

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ЦИФРОВОЙ
КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ
РЕЛАКСАЦИОННО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ***

**DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR DIGITAL
QUALITATIVE ASSESSMENT OF RELAXATION
AND RESTORATION PROPERTIES
OF POLYMER TEXTILE MATERIALS FOR TECHNICAL PURPOSES**

Н.В. ПЕРЕБОРОВА

N.V. PEREBOROVA

(Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна)

(Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design)

E-mail: ninal332@yandex.ru

Предлагаются новые критерии цифровой качественной оценки эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения, получаемые на основе исследования параметров-характеристик математических моделей релаксационных и восстановительных процессов указанных материалов. Разработанные критерии позволяют провести качественную оценку релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения, что значительно сокращает технико-экономические затраты на проектирование указанных материалов с заданными функциональными свойствами, так как отпадает необходимость в изготовлении опытных партий этих материалов.

New criteria for a digital qualitative assessment of the performance properties of polymer textile materials for technical purposes, obtained on the basis of a study of the parameters-characteristics of mathematical models of relaxation and recovery processes of these materials, are proposed. The developed criteria make it possible to conduct a qualitative assessment of the relaxation and recovery properties of polymer textile materials for technical purposes, which significantly reduces the technical and economic costs of designing these materials with specified functional properties, since there is no need to manufacture pilot batches of these materials.

* Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2020-0005.

Ключевые слова: полимерные текстильные материалы, релаксационно-восстановительные свойства, математическое моделирование, критерии качественной оценки.

Keywords: polymer textile materials, relaxation and restorative properties, mathematical modeling, assessment of a qualitative assessment.

Введение

Разработанный на основе математического моделирования релаксационно-восстановительного процесса полимерных текстильных материалов технического назначения метод определения функционально-потребительских релаксационно-восстановительных свойств указанных материалов [1] позволяет проводить оценку их качественных характеристик по релаксационно-восстановительным параметрам.

Рассмотрим математическую модель релаксационно-восстановительного процесса полимерных текстильных материалов технического назначения [2]:

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

где в качестве релаксационной функции φ_{et} выбрана функция нормированный арктангенс логарифма (НАЛ), характеризующая интегральное распределение Коши [3]:

$$\varphi_{et} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg\left(\frac{1}{b_{не}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon}\right), \quad (2)$$

Здесь τ_ε – характеристика среднего времени релаксации; $b_{не}$ – характеристика интенсивности релаксации; σ_t – напряжение, изменяющееся во времени t под действием деформации ε .

$$E_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} E_{et} - \quad (3)$$

модуль вязкоупругости и

$$E_0 = \lim_{t \rightarrow 0} E_{et} - \quad (4)$$

модуль упругости – два асимптотических значения модуля релаксации $E_{et} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon}$.

Для оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения предлагается несколько разработанных критериев, которые могут быть объединены в единый интегрированный критерий в силу того, что все релаксационно-восстановительные параметры оценки свойств указанных материалов подчинены вероятностному закону Коши и включают в себя оценку их качества [4].

Для оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения предлагаются следующие критерии:

- критерий интенсивности восстановления материала после эксплуатации;
- критерий степени восстанавливаемости материала после эксплуатации;
- критерий возможности многократного восстановления материала в процессе эксплуатации;
- временной критерий восстановления функционально-потребительских свойств материала после эксплуатации;
- критерий устойчивости материала к многократному восстановлению после эксплуатации.

Количественную оценку параметров в рамках предлагаемых критериев релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения предлагается проводить в безразмерных единицах, которые могут быть описаны следующим образом [5].

1. Критерий интенсивности восстановления материала после эксплуатации

Обозначим через

$$\alpha_1 = b_{не} \quad (5)$$

безразмерную переменную, характеризующую величину интенсивности восстановления материала после эксплуатации, которая

численно равна интенсивности процесса релаксации, отвечающего за восстановление функционально-потребительских свойств рассматриваемого материала. При этом α_1 может принимать любые неотрицательные значения ($\alpha_1 \geq 0$). Чем меньше значение α_1 , тем быстрее происходит процесс восстановления материала после эксплуатации [6].

