

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОУПРУГИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЗНАЧЕНИЯМ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ

© 2019

Е. Ю. Иванов аспирант;
Самарский государственный университет путей сообщения;
planeta@samaramail.ru

В. А. Кирпичёв доктор технических наук, профессор;
Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королёва;
dean_fla@ssau.ru

Рассматривается определение деформации ползучести, возникающей за счёт напряжений, действовавших до момента времени t . Описывается явление ползучести при постоянном напряжении. Предлагается метод, позволяющий по двум кривым ползучести материала, обладающего вязкоупругими свойствами и нелинейной зависимостью деформации ползучести от напряжения, определить параметры ядра ползучести Арутюняна, выбранного для описания поведения материала. Определена константа в выражении, описывающем нелинейную зависимость деформации ползучести от напряжения. В качестве исследуемого материала выбран сплав АМгбМ, широко используемый в конструкциях аэрокосмических изделий. Испытания проводились на образцах толщиной 3 мм при напряжениях 65 МПа и 156,9 МПа. По результатам испытаний образцов материала получены кривые ползучести. Определив параметры аппроксимации ядра Арутюняна и параметр, входящий в выражение нелинейной зависимости деформации ползучести от напряжения, можно определить величину деформации ползучести материала для произвольных значений напряжения и времени. Сравнение экспериментальных и расчётных кривых ползучести сплава АМгбМ подтверждает правильность определения реологических характеристик испытанного материала.

Конструкционные материалы; реологические характеристики; вязкоупругость; ядро наследственности; ползучесть; релаксация.

Цитирование: Иванов Е.Ю., Кирпичёв В.А. Определение реологических характеристик вязкоупругих конструкционных материалов по значениям деформации ползучести // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 3. С. 166-172. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-166-172

Введение

В настоящее время постоянно увеличивается линейка применяемых в промышленности материалов. Для проведения расчётов конструкций на прочность с учётом деформации ползучести требуются относительно простые методики, позволяющие оперативно и без больших трудозатрат определять реологические характеристики материалов. В работе предложена методика определения параметров ядра ползучести Арутюняна $K(t-\tau)$ вязкоупругого материала при нелинейной зависимости деформации ползучести $\varepsilon(t)$ от напряжения σ [1;2]. Полагается, что зависимость деформации ползучести $\varepsilon(t)$ от напряжения σ определяется соотношением [3]

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E(t)} \int_0^t K(t, \tau) [k_1 \sigma(\tau) + k_2 \sigma^2(\tau)] d\tau. \quad (1)$$

Здесь $K(t, \tau) = E(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} - \varphi(\tau) (1 - e^{-\gamma(t-\tau)}) \right]$ – ядро Арутюняна, в котором $E(\tau)$ –

модуль упругомгновенной деформации при растяжении; t – время; τ – время, когда были совершены воздействия; $\varphi(\tau)$ – функция старения; γ – параметр, подобранный надлежащим образом для данного материала; k_1 и k_2 константы.

Для конструкционных материалов из металла $\varphi(\tau) = \beta = \text{const}$, $E(\tau) = E = \text{const}$, и ядро Арутюняна принимает вид

$$K(t-\tau) = \beta\gamma E e^{-\gamma(t-\tau)}. \quad (2)$$

Предложена методика определения параметров β, γ ядра Арутюняна (характеристик материала) по значениям деформации ползучести при постоянном напряжении.

В этом случае $\sigma(t) = \sigma(0) = \text{const}$ и из (1) получаем

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} [k_1 \sigma(0) + k_2 \sigma^2(0)] \int_0^t K(t-\tau) d\tau. \quad (3)$$

Данные по деформации ползучести конкретного материала могут быть получены по результатам экспериментов.

Результаты испытаний на ползучесть образцов сплава АМг6М

Эксперимент на ползучесть проводился на установке кафедры сопротивления материалов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва.

Испытывались образцы, вырезанные из листа АМг6М толщиной 3 мм, модуль упругости материала $E = 68600$ МПа. Испытания проводились в течение 192 часов. Испытано три образца при $\sigma = 65$ МПа и три образца при $\sigma = 156,9$ МПа. Влияния направления выреза образцов из листа (вдоль, поперёк и под 45°) для данных образцов не выявлено. Графики осреднённых экспериментальных кривых ползучести материала АМг6М для $\sigma = 65$ МПа и $\sigma = 156,9$ МПа приведены на рис. 1.

