

ДЛИТЕЛЬНОЕ СИЛОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.М. БОНДАРЕНКО*, доктор технических наук, профессор, академик РААСН

К.П. ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ**, доктор технических наук, с.н.с.

*НИИСФ РААСН, 127238, Москва, Локомотивный пр-д 21

**АО «НИЦ «Строительство», 109428, Москва, 2-я Институтская, 6

Исследуется связь уровня нагружения с механическими характеристиками структурированных материалов и впервые вводится единое аналитическое описание ползучести для стадий устойчивого затухающего во времени деформирования, устойчивого состояния и неустойчивого критического деформирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ползучесть материалов, кинетика деформирования.

Экспериментально установлено, что силовые деформационные характеристики структурированных конструктивных материалов зависят от уровня, режима и продолжительности нагружения, а также возраста, влажности, температуры и масштабного фактора (Описанное типично для бетона и древесины).

С ростом напряжений сжатые материалы вначале уплотняются, их прочность увеличивается, деформативность уменьшается, а при дальнейшем увеличении напряжений структурные связи разрушаются, возникают трещины и изломы, а деформативность увеличивается, вплоть до неустойчивого лавинного развития. А.А. Гвоздев [5] и Н.Л. Леонтьев [8] ограничивают стадию устойчивого развития деформаций области напряжений $\sigma < R_{дл}$. Соответствующие графики деформирования представлены на рис. 1 и 2 [6,7].

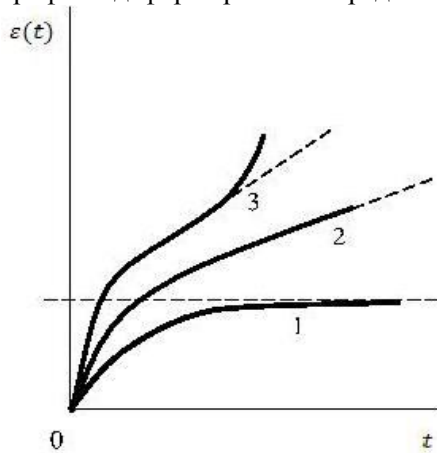


Рис. 1. Кривые длительных деформаций при постоянной нагрузке разного уровня (1-устойчивое, затухающее во времени деформирование, 2 - безразличное деформирование, 3-неустойчивое деформирование)

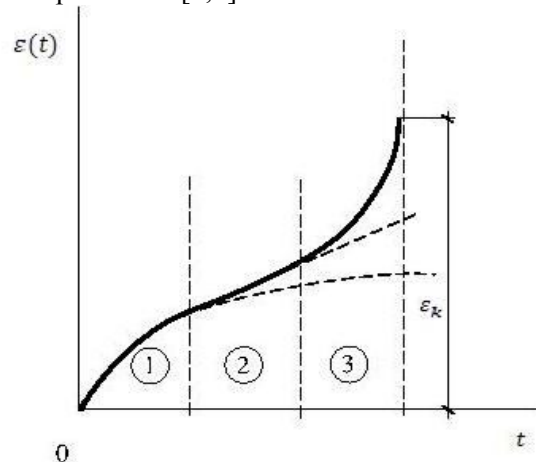


Рис. 2. Кривые длительных деформаций при увеличивающейся во времени нагрузке (1 - стадия нелинейного затухающего состояния, 2 - стадия устойчивого состояния, 3 - стадия лавинного деформирования)

В публикациях существует линейное постадийное аналитическое описание развития деформации ползучести, предложенное А.Р. Ржаницыным [10]:

а) в интегральных соотношениях

1. первая стадия:
$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{H} + \int_{-\infty}^t \sigma(\tau) K_1(t - \tau) d\tau,$$

2. вторая стадия:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{H} + \int_{-\infty}^t [a_1 + \sigma(t)] K_2(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

3. третья стадия:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{H} + \int_{-\infty}^t [a_2 + \sigma(t)] K_2(t - \tau) d\tau,$$

где K_1, K_2 и K_3 – постадийные функции влияния:

$$K_1(t - \tau) = \frac{H-E}{nH^2} e^{-\frac{E(t-\tau)}{nH}}; \quad K_2(t - \tau) = \frac{1}{nH}; \quad K_3(t - \tau) = \frac{n+E}{nH^2} e^{-\frac{F(t-\tau)}{nH}}, \quad (2)$$

$$a_1 = -\sigma_T; \quad a_2 = -\frac{2\sigma_T H}{H + F}$$

б) в дифференциальных соотношениях:

1. первая стадия: $nH\dot{\varepsilon} + \varepsilon E = n\dot{\sigma} + \sigma,$
2. вторая стадия: $nH\dot{\varepsilon} = n\dot{\sigma} + \sigma - \sigma_T,$
3. третья стадия: $nH\dot{\varepsilon} - F\varepsilon = n\dot{\sigma} + \sigma - 2\sigma_T.$ (3)

Границы между стадиями, устанавливаемые из условия неразрывности между первой и второй стадиями: $\varepsilon = \frac{\sigma_T}{E} = const,$

а между второй и третьей стадиями:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_T}{F} = const, \quad (4)$$

H, E, F, n, σ_T – некоторые эмпирические положительные постоянные.

