

01;05

## Анализ длительности процессов ползучести в рамках полевой теории дефектов

© Н.В. Чертова, Ю.В. Гриняев

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: chertova@ispms.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 9 октября 2000 г.)

На основе динамических уравнений полевой теории дефектов получены зависимости, описывающие кривые ползучести и связь внешне приложенного напряжения и времени до разрушения системы при разных режимах деформирования. Установлены закономерности изменения длительности процессов ползучести при варьировании внешних параметров, в качестве которых рассматриваются напряжения и начальная скорость деформации, и характеристик материала — предельно допустимой деформации, определяющей разрушение.

Потребности эксплуатации оборудования в специфических условиях — повышенных напряжений и температур обусловили открытие явления ползучести и предопределили развитие теории этого процесса. Усилия инженеров-практиков в первую очередь были направлены на "задачу расчета на ползучесть" [1], т.е. определения расчетным путем времени, по истечению которого деформация достигнет некоторой заданной величины, считаваемой предельно допустимой. Эта задача практически значима и актуальна до настоящего времени. На этапе зарождения теория ползучести развивалась как инженерная наука. Позднее в ее создании приняли участие механики и теория ползучести сформировалась как самостоятельная ветвь механики сплошной среды. Одновременно развивалась физика ползучести, исследующая механизмы явлений, наблюдаемых в процессе ползучести. Поскольку известные закономерности ползучести очень сложны, то их полное физическое объяснение и комплексное описание отсутствует до настоящего времени. Определенные успехи в развитии физики этого явления были достигнуты с использованием представлений теории дислокаций [2–4]. В указанных работах рассмотрен ряд дислокационных моделей, описывающих различные стадии и режимы ползучести. Авторы [3,4] считают, что при умеренных температурах элементарные процессы ползучести в твердых телах обусловлены главным образом перемещением дислокаций, поэтому в дальнейшем закономерности ползучести будут рассмотрены в рамках полевой теории, описывающей динамику трансляционных дефектов [5,6]. Следует отметить, что полевая теория дефектов оперирует величинами, которые являются характеристиками ансамбля дефектов, и соответствует, согласно [7], мезоскопическому способу описания системы. В классической теории дислокаций [2], рассматривающей отдельные дефекты материала и их взаимодействия, используется микроскопический способ описания системы [7].

В работе [8] на основе динамических уравнений полевой теории дефектов

$$B(\nabla \cdot I) = -B(\alpha \times I) - \rho \mathbf{V}^{\text{ext}},$$

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \alpha &= 0, & \nabla \times I &= \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \\ S \nabla \times \alpha &= -B \frac{\partial I}{\partial t} - S \left( \alpha \cdot \alpha - \frac{\delta}{2} \alpha^2 \right) \\ & - B \left( I \cdot I - \frac{\delta}{2} I^2 \right) - \eta I - \sigma^{\text{ext}} \end{aligned} \quad (1)$$

было получено уравнение

$$B \frac{\partial I}{\partial t} + B \left( I \cdot I - \frac{\delta}{2} I^2 \right) + \eta I + \sigma^{\text{ext}} = 0, \quad (2)$$

связывающие тензор плотности потока дислокаций  $I$  и напряжения от внешних воздействий  $\sigma^{\text{ext}}$ , на основе которого были исследованы некоторые особенности процесса ползучести. В приведенных выражениях  $\alpha$  — тензор плотности дислокаций;  $\mathbf{V}^{\text{ext}}$  — скорость упругих смещений;  $\rho$  — плотность среды,  $\eta$  — коэффициент вязкости;  $B, S$  — константы теории;  $\delta$  — символ Кронекера. Знаки  $(\times)$   $(\cdot)$  обозначают векторное и скалярное произведение,  $(\times)$  соответствует векторному произведению по первым индексам диады и скалярному по вторым. Уравнение (2) записано при условии однородного распределения дефектов, когда напряженности поля  $\alpha, I$  не зависят от координат. По мнению авторов [9], это наблюдается на пределе текучести материалов, где дефекты распределены хаотично и не образуют пространственных структур. Поскольку многие экспериментальные факты при изучении ползучести получены в опытах по растяжению стержней, то в работе [8] рассмотрен случай одноосного деформирования, для которого уравнение (2) в безразмерных величинах  $v = -(B/\eta)I_{11}$ ,  $\tau = (\eta/B)t$ ,  $S = (B/\eta^2)\sigma_{11}$  имеет вид

$$\frac{dv}{d\tau} = v^2/2 - v + S, \quad (3)$$

где  $v$  — скорость пластической деформации.

В указанной работе основное внимание уделено анализу выражений  $v(\tau)$ , которые определяют кривые ползучести  $\varepsilon(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau$  при постоянном напряжении.

