

УДК 539.3

*Д.В.БРЕСЛАВСКИЙ*, докт.техн.наук; *Ю.Н.КОРЫТКО*;  
*О.К.МОРАЧКОВСКИЙ*, докт.техн.наук; НТУ «ХПИ», Харьков

### **ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ТЕМПЕРАТУРЕ**

У роботі з застосуванням методу асимптотичних розкладів за двома масштабами часу та осереднення на періоді температурного циклу одержано нове рівняння стану повзучості металів та сплавів при циклічній зміні температури. Оцінку достовірності запропонованого рівняння стану термоциклічної повзучості одержано за порівнянням розрахункових й експериментальних даних.

The new creep-law of metals and alloys at the case of cyclic varying of temperature is given in a paper. The cyclic creep constitutive equation was derived by use of method of asymptotic creep-strains decomposition on two time scales after averaging on the period of a temperature cycle. The verification of suggested constitutive cyclic-thermo-creep – law was done by comparison the computed and experimental data.

**1 Актуальность темы.** В современном машиностроении конструктивные элементы часто эксплуатируются при совместном действии температурных и силовых полей. Уровни и периодичность смены действующих нагрузок и температур могут заметно влиять на процессы ползучести и время до разрушения конструктивных элементов. Во многих случаях изменение напряжений и температурных режимов носит циклический характер. В последнее время для описания ползучести материалов при постоянной температуре, быстром и медленном циклическом изменении напряжений предложены определяющие соотношения, например, в работах [1, 2]. Вместе с тем, практически важный случай циклического изменения рабочих температур, при которых развивается ползучесть в материале конструктивных элементов, до настоящего времени исследован недостаточно. В данной работе предложены новые уравнения состояния для термоциклической ползучести металлических материалов и их сплавов. Дано сопоставление расчетных и экспериментальных данных термоциклической ползучести образцов, изготовленных из углеродистой и легированной стали в различных интервалах температур.

**2 Одноосная ползучесть.** Как обычно, например [3, 4], примем, что деформация ползучести  $c$  зависит от напряжения –  $\sigma$ , времени –  $t$  и температуры –  $T$ :

$$c = f(\sigma, t, T), \quad (1)$$

где

$$f = f_1(\sigma) f_2(t) f_3(T). \quad (2)$$

В дальнейшем, используя гипотезу течения, как и в [3], конкретизируем вид функций, входящих в (2) так:

$$f_1(\sigma) = B\sigma^n; \quad f_2(t) = t; \quad f_3(T) = A \exp\left(\frac{-\Delta H}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $B, n, A$  – материальные постоянные, которые определяются при обработке экспериментальных кривых ползучести образцов при растяжении;

$\Delta H, k$  – энергия активации процессов ползучести в материале и постоянная Больцмана.

В этом случае уравнение состояния установившейся ползучести при постоянных напряжениях и температуре принимает вид:

$$\dot{c} = B \exp\left(\frac{-\Delta H}{kT}\right) \sigma^n. \quad (4)$$

В рамках феноменологического подхода обобщим зависимости (1-4) для термоциклической ползучести, принимая, что  $T = \varphi(t)$ ;  $\Delta H/k = Q$ ;  $Q > 0$ :

$$\dot{c} = B \sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{\varphi}\right). \quad (5)$$

Из (4) следуют известные уравнения установившейся ползучести при постоянных напряжениях и температуре.

**3. Ползучесть при циклическом изменении температуры.** Рассмотрим термоциклическую ползучесть при постоянных напряжениях, принимая в (5) функцию  $\varphi = \varphi^*(t)$  в виде, который отвечает наиболее часто встречающемуся на практике прямоугольному циклу на периоде  $T_c$  изменения температуры:

$$\varphi^*(t) = \begin{cases} \varphi_0, & 0 < t < \tau \\ \varphi_{\max}, & \tau < t < T_c \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\tau$  – время нагрева образца от начального значения –  $\varphi_0$  до температуры  $\varphi_{\max}$ ,  $\varphi_{\max} = \varphi_0 + \varphi_a$ ,  $\varphi_a$  – амплитудная составляющая изменения температуры.

