

УДК 539.434:677.494

**КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ
ДЕФОРМАЦИОННО-РЕЛАКСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
АРАМИДНЫХ ШНУРОВ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ***

**QUALITY ANALYSIS
OF DEFORMATION-RELAXATION PROPERTIES
OF ARAMID CORDS MOUNTAIN RESCUE APPOINTMENTS**

А.Г. МАКАРОВ, Н.В. ПЕРЕБОРОВА, М.А. ЕГОРОВА, И.М. ЕГОРОВ
A.G. MAKAROV, N.V. PEREBOROVA, M.A. EGOROVA, I.M. EGOROV

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

В статье рассматриваются вопросы качественного анализа деформационно-релаксационных свойств текстильных арамидных шнуров, применяемых при спасении людей при пожарах, в горах и в шахтах. Указанные материалы обладают как повышенной прочностью, так и большой устойчивостью к температурным воздействиям. Качественный анализ деформационно-релаксационных свойств арамидных шнуров проводился на основе математического моделирования процессов релаксации и ползучести с применением вычислительных технологий.

The article deals with the qualitative analysis of strain-relaxation properties of aramid textile cords used in rescuing people from fires in the mountains and in the mines. These materials have as high strength and high resistance to temperature influences. Qualitative analysis of strain-relaxation properties of aramid cords is based on mathematical modeling of relaxation processes and creep with computing technology.

Ключевые слова: деформация, релаксация, арамидные шнуры, прогнозирование, математическое моделирование, горноспасательное оборудование.

Keywords: deformation, relaxation, aramid cords, forecasting, mathematical modeling, mine-rescue equipment.

* Работа финансировалась в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ. Проект № 11.4696.2017/БЧ.

Для сравнительного анализа и прогнозирования деформационных свойств арамидных материалов необходима разработка адекватной математической модели на основе физически обоснованного аналитического описания вязкоупругости. Особую ценность имеет решение задачи прогнозиро-

вания деформационных процессов для таких материалов, когда помимо сопоставления их механических свойств, приходится учитывать условия их эксплуатации [1].

Технические характеристики арамидных шнуров, изучаемые в статье, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Название	Диаметр, мм	Линейная плотность, ктекс	Разрывная нагрузка, кН	Удлинение при разрыве, %	Компонентный состав
ШТВ	4	34,2	15,1	4,0	тварон
ШТР	3,5	21,1	7,2	4,3	терлон
ШТХ	6	43,6	22,8	4,2	технора
ШКВ	5	74,1	72,3	4,4	кевлар

Математическое моделирование вязкоупругости арамидных текстильных материалов проводили на основе нормированной функции арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), которая положительно себя зарекомендовала при моделировании вязкоупругости текстильных материалов сложной макроструктуры [2]. Она имеет вид:

– для процесса релаксации

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

– для процесса ползучести

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

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 [3]. Текстильные же объекты сложной макроструктуры типа тканей и шнуров можно считать условно состоящими из "суммы" объектов простой макроструктуры – нитей, моделирование релаксации и ползучести которых проводится также на основе функции НАЛ.

С учетом сказанного математические модели релаксации (3) и ползучести (4)

имеют вид [4]:

$$E_{\text{ет}} = E_0 - (E_0 - E_{\infty}) \varphi_{\text{ет}}, \quad (3)$$

$$D_{\text{от}} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \varphi_{\text{от}}, \quad (4)$$

где t – время; $1/b_{\text{н}\varepsilon}$ – параметр интенсивности процесса релаксации; $1/b_{\text{н}\sigma}$ – 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); $E_{\text{ет}} = \sigma/\varepsilon$ – модуль релаксации; E_0 – модуль упругости; E_{∞} – модуль вязкоупругости; $D_{\text{от}} = \varepsilon/\sigma$ – податливость; D_0 – начальная податливость; D_{∞} – предельная равновесная податливость; ε – деформация; σ – напряжение.

Использование нормированной функции НАЛ в качестве основы математической модели вязкоупругости позволяет с достаточной степенью точности моделировать деформационные свойства арамидных материалов.

