

**КАЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ПОЛИМЕРНЫХ НИТЕЙ НА СТАДИИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА***

**QUALITATIVE ASSESSMENT OF THE OPERATIONAL PROPERTIES
OF POLYMER THREADS AT THE STAGE OF THEIR DESIGN
AND PRODUCTION ORGANIZATION**

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 рассматриваются вопросы проведения качественной оценки эксплуатационных свойств полимерных нитей и текстильных изделий из них на стадии проектирования и организации производства с целью выпуска продукции, обладающей повышенной конкурентоспособностью. Качественная оценка эксплуатационных свойств полимерных нитей и текстильных изделий из них проводится на основе математического моделирования, прогнозирования и системного анализа упругих, вязкоупругих и пластических свойств указанных нитей. Для решения поставленной задачи предлагаются также методы разделения полной деформации и механической работы деформирования полимерных нитей на упругие, вязкоупругие и пластические компоненты, имеющие существенное значение при определении их функциональности.

The article deals with the issues of conducting a qualitative assessment of the operational properties of polymer threads and textile products from them at the design stage and organization of production in order to produce products with increased competitiveness. A qualitative assessment of the performance properties of polymer yarns and textile products from on the basis of mathematical modeling, prediction and system analysis of the elastic, viscoelastic and plastic properties of these yarns is carried out. To solve this problem, methods for dividing the total deformation and the mechanical work of deformation of polymer filaments into elastic, viscoelastic and plastic components, which are essential in determining their functionality are also proposed.

Ключевые слова: качественная оценка, математическое моделирование, численное прогнозирование, текстильные материалы, полимерные нити, упругость, вязкоупругость, пластичность.

Keywords: qualitative assessment, mathematical modeling, numerical prediction, textile materials, polymer threads, elasticity, viscoelasticity, plasticity.

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

Полимерные нити, используемые в промышленности, и в частности швейном производстве, должны обладать достаточной степенью прочности и хорошей растяжимостью. Чем быстрее проходят процессы релаксации и ползучести, тем при шитье образуется меньше складок, а строчка будет менее заметной, что, несомненно, сказывается на внешнем виде готового изделия.

В силу сказанного полимерные нити должны иметь определенные механические свойства.

Всестороннее исследование упругих и вязкоупругих свойств полимерных нитей возможно с позиции нелинейно-наследственной вязкоупругости полимеров на основе математического моделирования деформационных процессов.

Изучение деформационных свойств полимерных нитей в области действия неразрушающих нагрузок, близких к условиям их эксплуатации, состоит из нескольких этапов: проведения экспериментальных исследований и сбора необходимой информации; разработки математической модели деформационных свойств, наиболее адекватно отражающей механические свойства рассматриваемой нити; определения вязкоупругих характеристик как параметров предложенной математической модели; прогнозирования деформационных процессов; получения необходимой информации из прогноза, в частности значений упругих, вязкоупругих и пластических компонент деформации и механической работы деформирования.

Разработка математической модели вязкоупругости и определение параметров модели проводятся по конкретным методам [1]. Например, в качестве основы математической модели вязкоупругости полимерных нитей предлагается выбрать нормированный арктангенс логарифма приведенного времени [2].

Прогнозирование деформационных процессов полимерных нитей проведем на основе указанной выше математической модели с использованием интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра [3]:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \int_0^t \varepsilon_\theta \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta \quad (1)$$

для процесса нелинейно-наследственной релаксации и

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \int_0^t \sigma_\theta \varphi'_{\sigma, t-\theta} d\theta \quad (2)$$

для процесса нелинейно-наследственной ползучести,

где ε – деформация, σ – напряжение;

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{ne}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \quad \text{и}$$

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{ns}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right) \quad \text{– нормиро-}$$

