

УДК 539.434:677.494
DOI 10.47367/0021-3497_2023_4_110

**ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ
ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ***

**ASSESSMENT OF THE FUNCTIONALITY
OF POLYMER TEXTILE MATERIALS IN ORDER
TO INCREASE THEIR COMPETITIVENESS**

Н.С. КЛИМОВА

N.S. KLIMOVA

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)
(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: klimonata85@mail.ru

В статье описывается метод проведения оценки функциональности полимерных текстильных материалов с целью повышения их конкурентоспособности. Указанная оценка проводится на основе математического моделирования их вязкоупругости. При этом рассматривается один из общепризнанных вариантов математического моделирования вязкоупругости полимерных материалов, основанный на аналитической аппроксимации экспериментальных "семейств" релаксационных и деформационных кривых нормированными релаксационными и деформационными функциями по логарифмической шкале приведенного времени.

*Работа финансировалась в рамках выполнения гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-5349.2022.4

The article describes a method for assessing the functionality of polymeric textile materials in order to increase their competitiveness. This assessment of the functionality of polymeric textile materials is carried out on the basis of mathematical modeling of their viscoelasticity. In this case, one of the generally recognized variants of mathematical modeling of the viscoelasticity of polymeric materials is considered, based on the analytical approximation of experimental "families" of relaxation and deformation curves by normalized relaxation and deformation functions on a logarithmic scale of the reduced time.

Ключевые слова: вязкоупругие свойства, математическое моделирование, полимерные материалы, текстильные материалы, релаксационные процессы, деформационные процессы, конкурентоспособность, функциональность, конкурентоспособность.

Keywords: viscoelastic properties, mathematical modeling, polymeric materials, textile materials, relaxation processes, deformation processes, competitiveness, functionality, competitiveness.

В основе наиболее достоверного исследования механических свойств и прогнозирования деформационных процессов полимерных материалов лежит математическое моделирование вязкоупругих свойств на основе данных простого эксперимента. Известные математические модели механических свойств полимерных материалов в большей или меньшей степени достоверно позволяют описать деформационные процессы.

Одним из общепризнанных вариантов математического моделирования вязкоупругости полимерных материалов является вариант, основанный на аналитической аппроксимации экспериментальных "семейств" кривых релаксации и ползучести с помощью нормированных релаксационных функций и функций запаздывания по логарифмической шкале приведенного времени [1].

Большое количество полимерных материалов, обладающих самым разнообразным строением и проявляющих в силу сказанного те или иные деформационные свойства, диктует необходимость разработки новых вариантов математического моделирования их механических свойств, по возможности оптимальных для того или иного материала [2].

Следует отметить, что математическая модель, оптимально подходящая для описа-

ния деформационных свойств одного полимерного материала, может совсем не подходить для другого.

Данное обстоятельство является стимулирующим для создания развиваемой теории оптимального прогнозирования деформационных процессов, а также способствовало поиску математических моделей деформационных свойств полимерных материалов на основе различных, по возможности более простых, нормированных релаксационных функций и функций запаздывания.

Одним из основополагающих требований при построении развиваемой теории и поиске новых математических моделей явилось минимальное число параметров-характеристик модели и их физическая обоснованность, способствующая оптимизации и повышению надежности решения дальнейших технологических задач [3].

Упрощение и оптимизация математической модели вязкоупругости в рамках развиваемой теории достигается также за счет учета нелинейности в интегральных ядрах релаксации и запаздывания параметров модели.

Математические модели механических свойств полимерных материалов, применяемые для прогнозирования деформационных процессов, как правило, игнорируют тот факт, что полимерным материалам

наряду с упругостью и вязкоупругостью присущи также пластические свойства [4].

В развиваемой теории особое внимание уделено учету пластической компоненты деформации при прогнозировании деформационных процессов.

Начальный и один из простейших методов исследования полимерных материалов основан на изучении диаграмм растяжения. Диаграммы растяжения достаточно просто получают экспериментальным путем (например, на приборе "Instron – 1122"), в силу чего являются наиболее доступным средством исследования механических свойств полимерных материалов [5].

