DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-5-15-23

Языев С.Б., кандидат технических наук, доцент,
Чепурненко А.С. *, кандидат технических наук, доцент,
Литвинов С.В., кандидат технических наук, доцент,
Донской государственный технический университет, Россия
*Ответственный автор E-mail: anton_chepurnenk@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Аннотация: статья посвящена проблеме обработки экспериментальных кривых ползучести полимеров. Ставится задача определения их реологических характеристик из испытаний на любой из простейших видов деформации. В основу для аппроксимации экспериментальных кривых положено нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича.

Задача нахождения реологических параметров материала решается как задача нелинейной оптимизации. В качестве целевой функции выступает сумма квадратов отклонений экспериментальных значений на кривой ползучести от теоретических. Варьируемыми входными параметрами целевой функции являются начальная релаксационная вязкость η_0^* и модуль скорости m^* . Теоретическая кривая ползучести строится численно с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка. Решение задачи нелинейной оптимизации выполняется в среде Matlab методом внутренней точки. Отыскиваются такие значения η_0^* и m^* , при которых целевая функция принимает минимальное значение.

Для апробации методики была решена обратная задача. При заданных значениях реологических параметров материала построена теоретическая кривая ползучести при изгибе, и по ней найдены значения η_0^* и m^* . Также методика апробирована на экспериментальных кривых релаксации напряжений вторичного поливинилхлорида и кривых ползучести пенополиуретана при чистом сдвиге.

Показано более высокое качество аппроксимации экспериментальных кривых по сравнению с существующими методиками. Разработанная методика позволяет определять реологические характеристики материалов из испытаний на изгиб, центральное растяжение (сжатие), кручение, чистый сдвиг, причем достаточно провести испытание только на один вид деформации, а не серию, как было предложено ранее некоторыми исследователями.

Ключевые слова: ползучесть, релаксация, реологические параметры, изгиб, нелинейная оптимизация, обработка эксперимента, метод наименьших квадратов

Введение

Полимерные материалы, сочетая в себе высокую прочность при малом весе и низкой стоимости, в настоящее время находят все более широкое применение в строительной отрасли. Одним из существенных их недостатков является наличие помимо упругих свойств явно выраженной ползучести. Поэтому определение реологических характеристик полимеров является важной и актуальной задачей.

Существующие методики позволяют определить реологические характеристики из опытов на центральное растяжение (сжатие) [1-4], релаксацию напряжений [5] и чистый сдвиг [6-8], изгиб [9-10], а некоторые подходы для нахождения вязкоупругих констант требуют проведения серии экспериментов [11-13].

Для многих полимерных материалов хорошо согласуется с экспериментальными данными нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича [14-20], которое при одноосном растяжении (сжатии) имеет вид:

$$\frac{\partial \varepsilon^*}{\partial t} = \frac{f^*}{\eta^*}, \quad (1)$$

где ε^* – деформация ползучести, $f^* = \sigma - E_\infty \varepsilon^*$ – функция напряжений, σ – напряжение, E_∞ – модуль высокоэластичности, η^* – релаксационная вязкость, которая вычисляется как:

$$\eta^* = \eta_0^* \exp\left(-\frac{|f^*|}{m^*}\right), \quad (2)$$

где η_0^* – начальная релаксационная вязкость, m^* – модуль скорости.

В частности, данное уравнение используется для описания реологических свойств эпоксидной смолы и полиметилметакрилата [14-18], поливинилхлорида [5], полиэтилена высокой плотности [1, 19], сдвиговой ползучести пенополиуретана при чистом сдвиге [6], различных связующих для армированных пластиков [20]

Нами для обработки кривых ползучести также будет использоваться уравнение Максвелла-Гуревича, но предлагаемая концепция в целом позволяет применять произвольный закон ползучести.

В настоящей статье объектом исследования выступают кривые нелинейной ползучести полимеров, и ставится цель разработать такую методику их обработки, которая бы подходила для любого из простейших видов деформации. В рамкой поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Получение соотношений, устанавливающих связь между прогибом и изгибающим моментом, при испытаниях на изгиб полимерных балок для построения теоретических кривых ползучести при произвольных законах деформирования;

2. Разработка методики и программного обеспечения для обработки кривых ползучести в среде Matlab.