В дальнейшем более подробно будет проанализирована связь между приложенным напряжением и временем до разрушения системы.

Ранее установлено [8], что в зависимости от величины внешне приложенного напряжения  $S$  существует два режима ползучести. При  $S < 1/2$  наблюдается устойчивый режим ползучести, а при  $S > 1/2$  — неустойчивый. Соответствующие выражения скорости ползучести имеют вид

$$v(\tau) = \frac{p - q[(v_0 - p)/(v_0 - q)] \exp[(p - q)\tau/2]}{1 - [(v_0 - p)/(v_0 - q)] \exp[(p - q)\tau/2]} \quad \text{при } S < 1/2, \quad (4)$$

$$v(\tau) = \frac{n + \alpha^2}{n} + \frac{(n^2 + \alpha^2) \cos(\alpha\tau/2)}{n(\cos(\alpha\tau/2) - (n/\alpha) \sin(\alpha\tau/2))} \quad \text{при } S > 1/2, \quad (5)$$

а кривые ползучести определяются выражениями

$$\varepsilon(\tau) = \varepsilon_0 + p\tau + 2 \ln |(p - q) / [(p - v_0) - (q - v_0) \exp[(p - q)\tau/2]]|, \quad (6)$$

$$\varepsilon(\tau) = \varepsilon_0 + \tau - 2 \ln |\cos(\alpha\tau/2) - (n/\alpha) \sin(\alpha\tau/2)|, \quad (7)$$

где  $2\alpha = p - q$ ,  $n = 1 - v_0$ ,  $v_0$  — начальная скорость ползучести;  $p, q = 1 \pm \sqrt{1 - 2S}$  — стационарные скорости, получаемые из (3) при  $dv/d\tau = 0$ .

Внешнее напряжение  $S_* = 1/2$  является критическим и определяет точку бифуркации, в которой происходит смена режимов ползучести. Критическое напряжение позволяет ввести некоторый предел устойчивой ползучести, определяемый параметрами материала:  $\sigma^* = \eta^2/2B$ .

Анализ приведенных зависимостей (4)–(7) позволил установить, что долговечность реальной системы при  $S > S_*$  будет ограничена условием

$$\cos(\alpha\tau/2) - (n/\alpha) \sin(\alpha\tau/2) = 0, \quad (8)$$

при котором скорость ползучести (5) обращается в бесконечность и время нагружения системы до момента разрушения находится так:

$$t_1^* = (2/\alpha)(\pi - \arctg[\alpha/n]). \quad (9)$$

На рис. 1 приведены зависимости, показывающие связь приложенного напряжения и времени жизни системы до разрушения при  $S > S_*$  и значениях  $v_0 = 0.5$  (кривая 1) и 0.9 (кривая 2).

Как показано в [8], характер решений (3) при  $S < S_*$  существенно зависит от начального значения  $v_0$ , для которого можно выделить следующие интервалы:  $0 < v_0 < q$ ,  $q < v_0 < p$  и  $v_0 > p$ . При  $v_0 > p$  скорость ползучести становится бесконечно большой, когда знаменатель (4) обращается в нуль, отсюда время до разрушения системы определяется так:

$$t_2^* = (2/(p - q)) \ln[(v_0 - q)/(v_0 - p)]. \quad (10)$$

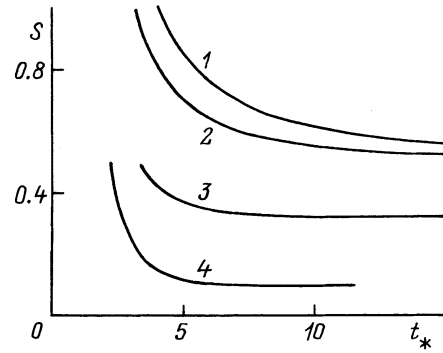


Рис. 1.

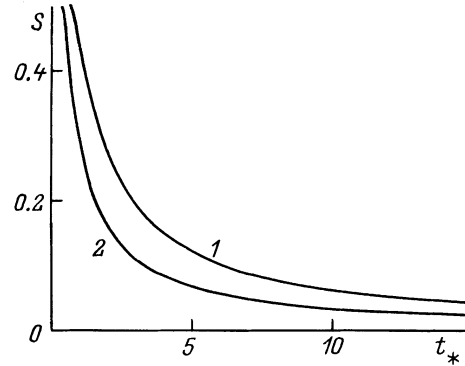


Рис. 2.

