

УДК 539.376

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСА ДЕФОРМАЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛА

Н. А. Веклич, А. М. Локощенко*, П. Н. Веклич*

Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина,
119991 Москва

* Научно-исследовательский институт механики

Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 119992 Москва

E-mail: loko@imes.msu.ru

В условиях ползучести при постоянном напряжении или в условиях постоянной скорости деформации моделируется высокотемпературное растяжение металлов вплоть до разрушения. Исследуется зависимость предельной деформации, соответствующей разрушению, от нагружающего фактора (напряжения или скорости деформации). Немонотонный характер этой зависимости, имеющей внутренний максимум, описывается в рамках кинетической теории Работнова с использованием одного и двух параметров поврежденности. Приведены результаты анализа известных экспериментальных данных.

Ключевые слова: деформационная способность, скорость деформации, разрушение, ползучесть, длительная прочность, моделирование, поврежденность, сверхпластичность.

Испытания металлов на растяжение при высоких температурах обычно проводятся в условиях задания зависимости осевого напряжения σ от времени t либо зависимости скорости осевой деформации $\dot{\epsilon}$ от t . В настоящее время имеется относительно небольшое количество достоверных экспериментальных данных, характеризующих высокотемпературное деформирование металлов вплоть до разрушения в широком диапазоне напряжений σ или скоростей деформаций $\dot{\epsilon}$. Это обусловлено сложностью измерения деформаций образцов в условиях высоких температур, а также трудностями, которые возникают, когда предельные деформации ϵ_* , накопленные к моменту разрушения t_* , достигают десятков и сотен процентов. Ограниченность и разрозненность фактического материала приводит к тому, что даже в случае одноосного напряженного состояния уравнения, описывающие деформирование материала вплоть до разрушения, окончательно не сформулированы.

1. Моделирование немонотонной зависимости предельной деформации ползучести от напряжения. Для описания высокотемпературного растяжения вплоть до разрушения используем концепцию механического уравнения состояния, предложенную Ю. Н. Работновым [1] для моделирования процесса ползучести. Согласно этой концепции скорость деформации ползучести $\dot{\rho}$ определяется напряжением σ , температурой и некоторым количеством структурных параметров, которые в процессе ползучести изменяются в соответствии с кинетическими уравнениями. При описании длительной прочности обычно используется структурный параметр $\omega(t)$, который является некоторой мерой поврежденности материала. Каждому состоянию поврежденности приписывается значение

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-01-00226).

$0 \leq \omega \leq 1$, при этом значение $\omega = 0$ соответствует неповрежденному материалу, значение $\omega = 1$ — материалу при разрушении.

В некоторых испытаниях металлов в условиях ползучести до разрушения наблюдается немонотонное изменение величины предельной деформации ползучести p_* , соответствующей моменту разрушения t_* , в исследуемом диапазоне значений постоянного растягивающего напряжения σ_0 (см., например, [2]). В [3] при исследовании ползучести стали марки 15X1M1Ф при температуре 565 °С выполнен анализ структуры разрушенных образцов; при этом показано, что экстремумы зависимости $p_*(\sigma_0)$ и зависимости количества трещин на единицу поверхности $m(\sigma_0)$ достигаются при одном и том же значении σ_0 . В [4] отмечено, что при моделировании немонотонной зависимости $p_*(\sigma_0)$ для учета влияния напряжения на скорость ползучести и скорость накопления поврежденности следует использовать различные функциональные соотношения.