3. Апробация разработанной методики на теоретических и реальных кривых ползучести.

Первая из поставленных задач обусловлена тем, что при изгибе, в отличие от центрального растяжения или сжатия, чистого сдвига, в случае нелинейной ползучести распределение напряжений и деформаций ползучести по высоте сечения также нелинейное, что делает невозможным получение аналитического выражения для зависимости прогиба от времени.

Изгибающий момент при изгибе определяется интегральным соотношением:

$$M = \int_A \sigma y dA, \quad (3)$$

где A – площадь поперечного сечения, σ – напряжение, координата y определяется относительно центра тяжести поперечного сечения.

На основе гипотезы плоских сечений деформации поперечного сечения определяются как:

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho}, \quad (4)$$

где ρ – радиус кривизны изогнутого стержня.

С физической стороны полная деформация представляет сумму упругой деформации и деформации ползучести:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon^*, \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала.

Выразим в (5) напряжение через деформации:

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon^*) = E\left(\frac{y}{\rho} - \varepsilon^*\right). \quad (6)$$

Подставив (6) в (3), получим:

$$M = \frac{EI}{\rho} - M^*, \quad (7)$$

где $I = \int_A y^2 dA$ – осевой момент инерции поперечного сечения, $M^* = E \int_A \varepsilon^* y dA$.

Для прямоугольного сечения величину M^* можно определить по формуле:

$$M^* = Eb \int_{-h/2}^{h/2} \varepsilon^* y dy. \quad (8)$$

Из (7) кривизна элемента определяется по формуле:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M + M^*}{EI}. \quad (9)$$

Определение реологических параметров материала из испытаний на изгиб удобно проводить по схеме чистого изгиба (рис. 1). В этом случае прогиб в середине пролета связан с кривизной элемента в зоне чистого изгиба как:

$$v = \frac{l^2}{8\rho}. \quad (10)$$

Из трех реологических параметров, входящих в нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича: начальной релаксационной вязкости η_0^* , модуля скорости m^* и модуля высокоэластичности E_∞ , наиболее просто определяется величина E_∞ . Для получения решения в конце процесса ползучести достаточно в упругом решении заменить мгновенный модуль упругости E на длительный H , вычисляемый по формуле:

$$H = \frac{E \cdot E_\infty}{E + E_\infty}. \quad (11)$$

Рис. 1. Испытания по схеме чистого изгиба
Fig. 1. Testing according to the scheme of pure bending

Таким образом, зная прогиб в конце процесса ползучести, можно найти длительный модуль H , а затем по известным величинам E и H вычислить E_∞ .

Методы и материалы

Задача определения параметров η_0^* и m^* нами ставится как задача нелинейной оптимизации. Расчет выполняется в среде Matlab с использованием пакета Optimization Toolbox. Входными параметрами целевой функции выступают величины η_0^* , m^* , E , E_∞ , F , l , a , размеры поперечного сечения испытываемого образца, а также 2 вектора, в которых содержатся моменты времени, в которые замерялся прогиб, и соответствующие значения перемещений. Для заданных моментов времени целевая функция, используя входные параметры, строит теоретическую кривую ползучести $v(t)$ и затем возвращает сумму квадратов отклонений теоретических значений от экспериментальных S :

$$S = \sum_{i=1}^n (v_i^{\text{теор}} - v_i^{\text{эксп}})^2. \quad (12)$$

Отыскиваются такие величины η_0^* и m^* , при которых целевая функция, т.е. сумма квадратов отклонений, принимает минимальное значение. Иными словами, используется метод наименьших квадратов, но аналитическое выражение для теоретической кривой ползучести в явном виде отсутствует. Нахождение минимума функции двух переменных производится при помощи метода внутренней точки.