Данную зависимость на рис. 1 представляют кривые 3, 4 при  $v_0 = 1.6$  и 1.9. Если начальные значения скорости принадлежат интервалу  $q < v_0 < p$ , то при  $\tau \rightarrow \infty$   $v(\tau) \rightarrow q$ , т.е. наблюдается стационарный режим ползучести. В этом случае анализ длительности ползучести представляет традиционную "задачу расчета на ползучесть". Считая известным критическое значение деформации  $\varepsilon_*$ , при котором происходит разрушение материала, можно на основе выражения (6) при  $\tau \rightarrow \infty$  определить интересующую зависимость между напряжением и временем до разрушения

$$t_3^* = (\varepsilon_* - \varepsilon_0)/q, \quad (11)$$

приведенную на рис. 2 при  $\varepsilon_* = 0.65$  (кривая 1) и 0.35 (2). В обоих случаях деформация в начальный момент времени  $\varepsilon_0$  полагалась равной 0.01%. Последняя качественно совпадает с результатами рис. 1 и 3, на котором приведены экспериментальные данные, полученные для разных материалов и температур испытаний [10], продолжавшихся до 100 суток. Кривые 1, 4 на рис. 3 получены для углеродистой стали (0.5% C и 0.24% C) при температурах 300 и 432°C; 2 — для никелевой стали при 400°C; 3, 5 — высоколегированной никелево-хромистой стали при 600 и 700°C, 7, 11 — быстрорежущей стали при 593 и 732°C; 6 — литой жаропрочной стали при 800°C; 8 — свинца при комнатной температуре; 9 — никелево-медного сплава при

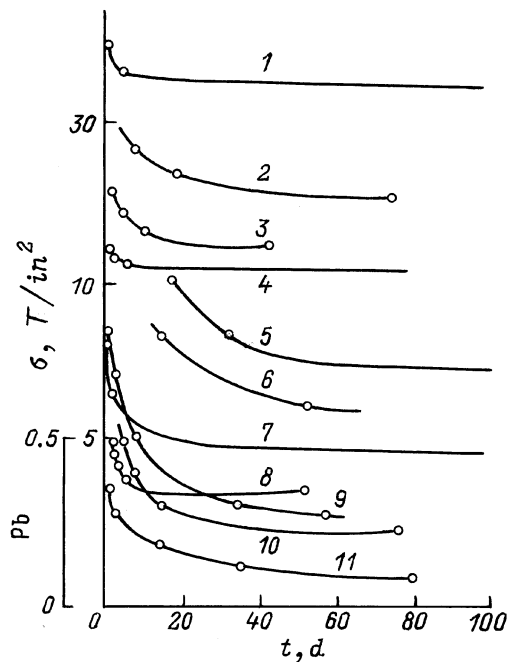


Рис. 3.

600°C и 10 — магниевого сплава при 150°C. Следуя выводам [8], не будем рассматривать интервал начальных значений  $0 < v_0 < q$ , при котором не удастся описать первый участок кривой ползучести с уменьшающейся скоростью.

В заключение отметим, что известны многочисленные попытки установить эмпирические законы, связывающие напряжение со временем до разрушения. Различные исследователи приходили к формулам логарифмического, экспоненциального и гиперболического типа [10]. Как отмечает автор последней работы, универсальной зависимости, которая бы удовлетворительно связывала эти величины при разных условиях, не найдено. Результаты данной работы также не приводят к единой связи между напряжением и временем до разрушения, поскольку существуют различные режимы ползучести в зависимости от внешних условий. Однако можно отметить, что при любых режимах ползучести увеличение приложенного напряжения  $S$  при одной и той же начальной скорости  $v_0$  или критической деформации  $\varepsilon_*$  приводит к уменьшению времени до разрушения системы. При одном и том же напряжении длительность процессов ползучести уменьшается при увеличении  $v_0$  (рис. 1) и уменьшении  $\varepsilon_*$ , соответствующей разрушению материала (рис. 2).

## Список литературы

- [1] *Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
- [2] *Коттрелл А.* Дислокации и пластическое течение в кристаллах. М.: Metallurgizdat, 1958. 267 с.
- [3] *Фридель Ж.* Дислокации. М.: Мир, 1967. 643 с.

- [4] *Розенберг В.М.* Ползучесть металлов. М.: Metallургия, 1967. 276 с.
- [5] *Гриняев Ю.В., Панин В.Е.* // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 1. С. 37–39.
- [6] *Гриняев Ю.В., Чертова Н.В., Панин В.Е.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 9. С. 134–135.
- [7] *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1985. 420 с.
- [8] *Гриняев Ю.В., Чертова Н.В.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 16. С. 57–62.
- [9] *Конева Н.А., Козлов Э.В.* // Изв. вузов. Физика. 1990. № 2. С. 89–106.
- [10] *Салли А.* Ползучесть и жаропрочные сплавы. М.: Оборонгиз, 1953. 304 с.