Кусочно-непрерывную функцию  $\varphi^*(t)$  представим в виде ряда Фурье:

$$\varphi^*(t) = \varphi_{\max} \left( \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T_c} t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T_c} t\right) \right) \right), \quad (7)$$

где:

$$a_0 = \frac{2}{T_c \varphi_{\max}} \int_0^{T_c} \varphi^*(t) dt; \quad a_k = \frac{2}{T_c \varphi_{\max}} \int_0^{T_c} \varphi^*(t) \cos\left(\frac{2\pi k t}{T_c}\right) dt;$$

$$b_k = \frac{2}{T_c \varphi_{\max}} \int_0^T \varphi^*(t) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_c}\right) dt.$$

Далее, введем параметр асимметрии цикла изменения температуры  $M = \varphi_a/\varphi_0$  – отношение амплитудной составляющей температуры к ее минимальному значению на периоде теплосмены и преобразуем закон циклического изменения температуры:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \left( 1 + M \left( \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left( a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T_c} t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T_c} t\right) \right) \right) \right). \quad (8)$$

Применим к определяющему уравнению в форме (6) метод двух масштабов [2]. Введем в рассмотрение:

- $t$  – время основного процесса ползучести при циклическом изменении температуры;
- $\xi = t/T$  – время цикла изменения температуры по закону (9),  $0 \leq \xi \leq 1$ .

Далее, следуя основным подходам работ [1, 2], для получения определяющего уравнения ползучести при циклическом изменении температуры применим методику асимптотических разложений и усреднения на периоде.

Принимая, что общая продолжительность процесса ползучести  $t_*$  превышает величину периода  $T_c$  циклической составляющей температуры  $\varphi$ , введем в рассмотрение малый параметр  $\mu = \frac{T_c}{t_*} \ll 1$ .

Асимптотическое решение дифференциального уравнения (5) с начальным условием  $c(0) = 0$  будем искать в виде разложения по малому параметру:  $c \equiv c^0(t) + \mu c^1(\xi)$ . Ограничимся только первым приближением, считая члены с высшими степенями параметра  $\mu$  бесконечно малыми, получим:

$$\frac{dc(t, \xi)}{dt} = \left( \frac{\partial c(t, \xi)}{\partial t} + \mu^{-1} \frac{\partial c(t, \xi)}{\partial \xi} \right)_{\xi=t/\mu}.$$

Учитывая, что  $\langle c^1(\xi) \rangle = \int_0^1 c^1(\xi) d\xi \equiv 0$ , для медленно изменяющейся со-

ставляющей ползучести при циклическом изменении температуры и постоянном напряжении, после усреднения на периоде цикла окончательно получим:

$$\dot{c} = B \sigma^n \int_0^1 \exp \left( \frac{-Q}{\varphi_0 \left( 1 + M \left( \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(2\pi k \xi) + b_k \sin(2\pi k \xi)) \right) \right)} \right) d\xi. \quad (9)$$

Зависимость (9) примем в качестве уравнения состояния термоциклической ползучести материала в случае циклического изменения температуры при постоянном напряжении.

**4 Сопоставления расчетных и экспериментальных данных.** Предложенное уравнение состояния (9) верифицировалось на примере ползучести одноосных образцов, изготовленных из углеродистой стали (0,15 % С) в интервале температур от 573 К до 748 К. Эксперименты по статической и термоциклической ползучести образцов из данного материала проведены японскими учеными под руководством профессора С.Тайра [4]. Эти экспериментальные данные использованы для получения материальных постоянных, входящих в уравнение (5). После обработки найдено:  $B = 2,4 \cdot 10^{-32} \cdot A$  (МПа)<sup>-n/c</sup>,  $A = 1,2 \cdot 10^{19}$ ;  $n = 21,4$ ;  $Q = 3,176 \cdot 10^4$  К.

На рис. 1 приведены кривые ползучести при постоянном напряжении, равном 180 МПа, для температур 773 К, 748 К и 723 К – кривые 1, 2 и 3 соответственно. Точками обозначены экспериментальные данные, взятые из работы [4]. Как видно из рисунка, обработка опытных данных выполнена с вполне удовлетворительной точностью.