Для описания процесса ползучести при постоянном напряжении σ_0 вплоть до разрушения и определения деформации p_* рассмотрим степенную зависимость скорости ползучести от напряжения:

$$\dot{p} = A \left(\frac{\sigma_0}{1 - \omega} \right)^n \quad (1)$$

и три вида кинетического уравнения для $\dot{\omega}$:

$$\dot{\omega} = B_1 \frac{\text{sh}(\sigma_0/c)}{(1 - \omega)^n}; \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = B_2 \frac{\sigma_0^{n/2} \exp(\sigma_0/c)}{(1 - \omega)^n}; \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = B_3 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_b - \sigma_0} \right)^k \frac{1}{(1 - \omega)^n} \quad \text{при } n > k > 0, \quad 0 < \sigma_0 < \sigma_b \quad (4)$$

(σ_b — условный предел кратковременной прочности при температуре испытаний). Проинтегрировав отношения $\dot{p}/\dot{\omega}$, в соответствии с (1)–(4) получим следующие зависимости предельной деформации p_* от уровня напряжения σ_0 :

$$p_* = \frac{A}{B_1} \frac{\sigma_0^n}{\text{sh}(\sigma_0/c)}, \quad p_* = \frac{A}{B_2} \frac{\sigma_0^{n/2}}{\exp(\sigma_0/c)}, \quad p_* = \frac{A}{B_3} \sigma_0^{(n-k)} (\sigma_b - \sigma_0)^k. \quad (5)$$

При малых значениях σ_0 все зависимости $p_*(\sigma_0)$ в (5) являются возрастающими, при достаточно больших значениях σ_0 — убывающими. Следовательно, при некотором промежуточном значении напряжения σ_{00} предельная деформация максимальна. С учетом (5) условие $(dp_*/d\sigma_0)|_{\sigma_0=\sigma_{00}} = 0$ позволяет определить эти значения σ_{00} для кинетических уравнений (2)–(4) соответственно:

$$\text{th} \frac{\sigma_{00}}{c} = \frac{\sigma_{00}}{nc}, \quad \sigma_{00} = \frac{nc}{2}, \quad \sigma_{00} = \frac{(n-k)\sigma_b}{n}.$$

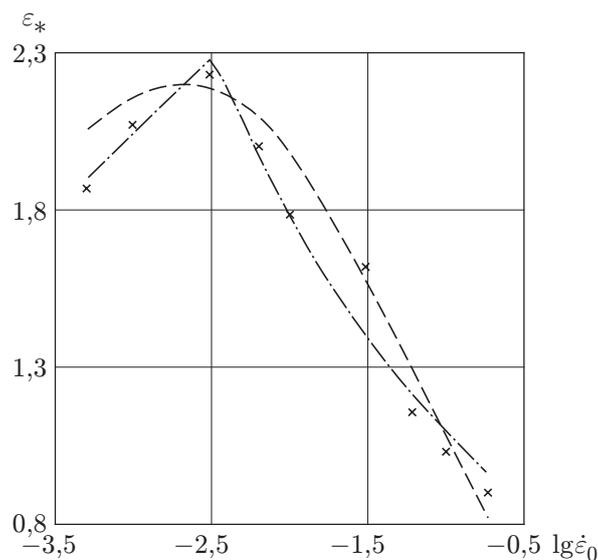
2. Моделирование немонотонной зависимости $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$. Среди основных требований, предъявляемых к механическим характеристикам материалов, большое значение имеет обеспечение высокого предела прочности и достаточно большого ресурса деформационной способности материала. Определение условий, необходимых для достижения высокого уровня предельных деформаций (деформаций, характеризующих разрушение материала), наиболее актуально для промышленных сплавов, используемых в процессах обработки металлов давлением. Наибольшие предельные деформации реализуются в условиях сверхпластичности, достигаемой при характерных для каждого сплава температуре и скорости

Значения $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$

$\dot{\varepsilon}_0, \text{c}^{-1}$	l_*/l_0	ε_*	$\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$	
			Формула (10)	Формула (15)
0,0005	6,49	1,87	2,06	1,90
0,001	7,93	2,07	2,17	2,04
0,003	9,33	2,23	2,19	2,27
0,006	7,39	2,00	2,10	1,96
0,01	6,05	1,80	1,98	1,76
0,03	5,08	1,63	1,60	1,40
0,06	3,16	1,15	1,31	1,21
0,10	2,80	1,03	1,09	1,09
0,18	2,47	0,91	0,84	0,96

деформации. Особенности механического поведения материалов в состоянии сверхпластичности подробно изложены в монографии [5].