В целом задача сводится к поиску указанных постоянных и последовательных приближений, данное предложение не получило широкого применения. Интересы практического применения привели к принципиально другому решению задачи, к поиску единого выражения для всех стадий, т.е. в целом для всего процесса деформирования. Такое решение получено в [2]. Для этого применяется прием оценки относительного дефицита меры ползучести:

$$\Delta C(t, t_0) = \frac{C(\infty, t_0) - C(t, t_0)}{C(\infty, t_0)} \quad (5)$$

и вводится, согласованное с предложением Гольберга-Вааге, нелинейное представление связи этого дефицита со скоростью его изменения:

$$\frac{d[\Delta C(t, t_0)]}{dt} = -\alpha [\Delta C(t, t_0)]^m \quad \text{при} \quad 0 \leq m \leq 1, \quad (6)$$

где α и m – эмпирические параметры.

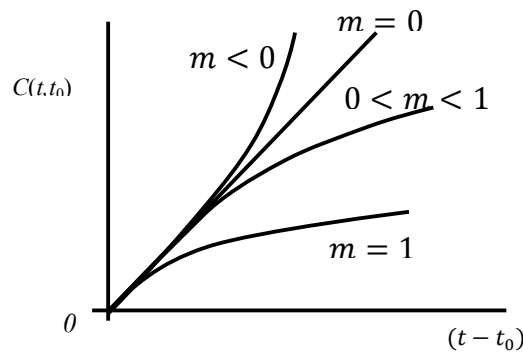


Рис. 3. Схема зависимости меры ползучести от величины m

Обработка экспериментов В.П. Селяева и К.П. Пятикрестовского привели к записям:

а) для бетонов [4]:

$$m \left(\frac{\sigma}{R_{\partial t}} \right) = \sum_{i=0}^{i=2} q_{mi} \left(\frac{\sigma}{R_{\partial t}} \right)^i, \quad (7)$$

где q_{mi} – опытные величины, зависящие от класса бетона;
 б) для древесины [1,9]

$$m\left(\frac{\sigma}{R_{дл}}\right) = 2,0 - 1,33\left(\frac{\sigma}{R_{дл}}\right). \quad (8)$$

Решение (6) приводит при $m \geq 0$ в стадию нелинейно развивающихся и затухающих деформаций при $m = 0$ в стадию устойчивого развития деформаций при $m < 0$ в стадию неустойчивого критического состояния, в частности, иллюстративно при $m \neq 1$:

$$C(t, t_0) = \left\{ 1 - (-1[(-m) + 1] \alpha (t - t_0))^{\frac{1}{(-m)+1}} \right\} C(\infty, 28), \quad (9)$$

при $m = 1$:

$$C(t, t_0) = [1 - e^{-\alpha(t-t_0)}] C(\infty, 28), \quad (10)$$

при $m = 0$:

$$C(t, t_0) = [1 + \alpha(t - t_0)] C(\infty, 28). \quad (11)$$

При этом заметим, что случай $m = 1$ соответствует общеизвестной записи для меры ползучести, общепринятой для исходных работ по теории ползучести (схематично рис. 3).

Таким образом, иллюстрируется связь решения уравнения (6) с уровнем действующих нагружений и показана его общность. Дальнейшее использование полученных результатов может быть осуществлено в рамках обычной теории ползучести.

© Бондаренко В.М., Пятикрестовский К.П. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. *Белянкин Ф.П., Яценко В.П.* Деформативность и сопротивление древесины как упруго-вязко-пластического тела. – Киев: Изд-во АН СССР, 1957. – 200 с.
2. *Бондаренко В.М., Ягунов Б.А.* К вопросу о расчетной оценке ползучести бетона// Академия. Архитектура и строительство, №3, Москва: РААСН, 2006. – С. 73—78.
3. *Бондаренко В.М.* Силовое деформирование, коррозионные повреждения, энергосопротивление железобетона// Курск: Изд. Юго-западного государственного университета, 2016. – 67 с.
4. *Бондаренко В.М., Римшин В.И.* Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. – Москва: Изд-во «Студент», 2015. – 114 р.
5. *Гвоздев А.А.* Ползучесть бетона и пути ее исследования// Сб.: Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов, Москва: Стройиздат, 1955. – С. 126—137.
6. *Гвоздев А.А. и др.* Прочность, структурные изменения и деформации бетона. – Москва: Стройиздат, 1978. – 132 р.
7. *Иванов Ю.М.* Основные вопросы изучения ползучести древесины// Сб.: Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных конструкций. – Москва: Стройиздат, 1950. – С. 100—115.
8. *Леонтьев Н.Л.* Длительное сопротивление древесины. – Москва: Госбумиздат, 1957. – 131 с.
9. *Пятикрестовский К.П.* Нелинейные методы механики в проектировании современных деревянных конструкций. – Мин. образования и науки Рос. Федерации. – Москва: МГСУ, 2014. – 320 с.
10. *Ржаницын А.Р.* Разработка основ общей теории ползучести// Сб.: Исследование прочности, пластичности и ползучести строительных материалов. – Москва: Стройиздат, 1955. – С. 100—116.