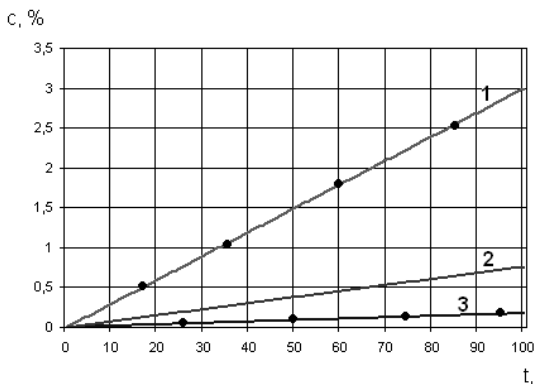


Рисунок 1 – Расчетные кривые статической ползучести углеродистой стали при  $\sigma = 180$  МПа,  $T = 773$  К – 1, 748 К – 2 и 723 К – 3, точки – экспериментальные данные

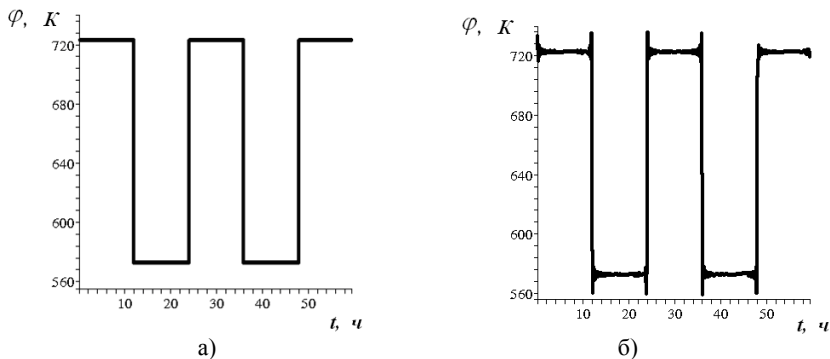


Рисунок 2 – Зависимость температуры от времени: а) – исходная [4]; б) – аппроксимированная рядом Фурье с удержанием 100 слагаемых

Далее рассмотрим термоциклическую ползучесть, воспользовавшись полученным уравнением (9). Расчетные кривые термоциклической ползучести при постоянном напряжении, равном 200 МПа, для углеродистой стали сопоставим с экспериментальными данными той же работы [4]. Для заданного в [4] изменения температуры в пределах цикла от 573 К до 723 К, представленного на рис. 2, примем закон (6) с параметрами:  $\varphi_0 = 573$  К;  $\varphi_a = 150$  К;  $T_c = 24$  ч;  $\tau = 12$  ч.

На рис. 3 приведены расчетные кривые статической ползучести (723 К) – 1 и циклической (573 К – 723 К) – 2 образцов из углеродистой стали, точки – экспериментальные данные [4].

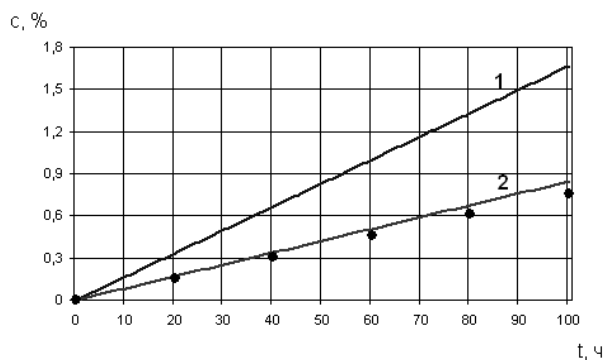


Рисунок 3 – Расчетные кривые статической ползучести (723 К) – 1 и циклической (573 К – 723 К) – 2, точки – экспериментальные данные

Авторы [4] отмечают, что при температуре 573 К статическая ползучесть рассматриваемой стали практически не наблюдается. Этот же вывод следует непосредственно из расчетных данных. Сравнительный анализ результатов расчетов и эксперимента свидетельствует о достаточной степени соответствия результатов (расхождение составляет менее 5 %).