Построение теоретической кривой выполняется численно при помощи метода Рунге-Кутты четвертого порядка. В случае испытаний на изгиб поперечное сечение по высоте разбивается на отрезки Δu . Деформации ползучести для каждого слоя в момент времени $t + \Delta t$ определяются по деформациям и напряжениям в момент времени t в 4 стадии:

$$\varepsilon_{t+\Delta t}^* = \varepsilon_t^* + \frac{\Delta t}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4), \quad (13)$$

где

$$k_1 = f(\varepsilon_t^*), \quad k_2 = f(\varepsilon_t^* + \frac{\Delta t}{2}k_1), \quad k_3 = f(\varepsilon_t^* + \frac{\Delta t}{2}k_2),$$

$$k_4 = f(\varepsilon_t^* + \Delta t k_3), \quad f(\varepsilon^*) = [\sigma - E_\infty \varepsilon^*] \exp\left(\frac{|\sigma - E_\infty \varepsilon^*|}{m^*}\right) / \eta_0^* = [E y / \rho - (E + E_\infty) \varepsilon^*] \exp\left(\frac{|E y / \rho - (E + E_\infty) \varepsilon^*|}{m^*}\right) / \eta_0^*.$$

Для каждой стадии выполняется перерасчет величины $1/\rho$ по формуле (9). Интегрирование в формуле (8) выполняется численно по формуле трапеций. При небольшом количестве экспериментальных точек для построения теоретической кривой вводятся дополнительные промежуточные точки.

Результаты и обсуждения

Для апробации разработанной методики на первом этапе была построена теоретическая кривая ползучести при изгибе для заданных значений η_0^* и m^* , и затем была решена обратная задача нахождения релаксационных констант по построенной кривой. Вычисления выполнялись при $b = 0,5$ см, $h = 2$ см, $F = 0,04$ кН, $a = 10$ см, $l = 50$ см, $E = 3035$ МПа, $E_\infty = 2310$ МПа, $m^* = 4,44$ МПа, $\eta_0^* = 2083$ МПа·сут. Требуемое количество итераций для нахождения решения зависело от начального приближения. Так, при начальных значениях $m^* = 8$ МПа, $\eta_0^* = 10\,000$ МПа·сут потребовалось 37 итераций, и в результате были получены величины $m^* = 4,439$ МПа, $\eta_0^* = 2083,594$ МПа·сут. При сильном отклонении начального приближения от точных значений решение найти не удавалось. На рис. 2 показан график изменения целевой функции в зависимости от параметров m^* и η_0^* . На рис. 3 для наглядности также приведены изолинии одинаковых значений целевой функции. На графике изолиний точка $m^* = 4,44$ МПа, $\eta_0^* = 2083$ МПа·сут отмечена красным крестиком.

Рис. 2. Изменение целевой функции в зависимости от параметров m^* и η_0^*
Fig. 2. The change of the objective function depending on the parameters m^* and η_0^*

Рис. 3. Изолинии равных значений целевой функции
Fig. 3. Isolines of equal values of the objective function

Поскольку реологические константы из испытаний материалов на изгиб ранее не определялись, нами также была выполнена апробация методики на кривых релаксации напряжений для вторичного ПВХ, обработка которых другим методом выполнялась в работе [5]. На рис. 4 приведены экспериментальные кривые релаксации напряжений при различных температурах (отмечены маркерами), их аппроксимация по методике, предложенной в [5], (штриховые линии) и нами (сплошные линии). Из рис. 4 видно, что предлагаемая нами методика при том же законе ползучести обеспечивает более высокое качество аппроксимации.

Рис. 4. Экспериментальные кривые релаксации напряжений вторичного ПВХ и их аппроксимация по методике [5] (штриховые линии) и по методике, предложенной авторами (сплошные линии)
Fig. 4. Experimental stress relaxation curves of secondary PVC and their approximation by the method [5] (dashed lines) and by the method proposed by the authors (solid lines)

Помимо кривых релаксации напряжений для ПВХ нами была выполнена обработка кривых ползучести пенополиуретана при чистом сдвиге, рассмотренных ранее в работе [6]. На рис. 5 приведена одна из экспериментальных кривых ползучести (отмечена треугольными маркерами), а также ее аппроксимация по методике, предложенной в [6] (штриховая линия) и по разработанной нами методике (сплошная линия). В первом случае достоверность аппроксимации R^2 составила 0,9209, а во втором – 0,9736. Таким образом, предлагаемая нами методика позволяет повысить качество аппроксимации.

