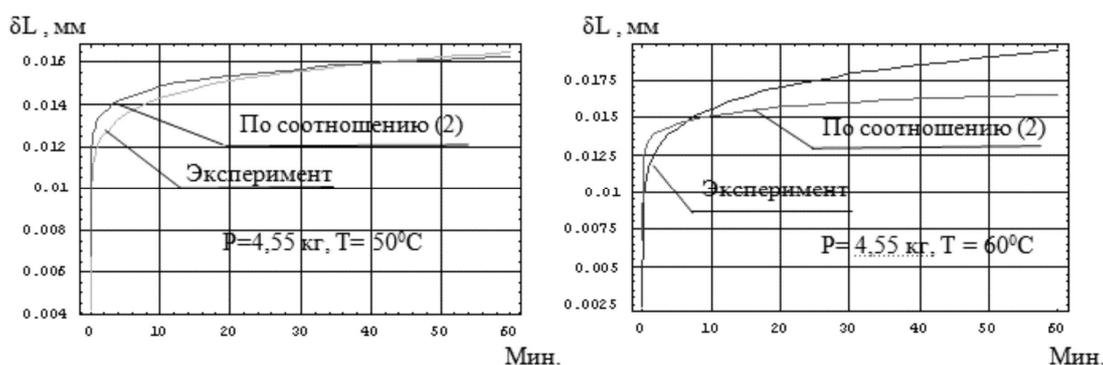


Рис. 3. Зависимости удлинений, полученные с помощью коэффициента температурно-временной аналогии из условия минимизации невязки между ними

На рис. 3 приведены прогнозируемые зависимости удлинений при $T=50$ °С, $T=60$ °С, полученные с помощью соотношения (2). 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», что позволяет, зная коэффициент температурно-временной аналогии a_T , прогнозировать его поведение во времени при различных температурах и длительном времени эксплуатации.

Список литературы

1. Перепёлкин К.Е. Волокна и волокнистые материалы с экстремальными свойствами. Теория и практические достижения // Химические волокна, 1991, № 4. – С. 18-23.
2. Brochure Dyneema. Dyneema the top in high performance fibers. Properties & Applications. Edited by 01-40-01© DSM High Performance Fibers BV – C. Design, Bunde – Printed in The Netherlands – Edition 02/00 (2000).
3. Каюмов Р.А., Страхов Д.Е. Прогнозирование деформации во времени полимерных материалов с памятью формы при различной температуре. // Известия КГАСУ, № 2 (16). 2011. – С. 195-199.
4. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Д. Прогностика деформативности полимерных материалов. – Рига: «Знание», 1975. – 416 с.

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

E-mail: kayumov@mail.ru

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

E-mail: strahov@ksaba.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Abdullin I.S. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: abdullin_I@kstu.ru

Grishanova I.A. – candidate of technical sciences, associate professor

Fedorova M.A. – bachelor

Kazan National Research Technological University

The organization address: 420015, Russia, Kazan, K. Marksa st., 68

Prediction of deformation in time of high polyethylene fibers with different temperatures

Resume

The paper considers the important task of forecasting the deformation of high-strength polyethylene fiber over time at different temperatures. The need for ongoing research is due to the optimal choice of the polymer matrix to create a composite material acting as a «whole», ie without cracking of the polymer matrix during the time in the application loads close to critical. The object of this study was many filament high-strength polyethylene fiber.

When using the selected method of analogy, the problem of predicting the creep for a given temperature and stress is reduced to finding the coefficients of reduction, based on experiments that establish the relevant time scales of deformation. To describe the behavior of the polymer was accepted model of hereditary-elastic material with creep kernel of Abel. After processing the experimental data the regression function describing the behavior of the polymer material.

Having obtained a coefficient reduction can solve the problem of predicting the behavior of materials under conditions most close to the performance, for example, for large values of time interval values or higher temperatures.

Thus, the results of the experiments and numerical analysis can be assumed that the polymeric material under consideration is classified as «simple», that allows knowing the coefficient of temperature-time analogy, to predict its behavior over time at different temperatures and prolonged operating time.

Keywords: composite materials, high-strength polyethylene fiber, temperature-time analogy, the temperature-time reduction, time behavior, prediction of deformation.

References

1. Perepelkin K.E. Fibers and fibrous materials with extreme properties. Theory and practical achievements // Chemical fiber, 1991, № 4. – P. 18-23.
2. Brochure Dyneema. Dyneema the top in high performance fibers. Properties & Applications. Edited by 01-40-01© DSM High Performance Fibers BV. – C. Design, Bunde – Printed in The Netherlands – Edition 02/00 (2000).
3. Kayumov R.A., Strahov D.E., Prediction of deformation in time of polymeric materials with shape memory at different temperatures. // Izvestija KGASU, 2011, № 2 (16). – P. 195-199.
4. Urzhumtsev J.S., Maximov R.D. prediction deformability of polymer materials. – Riga: «Knowledge», 1975. – 416 p.