ванные функции релаксации и запаздывания; t – время, $1/b_{ne}$ и $1/b_{ns}$ – параметры интенсивности; τ_ε и τ_σ – времена релаксации и запаздывания; E_0 – модуль упругости; E_∞ – модуль вязкоупругости; D_0 – начальная податливость; D_∞ – предельная равновесная податливость;

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{ne}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{1}{b_{ne}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right) \quad \text{и}$$

$$W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{ns}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} = \frac{1}{b_{ns}} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\sigma} \right) \right) \quad \text{–}$$

аргументы-функционалы;

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{ne}} \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t}^2} \frac{1}{t} \quad \text{и}$$

$$\varphi'_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \frac{1}{b_{ns}} \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \frac{1}{t} \quad \text{– интеграль-}$$

ные ядра релаксации и ползучести; t_1 – базовое время.

Метод разделения удельной механической работы деформирования [4] на упругую $a_{i0} = 0,5 E_0^{-1} \sigma_i^2$ и вязкоупруго-пластическую $a_{it} = a_t - a_{t0}$ компоненты применим к полиэфирной нити,

$$a_t = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma_t d\varepsilon = 0,5 E_0 \varepsilon_t^2 - \dot{\varepsilon} (E_0 - E_\infty) \int_0^t \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{\varepsilon s} ds dt \quad (3)$$

произведенной ОАО "Петронить" (г. Санкт-Петербург).

Упругая компонента относительной механической работы a_{t0}/a_t определялась по процессу растяжения по формуле

$$\frac{a_{t0}}{a_t} = \frac{\varepsilon_t^2 + (1-c)^2 \left(\int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{ES} ds \right)^2 + 2\varepsilon_t (1-c) \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{ES} ds}{\varepsilon_t^2 + 2\varepsilon_t (1-c) \int_0^t \int_0^t \varepsilon_{t-s} \varphi'_{ES} ds dt}, c = E_\infty/E_0. \quad (4)$$

Упругой и вязкоупругопластической компонентам механической работы деформирования соответствуют упругая ε_{t0} и вязкоупругопластическая ε_{t1} компоненты полной деформации ε_t .

Относительные показатели упругой a_{t0}/a_t и вязкоупругопластической a_{t1}/a_t компонент механической работы деформирования полиэфирной нити ($T = 20^\circ\text{C}$, скорость деформирования $\dot{\varepsilon} = 0,083 \text{ c}^{-1}$) приведены на рис. 1, откуда видно, что с ростом деформации относительная доля упругой компоненты механической работы падает, а относительная доля вязкоупругопластической компоненты возрастает [5].

Разложение механической работы деформирования на компоненты важно при исследовании влияния внешних механических воздействий на полимерные нити, применяемые в материалах, используемых в качестве составляющих элементов защитных конструкций [6].

Как видно из графика, при малой деформации (2%) преобладают упругие компоненты деформации и механической работы. Доля вязкоупругопластической компоненты механической работы в этом случае не очень значительна и составляет величину порядка 20% [7].

В то же время с увеличением деформации (6%) вязкоупругопластические компоненты механической работы деформирования возрастают, составляя величину около половины от всей затраченной механической энергии [8].

Исследование вязкоупругопластической компоненты механической работы и деформации имеет значение, например, для того, чтобы ответить на вопрос, насколько защитный материал может

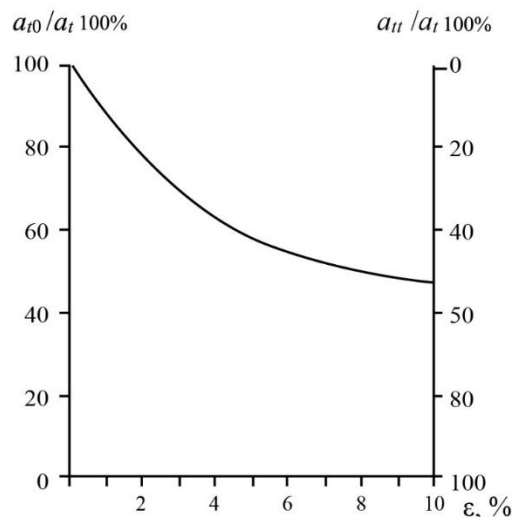


Рис. 1

погасить ударное механическое воздействие.