2. Критерий степени восстанавливаемости материала после эксплуатации

Обозначим через

$$\alpha_2 = \frac{E_\infty}{E_0 + E_\infty} \quad (6)$$

безразмерную переменную, характеризующую степень восстанавливаемости материала после эксплуатации. При этом α_2 принимает неотрицательные значения ($\alpha_2 \geq 0$). Чем меньше значение α_2 , тем большей степенью восстановления после эксплуатации обладает материал. Чем больше значение параметра α_2 , тем меньшей возможностью к восстановлению обладает материал [7].

3. Критерий возможности многократного восстановления материала в процессе эксплуатации

Обозначим через

$$\alpha_3 = \frac{100\%}{\varepsilon_p} \quad (7)$$

безразмерную переменную, характеризующую возможность многократного восстановления материала в процессе эксплуатации, где ε_p – значение разрывной деформации в процентах. При этом α_3 может принимать любые неотрицательные значения ($\alpha_3 \geq 0$). Чем меньше значение α_3 , тем большей возможностью многократного восстановления обладает материал. Значение $\alpha_3=0$ соответствует материалу, обладающему свойством полного многократного восстановления [8].

4. Временной критерий восстановления функционально-потребительских свойств материала после эксплуатации

Обозначим через

$$\alpha_4 = \frac{\bar{\tau}_\varepsilon}{t_1} \quad (8)$$

безразмерную переменную, характеризующую временные способности материала по восстановлению своих функционально-потребительских свойств после эксплуатации, где t_1 – некоторое значение базового времени, например $t_1 = 60$ с, $\bar{\tau}_\varepsilon$ – среднее релаксационное время, определяемое по формуле:

$$\bar{\tau}_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} \tau_\varepsilon d\varepsilon. \quad (9)$$

Здесь ε_1 – наименьшее значение из интервала исследуемых деформаций, ε_2 – наибольшее значение из интервала исследуемых деформаций [9].

При этом α_4 может принимать любые неотрицательные значения ($\alpha_4 \geq 0$). Чем меньше значение α_4 , тем быстрее восстанавливается материал после эксплуатации.

Обозначим через

5. Критерий устойчивости материала к многократному восстановлению после эксплуатации

$$\alpha_5 = \frac{E_\infty}{E_0 - E_\infty} \quad (10)$$

безразмерную переменную, характеризующую устойчивость материала к многократному восстановлению после эксплуатации. При этом α_5 может принимать любые неотрицательные значения ($\alpha_5 \geq 0$). Чем меньше значение α_5 , тем большей устойчивостью к многократному восстановлению после эксплуатации обладает материал. Значение $\alpha_5 = 0$ соответствует условию полной устойчивости материала к многократному восстановлению после эксплуатации.

Ввиду того, что основные релаксационные характеристики E_0 , E_∞ , $b_{не}$ и τ_ε получаются с использованием математического моделирования релаксационно-восстановительных свойств на основе вероятностного распределения Коши, интегральной функцией распределения которого является функция НАЛ, то и все переменные α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 также подчиняются вероятностному распределению Коши в силу аддитивности этого закона [10].

Вероятностное распределение Коши является достаточно близким к нормальному распределению, отличаясь от него некоторыми свойствами, например, более медленной сходимостью интегральной функции к своим асимптотическим значениям. Это свойство распределения Коши позволяет с большей достоверностью обрабатывать статистические выборки, обладающей значительной степенью рассеянности, что и характеризует выборочные совокупности релаксационно-восстановительных характеристик полимерных текстильных материалов технического назначения.

В силу сказанного следует заметить, что вероятностная релаксационная характеристика ε_p также подчинена закону Коши.

В качестве интегральных функций вероятностных распределений при исследовании релаксационных, деформационных и других свойств полимерных текстильных материалов технического назначения, кроме нормального распределения с функцией "интеграл вероятности" (ИВ) и распределения Коши с функцией НАЛ, иногда используют функцию "гиперболический тангенс" (ГТ) и "функцию Кольрауша" (ФК) [11...13].