Рис. 5. Экспериментальная кривая ползучести пенополиуретана при сдвиге и ее аппроксимация
Fig. 5. Experimental shear creep curve of polyurethane foam and its approximation

Выводы

1. Получены уравнения, устанавливающие связь между прогибом полимерной балки и изгибающим моментом для построения теоретических кривых ползучести при изгибе в случае произвольного закона ползучести;
2. Разработана методика и программное обеспечение для обработки кривых ползучести при любом из простейших видов деформации (растяжение-сжатие, изгиб, кручение, сдвиг), позволяющие использовать произвольный закон деформирования;
3. Разработанная методика апробирована на теоретической кривой ползучести при изгибе, а также реальных кривых ползучести при растяжении-сжатии и сдвиге. Предложенный подход к определению реологических параметров материалов показал высокую эффективность по сравнению с существующими методиками. Применение методов нелинейной оптимизации позволяет выполнить обработку кривых ползучести, для которых построение аналитического выражения не представляется возможным. Перспективами развития исследований в данном направлении является апробация нелинейного уравнения Максвелла-Гуревича для не полимерных материалов (бетоны, древесина, металлы и т.д.). Кроме того, представляет интерес определение реологических характеристик из испытаний на кручение, а также сравнение ползучести материалов при растяжении и сдвиге.

Литература

1. Litvinov S.V., Yazyev B.M., Turko M.S. Effecting of Modified HDPE Composition on the Stress-Strain State of Constructions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/463/4/042063/meta>
2. Tezel T., Kovan V., Topal E.S. Effects of the printing parameters on short-term creep behaviors of three-dimensional printed polymers // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 136. № 21. P. 47564.
3. Guangjian Xiang, Deshun Yin, Ruifan Meng, Siyu Lu. Creep model for natural fiber polymer composites (NFPCs) based on variable order fractional derivatives: Simulation and parameter study // Journal of Applied Polymer Science. 2020. Vol. 137. № 24. P. 48796.

4. Amjadi M., Fatemi A. Creep and fatigue behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of temperature, mean stress, frequency, and processing technique // *International Journal of Fatigue*. 2020. Vol. 141. P. 105871.
5. Dudnik A.E., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Determining the rheological parameters of polyvinyl chloride, with change in temperature taken into account // *International Polymer Science and Technology*. 2017. Vol. 44. P. 43 – 48. DOI: 10.1177/0307174X1704400109
6. Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Savchenko A.A. Calculation of Three-Layer Panels with Polyurethane Foam Filler Taking into Account the Rheological Properties of the Middle Layer // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 935. P. 144 – 149. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.935.144
7. Figueira D. et al. Influence of service temperature on shear creep behaviour of a rigid low-density closed-cell PIR foam // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 225. P. 1052 – 1063.
8. Garrido M., Correia J.R., Keller T. Effect of service temperature on the shear creep response of rigid polyurethane foam used in composite sandwich floor panels // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 118. P. 235 – 244.
9. Sá M., Gomes A., Correia J., Silvestre N. Flexural creep response of pultruded GFRP deck panels: Proposal for obtaining full-section viscoelastic moduli and creep coefficients // *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 213 – 224.
10. Mayookh Lal H. et al. Experimental Study on the Flexural Creep Behaviors of Pultruded Unidirectional Carbon/Glass Fiber-Reinforced Hybrid Bars // *Materials*. 2020. Vol. 13. № 4. P. 976.
11. Xu Y. et al. Creep behavior of bagasse fiber reinforced polymer composites // *Bioresource technology*. 2010. Vol. 101. № 9. P. 3280 – 3286.
12. Shojaei A.K., Wedgewood A.R. An anisotropic cyclic plasticity, creep and fatigue predictive tool for unfilled polymers // *Mechanics of Materials*. 2017. Vol. 106. P. 20 – 34.
13. Hanzon D.W. et al. Creep-induced anisotropy in covalent adaptable network polymers // *Soft Matter*. 2017. Vol. 13. № 39. P. 7061 – 7073.
14. Zakhariev G., Khadzhikov L., Marinov P. A rheological model of polymers and glass-reinforced plastics // *Polymer Mechanics*. 1971. Vol. 7. № 5. P. 761 – 775.
15. Trush L., Litvinov S., Zakieva N., Bayramukov S. Optimization of the solution of a plane stress problem of a polymeric cylindrical object in thermoviscoelastic statement // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. Vol. 692. P. 885 – 893. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_95
16. Цыбин Н.Ю., Андреев В.И., Турусов Р.А. Исследование ползучести полимеров в различных условиях деформирования // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2018. № 3. С. 30 – 35.
17. Tsybin N.Y., Turusov R.A., Andreev V.I. Comparison of creep in free polymer rod and creep in polymer layer of the layered composite // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. P. 51 – 58. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.079
18. Chepurnenko V., Yazyev B., Dubovitskaya L. Features of compressed rods calculations with account of initial imperfections and creep effects // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/24/e3sconf_tpacce2020_02003/e3sconf_tpacce2020_02003.html
19. Andreev V.I., Frolova I.I., Sigunova L.Y. Calculation of temperature stresses in polymers in the cycles heating-cooling process // *Material Science Forum*. 2018. Vol. 931. P. 9 – 13.
20. Kuperman A.M., Turusov R.A. Relaxation characteristics of reinforced plastics in tension of ring specimens by split disks // *Mechanics of composite materials*. 2012. Vol. 48. P. 305 – 312.