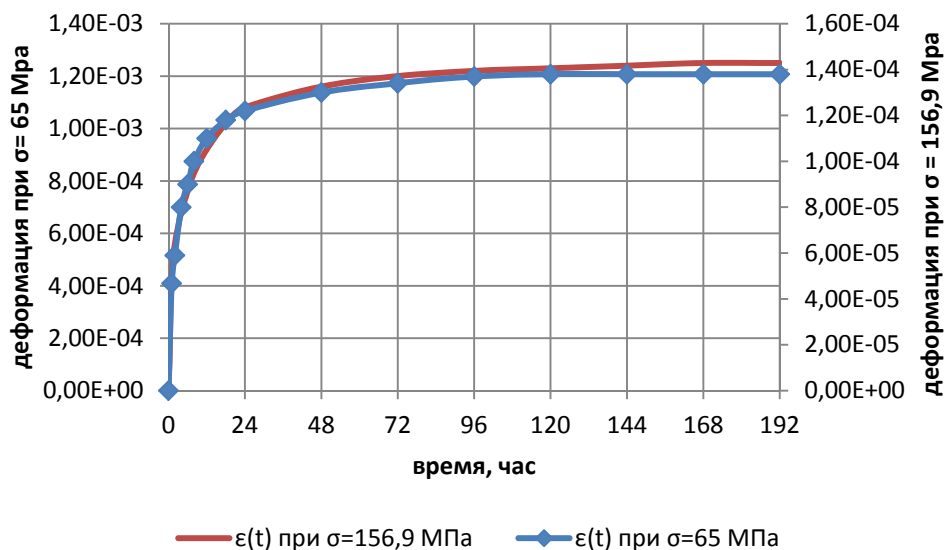


Рис. 1. График ползучести материала АМг6М при $\sigma = 65$ МПа и $\sigma = 156,9$ МПа

Методика определения параметров ядра Арутюняна

Подставив ядро Арутюняна (2) в соотношение (3), после интегрирования получим:

$$\varepsilon(t) = [\sigma(0) + c\sigma^2(0)]\varphi(1 - e^{-\gamma t}), \quad (4)$$

где $c = \frac{k_1}{k_2}$, $\varphi = k_1\beta$.

Для определения параметра c необходимо иметь экспериментальные значения деформации ползучести образцов материала, полученные для двух значений напряжений. В рассматриваемом случае испытания проводились при $\sigma_1(0) = 65$ МПа и $\sigma_2(0) = 156,9$ МПа (напряжение, близкое к $\sigma_{0,2}$ для АМг6М).

Поскольку эксперимент проводился для двух значений напряжений, то введём обозначения $\varepsilon_j(t_i)$, $\sigma_j(0)$, где $j = 1, 2$ и соответствует индексу напряжений $\sigma_1(0)$ и $\sigma_2(0)$; t_i – время из интервала $0 < t_i < t_{\text{экс}}$; $t_{\text{экс}}$ – время продолжительности эксперимента на ползучесть.

Из выражения (4) получим

$$\varepsilon_j(t) = [\sigma_j(0) + c\sigma_j^2(0)]\varphi(1 - e^{-\gamma t}). \quad (5)$$

Используя (5), определим

$$\varepsilon_1(t) = [\sigma_1(0) + c\sigma_1^2(0)]\varphi(1 - e^{-\gamma t}), \quad (6)$$

$$\varepsilon_2(t) = [\sigma_2(0) + c\sigma_2^2(0)]\varphi(1 - e^{-\gamma t}). \quad (7)$$

Разделив (6) на (7), получим

$$\frac{\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_2(t)} = \frac{\sigma_1(0) + c\sigma_1^2(0)}{\sigma_2(0) + c\sigma_2^2(0)}.$$

Отсюда

$$c = \frac{\varepsilon_1(t)\sigma_2(0) - \varepsilon_2(t)\sigma_1(0)}{\varepsilon_2(t)\sigma_1^2(0) - \varepsilon_1(t)\sigma_2^2(0)}.$$

Расчётным путём были определены значения c для времени $t = 6, 8, 12, 24$ и 48 часов для $\sigma_1(0)$ и $\sigma_2(0)$. Среднее значение $c = -0,034$.

Для определения параметров φ, γ в выражении (4) выберем три значения времени t_1, t_2, t_3 , где $0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_{\text{экс}}$ и примем, что $t_1 = \frac{t_3}{4}$ и $t_2 = \frac{t_3}{2}$.