По диаграммам растяжения (рис. 1) может быть получена качественная оценка некоторых вязкоупругих параметров-характеристик материала, например таких, как: модуль упругости и модуль вязкоупругости; обратные им величины – начальная податливость и предельно-равновесная податливость; диапазоны изменения модуля релаксации, а следовательно, качественная оценка релаксационной способности материала; диапазоны изменения податливости и, как следствие, качественная оценка ползучести [6].

Использование экспериментальных диаграмм растяжения бывает полезно, когда нет возможности проведения всестороннего, многогранного исследования материалов или необходимо быстро получить приближенные вязкоупругие параметры-характеристики [7].

Наряду с определением указанных выше вязкоупругих параметров-характеристик предлагается методика качественной оценки упругих и вязкоупругоупругих компонент механической работы деформирования, имеющих важное значение для определения качественной способности материала восстанавливать первоначальную форму и гасить ударно-механические воздействия [8].

Отбор материалов, обладающих наилучшей способностью к восстановлению формы после деформирования, важен как для оценки износостойкости материала, так и для оценки степени потери товарного вида готового изделия при его эксплуатации.

На рис. 1 представлены экспериментальная диаграмма растяжения крученной полиэфирной нити (скорость деформирования $\dot{\epsilon} = 0,083 \text{ c}^{-1}$) и приближенное определение модуля упругости E_0 и модуля вязкоупругости E_∞ .

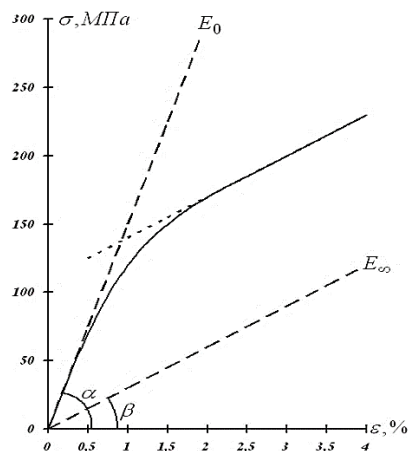


Рис. 1

Экономически более оправдано производство полимерных изделий, имеющих длительный срок эксплуатации с наименее возможной потерей товарного вида.

В то же время перед промышленностью ставится вопрос и о производстве таких полимерных материалов, для которых первостепенное значение имеют вопросы пластичности, а вопросы сохранения товарного вида изделия не столь актуальны. Примером этого является применение полимерных материалов в защитных конструкциях и спецодежде, где главенствующую роль играет способность материала гасить вредные механические воздействия с целью защиты человека и оборудования [9].

На основе качественного анализа соотношений упругих и вязкоупругоупругих компонент механической работы деформирования решается задача по качественной оценке соотношения упругих и вязкоупругоупругих компонент деформации полимерных материалов.

Более подробное и, соответственно, более точное исследование полимерных материалов возможно с помощью математического моделирования деформационных свойств полимерных материалов, в основе которого лежат данные эксперимента, проведенного с использованием специальных

приборов, например, различного рода релаксметров деформаций и напряжений [10].

Разработанные на основе такого моделирования методики определения вязкоупругих характеристик полимерных материалов в дальнейшем используются для прогнозирования деформационных процессов.

В качестве одного из примеров математической модели релаксации (изменение во времени напряжения σ , зависящего от деформации ε) можно привести модель, основанную на нормированной функции в виде гиперболического тангенса [11]:

$$\sigma(\varepsilon, t) = E_0 \varepsilon - \frac{E_0 - E_\infty}{2} \varepsilon \cdot \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_\varepsilon}{2} \ln \left(\frac{t}{\tau(\varepsilon)} \right) \right) \right). \quad (1)$$

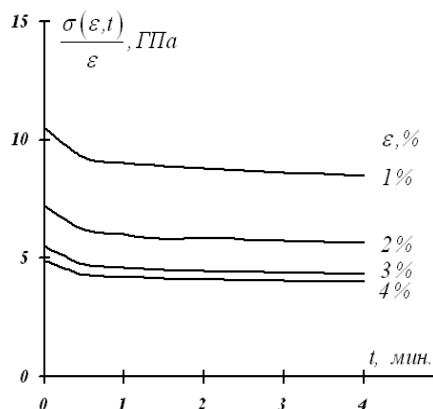


Рис. 2

Аналогичная математическая модель ползучести (изменение во времени деформации ε , зависящей от напряжения σ) имеет вид [12]:

$$\varepsilon(\sigma, t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{E_0 - E_\infty}{2E_0 E_\infty} \sigma \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_\sigma}{2} \ln \left(\frac{t}{\tau(\sigma)} \right) \right) \right). \quad (2)$$

Здесь t – время; E_0 – модуль упругости; E_∞ – модуль вязкоупругости; $\tau(\varepsilon)$ – время релаксации как функция деформации; $\tau(\sigma)$ – время запаздывания как функция напряжения.

