

УДК 539.434:677.494

ВАРИАНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И РЕЛАКСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СЛОЖНОГО СТРОЕНИЯ

WAYS OF MODELING DEFORMATION AND RELAXATION 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, M.A. WAGNER

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

Методы исследования нелинейно-наследственной вязкоупругости синтетических нитей переносятся на текстильные материалы сложного строения (пряжи, ткани, и т.п.). Разрабатываются аналитические и компьютерные методики исследования их деформационных и релаксационных свойств. Предлагается аналитический вариант нормированной релаксационной функции и функции ползучести, наиболее подходящий для исследования текстильных материалов сложного строения.

Methods for studying the nonlinear viscoelastic hereditary synthetic fibers are transferred to the complex structure of textile materials (yarn, fabric, etc.). Developed analytical techniques and computer studies of deformation and relaxation properties. An analytical version of the normalized relaxation function and creep function is most suitable for the study of textile materials with a complex structure.

Ключевые слова: текстильные материалы сложного строения, нелинейно-наследственная вязкоупругость, компьютерные методики.

Keywords: textile materials with a complex structure, nonlinear viscoelasticity hereditary, computer techniques.

Многообразие текстильных материалов диктует необходимость создания методик исследования и прогнозирования вязкоупругих свойств объектов различной структуры, в том числе и сложной, которым уделяется недостаточно внимания.

Сложность структур текстильных материалов, заключающаяся прежде всего в разнообразии методов технологического производства и последующей обработки, существенно сказывается на свойствах материалов. В силу этого для изучения и про-

гнозирования деформационных свойств указанных материалов требуется разработка новых и совершенствование имеющихся методик. Чем больше разнообразие предлагаемых методик, тем свободнее выбор, способствующий получению наиболее точного прогноза.

Исследование свойств текстильных материалов сложной макроструктуры затруднено наличием у них более широкого спектра релаксации и ползучести. Данное обстоятельство стимулировало поиск новых релаксационных функций, отличающихся расширенным спектром. Если для синтетических нитей считается общепризнанным, что механические воздействия являются активирующими, то есть ускоряют эндохронные (внутренние) реакции микромеханизмов протекающих процессов, уменьшая времена запаздывания в процессе ползучести и времена релаксации в процессе релаксации, то среди текстильных материалов сложного строения можно выделить как материалы, обладающие

этим свойством, так и группу материалов, на которые механические воздействия оказывают затормаживающие воздействия, увеличивающие времена запаздывания и релаксации [1...5].

Традиционно применяемые методики прогнозирования [6...8], построенные на использовании таких нормированных функций, как интеграл вероятностей (ИВ), функции Кольрауша (ФК), гиперболического тангенса (ГТ), дают хорошие результаты при исследовании синтетических нитей, что объясняется наличием у них спектра релаксации и ползучести, соответствующего указанным нормированным функциям. Группа материалов сложного макростроения, например, некоторые пряжи [9], тканые ленты [10], плащевые ткани, используемых в спецодежде [11] (табл. 1 – технические характеристики текстильных материалов) и т.п., имеют более широкий спектр релаксации, как было показано в ходе исследования.

Т а б л и ц а 1

Название	Ширина, мм	Состав	Плотность		Разрывная деформация, %	Разрывная нагрузка, Н
			объемная, г/см ³	линейная, тек основа/уток/прижимная		
Пряжа № 8 (кольцевое прядение)	-	хлопок - 30%, лен - 20%, лавсан - 50%	1,45	-	14	10,5
Пряжа № 12 (самкруточная)	-	хлопок - 35%, лен - 15%, нитрон - 50%	1,34	-	15	4,5
Тканая лента ТК-2	59	капрон - 100%	-	182/182/-	36,5	37,6·10 ³
Тканая лента ТК-16	50	капрон - 100%	-	182/182/182	43,0	32,5·10 ³
Плащевая ткань № 11	100	полиэстер-60%, капрон - 40%	-	6,7/18,8/-	18,4	2,9·10 ³
Плащевая ткань № 14	100	капрон - 100%	-	3,3/5/-	22,6	3,7·10 ³

Поэтому для прогнозирования их деформационных процессов целесообразно выбирать нормированные функции, обладающие расширенным спектром по сравнению с традиционным. Одной из таких элементарных функций является нормированный арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ) [12]:

$$E_{et} = E_0 - (E_0 - E_\infty)\varphi_{et}, \quad (1)$$

$$\varphi_{et} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{ne}} \ln \frac{t}{\tau_e} \right),$$

$$D_{ot} = D_0 + (D_\infty - D_0)\varphi_{ot}, \quad (2)$$

$$\varphi_{ot} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{no}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right),$$

где t – время; $1/b_{не}$ – параметр интенсивности процесса релаксации; $1/b_{пс}$ – 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.

