

УДК 539.434:677.494

**МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И КАЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА
РЕЛАКСАЦИОННО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ***

**METHODS OF MATHEMATICAL MODELING
AND QUALITATIVE ANALYSIS
OF RELAXATION-DEFORMATION PROCESSES
OF ARAMIDE TEXTILE MATERIALS**

Н.В. ПЕРЕБОРОВА, А.В. ДЕМИДОВ, А.Г. МАКАРОВ, Н.С. КЛИМОВА, Е.К. ВАСИЛЬЕВА
N.V. PEREBOROVA, A.V. DEMIDOV, A.G. MAKAROV, N.S. KLIMOVA, E.K. VASILEVA

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

В статье описываются методы математического моделирования и качественного анализа релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов, лежащие в основе повышения конкурентоспособности и улучшения эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств указанных материалов.

In the article methods of mathematical modeling and qualitative analysis of relaxation-deformational processes of aramid textile materials are described, which underlie the increase of competitiveness and improvement of the operational-consumer and functional properties of these materials.

Ключевые слова: арамидные материалы, текстильные материалы, моделирование, деформация, релаксация, функциональное назначение, эксплуатационные свойства, компьютерное прогнозирование.

Keywords: aramid materials, textile materials, modeling, deformation, relaxation, functional purpose, operational properties, computer prediction.

Для проектирования новых арамидных материалов, обладающих требуемыми функциональными и эксплуатационно-потребительскими свойствами, необходимо

прежде всего разработать теорию качественной оценки указанных свойств, которая, в свою очередь, должна опираться на математические модели физико-механи-

* Работа финансировалась в рамках выполнения базовой части государственного задания Министерства образования и науки РФ, Проект № 11.4696.2017/8.9.

ческих свойств. В теории вязкоупругости полимерных материалов, к классу которых относятся арамидные материалы, основополагающими физико-механическими процессами являются релаксационные и деформационные процессы. При моделировании релаксационных процессов за основу берут приложенную деформацию, исследуя изменение напряжения в материале. При моделировании деформационных процессов за основу берут приложенное напряжение, исследуя изменение деформации материала [1].

Таким образом, для проведения анализа функциональных и эксплуатационно-потребительских свойств арамидных текстильных материалов необходимо:

- разработать математические модели их деформационно-релаксационных свойств;
- разработать методы определения деформационно-релаксационных параметров-характеристик указанных материалов;
- разработать критерии качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов.

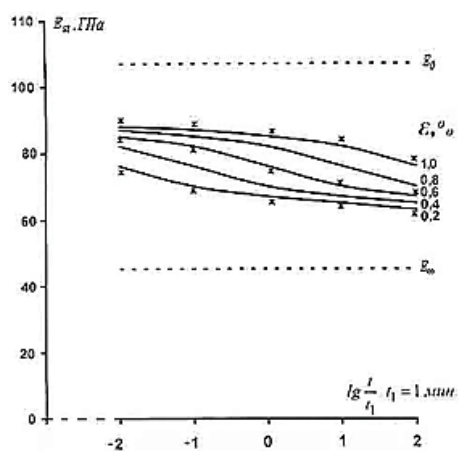


Рис. 1

Аналогично разработку математической модели деформационных свойств арамидных текстильных материалов проводили с учетом краткосрочных тестовых экспериментальных исследований изучаемых материалов в режиме ползучести. Результатом экспериментальных исследований в режиме ползучести являются кривые "семейства" ползучести (то есть временные зависимости деформации ε от приложен-

Разработку математической модели релаксационных свойств арамидных текстильных материалов проводили с учетом краткосрочных тестовых экспериментальных исследований изучаемых материалов в режиме релаксации напряжения. Результатом экспериментальных исследований в режиме релаксации напряжений являются кривые "семейства" релаксации (то есть временные зависимости напряжения σ от приложенной деформации ε). После деления экспериментально полученных значений напряжений на соответствующие значения выбранных деформаций указанные "семейства" релаксации перестраиваются в "семейства" значений модуля релаксации $E_{et} = \sigma/\varepsilon$. Пример "семейства" модуля релаксации арамидной нити СВМ линейной плотности 0,08 Ктекс, произведенной на ОАО "Тверьхимволокно", приведен на рис. 1 ("семейство" значений модуля релаксации нити СВМ линейной плотности 0,08 Ктекс при температуре 20°C; сплошные линии – эксперимент, звездочки – расчет).