Процессы релаксации и ползучести проиллюстрированы на примере крученной полиэфирной нити (рис. 2, рис. 3).

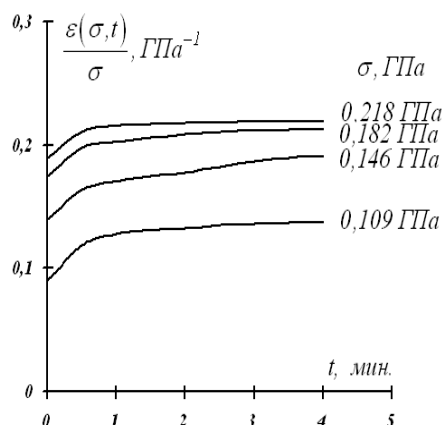


Рис. 3

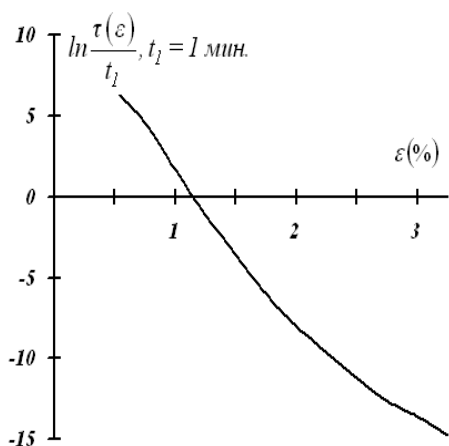


Рис. 4

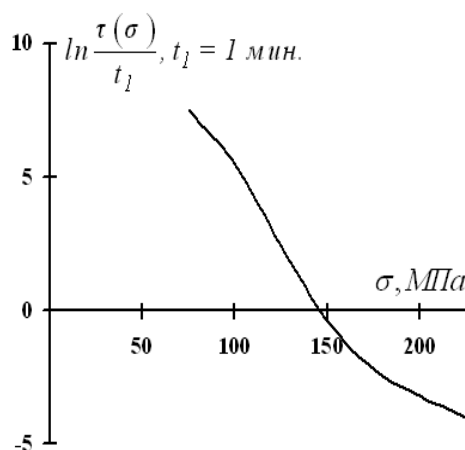


Рис. 5

Несомненным достоинством моделей (1) и (2) является то, что они содержат ми-

нимальное число параметров, имеющих определенный физический смысл [13]:

$$- E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sigma(\varepsilon, t)}{\varepsilon} \text{ – модуль упругости,}$$

характеризующий квазимгновенное значение релаксирующего модуля, то есть его значение в начале процесса релаксации;

$$- E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sigma(\varepsilon, t)}{\varepsilon} \text{ – модуль вязко-}$$

упругости, характеризующий квазиравновесное значение релаксирующего модуля, то есть его значение в конце процесса релаксации;

- структурные параметры A_ε и A_σ , характеризующие скорость (интенсивность) процессов релаксации и ползучести;

- время релаксации $\tau(\varepsilon)$, характеризующее время прохождения половины процесса релаксации при заданном значении деформации ε (рис. 4);

- время запаздывания $\tau(\sigma)$, характеризующее время прохождения половины процесса ползучести при заданном значении напряжения σ (рис. 5).