В [6] приведены результаты экспериментального исследования деформирования до разрушения алюминиевого сплава 01570 при температуре 500 °С. В испытаниях использовались плоские образцы, вырезанные из листа вдоль направления прокатки. Представляет интерес определение при температуре 500 °С скорости деформации, приводящей к максимальной деформации при разрушении. В этих экспериментах, проводившихся при постоянной скорости логарифмической деформации $\dot{\varepsilon}_0$, получена немонотонная зависимость предельной логарифмической деформации ε_* от величины $\dot{\varepsilon}_0$ (с внутренним максимумом). При этом отношение длин l_* образцов при разрушении к начальной длине l_0 находится в диапазоне 2,5 ÷ 9,3. В таблице приведены средние для 3–7 испытаний значения параметра $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$, показанные на рисунке точками. Из результатов испытаний [6] следует, что при температуре 500 °С и $\dot{\varepsilon}_0 = 0,003 \text{ c}^{-1}$ сплав 01570 деформируется в условиях сверхпластичности.



Экспериментальная (точки) и расчетная (линии) зависимости предельной деформации от логарифмической скорости деформации:

штриховая линия — расчет по формуле (10) ($\dot{\varepsilon}_{00} = 0,002 \text{ c}^{-1}$, $n = 0,15$, $\beta = 8,47 \text{ c}^n$, $C = 0,723 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1/2}$); штрихпунктирная — расчет по формуле (15) ($\dot{\varepsilon}_0 = 0,003 \text{ c}^{-1}$, $D = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$, $n = 1,21$, $k = 0,90$)

Рассмотрим моделирование результатов испытаний, в которых логарифмическая скорость деформации $\dot{\varepsilon}(t)$ сохраняет постоянное значение $\dot{\varepsilon}_0$ вплоть до разрушения, а зависимость предельной деформации ε_* от скорости деформирования $\dot{\varepsilon}_0$ имеет немонотонный характер с внутренним максимумом. В случае, когда $\omega(t)$ является единственным структурным параметром, кинетическое уравнение для описания его изменения во времени можно представить в общем виде

$$\dot{\omega} = \varphi(\dot{\varepsilon}_0, \omega), \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t_*) = 1. \quad (6)$$

Сначала рассмотрим зависимость функции φ от ее аргументов $\dot{\varepsilon}_0$ и ω (6) в виде степенных функций

$$\dot{\omega} = B\dot{\varepsilon}_0^k(1 - \omega)^{-r}. \quad (7)$$

В этом случае в результате интегрирования (7) получаем

$$\varepsilon_* = \dot{\varepsilon}_0^{(1-k)} / (B(r+1)). \quad (8)$$

Согласно (8) при $0 < k < 1$ деформация ε_* является монотонно возрастающей функцией скорости деформации $\dot{\varepsilon}_0$, при $k > 1$ — монотонно убывающей функцией. Таким образом, описание немонотонной зависимости $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$ с помощью кинетического уравнения (7) невозможно.

Заменим степенную зависимость $\dot{\omega}(\dot{\varepsilon}_0, \omega)$ в (7) на функцию с тремя константами:

$$\dot{\omega} = C\sqrt{\dot{\varepsilon}_0} \exp(\beta\dot{\varepsilon}_0^n). \quad (9)$$

Тогда зависимость предельной деформации ε_* от скорости $\dot{\varepsilon}_0$ принимает вид

$$\varepsilon_* = \sqrt{\dot{\varepsilon}_0} / (C \exp(\beta\dot{\varepsilon}_0^n)). \quad (10)$$