Выбор функции для модели вязкоупругих свойств текстильных материалов осложняется тем, что нельзя априорно отдать предпочтение какой-то из них. Основным критерием для отбора служит эксперимент. Наличие нескольких нормированных функций позволяет сделать более правильный выбор и тем самым повысить надежность прогнозирования. Как показал эксперимент, модели с использованием ИВ и функции НАЛ для широкого класса синтетических нитей дают достаточно точный прогноз. Что же касается сложных структурных материалов, то там проявляются преимущества математической модели с функцией НАЛ.

Медленная сходимость функции НАЛ к своим асимптотическим значениям позволяет аппроксимировать обобщенные кривые релаксации и податливости в более широком временном диапазоне, чем при использовании других функций, что дает возможность прогнозирования физико-

механических свойств не только синтетических нитей, но и текстильных материалов сложной макроструктуры, обладающие двумя различными видами нелинейности вязкоупругих свойств. Кроме того, функция НАЛ подходит для моделирования свойств текстильных материалов с "рыхлой" макроструктурой благодаря расширенному спектру времен релаксации и ползучести. Применение функции НАЛ увеличило значение начального модуля упругости, что приблизило его к акустическому значению $E_{ак}$ – это физически обосновано, так как скорость распространения упругих взаимодействий в полимерах близка к звуковой. Уменьшилось значение модуля вязкоупругости E_∞ , обосновав возможность прогнозирования длительных процессов релаксации.

Аналитическое задание функции НАЛ и принадлежность ее к классу элементарных функций упрощает дифференциально-интегральные преобразования в рамках рассматриваемой математической модели и тем самым ускоряет процесс нахождения вязкоупругих характеристик. Разработанные методики достаточно точно прогнозируют вязкоупругие состояния рассмотренных объектов, используя при этом минимальное число возможных параметров, что упрощает процесс расчета.

В табл. 2 представлены расчетные характеристики релаксации и ползучести текстильных материалов.

Т а б л и ц а 2

Название продукта	E_0 , ГПа	$E_0 F$, кН	E_∞ , ГПа	$E_\infty F$, кН	$\frac{1}{b_{не}}$	D_0 , ГПа ⁻¹	$D_0 \cdot F^{-1}$, кН ⁻¹	D_∞ , ГПа ⁻¹	$D_\infty \cdot F^{-1}$, кН ⁻¹	$\frac{1}{b_{пс}}$
Пряжа № 8, T = 20°C	5,26	-	1,887		0,104	0,190	-	0,530	-	0,160
Пряжа № 12, T = 20°C	1,21	-	0,39		0,340	0,826	-	2,564	-	0,335
Лента ТК-2, T = 20°C	-	45,7	-	14,8	0,213	-	0,0219	-	0,0676	0,318
Лента ТК-16, T = 20°C	-	42,2	-	16,2	0,249	-	0,0237	-	0,0617	0,356
Плащевая ткань № 11, T = 20°C	-	53,5	-	22,6	0,709	-	0,0187	-	0,0443	1,081
Плащевая ткань № 14, T = 20°C	-	57,4	-	18,3	0,647	-	0,0174	-	0,0546	1,019

Разработка методик моделирования вязкоупругих свойств получила дальнейшее развитие в виде программного продукта [13], позволяющего автоматизировать процесс вычисления. Компьютеризация методик дает простой способ выбора

наилучшей нормированной функции из числа имеющихся – по величине отклонения расчетных точек от эксперимента, что положительно сказывается на точности прогноза.