References

1. Litvinov S.V., Yazyev B.M., Turko M.S. Effecting of Modified HDPE Composition on the Stress-Strain State of Constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 463. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/463/4/042063/meta>
2. Tezel T., Kovan V., Topal E.S. Effects of the printing parameters on short-term creep behaviors of three-dimensional printed polymers. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. 136 (21). P. 47564.
3. Guangjian Xiang, Deshun Yin, Ruifan Meng, Siyu Lu. Creep model for natural fiber polymer composites (NFPCs) based on variable order fractional derivatives: Simulation and parameter study. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. 137 (24). P. 48796.
4. Amjadi M., Fatemi A. Creep and fatigue behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of temperature, mean stress, frequency, and processing technique. *International Journal of Fatigue*. 2020. 141. P. 105871.

5. Dudnik A.E., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Determining the rheological parameters of polyvinyl chloride, with change in temperature taken into account. *International Polymer Science and Technology*. 2017. 44. P. 43 – 48. DOI: 10.1177/0307174X1704400109
6. Yazyev B.M., Chepurnenko A.S., Savchenko A.A. Calculation of Three-Layer Panels with Polyurethane Foam Filler Taking into Account the Rheological Properties of the Middle Layer. *Materials Science Forum*. 2018. 935. P. 144 – 149. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.935.144
7. Figueira D. et al. Influence of service temperature on shear creep behaviour of a rigid low-density closed-cell PIR foam. *Construction and Building Materials*. 2019. 225. P. 1052 – 1063.
8. Garrido M., Correia J.R., Keller T. Effect of service temperature on the shear creep response of rigid polyurethane foam used in composite sandwich floor panels. *Construction and Building Materials*. 2016. 118. P. 235 – 244.
9. Sá M., Gomes A., Correia J., Silvestre N. Flexural creep response of pultruded GFRP deck panels: Proposal for obtaining full-section viscoelastic moduli and creep coefficients. *Composites Part B: Engineering*. 2016. 98. P. 213 – 224.
10. Mayookh Lal H. et al. Experimental Study on the Flexural Creep Behaviors of Pultruded Unidirectional Carbon. Glass Fiber-Reinforced Hybrid Bars. *Materials*. 2020. 13 (4). P. 976.
11. Xu Y. et al. Creep behavior of bagasse fiber reinforced polymer composites. *Bioresource technology*. 2010. 101 (9). P. 3280 – 3286.
12. Shojaei A.K., Wedgewood A.R. An anisotropic cyclic plasticity, creep and fatigue predictive tool for unfilled polymers. *Mechanics of Materials*. 2017. 106. P. 20 – 34.
13. Hanzon D.W. et al. Creep-induced anisotropy in covalent adaptable network polymers. *Soft Matter*. 2017. 13 (39). P. 7061 – 7073.
14. Zakhariev G., Khadzhikov L., Marinov P. A rheological model of polymers and glass-reinforced plastics. *Polymer Mechanics*. 1971. 7 (5). P. 761 – 775.
15. Trush L., Litvinov S., Zakieva N., Bayramukov S. Optimization of the solution of a plane stress problem of a polymeric cylindrical object in thermoviscoelastic statement. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. 692. P. 885 – 893. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_95
16. Cybin N.YU., Andreev V.I., Turusov R.A. Issledovanie polzuchesti polimerov v razlichnyh usloviyah deformirovaniya. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2018. 3. P. 30 – 35. (rus.)
17. Tsybin N.Y., Turusov R.A., Andreev V.I. Comparison of creep in free polymer rod and creep in polymer layer of the layered composite. *Procedia Engineering*. 2016. 153. P. 51 – 58. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.079
18. Chepurnenko V., Yazyev B., Dubovitskaya L. Features of compressed rods calculations with account of initial imperfections and creep effects. *E3S Web of Conferences*. 2020. 164. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/24/e3sconf_tpacce2020_02003/e3sconf_tpacce2020_02003.html
19. Andreev V.I., Frolova I.I., Sigunova L.Y. Calculation of temperature stresses in polymers in the cycles heating-cooling process. *Material Science Forum*. 2018. 931. P. 9 – 13.
20. Kuperman A.M., Turusov R.A. Relaxation characteristics of reinforced plastics in tension of ring specimens by split disks. *Mechanics of composite materials*. 2012. 48. P. 305 – 312.

