

УДК 539.434:677.494

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ**

**MODELING AND FORECASTING VISCOELASTIC PROPERTIES
OF TEXTILE MATERIALS WITH A COMPLEX STRUCTURE**

А.Г. МАКАРОВ, Н.В. ПЕРЕБОРОВА, М.А. ЕГОРОВА, В.И. ВАГНЕР
A.G. MAKAROV, N.V. PEREBOROVA, M.A. EGOROVA, V.I. WAGNER

(Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна)
(Saint-Petersburg State University of Technology and Design)
E-mail: makvin@mail.ru

В статье на основе математического моделирования вязкоупругости продолжено изучение деформационных и релаксационных свойств текстильных материалов сложного строения. Предложен вариант прогнозирования нелинейно-наследственной релаксации и ползучести, наиболее подходящий для исследования текстильных материалов сложного строения, на основе которого, в частности, разработаны методики выделения упругой компоненты механической работы деформирования, методики интегральных критериев правдоподобия определяемых вязкоупругих параметров и методики определения спектров релаксации и ползучести.

In this paper based on mathematical modeling of viscoelasticity we continue the study of the deformation and relaxation properties of textile materials with a complex structure. A variant of prediction of nonlinear hereditary relaxation and creep, the most suitable for the study of textile materials with a complex structure, based on which, in particular, a method of defining the elastic deformation of the mechanical components, methods of integrated likelihood of criteria defined by the viscoelastic parameters and the methodology for determining the spectrum of relaxation and creep.

Ключевые слова: вязкоупругие свойства, текстильные материалы сложного строения, математическое моделирование.

Keywords: viscoelastic properties, textile materials of a difficult structure, mathematical modelling.

В предыдущей статье [1] описан вариант моделирования деформационных и релаксационных свойств текстильных материалов сложного строения. Оказалось, что методы наследственной механики полимеров, применявшиеся ранее к синтетическим нитям, применимы и для решения задач нелинейно-наследственной вязкоупругости текстильных материалов сложного макростроения. При моделировании и исследовании деформационных и релаксационных свойств сложных текстильных объектов, в отличие от нитей более простого строения, наиболее продуктивной является функция нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ):

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty)\phi_{\varepsilon t}, \quad (1)$$

$$\phi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{n\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right),$$

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0)\phi_{\sigma t}, \quad (2)$$

$$\phi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{n\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right),$$

где t – время; $1/b_{n\varepsilon}$ – параметр интенсивности процесса релаксации; $1/b_{n\sigma}$ – параметр интенсивности процесса ползучести; τ_ε – время релаксации; τ_σ – время запаздывания; $E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$ – модуль релаксации; E_0 – модуль упругости; E_∞ – модуль вязкоупругости; $D_{\sigma t} = \varepsilon/\sigma$ – податливость; D_0 – начальная податливость; D_∞ – предельная равновесная податливость; ε – деформация; σ – напряжение.

С учетом специфики сложного строения текстильных материалов были разработаны аналитические и компьютерные методики исследования их деформационных и релаксационных свойств. Выявлена группа текстильных материалов сложной макроструктуры (тканые капроновые ленты и плащевые ткани), для которой в процессе деформирования и релаксации увеличиваются времена запаздывания и релаксации, то есть деформация и нагрузка

носят антиактивирующий характер. Увеличение времен релаксации и запаздывания происходит по причине упрочнения материала по мере растяжения.

Следующим шагом исследования деформационных и релаксационных свойств текстильных материалов сложного строения является прогнозирование деформационных и релаксационных процессов, которое, как и в случае текстильных материалов более простой макроструктуры, можно осуществлять на основе решения интегрального уравнения Больцмана-Вольтера [2...6]:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \int_0^t \varepsilon_\theta \phi'_{\varepsilon; t-\theta} d\theta \quad (3)$$

– для процесса нелинейно-наследственной релаксации и

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \int_0^t \sigma_\theta \phi'_{\sigma; t-\theta} d\theta \quad (4)$$

– для процесса нелинейно-наследственной ползучести.

Разработаны также методики уточнения расчетных диаграмм растяжения посредством коррекции функции времен релаксации по контрольным точкам экспериментальной диаграммы с целью уточнения параметров математической модели (рис. 1 – диаграмма растяжения пряжи № 12, $T = 20^\circ\text{C}$ при скорости деформирования $\dot{\varepsilon} = 0,083 \text{ c}^{-1}$ (сплошная линия – эксперимент, о – расчет до коррекции, * – расчет после коррекции диаграммы по точке экспериментальной диаграммы $\varepsilon = 4\%$, $\sigma = 18,7 \text{ МПа}$).