Подставив в (5) значения времени t_1, t_2, t_3 , составим соотношения

$$\varepsilon_j(t_3) - \varepsilon_j(t_2) = [\sigma_j(0) + c\sigma_j^2(0)]\varphi \left(e^{-\gamma \frac{t_3}{2}} - e^{-\gamma t_3} \right), \quad (8)$$

$$\varepsilon_j(t_2) - \varepsilon_j(t_1) = [\sigma_j(0) + c\sigma_j^2(0)]\varphi \left(e^{-\gamma \frac{t_3}{4}} - e^{-\gamma \frac{t_3}{2}} \right). \quad (9)$$

Воспользуемся подстановкой $x = e^{-\gamma \frac{t_3}{4}}$ и, разделив (8) на (9), получим

$$\frac{\varepsilon_j(t_3) - \varepsilon_j(t_2)}{\varepsilon_j(t_2) - \varepsilon_j(t_1)} = x^2 + x. \quad (10)$$

Решая квадратное уравнение (10), определим значение x . Прологарифмировав выражение подстановки x , получим

$$\ln x = -\gamma \frac{t_3}{4}.$$

Отсюда

$$\gamma = -\frac{4}{t_3} \ln x. \quad (11)$$

Используя (4) и (11), получим

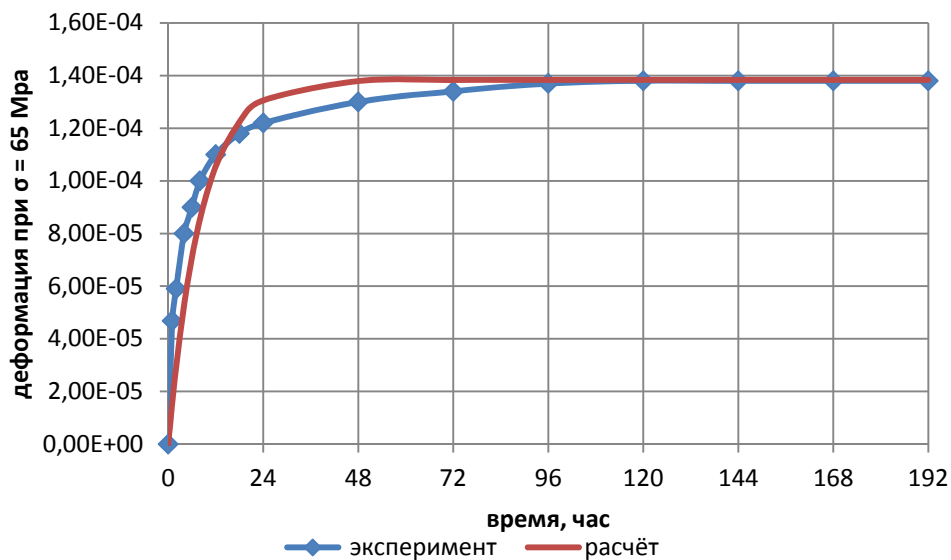
$$\varphi = \frac{\varepsilon(t)}{[\sigma(0) + c\sigma^2(0)](1 - e^{-\gamma t})}.$$

С помощью программного пакета MathCad получены значения параметров γ, φ при $\sigma_1(0) = 65$ МПа и $\sigma_2(0) = 156,9$ МПа для вариантов: 1 – $t_1 = 2$ часа, $t_2 = 4$ часа, $t_3 = 8$ часов; 2 – $t_1 = 6$ часов, $t_2 = 12$ часов, $t_3 = 24$ часа; 3 – $t_1 = 12$ часов, $t_2 = 24$ часа, $t_3 = 48$ часов. Осреднённые значения составляют $\gamma = 0,1125$, $\varphi = -1,759 \cdot 10^{-6}$.

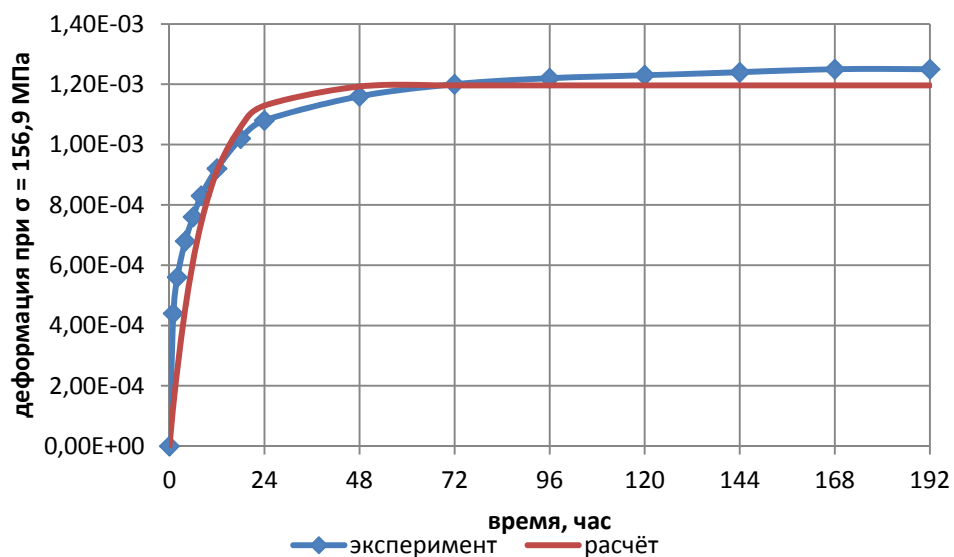
Таким образом, определены все три параметра c, γ, φ в выражении (4), которое позволяет при заданном напряжении и времени определить деформацию ползучести.