При малых значениях $\dot{\varepsilon}_0$ зависимость $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$ является возрастающей, при больших значениях $\dot{\varepsilon}_0$ — убывающей. Следовательно, существует промежуточное значение $\dot{\varepsilon}_{00}$, при котором зависимость $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$ имеет максимум. Из условия $(d\varepsilon_*/d\dot{\varepsilon}_0)|_{\dot{\varepsilon}_0=\dot{\varepsilon}_{00}} = 0$ получаем, что значения $\dot{\varepsilon}_{00}$, n и β связаны соотношением

$$2\beta n(\dot{\varepsilon}_{00})^n = 1.$$

В таблице приведены значения $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$, вычисленные по формуле (10) при $\dot{\varepsilon}_{00} = 0,002 \text{ с}^{-1}$, $n = 0,15$, $\beta = 8,47 \text{ с}^n$ и $C = 0,723 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1/2}$. На рисунке зависимость $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$ показана штриховой линией.

Итак, введение зависимости скорости накопления поврежденности $\dot{\omega}$ от логарифмической скорости деформации $\dot{\varepsilon}_0$ в виде (9) позволяет описать наблюдаемую в экспериментах [6] немонотонную зависимость предельной деформации при разрушении от скорости $\dot{\varepsilon}_0$ с внутренним максимумом. Для оценки суммарного различия экспериментальных ε_* и теоретических $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$ значений предельных деформаций введем сумму

$$S = \sum_{i=1}^9 \left(\frac{\varepsilon_* - \varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)}{\varepsilon_* + \varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)} \right)^2. \quad (11)$$

Вычисления показывают, что при использовании (10), (11) значение $S = 0,0126$.

Рассмотрим моделирование немонотонной зависимости $\varepsilon_*(\dot{\varepsilon}_0)$ с помощью двух параметров поврежденности. Как известно, характер разрушения зависит от уровня нагружающего параметра (σ_0 или $\dot{\varepsilon}_0$) и для ряда материалов при одной и той же температуре может быть различным. При больших значениях σ_0 или $\dot{\varepsilon}_0$ наблюдается развитие необратимых сдвиговых деформаций вплоть до разрушения, которое происходит главным образом по

зерну. При малых значениях σ_0 или $\dot{\epsilon}_0$ вдоль границ зерен происходит образование пор, затем объединение пор перерастает в трещины, что приводит к межзеренному разрушению материала. Очевидно, что в условиях, когда существуют нарушения структуры двух типов, целесообразно ввести два структурных параметра: $\omega(t)$ и $\Omega(t)$ [7–9].

Рассмотрим простейшую форму кинетических уравнений, характеризующих изменение структурных параметров ω , Ω во времени t :

$$\dot{\omega} = D(\dot{\epsilon}_0/\dot{\epsilon}_{00})^n, \quad \dot{\Omega} = D(\dot{\epsilon}_0/\dot{\epsilon}_{00})^k, \quad n > k > 0 \quad (12)$$

(параметры ω , Ω изменяются от нуля в начальный момент времени до единицы при разрушении). Момент разрушения t_* определяется некоторым соотношением между параметрами ω и Ω . В качестве простейшего условия разрушения примем следующее:

$$\max(\omega(t_*), \Omega(t_*)) = 1. \quad (13)$$

Соотношения (12) показывают, что структурные параметры $\omega(t)$ и $\Omega(t)$ изменяются во времени независимо друг от друга. Разрушение наступает в момент времени t_* , когда согласно (13) параметр $\omega(t)$ принимает значение, равное единице. В предположении, что величина $\dot{\epsilon}_{00}$ известна из экспериментов, двухпараметрическая модель длительного разрушения включает три константы: D , n , k . Интегрирование (12) от $t = 0$ до t_* позволяет получить следующие соотношения для времен разрушения $t_{\omega*}$ и $t_{\Omega*}$ и деформаций разрушения $\varepsilon_{\omega*}$ и $\varepsilon_{\Omega*}$, вычисляемых из условия равенства единице параметров поврежденности ω и Ω :