Другим достоинством предлагаемых моделей релаксации (1) и ползучести (2) является то, что производные

$$\frac{\partial \sigma(\varepsilon, t)}{\partial \ln(t/\tau(\varepsilon))} \text{ и}$$

$$\frac{\partial \sigma(\sigma, t)}{\partial \ln(t/\tau(\sigma))} \text{ рекуррентным образом выра-}$$

жаются через параметры модели, что оптимальным образом сказывается как на упрощении дальнейших аналитических преобразований, так и на повышении точности определения вязкоупругих параметров-характеристик и, как следствие, на повышении достоверности прогнозирования деформационных процессов:

$$\frac{\partial \sigma(\varepsilon, t)}{\partial \ln(t/\tau(\varepsilon))} = -(E_0 - E_\infty) \varepsilon \cdot A_\varepsilon \varphi(\varepsilon, t) (1 - \varphi(\varepsilon, t)), (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon(\sigma, t)}{\partial \ln(t/\tau(\sigma))} = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0 E_\infty} \sigma A_\sigma \varphi(\sigma, t) (1 - \varphi(\sigma, t)), (4)$$

где

$$\varphi(\varepsilon, t) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_\varepsilon}{2} \ln \left(\frac{t}{\tau(\varepsilon)} \right) \right) \right) \quad (5)$$

– функция релаксации,

$$\varphi(\sigma, t) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(\frac{A_\sigma}{2} \ln \left(\frac{t}{\tau(\sigma)} \right) \right) \right) \quad (6)$$

– функция запаздывания, что упрощает аналитические преобразования [14].

Математические модели релаксации и ползучести (1), (2) с нормированной функцией в виде гиперболического тангенса (5), (6), кроме вышесказанного, имеют преимущество перед другими известными математическими моделями при прогнозировании быстротекущих деформационных процессов [15]. Данное обстоятельство вытекает из достаточно быстрой сходимости функций (5) и (6) к своим асимптотическим значениям по сравнению с другими известными математическими моделями и подтверждено сравнением расчетного прогнозирования с экспериментальными данными.

Следует заметить, что выбор аналогов нормированных функций (5), (6) для моделей механических свойств полимерных материалов осложняется тем, что нельзя априорно отдать предпочтение какой-то из них. Основным критерием для отбора служит эксперимент. Наличие нескольких нормированных функций для моделирования позволяет сделать оптимальный выбор и тем самым повысить надежность прогнозирования [16].

Разработка методов математического моделирования деформационных свойств на основе функции в виде гиперболического тангенса и других нормированных функций получила дальнейшее развитие в виде программного продукта [17], позволяющего компьютеризировать процесс вычисления деформационных характеристик, а также упростить оптимальный выбор нормированной функции – основы математической модели – из числа имеющихся.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложен метод проведения оценки функциональности полимерных текстильных материалов с целью повышения их конкурентоспособности. Предложенной вариант оценки функциональности полимерных текстильных материалов

основан на математическом моделировании их вязкоупругости и последующем системном анализе деформационно-эксплуатационных свойств этих материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов А.А. Моделирование эластических свойств полиэфирных крученых текстильных нитей // Химические волокна. 2022. № 2. С. 64...66.

2. Егорова М.А., Козлов А.А. Системный анализ деформационных режимов эксплуатации арамидных текстильных материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 80...83.

3. Киселев С.В. Вычисление энергии активации деформационных процессов полимерных волокнистых материалов в режимах релаксации и ползучести // Химические волокна. 2022. № 2. С. 84...86.

4. Киселев С.В., Козлов А.А. Компьютерное прогнозирование релаксационных и деформационных спектров полимерных текстильных материалов // Химические волокна. 2022. № 3. С. 13...16.

5. Киселев С.В. Вариант математического моделирования деформационных свойств полимерных текстильных нитей // Химические волокна. 2022. № 3. С. 43...46.

6. Егорова М.А., Егоров И.М. Компьютерное прогнозирование спектрально-энергетических характеристик полимерных текстильных тканей // Химические волокна. 2022. № 3. С. 34...37.

7. Киселев С.В., Козлов А.А., Егоров И.М. Компьютерное прогнозирование деформационных режимов эксплуатации геотекстильных нетканых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 3. С. 214...220.

8. Киселев С.В. Методы системного анализа при определении энергии активации процессов релаксации и ползучести полимерных материалов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. 2022. № 3. С. 46...50.

9. Козлов А.А. Моделирование эластических свойств крученых текстильных нитей // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 88...96.

10. Егорова М.А., Егоров И.М. Системный анализ деформационных процессов арамидных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 136...143.

11. Киселев С.В. Автоматизация контроля вязкоупругих характеристик полимерных тканей на основе компьютерного прогнозирования деформационных процессов // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 144...153.