Прогнозирование деформационных и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов целесообразно проводить на основе известных интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра (5)

– для процесса нелинейно-наследственной релаксации и (6) – для процесса нелинейно-наследственной ползучести [5]:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \int_0^t \varepsilon_\theta \Phi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta, \quad (5)$$

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \int_0^t \sigma_\theta \Phi'_{\sigma, t-\theta} d\theta. \quad (6)$$

Преимущество применения такого моделирования деформационных процессов, как следствие математической модели (1)...(4), состоит в возможности расширения области доверительного прогнозирования в сторону "больших" (длительные процессы) и в сторону "малых" времен (кратковременные процессы) с уменьшением погрешности прогноза за счет снижения влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса, что обусловлено замедленной сходимостью функции НАЛ к своим асимптотическим значениям.

Для повышения точности прогнозирования применяли методы вычисления несобственных нелинейно-наследственных интегралов (5), (6), основанные на неравномерном разбиении временной шкалы с учетом специфики рассматриваемого процесса. При прогнозировании активных (быстропротекающих) процессов, характеризующихся ростом скорости деформирования, временная шкала разбивалась в возрастающей геометрической прогрессии с целью наилучшего учета влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса. При прогнозировании длительных процессов, характеризующихся снижением скорости деформирования, временная шкала разбивалась в убывающей геометрической прогрессии с целью наилучшего учета длительных деформационных воздействий [6].

Использование математической модели с функцией НАЛ для описания деформационных процессов арамидных текстильных материалов позволяет с достаточной степенью точности прогнозировать деформационные свойства указанных материалов [7].

Системный анализ деформационных процессов арамидных материалов позволяет ответить на многие вопросы, касающиеся упругих и вязкоупруго-пластических свойств изучаемых материалов. Например, арамидные ткани, предназначенные для индивидуальной бронезащиты, должны обладать не только большой степенью жесткости, которая свойственна всем арамидным материалам, но и определенной долей пластичности, чтобы максимально гасить вредные механические воздействия. Здесь первостепенную роль начинает играть структура арамидной ткани, способ переплетения нитей, геометрическая структура материала, количество слоев ткани [8].

Арамидные текстильные материалы, применяемые в качестве арматуры корпусов космических летательных аппаратов, должны обладать несколько иными характеристиками. Здесь на первое место выходит их огнестойкость и возможность наиболее длительного сохранения упругих механических свойств при повышенной температуре [9].

Арамидные шнуры, применяемые при спасении людей из высотных зданий при пожаре, должны обладать определенными упругими и вязкоупругопластическими свойствами наряду с огнестойкостью [10].

Арамидным текстильным материалам свойственно также такое явление, как усадка с ростом температуры и последующее восстановление при остывании. Если, например, металлы расширяются при нагревании, то арамидные материалы ведут себя противоположным образом – они усаживаются. Физическая суть этого интересного явления заключается в том, что в нормальных условиях (при комнатной температуре) макромолекулы арамидных нитей находятся в транс-конформации, то есть геометрически представляют собой более или менее распрямленные отрезки. С увеличением температуры эти макромолекулы постепенно меняют свою геометрическую структуру, переходя к цис-конформации, которая представляет собой уже не прямые отрезки, а волнообразную структуру.