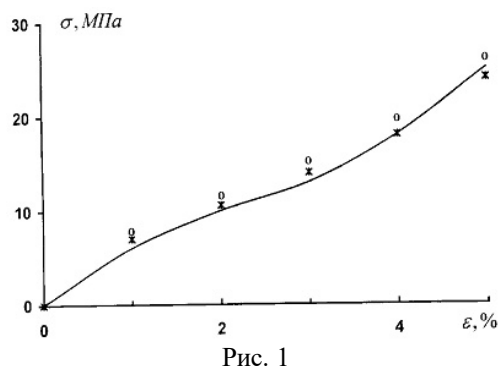


Рис. 1

Расчетные диаграммы тем ближе к экспериментальным, чем большее число точек экспериментальной диаграммы выбирается для коррекции. При этом, корректируя расчетную диаграмму, соответствующую некоторой скорости, мы получаем заметное улучшение расчетных диаграмм, построенных для других скоростей. Этот факт говорит об устойчивости данного метода, о методически правильно поставленной задаче и способе ее решения. Предложенный метод коррекции расчетных диаграмм растяжения по точкам экспериментальной диаграммы и его компьютеризация повышают надежность полученных расчетных значений вязкоупругих характеристик.

Предложены методики разделения механической работы деформирования – на упругую и поглощаемую компоненты, а также соответствующие ей деформации – на упруго-обратимую и вязкоупругопластическую компоненты (рис. 2 – разложе-

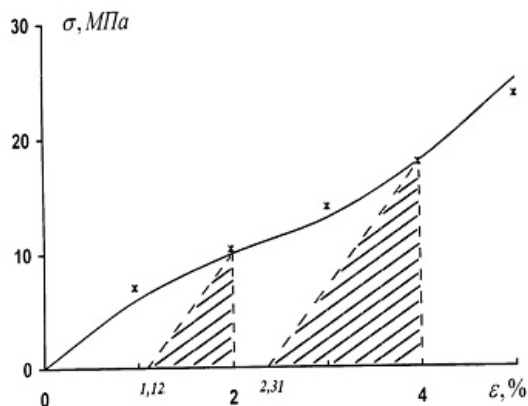


Рис. 2

На основе нелинейно-наследственного уравнения вязкоупругости (3), (4) [13] разработаны интегральные критерии правдоподобия определяемых вязкоупругих параметров, позволяющие контролировать как точность их определения, так и достоверность прогнозирования деформационных процессов. Рассмотренные критерии могут также использоваться для подтверждения достоверности определения среднестатистических времен релаксации и запаздывания, которые не подлежат непо-

средственному определению из эксперимента, а могут быть определены только методами математической физики. Указанные интегральные критерии являются наглядным средством наилучшего выбора нормированной функции из числа предложенных. Они носят универсальный характер, так как, с одной стороны, являются критериями достоверности выбора нормированных функций релаксации и ползучести, а, с другой стороны, являются критериями правдоподобия определяемых вяз-

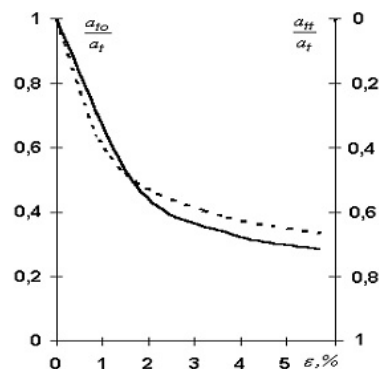


Рис. 3

средственному определению из эксперимента, а могут быть определены только методами математической физики. Указанные интегральные критерии являются наглядным средством наилучшего выбора нормированной функции из числа предложенных. Они носят универсальный характер, так как, с одной стороны, являются критериями достоверности выбора нормированных функций релаксации и ползучести, а, с другой стороны, являются критериями правдоподобия определяемых вяз-

коупругих характеристик.

На основе рекуррентных соотношений [14] для приближений спектров релаксации \bar{H}_k и ползучести \bar{Q}_k предложено решение задачи об аналитической взаимосвязи между нелинейно-наследственным ядром релаксации и деформационно-временным спектром релаксации, а также между нелинейно-наследственным ядром ползучести и силовременным спектром ползучести на примере задания функций релаксации и ползучести в виде НАЛ.

Задачи определения спектров релаксации и спектров ползучести свелись к нахождению коэффициентов $b_{пе}$ и $b_{пс}$, зависящих от структуры материала и определяемых экспресс-обработкой соответствующих "семейств" релаксации и ползучести [15], [16].