$$\begin{aligned} t_{\omega*} &= (\dot{\epsilon}_{00}/\dot{\epsilon}_0)^n/D, & \varepsilon_{\omega*} &= (\dot{\epsilon}_{00})^n(\dot{\epsilon}_0)^{(1-n)}/D, \\ t_{\Omega*} &= (\dot{\epsilon}_{00}/\dot{\epsilon}_0)^k/D, & \varepsilon_{\Omega*} &= (\dot{\epsilon}_{00})^k(\dot{\epsilon}_0)^{(1-k)}/D. \end{aligned} \quad (14)$$

С учетом, что $n > k$, из (14) следует

$$\begin{aligned} \varepsilon_* &= \varepsilon_{\Omega*} = (\dot{\epsilon}_{00})^k(\dot{\epsilon}_0)^{(1-k)}/D & \text{при } \dot{\epsilon}_0 \leq \dot{\epsilon}_{00}, \\ \varepsilon_* &= \varepsilon_{\omega*} = (\dot{\epsilon}_{00})^n(\dot{\epsilon}_0)^{(1-n)}/D & \text{при } \dot{\epsilon}_0 \geq \dot{\epsilon}_{00}. \end{aligned} \quad (15)$$

Значения деформации разрушения, вычисленные по формуле (15) при $\dot{\epsilon}_{00} = 0,003 \text{ с}^{-1}$, $D = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $n = 1,21$ и $k = 0,90$, приведены в таблице. Зависимость $\varepsilon_*(\dot{\epsilon}_0)$, определяемая согласно (15) при указанных значениях констант, показана на рисунке штрихпунктирной линией. Вычисление суммарного различия экспериментальных и теоретических значений ε_* с использованием (11), (15) показывает, что в этом случае $S = 0,0083$.

Итак, моделирование предельной деформации с помощью двух параметров поврежденности (кинетические уравнения (12)) приводит к меньшему суммарному разбросу теоретических и экспериментальных значений $\varepsilon_*(\dot{\epsilon}_0)$, чем моделирование с помощью одного параметра поврежденности с использованием кинетического уравнения (9).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Работнов Ю. Н.** Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966.
2. **Локощенко А. М., Шестериков С. А.** Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // ПМТФ. 1980. № 3. С. 155–159.
3. **Мищенко Л. Д., Дьяченко С. С., Тарабанова В. П.** Исследование изменений структуры и характера разрушения стали 15Х1М1Ф в процессе ползучести // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1978. № 2. С. 110–112.
4. **Локощенко А. М., Шестериков С. А.** Модель длительной прочности с немонотонной зависимостью деформации при разрушении от напряжения // ПМТФ. 1982. № 1. С. 160–163.

5. **Васин Р. А.** Введение в механику сверхпластичности / Р. А. Васин, Ф. У. Еникеев. Уфа: Гилем, 1998. Ч. 1.
6. **Аминов О. В., Лазаренко Э. С., Романов К. И.** К исследованию ресурса деформационной способности // Завод. лаб. Диагностика материалов. 2004. Т. 70, № 1. С. 48–52.
7. **Любарт Е. Л.** Об одной возможности феноменологического описания процесса разрушения при ползучести // Научные работы аспирантов МГУ. М.: Ин-т механики Моск. ун-та, 1973. № 1. С. 116–120.
8. **Локощенко А. М., Шестериков С. А.** К проблеме оценки длительной прочности при ступенчатом нагружении // ПМТФ. 1982. № 2. С. 139–143.
9. **Локощенко А. М., Наместникова И. В.** Описание длительной прочности при ступенчатом нагружении // Пробл. прочности. 1983. № 1. С. 9–13.

Поступила в редакцию 8/XI 2006 г.