*Yazyev S.B., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Chepurnenko A.S., * Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Litvinov S.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Don State Technical University (DSTU), Russia*

**Corresponding author E-mail: anton_chepurnenk@mail.ru*

DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PARAMETERS OF POLYMERIC MATERIALS USING NONLINEAR OPTIMIZATION METHODS

Abstract: the article is devoted to the problem of processing the experimental creep curves of polymers. The task is to determine their rheological characteristics from tests for any of the simplest types of deformation. The basis for the approximation of the experimental curves is the nonlinear Maxwell-Gurevich equation.

The task of finding the rheological parameters of the material is posed as a nonlinear optimization problem. The objective function is the sum of the squared deviations of the experimental values on the creep curve from the theoretical ones. Variable input parameters of the objective function are the initial relaxation viscosity η_0^* and velocity modulus m^* . A theoretical creep curve is constructed numerically using the fourth-order Runge-Kutta method. The nonlinear optimization problem is solved in the Matlab environment using the internal point method. The values m^* and η_0^* are found for which the objective function takes the minimum value.

To test the technique, the inverse problem was solved. For given values of the rheological parameters of the material, a theoretical curve of creep under bending was constructed, and the values m^* and η_0^* were found from it. The technique was also tested on experimental stress relaxation curves of secondary polyvinyl chloride and creep curves of polyurethane foam with a pure shear.

A higher quality approximation of experimental curves is shown in comparison with existing methods. The developed technique allows us to determine the rheological characteristics of materials from tests for bending, central tension (compression), torsion, shear, and it is enough to test only one type of deformation, and not a series, as was suggested earlier by some researchers.

Keywords: creep, relaxation, rheological parameters, bending, nonlinear optimization, experimental processing, least squares method

Для цитирования: Языев С.Б., Чепурненко А.С., Литвинов С.В. Определение реологических параметров полимерных материалов с использованием методов нелинейной оптимизации // Строительные материалы и изделия. 2020. Том 3. № 5. С. 15 – 23. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-5-15-23

For citation: Yazyev S.B., Chepurnenko A.S., Litvinov S.V. Determination of rheological parameters of polymeric materials using nonlinear optimization methods. Construction Materials and Products. 2020. 3 (5). P. 15 – 23. DOI: 10.34031/2618-7183-2020-3-5-15-23

Поступила в редакцию 14 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 9 августа 2020 г.

Одобрена для публикации 3 сентября 2020 г.

Received: July 14, 2020.

Revised: August 9, 2020.

Accepted: September 3, 2020.