Далее рассмотрим циклическую ползучесть образцов из нержавеющей стали марки 321 (293 К – 710 К). Экспериментальные данные статической ползучести при температуре 1003К приведены в [5] и использовались для определения материальных постоянных в (9). Расчетами определено:  $B = 1,9 \cdot 10^{-11} \cdot A$  (МПа)<sup>-n</sup>/с;  $A = 1,01 \cdot 10^{14}$ ;  $n = 3,694$ ,  $Q = 2,096 \cdot 10^4$  К. Изменение температуры в опытах, приведенных в [5], принималось отвечающим трапецеидальному циклу, показанному на рис. 4, параметры которого составляют:  $\varphi_0 = 293$  К;  $\varphi_a = 710$  К;  $T_c = 2$  ч (рис. 4).

На рис. 5 приведены кривые ползучести при напряжении 70 МПа для принятого цикла изменения температуры (кривая 2), а также для статической ползучести при постоянных температурах (при 923 К – кривая 3, при максимальной температуре цикла 1003 К – кривая 1). Точками обозначены экспериментальные данные, взятые из работы [5]. Отличие опытных и расчетных данных не превосходит 3-5 %.

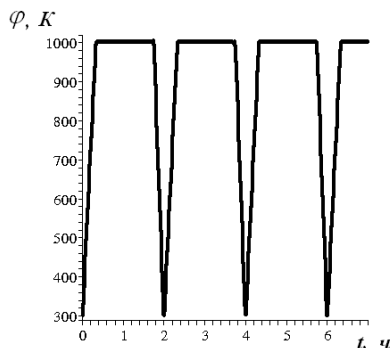


Рисунок 4 – Зависимость температуры от времени – аппроксимированная рядом Фурье с удержанием 100 слагаемых

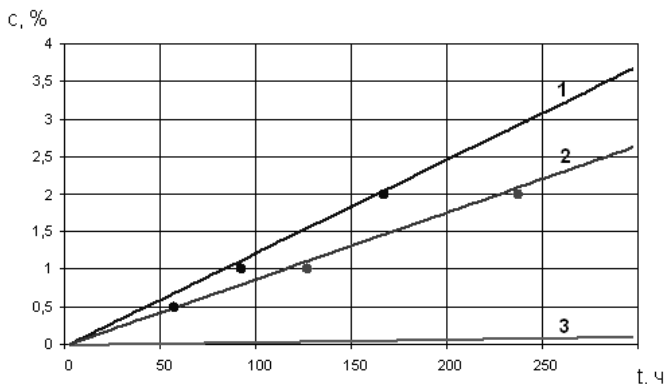


Рисунок 5 – Кривые статической – 1, 3 и циклической ползучести – 2 образцов из стали марки 321, точки – экспериментальные данные

**5 Выводы.** В работе дано обобщение уравнения состояния установившейся ползучести при постоянных напряжениях и температуре для случая термоциклической ползучести. Используя методику асимптотических разложений двух масштабов времени (быстрого и медленного) и усреднения на периоде температурного цикла предложено новое уравнение состояния термоциклической ползучести металлических материалов. Расчетные кривые термоциклической ползучести одноосных образцов, изготовленных из углеродистой стали (0.15% C) и нержавеющей стали марки 321, сопоставлены с экспериментальными данными других авторов. Данные сравнения свидетельствуют о вполне удовлетворительном соответствии расчетных и экспериментальных кривых термоциклической ползучести.

**Список литературы:** 1. Breslavsky D., Morachkovsky O. A new model of nonlinear dynamic creep // IUTAM Symposium on Anisotropy, Inhomogeneity and Nonlinearity in Solid Mechanics. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 1995. – P. 161-166. 2. Бреславский Д.В., Морачковский О.К., Уварова О.А. Метод асимптотических разложений в задачах мало- и многоциклового ползучести мате-

риалов // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП». – № 19. – 2004. – С. 23-32. **3.** *Lemaitre J., Chaboche J.-L.* Mechanics of solid materials. – Cambridge: University press, 1994. – 556 p. **4.** *Taiya S., Otani P.* Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Metallurgia, 1986. – 280 с. **5.** *Гварниери* Характеристики длительной прочности листовых материалов при циклических нагрузках и температурах // Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. – Госэнергоиздат, 1960. – С. 65-111.

*Поступила в редколлегию 01.09.2008*