Поступила в редакцию 2 апреля 2017 г. Прошла рецензирование 28 мая 2017 г.

Принята к публикации 18 октября 2017 г.

Об авторах:

БОНДАРЕНКО ВИТАЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ, доктор технических наук, профессор, академик РААСН, главный научный сотрудник НИИСФ. Научные интересы: строительная механика, железобетонные конструкции. Количество опубликованных работ – более 300. Адрес: 127238, Москва, Локомотивный проезд, 21, НИИСФ РААСН.

ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ КОНСТАНТИН ПАНТЕЛЕЕВИЧ, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (АО «НИЦ «Строительство»). Научные интересы: строительная механика, деревянные конструкции. Опубликовал более 140 научных работ. Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6. E-mail: stroymex@list.ru.

Для цитирования:

Бондаренко В.М., Пятикрестовский К.П. Длительное силовое деформирование структурированных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 45—48. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-45-48.

References

1. Belyankin, F.P., Yatzenko, V.P. (1957) *Deformativnost i Soprotivlenie Drevesiny* [Deformation and Resistance of Wood]. Kiev: Izd. AN SSSR. 200 p. (In Russ.)
2. Bondarenko, V.M., Yagupov, B.A. (2006) On problem of design evaluation of creep. *Akademiya. Arhitektura i Stroitel'stvo*, No 3, Moscow: RAASN. 73—78. (In Russ.)
3. Bondarenko, V.M. (2016) *Force Deforming, Corrosion Damages, Electric Resistance of Reinforced Concrete*. Kursk: South-West State University. 67 p. (In Russ.)
4. Bondarenko, V.M., Rimshin, V.I. (2015) *Dissipative Theory of Force Resistance of Reinforced Concrete*. Moscow: Izd. "Student". 114 p. (In Russ.)
5. Gvozdev, A.A. (1955) Creeping of concrete and the ways of its research. *Issledovanie Prochnosti, Plastichnosti, i Polzuchesti Stroit. Materialov*, Moscow: Stroyizdat, 126—137. (In Russ.)
6. Gvozdev, A.A. et al (1978) *Prochnost, Strukturnie Izmeneniya i Deformatzii Betona* [Strength, Structural Modifications, and deformations of Concrete]. Moscow: Stroyizdat. 132 p. (In Russ.)
7. Ivanov, Yu.M. (1950) The general problems of researching of creep of wood. *Issledovanie Prochnosti, Plastichnosti, i Polzuchesti Stroit. Materialov*, Moscow: Stroyizdat. P. 100—115. (In Russ.)
8. Leont'ev, N.L. (1957) *Dlitel'noe Soprotivlenie Drevesiny*. Moscow: Gosbumizdat. 131 p. (In Russ.)
9. Pyatikrestovskiy K.P. (2014) *Nelineynie Metody Mehaniki v Proektirovanii Sovremennykh Derevyannykh Konstruktziy* [Non-linear methods of mechanics in design of modern wooden structures]. Moscow: MGSU. 320 p. (In Russ.)
10. Rzhantzin, A.R. (1955) Development of the basis of general theory of creep. *Issledovanie prochnosti, Plastichnosti, i Polzuchesti Stroit. Materialov*, Moscow: Stroyizdat. 100—116. (In Russ.)

SUSTAINED FORCE DEFORMING OF STRUCTURED MATERIALS

* V.M. BONDARENKO, ** K.P. PYATIKRESTOVSKIY

*The Scientific-and-Research Institute of Building Physics (NIISF), Moscow, Russia

**TzNIISK named after V.A. Kucherenko (AO "NITz "Stroitel'stvo"), Moscow, Russia

Relationship between value of loading and mechanical characteristics of structured materials is explored. A uniform analytical description of creep for stages of stable deformation, damped at time, stable and unstable critical deforming are introduced into practice for the first time.

Keywords: creep of materials, kinetics of deforming.

Article history: Received: April 2, 2017. Revised: May 28, 2017. Accepted: October 18, 2017.

About the authors:

BONDARENKO VITALIY MIHAILOVICH, member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), DSc, Professor, chief research worker of the Scientific-and-Research Institute of Building Physics. Scientific interests: structural mechanics, reinforced concrete structures. He has published 300 scientific works. Post address: 21, Lokomotivniy proezd, Moscow, 127238, Russian Federation.

PYATIKRESTOVSKIY KONSTANTIN PANTELEEVIICH, DSc, senior research worker, TzNIISK named after V.A. Kucherenko (AO "NITz "Stroitel'stvo"). Scientific interests: structural mechanics, wooden structures. He has published 140 scientific works. Post address: 6, 2-ya Institutskaya ul., Moscow, 109428, Russian Federation. Email address: stroymex@list.ru.

For citation:

Bondarenko V.M., Pyatikrestovskiy K.P. (2017) Sustained force deforming of structured materials. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 6. 45—48. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-45-48. (In Russ.)