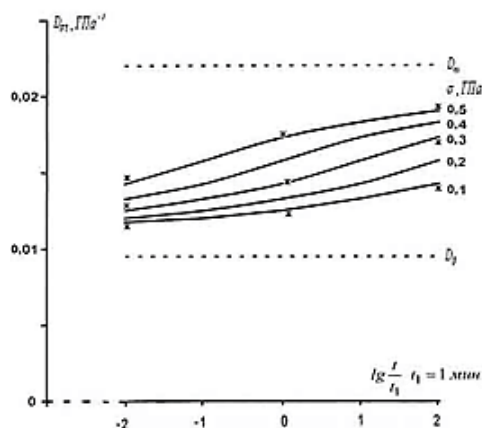


Рис. 2

ного напряжения σ). После деления экспериментально полученных значений деформаций на соответствующие значения выбранных напряжений указанные "семейства" ползучести перестраиваются в "семейства" значений податливости $D_{et} = \varepsilon/\sigma$. Пример "семейства" податливости арамидной нити СВМ линейной плотности 0,08 Ктекс приведен на рис. 2 ("семейство" зна-

чений податливости нити СВМ линейной плотности 0,08 Ктекс при температуре 20°C; сплошные линии – эксперимент, звездочки – расчет).

Математическое моделирование релаксации изучаемых арамидных материалов проводили на основе принципа деформационно-временной аналогии с использованием для аппроксимации модуля релаксации [2]:

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

нормированной функции арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), которая положительно себя зарекомендовала при моделировании релаксации текстильных материалов сложной макроструктуры, каковыми являются изучаемые материалы, изготовленные из арамидных нитей и волокон [3]:

$$\phi_{\text{et}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{\text{н}\varepsilon}} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right). \quad (2)$$

Обоснованность выбора функции НАЛ заключается в том, что она характеризует вероятностное распределение Коши, обладающее тем важным свойством, что распределение суммы случайных величин, подчиняющихся закону Коши, также подчинено этому закону [4].

Текстильные объекты сложной макроструктуры типа арамидных лент, тканей и шнуров можно считать условно состоящими из суммы объектов простой макроструктуры – нитей (а сами нити – из волокон), поэтому математическое моделирование процесса релаксации напряжения для них желательно проводить на основе функции НАЛ [5].

Правильность выбора математической модели релаксации в виде функции НАЛ подтверждает близость расчетных значений модуля релаксации к соответствующим экспериментальным кривым. Расчетные значения модуля релаксации (рис. 1), вычисленные по математической модели (1), (2), нанесены на соответствующие экспериментальные графики [6].

Аналогично математическое моделирование ползучести изучаемых текстильных

материалов проводили на основе принципа сило-временной аналогии с использованием для аппроксимации податливости [7]:

$$D_{\text{ст}} = D_0 + (D_\infty - D_0)\phi_{\text{ст}} \quad (3)$$

также нормированной функции НАЛ, которая в этом случае имеет вид:

$$\phi_{\text{ст}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{\text{н}\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_\sigma} \right). \quad (4)$$

Правильность выбора математической модели ползучести в виде функции НАЛ подтверждает близость расчетных значений податливости к соответствующим экспериментальным кривым. Расчетные значения податливости (рис. 2), вычисленные по математической модели (3), (4), нанесены на соответствующие экспериментальные графики [8].

Отличие предложенной математической модели ползучести от аналогичных известных математических моделей ползучести состоит в том, что времена запаздывания τ_σ задаются в виде кусочно-линейной непрерывной функции, зависящей от значений приложенного напряжения, что упрощает процесс прогнозирования, не влияя существенным образом на его точность [9].

В приведенных формулах (1)...(4) использованы следующие обозначения: t – время; $b_{\text{н}\varepsilon}$ – параметр интенсивности процесса релаксации; $b_{\text{н}\sigma}$ – параметр интенсивности процесса ползучести; τ_ε – время релаксации (время, за которое "отрелаксирует" половина всех "релаксирующих" частиц при величине деформации ε); τ_σ – время запаздывания (время, за которое осуществится половина конформационных переходов "запаздывающих" частиц при величине напряжения σ); $E_{\text{et}} = \sigma/\varepsilon$ – модуль релаксации; E_0 – модуль упругости; E_∞ – модуль вязкоупругости; $D_{\text{ст}} = \varepsilon/\sigma$ – податливость; D_0 – начальная податливость; D_∞ – предельная равновесная податливость; ε – деформация; σ – напряжение.

Разработанные методы определения релаксационных и деформационных параметров-характеристик и методы прогнозирования релаксационных и деформационных процессов арамидных текстильных материалов и изделий служат практической основой для улучшения качества указанных материалов и повышения их конкурентоспособности.