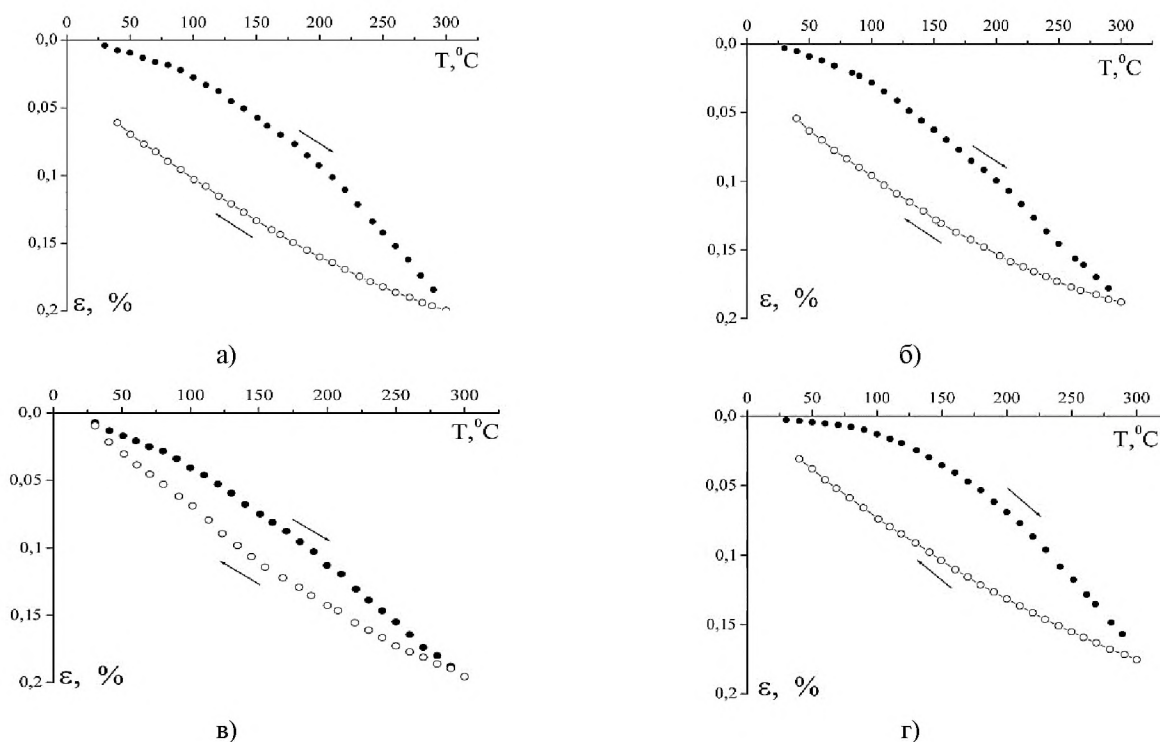


Рис. 1

Явление усадки, как показали эксперименты (рис. 1 – экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления арамидных текстильных шнуров: а – ШКВ (кевлар), б – ШТВ (тварон), в – ШТР (терлон), г – ШТХ (технора)), является обратимым, то есть при остывании макромолекулы снова стремятся полностью или частично перейти к транс-конформации [11].

Как видно из рис. 1, полной обратимостью усадки из представленных материалов обладает только шнур из терлона, остальные же шнуры восстанавливаются не полностью [12].

ВЫВОДЫ

1. Системный анализ деформационных процессов арамидных текстильных материалов позволяет ответить на многие вопросы, касающиеся упругих и вязкоупруго-пластических свойств изучаемых материалов, что является важным для оценки функциональных и эксплуатационных свойств указанных материалов.

2. Разработанные методы сравнительного анализа деформационных свойств ара-

мидных текстильных материалов позволяют выявить взаимосвязи указанных свойств со структурой.

3. Системный анализ деформационных свойств арамидных текстильных материалов позволяет выявить роль влияния геометрических размеров, линейной плотности, способа переплетения нитей и компонентного состава на их деформационные свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.Г., Сталевич А.М. Прогнозирование восстановительного деформационного процесса и обратной релаксации полимерных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 3. С. 10...13.
2. 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.
3. Демидов А.В., Макаров А.Г., Сталевич А.М. Критерии оптимального выбора математической модели вязкоупругости текстильных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006, № 5. С. 18...22.
4. Макаров А.Г., Демидов А.В., Новоселова А.Г., Сталевич А.М. Методы спектрального моделирования механической релаксации текстильных матери-

алов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, № 1. С. 15...19.

5. Дроботун Н.В., Слуцкер Г.Я., Макаров А.Г. Метод расчета компрессионного трикотажа для лечения варикозного расширения вен // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2009, № 3. С. 34...37.

6. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Терушкина О.Б., Дроботун Н.В. Физический анализ кинетики ползучести мононитей из полипропилена и поливинилиденфторида // Дизайн. Материалы. Технология. – 2012, № 3 (23). С. 41...44.