6. Интегрированный критерий релаксационно-восстановительных свойств

Так как все введенные вероятностные

$$\frac{\sum_{k=1}^N A_{pk}}{N} = \frac{\sum_{k=1}^N (\alpha_{1k} + \alpha_{2k} + \alpha_{3k} + \alpha_{4k} + \alpha_{5k})}{N} = \bar{A}_p \rightarrow \min, \quad (12)$$

где N – число исследуемых образцов материала (объем выборки); \bar{A}_p – среднее значение релаксационно-восстановительного параметра.

Как уже отмечалось, разработанный критерий оптимизации релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения носит интегрированный характер и включает в себя оптимизацию по пяти частичным критериям релаксационно-восстановительных свойств указанных материалов, а именно по:

характеристики $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ распределены по закону Коши, то целесообразно рассмотреть новый релаксационно-восстановительный параметр

$$A_p = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5, \quad (11)$$

также распределенный по закону Коши.

Исходя из свойств слагаемых $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$, параметр A_p может принимать любые неотрицательные значения ($A_p \geq 0$), причем релаксационно-восстановительные свойства полимерных текстильных материалов технического назначения будут тем лучше, чем меньше будет значение релаксационно-восстановительного параметра A_p .

Понятно, что в идеальном случае наилучшими, с точки зрения качества материалов, функционально-потребительскими релаксационно-восстановительными характеристиками будут обладать те материалы текстильной и легкой промышленности, у которых $A_p = 0$. Однако на практике такого достичь невозможно [14].

Таким образом, критерий оптимизации релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения можно сформулировать следующим образом:

- критерию интенсивности восстановления материала после эксплуатации;
- критерию степени восстанавливаемости материала после эксплуатации;
- критерию возможности многократного восстановления материала в процессе эксплуатации;
- временному критерию восстановления функционально-потребительских свойств материала после эксплуатации;
- критерию устойчивости материала к многократному восстановлению после эксплуатации.

ВЫВОДЫ

1. На основе математического моделирования релаксационно-восстановительных процессов полимерных текстильных материалов технического назначения были разработаны пять локальных критериев качественной оценки релаксационных и восстановительных свойств указанных материалов.

2. На основе локальных критериев качественной оценки релаксационных и восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения и с учетом аддитивности вероятностного распределения Коши был разработан комплексный интегрированный критерий оценки релаксационно-восстановительных свойств указанных материалов.

3. Разработанные пять локальных и один интегрированный критерий качественной оценки релаксационных и восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения служат средством сравнительного анализа и технологического отбора указанных материалов, обладающих заданными функциональными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Makarov A. G., Slutsker G.Y., Gofman I.V., Vasil'eva V.V. Initial stage of stress relaxation in oriented polymers. *Physics of the Solid State*. – 2016. Vol. 58, №4. P. 840...846.

2. Makarov A.G., Slutsker G.Y., Drobotun N.V. Creep and fracture kinetics of polymers. *Technical Physics*. – 2015. Vol. 60, № 2. P. 240...245.

3. Gorshkov A.S., Makarov A.G., Romanova A.A., Rymkevich P.P. Modelling of directed polymers deformation processes based on the description of the kinetics of supramolecular structures separated by energy barriers. *Magazine of Civil Engineering*. – 2013. Vol. 44, №9. P. 76...83+103...104.

4. Rymkevich P.P., Romanova A.A., Golovina I.A., Makarov A.G. The energy barriers model for the physical description of the viscoelasticity of synthetic polymers: Application to the uniaxial orientational drawing of polyamide films // *Journal of Macromolecular Science. Part B: Physics*. – 2013. Vol. 52, №12. P.1829...1847.

5. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. A version of modeling of nonlinear-hereditary viscoelasticity of polymer materials//*Mechanics of Solids*. – 2009, №44 (1). P. 122...130.

6. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M.

Predicting the nonlinear hereditary viscoelasticity of polymers // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2007, №48 (6). P. 897...904.

7. Makarov A.G. Determining the analytical correlation between the standardized nuclei of relaxation and creep in textile materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2002, №2. P. 13...17.