Следует также заметить, что спектры релаксации \bar{H} и ползучести \bar{Q} с достаточной степенью точности характеризуются своими первыми приближениями – релаксационным ядром и ядром ползучести, а последующие приближения быстро сходятся к точным значениям спектров (рис. 4 – приближения спектра релаксации (\bar{H}_n) пряжи №12 ($b_{пе} = 2,94$, $T = 20^\circ C$)).

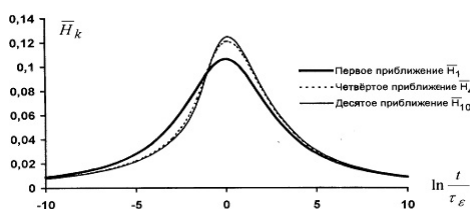


Рис. 4

Таким образом, с учетом специфики сложного строения текстильных нитей разработаны аналитические и компьютерные методики исследования их физико-механических свойств, в том числе:

- методики определения параметров релаксации и ползучести, включая времена релаксации и запаздывания;

- методики прогнозирования нелинейно-наследственных процессов релаксации и ползучести, включая деформационно-

восстановительные процессы и процессы обратной релаксации;

- методики выделения упругой компоненты механической работы деформирования как непосредственно из диаграмм растяжения, так и расчетным прогнозированием;

- методики интегральных критериев правдоподобия определяемых вязкоупругих параметров;

- методики определения спектров релаксации и ползучести и др.

ВЫВОДЫ

Разработанные методики моделирования вязкоупругих свойств текстильных материалов сложного строения представляют интерес для технологии текстильного производства, например, при отборе пряжи для вязания трикотажного полотна, так как пряжа должна обладать не только способностью к упругоэластическому восстановлению, но и определенными релаксационными характеристиками, со временем сказывающимися на внешнем виде изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Вагнер В.И. Вариант моделирования деформационных и релаксационных свойств текстильных материалов сложного строения // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014, №3. С.110...115.
2. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант моделирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2009, № 1. С. 143...153.
3. Жуковский В.А., Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Слуцкер Г.Я., Столяров О.Н., Териушкина О.Б., Гриднева А.В. Деформационные свойства синтетических монокристаллов медицинского назначения // Химические волокна. – 2008, № 4. С. 25...28.
4. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г. Моделирование деформационных свойств полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2008, № 1. С. 140...145.
5. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М. Вариант прогнозирования деформационных процессов полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2008, № 3. С.85...91.
6. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Каланчук О.Э. Компьютерное прогнозирование вязкоупругих процессов полимерных матери-

лов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2008, № 4. С. 80...83.

7. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант моделирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2009, № 1. С. 143...153.

8. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Абрамова И.В. Компьютерное прогнозирование вязкоупругих процессов полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2009, № 1. С. 100...104.

9. Ростовцева Н.Г., Абрамова И.В., Макаров А.Г. Вариант прогнозирования упругой, вязкоупругой и пластической компонент деформации полимерных нитей // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2009, № 1. С. 53...56.

10. Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Федорова С.В., Макаров А.Г. Прогнозирование деформационных процессов полимерных материалов в условиях меняющейся температуры // Дизайн. Материалы. Технология. – 2009, № 3. С. 69...71.

11. Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Федорова С.В., Макаров А.Г. Вариант спектральной интерпретации релаксации и ползучести полимерных нитей // Дизайн. Материалы. Технология. – 2009, № 4. С. 66...68.

12. Ростовцева Н.Г., Макаров А.Г., Пушкарь Д.В. Прогнозирование процессов обратной релаксации полимерных материалов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2010, Т. 7. № 1. С. 64...65.

13. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Артемьева Е.Н., Лебедева С.В. Моделирование деформационных свойств арамидных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2010, № 2. С. 25...29.

14. Макаров А.Г., Киселёв С.В., Рыбачук С.В., Пушкарь Д.В. Вариант моделирования релаксации и ползучести полимерных одноосно ориентированных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2011, № 1. С. 91...94.

15. Макаров А.Г., Киселёв С.В., Рыбачук С.В., Зурахов В.С. Высокоскоростное деформирование одноосно-ориентированных полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2011, № 2. С. 64...66.

16. Слуцкер Г.Я., Жуковский В.А., Терушкина О.Б., Дроботун Н.В., Филипенко Т.С., Едомина Н.А., Макаров А.Г. Упругие характеристики ПП и ПВДФ мононитей и сетчатых эндопротезов на их основе // Химические волокна. – 2013, № 1, С. 1...5.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 15.02.14.