12. Козлов А.А. Комплексное исследование функциональных свойств текстильных материалов на основе математического моделирования эксплуатационных процессов // Вестник СПГУТД. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 129...137.

13. Киселев С.В., Козлов А.А. Цифровизация прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов // Вестник

СПГУТД. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 10...15.

14. Макаров А.Г., Демидов А.В. Цифровое прогнозирование упругих, вязкоупругих и пластических компонент деформации текстильных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 130...135.

15. Демидов А.В., Макаров А.Г. Изучение деформационных процессов геотекстильных нетканых материалов с позиции спектрального анализа // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 4 (68). С. 125...132.

16. Макаров А.Г., Киселев С.В. Системный анализ деформационных свойств полимерной текстильной пряжи // Вестник СПГУТД. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 76...84.

17. Макаров А.Г., Козлов А.А., Киселев С.В. Качественный анализ эксплуатационных свойств полимерных парашютных строп // Вестник СПГУТД. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. С. 51...58.

REFERENCES

1. Kozlov A.A. Modeling of elastic properties of polyester twisted textile threads // Chemical fibers. 2022. No. 2. P. 64...66.

2. Egorova M.A., Kozlov A.A. System analysis of deformation modes of operation of aramid textile materials // Chemical fibers. 2022. No. 2. P. 80...83.

3. Kiselev S.V. Calculation of the activation energy of deformation processes of polymeric fibrous materials in relaxation and creep modes // Chemical fibers. 2022. No. 2. P. 84...86.

4. Kiselev S.V., Kozlov A.A. Computer prediction of relaxation and deformation spectra of polymeric textile materials // Chemical fibers. 2022. No. 3. P. 13...16.

5. Kiselev S.V. A variant of mathematical modeling of the deformation properties of polymer textile yarns // Chemical fibers. 2022. No. 3. P. 43...46.

6. Egorova M.A., Egorov I.M. Computer prediction of the spectral-energy characteristics of polymer textile fabrics // Chemical fibers. 2022, No. 3. P. 34 ... 37.

7. Kiselev S.V., Kozlov A.A., Egorov I.M. Computer prediction of deformation modes of operation of geotextile non-woven materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2022. No. 3. P. 214...220.

8. Kiselev S.V. Methods of system analysis in determining the activation energy of the processes of relaxation and creep of polymeric materials // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Light industry technology. 2022. No. 3. P. 46...50.

9. Kozlov A.A. Modeling of elastic properties of twisted textile threads // Design. Materials. Technology. 2022. No. 1. P. 88 ... 96.

10. Egorova M.A., Egorov I.M. System analysis of deformation processes of aramid materials // Design. Materials. Technology. 2022. No. 1. P. 136...143.

11. Kiselev S.V. Automation of control of viscoelastic characteristics of polymeric fabrics based on com-

puter prediction of deformation processes // Design. Materials. Technology. 2022. No. 1. P. 144...153.

12. *Kozlov A.A.* Comprehensive study of the functional properties of textile materials based on mathematical modeling of operational processes // Vestnik SPSUTD. Series 4. Industrial technologies. 2022. No. 1. P. 129...137.

13. *Kiselev S.V., Kozlov A.A.* Digitalization of forecasting of operational processes of polymer textile materials // Vestnik of SPSUTD. Series 4. Industrial technologies. 2022. No. 2. P. 10...15.

14. *Makarov A.G., Demidov A.V.* Digital prediction of elastic, viscoelastic and plastic deformation components of textile materials // Design. Materials. Technology. 2022. No. 1. P. 130...135.

15. *Demidov A.V., Makarov A.G.* Study of deformation processes of geotextile non-woven materials

from the standpoint of spectral analysis // Design. Materials. Technology. 2022. No. 4 (68). P. 125...132.

16. *Makarov A.G., Kiselev S.V.* System analysis of the deformation properties of polymer textile yarn // Vestnik SPSUTD. Series 4. Industrial technologies. 2022. No. 1. P. 76...84.

17. *Makarov A.G., Kozlov A.A., Kiselev S.V.* Qualitative analysis of the operational properties of polymeric parachute lines // Vestnik SPSUTD. Series 4. Industrial technologies. 2022. No. 1. P. 51...58.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. Поступила 03.05.23.