В этом смысле следует положительно отметить увеличение доли вязкоупругопластической компоненты механической энергии деформирования при увеличении деформации [9].

В то же время при небольшой деформации преобладание упругих компонент деформации и энергии деформирования приводит к тому, что материал хорошо восстанавливается и пригоден для дальнейшего использования [10].

Таким образом, материалу для возвращения в исходное состояние в силу закона сохранения энергии потребуются передать из внешней среды тем больше (в процентном отношении) энергии, чем на большую величину его деформировали.

С другой стороны, данный факт говорит об усилении роли вязкоупругого фактора по мере увеличения деформации [11].

Полная деформация ε_t может быть разложена на три основные компоненты деформации: упругую $\varepsilon_y = \varepsilon_{t0}$, высокоэластическую (вязкоупругую) ε_ε и пластическую (вязкую) ε_{nl} [12].

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t0} + \varepsilon_\varepsilon + \varepsilon_{nl}. \quad (5)$$

Как было видно, процесс разделения деформации на составные части достаточно сложен.

Методы выделения упругой компоненты деформации могут быть основаны либо на использовании экспериментальной диаграммы растяжения, либо на прогнозе – численном решении уравнения нелинейно-наследственной вязкоупругости (1).

При этом оставшаяся поглощаемая компонента деформации ε_{tt} представляет собой, по сути, сумму высокоэластической и пластической компоненты [13];

$$\varepsilon_{tt} = \varepsilon_\varepsilon + \varepsilon_{nl}. \quad (6)$$

Компонента высокоэластической деформации ε_ε (так же как и упругая компонента ε_{t0}) является обратимой, а пластическая компонента ε_{nl} – необратимой.

Следовательно, полную деформацию можно разделить на обратимую и необратимую компоненты следующим образом [14]:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{обр} + \varepsilon_{необр}, \quad (7)$$

где

$$\varepsilon_{обр} = \varepsilon_{t0} + \varepsilon_\varepsilon \quad (8)$$

– обратимая деформация;

$$\varepsilon_{необр} = \varepsilon_{nl} \quad (9)$$

– необратимая деформация.

Следует заметить, что методы аналитического описания деформационных свойств полимерных нитей, у которых проявляются вязкоупругие свойства в широком диапазоне деформирования, зачастую не учитывают необратимую компоненту дефор-

мации по следующим двум причинам: во-первых, при деформировании доминирующую роль играют вязкоупругие свойства, а не пластические; во-вторых, учет необратимой компоненты деформации заметно усложняет процедуру составления уравнений наследственного типа [15].

В Ы В О Д Ы

Показано, что качественная оценка эксплуатационных свойств полимерных нитей и изделий из них может быть успешно осуществлена на основе математического моделирования, прогнозирования и системного анализа упругих, вязкоупругих и пластических свойств указанных нитей.

Разработаны методы разделения полной механической работы деформирования и соответствующей ей деформации на упругообратимые и вязкоупругопластические компоненты, которые предлагается использовать как при расчетах эксплуатации полимерных нитей в динамических режимах деформирования, так и для оценки способности текстильных материалов сопротивляться механическим воздействиям и восстанавливать первоначальную форму в процессе эксплуатации.

Качественную оценку эксплуатационных свойств полимерных нитей, а также изделий из них необходимо проводить на стадии их проектирования и организации производства с целью разработки текстильной продукции, обладающей повышенной конкурентоспособностью, что особенно важно в период действия международных санкций.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Вагнер В.И., Егоров И.М., Литвинов А.М., Козлов А.А. Оптимизация моделирования деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 10...12.
2. Козлов А.А. Моделирование эластических свойств полиэфирных крученых текстильных нитей // Химические волокна. 2022. № 2. С. 64...66.
3. Егорова М.А., Козлов А.А. Системный анализ деформационных режимов эксплуатации арамидных текстильных материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 80...83.