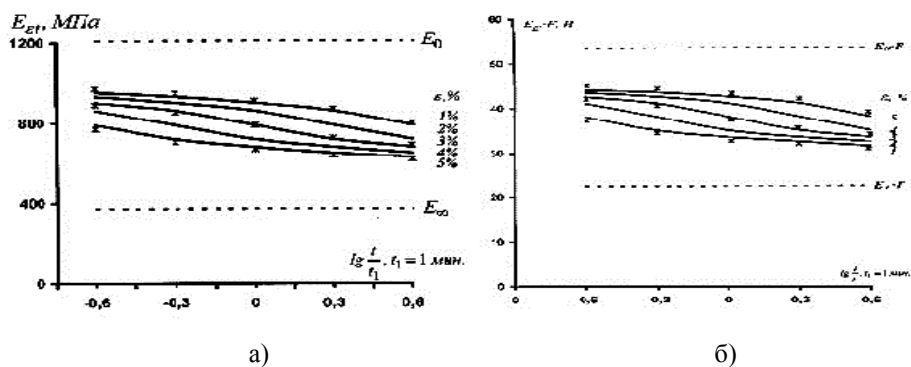


Рис. 1

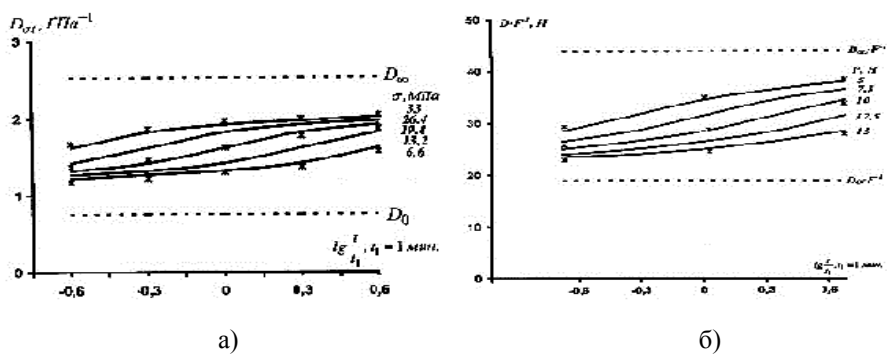


Рис. 2

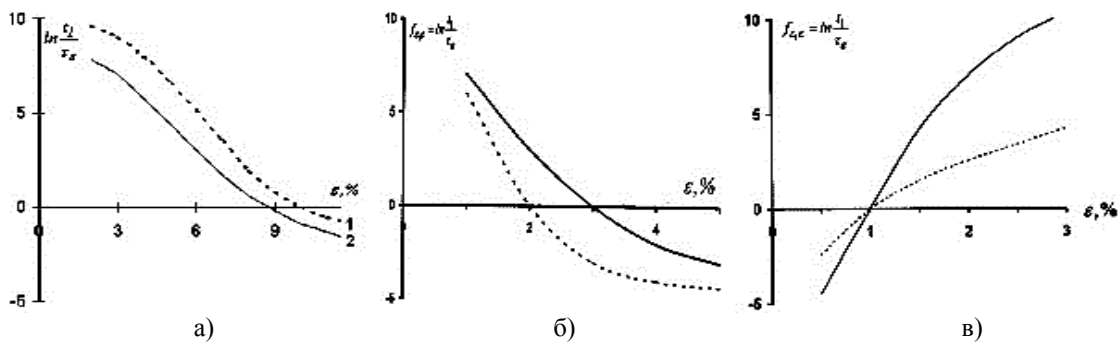


Рис. 3

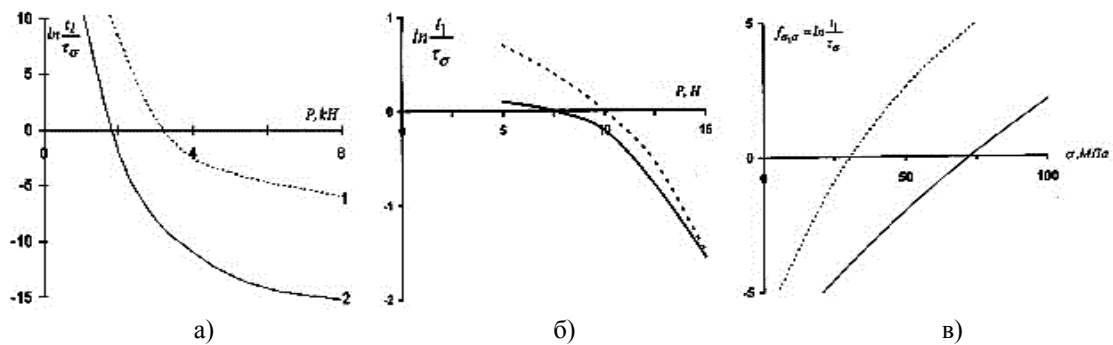


Рис. 4

Текстильные материалы сложной макро­структуры можно условно разделить на две категории по принципу влияния механических воздействий на времена релаксации и запаздывания. К первой группе материалов, у которых в процессе деформирования уменьшаются времена релаксации и запаздывания, можно отнести некоторые виды пряжи [14] (рис. 1-а, рис. 2-а, рис.3-в, рис. 4-в). Аналогичные процессы происходят и при деформировании синтетических нитей. В этом случае механические воздействия являются активизирующими, то есть ускоряют эндохронные (внутренние) реакции микромеханизмов протекающих процессов.