Благодаря компьютеризации методов качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий появился действенный механизм их практического применения с целью оценки уровня потребительского соответствия, а также расширения функциональности и повышения качества исследуемых материалов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате исследований

- разработаны математические модели релаксационных процессов арамидных текстильных материалов и изделий, наилучшим образом отражающие их функциональное назначение;

- разработаны математические модели деформационных процессов арамидных текстильных материалов и изделий, наилучшим образом отражающие их эксплуатационно-потребительское назначение;

- предложены методы определения релаксационных параметров-характеристик арамидных текстильных материалов и изделий, которые являются основой для проведения качественного анализа их функциональных свойств;

- предложены методы определения деформационных параметров-характеристик арамидных текстильных материалов и изделий, которые являются основой для проведения качественного анализа их эксплуатационно-потребительских свойств;

- компьютерная реализация методов определения релаксационных и деформационных параметров-характеристик и методов прогнозирования релаксационных и деформационных процессов арамидных

текстильных материалов послужила практической основой для улучшения качества указанных материалов и повышения их конкурентоспособности;

- компьютеризация методов качественной оценки эксплуатационно-потребительских и функциональных свойств арамидных текстильных материалов и изделий позволяет практически оценить уровень потребительского соответствия, а также расширения функциональности и повышения качества исследуемых материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Исследование изменений деформационных свойств полиэфирных нитей в зависимости от степени крутки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 4. С. 9...13.

2. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Определение механических характеристик текстильных материалов при переменной температуре // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 6. С. 14...19.

3. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Вариант математического моделирования деформационных процессов синтетических нитей // Химические волокна. – 2007, № 6. С. 49...52.

4. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Демидов А.В., Вагнер В.И. Спектральный анализ релаксационных свойств полимерных нитей аморфно-кристаллического строения // Химические волокна. – 2013, № 5. С. 44...47.

5. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Основы спектрально-временного анализа релаксационных и деформационных свойств полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2014, Т.23, № 1. С. 19...23.

6. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Гофман И.В., Васильева В.В. Начальная стадия релаксации напряжения в ориентированных полимерах // Физика твердого тела. – Том 58, № 4. С. 814...820.

7. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Егорова М.А., Ледов Д.С., Бусыгин К.Н., Коновалов А.С. Методология спектрального моделирования деформационно-релаксационных процессов полимерных материалов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2015, Т.30, № 4. С. 7...16.

8. Макаров А.Г., Шванкин А.М. Сравнительный анализ физико-механических свойств арамидных материалов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2016, Т.31, № 1. С. 22...27.

9. Шванкин А.М., Егоров И.М., Егорова М.А., Козлов А.А. Математическое моделирование деформационных процессов арамидных материалов

// Вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. – 2016, № 1. С. 10...14.

REFERENCES

1. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Issledovanie izmenenij deformacionnyh svojstv poliefirnyh nitej v zavisimosti ot stepeni krutki // *Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti.* – 2006, № 4. S. 9...13.

2. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Opredelenie mehanicheskikh harakteristik tekstilnyh materialov pri peremennoj temperature // *Izv. vuzov. Tehnologiya tekstilnoj promyshlennosti.* – 2006, № 6. S. 14...19.

3. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Variant matematicheskogo modelirovaniya deformacionnyh processov sinteticheskikh nitej // *Himicheskie volokna.* – 2007, № 6. S. 49...52.

4. Makarov A.G., Pereborova N.V., Demidov A.V., Vagner V.I. Spektralnyj analiz relaksacionnyh svojstv polimernyh nitej amorfno-kristallicheskogo stroeniya // *Himicheskie volokna.* – 2013, № 5. S. 44...47.

5. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Osnovy spektralno-vremennogo analiza relaksacionnyh i deformacionnyh svojstv polimernyh materialov tekstilnoj i legkoj

promyshlennosti // *Izv. vuzov. Tehnologiya legkoj promyshlennosti.* – 2014, T.23, № 1. S. 19...23.

6. Makarov A.G., Slucker G.Ya., Gofman I.V., Vasileva V.V. Nachalnaya stadiya relaksacii napryazheniya v orientirovannyh polimerah // *Fizika tverdogo tela.* – Tom 58, № 4. S. 814...820.

7. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Ledov D.S., Busygin K.N., Konvalov A.S. Metodologiya spektralnogo modelirovaniya deformacionno-relaksacionnyh processov polimernyh materialov // *Izv. vuzov. Tehnologiya legkoj promyshlennosti.* – 2015, T.30, № 4. S. 7...16.

8. Makarov A.G., Shvankin A.M. Sravnitelnyj analiz fiziko-mehanicheskikh svojstv aramidnyh materialov // *Izv. vuzov. Tehnologiya legkoj promyshlennosti.* – 2016, T.31, № 1. S. 22...27.

9. Shvankin A.M., Egorov I.M., Egorova M.A., Kozlov A.A. Matematicheskoe modelirovanie deformacionnyh processov aramidnyh materialov // *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gos. un-ta tehnologii i dizajna. Seriya 1. Estestvennye i tehnicheckie nauki.* – 2016, №1. S. 10...14.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации СПбГУПТД. Поступила 04.04.18.