Экспериментальные и расчётные кривые ползучести образцов сплава АМгбМ

С помощью полученных реологических характеристик материала, приведённых выше, и используя формулу (5), определены расчётные значения деформации ползучести в образцах. Графики экспериментальной и расчётной кривых ползучести приведены на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Расчётные и экспериментальные кривые ползучести образцов из АМгБМ:
а – $\sigma = 65$ МПа; б – $\sigma = 156,9$ МПа

Из анализа графиков на рис. 2 видно, что расчётные кривые ползучести дают хорошее совпадение с экспериментальными данными. Отсюда следует вывод, что определив параметры аппроксимации выражения (4) при двух значениях напряжения, выбранных для проведения испытаний, можно определить величину деформации ползучести исследуемого материала для произвольных значений времени и напряжения.

По мнению авторов [3], не имеет смысла стремиться к точному аналитическому описанию кривых ползучести на всех их участках, так как это неизбежно приводит к трудным математическим задачам и в то же время лишь приближённо отражает (вследствие разброса) исходные данные, полученные из экспериментов. Достаточно, чтобы полученные в результате аппроксимаций зависимости правильно отражали главные

черты явлений ползучести в материалах и одновременно были достаточно простыми для решения прикладных задач.

Заключение

Разработана методика определения реологических характеристик для вязкоупругих материалов с ядром разностного типа при нелинейной зависимости деформации ползучести от напряжения.

Проведены экспериментальные исследования образцов из сплава АМг6М при постоянной нагрузке.

Определены реологические характеристики сплава АМг6М для ядра Арутюняна.

Установлено хорошее соответствие расчётных кривых ползучести сплава АМг6М, полученных с использованием ядра Арутюняна, с экспериментальными данными.

Библиографический список

1. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
2. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. М.: Машиностроение-1, 2005. 226 с.
3. Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В. Контактные задачи теории ползучести. Ереван: АН АрмССР, 1990. 318 с.

DETERMINING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF VISCOELASTIC MATERIALS BY THE VALUES OF CREEP STRAIN

© 2019

E. Yu. Ivanov Postgraduate Student;
Samara State Transport University, Samara, Russian Federation;
planeta@samaramail.ru

V. A. Kirpichev Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Strength of Materials;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
dean_fla@ssau.ru

Determination of creep strain arising due to stresses acting up to the moment of time t is considered. The phenomenon of constant-stress creep is described. A method is proposed to determine the parameters of the Arutyunyan creep kernel selected to describe the behavior of a material using two creep curves of a material with viscoelastic properties and nonlinear dependence of creep strain on the stress. In addition, the constant in the expression describing nonlinear dependence of creep strain on the stress is defined. The AMg6M alloy, widely used in the design of aerospace products, was chosen as the material to be analyzed. The tests were carried out on samples 3 mm thick at strains of 65 MPa and 156.9 MPa. According to the results of testing samples of materials on the test bench of Samara University creep curves were obtained. By determining the parameters of the approximation of the Arutyunyan kernel and the parameter included in the expression of nonlinear dependence of creep strain on the stress, it is possible to determine the value of the creep strain of the material for arbitrary values of stress and time. Comparison of the experimental and calculated creep curves for the AMg6M alloy confirms the validity of determination of the rheological characteristics of the tested material.

Structural materials; rheological properties; viscoelasticity; inheritance core; creep; relaxation.

Citation: Ivanov E.Yu., Kirpichev V.A. Determining the rheological properties of viscoelastic materials by the values of creep strain. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 3. P. 166-172.
DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-166-172

References

1. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 400 p.
2. Radchenko V.P., Saushkin M.N. *Polzuchest' i relaksatsiya ostatochnykh napryazheniy v uprochnennykh konstruksiyakh* [Creep and relaxation of residual stresses in reinforced structures]. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ., 2005. 226 p.
3. Arutyunyan N.Kh., Manzhurov A.V. *Kontaktnye zadachi teorii polzuchesti* [Contact problems of the creep theory]. Erevan: AN ArmSSR Publ., 1990. 318 p.