Менее изученной, с точки зрения влияния деформационных воздействий на макро­структуру, остается вторая группа материалов, представленных тканями капроновыми лентами и плащевыми тканями [15] (рис. 1-б; рис. 2-б; рис. 3-а, б; рис. 4-а, б), у которых процессы деформирования вызывают увеличение времен релаксации и запаздывания. В данном случае мы имеем дело с затормаживающим воздействием механической нагрузки. Это обстоятельство обусловлено наличием у материалов менее плотного строения, чем свойственно синтетическим нитям и пряже. Увеличение времен релаксации и запаздывания происходит по причине упрочнения материала по мере растяжения.

Рис. 1 – модуль релаксации (* – расчетные точки для значений деформации 1%, 3%, 5%): а – пряжи № 12, $T = 20^{\circ}\text{C}$, б – плащевой ткани № 11, $T = 20^{\circ}\text{C}$. Рис. 2 – податливость: а – пряжи № 12, $T = 20^{\circ}\text{C}$ (* – расчетные точки для значений напряжений 6,6; 19,8; 33 МПа), б – плащевой ткани № 11, $T = 20^{\circ}\text{C}$ (* – расчетные точки для значений нагрузки 5, 10, 15 Н). Рис. 3 – функции среднестатистических времен релаксации τ_{ϵ} текстильных материалов ($t_1 = 60$ с): а – лента ТК-2 (1 - $T = 20^{\circ}\text{C}$), лента ТК-16 (2 - $T = 20^{\circ}\text{C}$); б – плащевая ткань №11 (- - - - $T = 20^{\circ}\text{C}$), плащевая ткань №14 (----- $T = 20^{\circ}\text{C}$); в - пряжа № 8 (- - - - $T = 20^{\circ}\text{C}$); пряжа № 12 (----- $T = 20^{\circ}\text{C}$). Рис. 4 – функции среднестатистических времен

запаздывания τ_{ϵ} текстильных материалов ($t_1 = 60$ с): а – лента ТК-2 (1 - $T = 20^{\circ}\text{C}$), лента ТК-16 (2 - $T = 20^{\circ}\text{C}$); б – плащевая ткань №11 (- - - - $T = 20^{\circ}\text{C}$), плащевая ткань №14 (----- $T = 20^{\circ}\text{C}$); в – пряжа № 8 (- - - - $T = 20^{\circ}\text{C}$), пряжа № 12 (----- $T = 20^{\circ}\text{C}$).

ВЫВОДЫ

1. Методы наследственной механики полимеров, применявшиеся ранее к синтетическим нитям, оказались применимыми и для решения задач нелинейно-наследственной вязкоупругости текстильных материалов сложного макро­строения.

2. При моделировании и исследовании деформационных и релаксационных свойств сложных текстильных объектов, в отличие от нитей более простого строения, наиболее продуктивной, по сравнению с изученными вариантами релаксационных функций и функций ползучести, является функция НАЛ.

3. С учетом специфики сложного строения текстильных материалов разработаны аналитические и компьютерные методики исследования их деформационных и релаксационных свойств.

4. 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. В данном случае мы имеем дело с затормаживающим воздействием механической нагрузки. Это обстоятельство обусловлено наличием у материалов менее плотного строения, чем свойственно синтетическим нитям и пряже. Увеличение времен релаксации и запаздывания происходит по причине упрочнения материала по мере растяжения.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Жуковский В.А., Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Слуцкер Г.Я., Столяров О.Н., Терушкина О.Б., Гриднева А.В. Деформационные свойства синтетических мононитей медицинского назначения // Химические волокна. – 2008, № 4. С. 25...28.

3. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г. Моделирование деформационных свойств полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология.– 2008, №1. С. 140...145.

4. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М. Вариант прогнозирования деформационных процессов полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2008, № 3. С. 85...91.

5. Макаров А.Г., Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Каланчук О.Э. Компьютерное прогнозирование вязкоупругих процессов полимерных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. – 2008, № 4. С. 80...83.

6. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант моделирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов // Изв. Российск. акад. наук. Механика твердого тела. – 2009, № 1. С. 143..153.

7. 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.

8. 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.

9. Ростовцева Н.Г., Литвинов А.М., Федорова С.В., Макаров А.Г. Прогнозирование деформационных процессов полимерных материалов в условиях ме-

няющейся температуры // Дизайн. Материалы. Технология. – 2009, № 3. С. 69...71.

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

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

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.