7. Головина В.В., Рымкевич П.П., Макаров А.Г., Романова А.А. Прогнозирование деформационных и релаксационных процессов в одноосноориентированных полимерных материалах // Химические волокна. – 2013, № 6. С. 33...40.

8. Макаров А.Г., Переборова Н.В., Вагнер В.И., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Основы математического моделирования релаксации и ползучести полимерных материалов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2013, № 3 (21). С. 27...31.

9. 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, № 1 (23). С. 19...23.

10. Рымкевич П.П., Головина В.В., Горшков А.С., Макаров А.Г., Романова А.А. Осреднение физических величин методом нормального распределения // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2015, № 2 (28). С. 98...103.

11. 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, № 4 (30). С. 7...16.

12. Переборова Н.В. Разработка критериев качественной оценки функционально-потребительских свойств продукции текстильной и легкой промышленности с целью управления качеством продукции // Материалы. Дизайн. Технология. – 2015, № 4 (39). С. 98...102.

REFERENCES

1. Makarov A.G., Stalevich A.M. Prognozirovanie vosstanovitel'nogo deformacionnogo processa i obratnoj relaksacii polimernyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2002, № 3. S.10...13.

2. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Issledovanie izmenenij deformacionnyh svojstv polijefimnyh nitej v zavisimosti ot stepeni krutki // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2006, № 4. S. 9...13.

3. Demidov A.V., Makarov A.G., Stalevich A.M. Kriterii optimal'nogo vybora matematicheskoy modeli vjaskouprugosti tekstil'nyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2006, № 5. S.18...22.

4. Makarov A.G., Demidov A.V., Novoselova A.G., Stalevich A.M. Metody spektral'nogo modelirovanija mehanicheskoy relaksacii tekstil'nyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2007, № 1. S. 15...19.

5. Drobotun N.V., Slucker G.Ja., Makarov A.G. Metod rascheta kompressionnogo trikotazha dlja lechenija varikoznogo rasshirenija ven // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2009, № 3. S.34...37.

6. Makarov A.G., Slucker G.Ja., Terushkina O.B., Drobotun N.V. Fizicheskij analiz kinetiki polzuchesti mononitej iz polipropilena i polivinilidenftrida // Dizajn. Materialy. Tehnologija. – 2012, № 3 (23). S.41...44.

7. Golovina V.V., Rymkevich P.P., Makarov A.G., Romanova A.A. Prognozirovanie deformacionnyh i relaksacionnyh processov v одноосноориентированных полимерных материалах // Himicheskie volokna. – 2013, № 6. S. 33...40.

8. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Osnovy matematicheskogo modelirovanija relaksacii i polzuchesti polimernyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2013, № 3 (21). S. 27...31.

9. Makarov A.G., Pereborova N.V., Vagner V.I., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Osnovy spektral'no-vremennogo analiza relaksacionnyh i deformacionnyh svojstv polimernyh materialov tekstil'noj i legkoj promyshlennosti // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2014, № 1 (23). S. 19...23.

10. Rymkevich P.P., Golovina V.V., Gorshkov A.S., Makarov A.G., Romanova A.A. Osrednenie fizicheskikh velichin metodom normal'nogo raspredelenija // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2015, № 2 (28). S. 98...103.

11. Makarov A.G., Pereborova N.V., Egorova M.A., Ledov D.S., Busygin K.N., Konovalov A.S. Metodologija spektral'nogo modelirovanija deformacionno-relaksacionnyh processov polimernyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija legkoj promyshlennosti. – 2015, № 4 (30). S. 7...16.

12. Pereborova N.V. Razrabotka kriteriev kachestvennoj ocenki funkcional'no-potrebitel'skih svojstv produkcii tekstil'noj i legkoj promyshlennosti s cel'ju upravlenija kachestvom produkcii // Materialy. Dizajn. Tehnologija. – 2015, № 4 (39). S. 98...102.

Рекомендована кафедрой интеллектуальных систем и защиты информации СПбГУПТД. Поступила 07.02.17.