8. Stalevich A.M., Makarov A.G. Forecasting the deformation recovery process and the reverse relaxation in polymer materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2002, №3. P. 10...13.

9. Stalevich A.M., Makarov A.G. Determining the inherent viscoelastic relaxation spectrum for synthetic filaments // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2000, №3. P. 8...12.

10. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Modeling of Deformation- Relaxation Processes of Aramid Textile Materials - the Foundation for Analyzing Their Operational Properties// *Fibre Chemistry*. – 2018. Vol. 50, №2. P. 104...107.

11. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A., Konovalov A.S. Methods of simulation and comparative analysis of shadow' and deformation-reducing properties of aramide textile materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2018, №3. P. 253...257.

12. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Wagner V.I. Modeling and forecasting viscoelastic properties of textile materials with a complex structure // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2014, №6. P. 120...124.

13. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. The criteria of optimal selection of mathematical model of textile materials viscoelasticity // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2006, №5. P. 21...25.

14. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. Improving the Competitiveness of Aramid Textile Materials Based on Mathematical Modeling and Analysis of Their Performance Properties // *Fibre Chemistry*. – 2019. №50(6). P. 569...572.

REFERENCES

1. Makarov A. G., Slutsker G.Y., Gofman I.V., Vasil'eva V.V. Initial stage of stress relaxation in oriented polymers. *Physics of the Solid State*. – 2016. Vol. 58, №4. P. 840...846.

2. Makarov A.G., Slutsker G.Y., Drobotun N.V. Creep and fracture kinetics of polymers. *Technical Physics*. – 2015. Vol. 60, № 2. P. 240...245.

3. Gorshkov A.S., Makarov A.G., Romanova A.A., Rymkevich P.P. Modelling of directed polymers deformation processes based on the description of the kinetics of supramolecular structures separated by energy barriers. *Magazine of Civil Engineering*. – 2013. Vol. 44, №9. P. 76...83+103...104.

4. Rymkevich P.P., Romanova A.A., Golovina I.A., Makarov A.G. The energy barriers model for the physical description of the viscoelasticity of synthetic polymers: Application to the uniaxial orientational drawing of polyamide films // *Journal of Macromolecular Science. Part B: Physics.* – 2013. Vol. 52, №12. P.1829...1847.
5. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. A version of modeling of nonlinear-hereditary viscoelasticity of polymer materials//*Mechanics of Solids.* – 2009, №44 (1). P. 122...130.
6. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Predicting the nonlinear hereditary viscoelasticity of polymers // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics.* – 2007, №48 (6). P. 897...904.
7. Makarov A.G. Determining the analytical correlation between the standardized nuclei of relaxation and creep in textile materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2002, №2. P. 13...17.
8. Stalevich A.M., Makarov A.G. Forecasting the deformation recovery process and the reverse relaxation in polymer materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2002, №3. P. 10...13.
9. Stalevich A.M., Makarov A.G. Determining the inherent viscoelastic relaxation spectrum for synthetic filaments // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2000, №3. P. 8...12.
10. Pereborova N.V., Demidov A.V., Makarov A.G., Klimova N.S. Modeling of Deformation- Relaxation Processes of Aramid Textile Materials - the Foundation for Analyzing Their Operational Properties// *Fibre Chemistry.* – 2018. Vol. 50, №2. P. 104...107.
11. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Kozlov A.A., Kononov A.S. Methods of simulation and comparative analysis of shadow' and deformation-reducing properties of aramide textile materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* –2018, №3. P. 253...257.
12. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Wagner V.I. Modeling and forecasting viscoelastic properties of textile materials with a complex structure // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2014, №6. P. 120...124.
13. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. The criteria of optimal selection of mathematical model of textile materials viscoelasticity // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* – 2006, №5. P. 21...25.
14. Pereborova N.V., Makarov A.G., Egorova M.A., Klimova N.S. Improving the Competitiveness of Aramid Textile Materials Based on Mathematical Modeling and Analysis of Their Performance Properties // *Fibre Chemistry.* – 2019. №50(6). P. 569...572.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации. Поступила 23.12.21.