4. *Киселев С.В.* Вычисление энергии активации деформационных процессов полимерных волокнистых материалов в режимах релаксации и ползучести // *Химические волокна*. 2022. № 2. С. 84...86.
5. *Киселев С.В., Козлов А.А.* Компьютерное прогнозирование релаксационных и деформационных спектров полимерных текстильных материалов // *Химические волокна*. 2022. № 3. С. 13...16.
6. *Киселев С.В.* Вариант математического моделирования деформационных свойств полимерных текстильных нитей // *Химические волокна*. 2022. № 3. С. 43...46.
7. *Егорова М.А., Егоров И.М.* Компьютерное прогнозирование спектрально-энергетических характеристик полимерных текстильных тканей // *Химические волокна*. 2022. № 3. С. 34...37.
8. *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.
9. *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.
10. *Вагнер В.И., Киселев С.В., Козлов С.В.* Разработка методов моделирования эластических свойств крученых текстильных нитей // *Изв. вузов. Технология легкой промышленности*. 2022. № 3. С. 56...62.
11. *Козлов А.А.* Моделирование эластических свойств крученых текстильных нитей // *Дизайн. Материалы. Технология*. 2022. № 1. С. 88...96.
12. *Егорова М.А., Егоров И.М.* Системный анализ деформационных процессов арамидных материалов // *Дизайн. Материалы. Технология*. 2022. № 1. С. 136...143.
13. *Киселев С.В.* Автоматизация контроля вязкоупругих характеристик полимерных тканей на основе компьютерного прогнозирования деформационных процессов // *Дизайн. Материалы. Технология*. 2022. № 1. С. 144...153.
14. *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.
15. *Киселев С.В., Козлов А.А.* Цифровизация прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов // *Вестник СПГУТД. Серия 4. Промышленные технологии*. 2022. № 2. С. 10...15.
2. *Kozlov A.A.* Modeling of elastic properties of polyester twisted textile threads // *Chemical fibers*. 2022, No. 2. P. 64...66.
3. *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.
4. *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.
5. *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.
6. *Kiselev S.V.* A variant of mathematical modeling of the deformation properties of polymer textile yarns // *Chemical fibers*. 2022. No. 3. P. 43...46.
7. *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.
8. *Kiselev S.V., Kozlov A.A., Egorov I.M.* Computer prediction of deformation modes of geotextile nonwoven materials' operation // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. No. 3. P. 214 ... 220.
9. *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.
10. *Vagner V.I., Kiselev S.V., Kozlov S.V.* Acoust. Development of methods for modeling the elastic properties of twisted textile threads // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Light industry technology*. 2022. No. 3. P. 56...62.
11. *Kozlov A.A.* Modeling of elastic properties of twisted textile threads // *Design. Materials. Technology*. 2022. No. 1. P. 88...96.
12. *Egorova M.A., Egorov I.M.* System analysis of deformation processes of aramid materials // *Design. Materials. Technology*. 2022. No. 1. P. 136...143.
13. *Kiselev S.V.* Automation of control of viscoelastic characteristics of polymeric fabrics based on computer prediction of deformation processes // *Design. Materials. Technology*. 2022. No. 1. P. 144...153.
14. *Kozlov A.A.* Comprehensive study of the functional properties of textile materials based on mathematical modeling of operational processes // *Vestnik of SPSUTD. Series 4. Industrial technologies*. 2022. No. 1. P. 129...137.
15. *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.

REFERENCES

1. *Vagner V.I., Egorov I.M., Litvinov A.M., Kozlov A.A.* Russ. Optimization of modeling of deformation modes of operation of polymeric fibrous materials // *Chemical fibers*. 2022. No. 2. P. 10...12.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации СПГУТД. Поступила 03.05.23.