

УДК 539.376

## ОХРУПЧИВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

*Р.А. Арутюнян*

Предложен критерий длительной прочности с учетом эффекта сжимаемости.

*Ключевые слова:* высокотемпературная ползучесть; тепловая хрупкость; несжимаемость; пористость; параметр сплошности (поврежденности); сжимаемость; критерий хрупкого разрушения.

---

## EMBRITTLEMENT AND FRACTURE OF METALS IN HIGH-TEMPERATURE CREEP

*R.A. Arutyunyan*

The article offers the criterion of long durability taking into account the effect of compressibility.

*Keywords:* high-temperature creep; thermal brittleness; incompressibility; porosity; continuity (damage) parameter; compressibility; the criterion of brittle fracture.

**Введение.** В опытах на высокотемпературную ползучесть металлических материалов наблюдаются два предельных состояния. Первое – близкое к вязкому течению, реализуется при воздействии относительно больших напряжений и высоких температур, второе – хрупкое при длительном воздействии малых напряжений и высоких температур. Во втором случае металлические материалы охрупчиваются (эффект тепловой хрупкости) [1]. Это эффект связан с физическими процессами накопления пор по границам зерен по механизму диффузии вакансий и зернограничного проскальзывания.

Для описания области хрупких разрушений методами механики материалов были разработаны критерии, базирующиеся на концепции рассеянной поврежденности Качанова–Работнова [2–4]. Эта концепция получила всемирное признание и развитие в трудах многих ученых в различных странах. В то же время отмечалось, что формальное введение параметра поврежденности, без придания ему физического содержания, не может полностью решить проблему длительной прочности. Были предложены различные варианты материализации этого параметра непосредственно в физических опытах. Наиболее распространенными можно считать опыты, в которых изучается эволюция пористости в процессе ползучести. Со-

гласно этим исследованиям в качестве параметра поврежденности рассматривалась относительная величина пор – число пор, отнесенное к площади поперечного сечения образца. Другие авторы считают необратимое изменение объема (разрыхление по терминологии В.В. Новожилова [5]) или плотности [6] наиболее представительной характеристикой поврежденности и в опытах изучаются изменения этих характеристик [7–13].

**Критерий длительной прочности Качанова–Работнова, основанный на концепции поврежденности.** Концепция поврежденности и критерий хрупкой прочности впервые были разработаны в работах Качанова и Работнова. В модели хрупкого разрушения Качанова [2] вводится параметр сплошности  $\psi$  ( $1 \geq \psi \geq 0$ ) произвольно без придания ему определенного физического содержания. В работах Работнова [3, 4] параметр поврежденности задается в виде  $\omega = 1 - \psi$ , ( $0 \leq \omega \leq 1$ ) и определяется соотношением  $\omega = F_T / F_0$  (где  $F_T$  – площадь трещин, располагающихся к моменту времени  $t$  в поперечном сечении растягиваемого образца,  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца). Из соотношения  $F = f_0 - F_T$  следует  $F = F_0(1 - \omega)$  ( $F$  – текущая площадь поперечного сечения образца).

Согласно Качанову [2], деформация ползучести не влияет на процессы разрушения, а скорость изменения параметра сплошности  $\psi$  задается степенной функцией от эффективного напряжения

$$\frac{d\psi}{dt} = -A \left( \frac{\sigma_{max}}{\psi} \right)^n, \quad (1)$$

где  $A > 0$ ,  $n \geq 0$  – эмпирические постоянные, не зависящие от напряжения;  $\sigma_{max} / \psi$  – эффективное напряжение.

Решается задача о растяжении образца под воздействием постоянной нагрузки  $P$ . Считается, что хрупкое разрушение происходит при малых деформациях, поэтому можно пренебречь изменением поперечного сечения образца, т. е. принимается условие  $F = F_0$ , тогда  $\sigma_{max} = \sigma = P / F = P / F_0 = \sigma_0 = const$ ,  $\sigma$  – истинное,  $\sigma_0$  – номинальное напряжение. При этих предположениях уравнение (1) записывается в виде

$$\frac{d\psi}{dt} = -A \left( \frac{\sigma_0}{\psi} \right)^n \quad (2)$$

Такой подход может придать параметру сплошности и поврежденности физическое содержание. Однако из условия  $F = F_0$ , которое используется в концепции Качанова, следует  $\omega = 0$ ,  $\psi = 1$ , т. е. теряет смысл само понятие поврежденности. Таким образом, подобная интерпретация параметра сплошности Качанова не представляется вполне корректной.

В модели хрупкого разрушения Работнова параметр поврежденности  $\omega$  задается следующим кинетическим уравнением:

$$\frac{d\omega}{dt} = A \left( \frac{\sigma_0}{1-\omega} \right)^n \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) идентичны при условии  $\omega = 1 - \psi$ ,  $d\psi = -d\omega$ . Решение этих уравнений при начальном условии  $t = 0$ ,  $\psi = 1$ ,  $\omega = 0$  имеет вид

$$\psi = 1 - \omega = \left[ 1 - (n+1) A \sigma_0^n t \right]^{\frac{1}{n+1}}. \quad (4)$$

Принимая условие разрушения  $t = t_f^b$ ,  $\psi = 0$ ,  $\omega = 1$ , из (4) следует критерий хрупкого разрушения Качанова–Работнова:

$$t_f^b = \frac{1}{(n+1) \cdot A \sigma_0^n}. \quad (5)$$

Для учета деформационных процессов Работнов ввел систему из двух взаимосвязанных уравнений для деформации ползучести  $\varepsilon$  и параметра поврежденности  $\omega$  [4]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = b \sigma^m (1-\omega)^{-q}, \quad (6)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = c \sigma^n (1-\omega)^{-r}, \quad (7)$$

где  $b, c, m, n, q, r$  – постоянные.

В случае чисто хрупкого разрушения и малых деформаций считается  $F = F_0$ ,  $\sigma = \sigma_0 = const$  и из решения системы уравнений (6)–(7) следует соотношение для деформации ползучести (согласно обозначениям в уравнениях (6)–(7)):

$$\varepsilon = \frac{k t_f^b}{m t_f^v} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{t_f^b} \right)^{1/k} \right], \quad (8)$$

где  $k = \frac{r+1}{r+1-q}$ ,  $t_f^b = \frac{1}{c(1+r)\sigma_0^n}$ ,  $t_f^v = \frac{1}{bm\sigma_0^m}$ .

Как уже было отмечено, из условия  $F = F_0$  следует  $\omega = 0$ , т. е. теряет смысл само понятие поврежденности.

Далее рассматривается случай больших деформаций и принимается условие несжимаемости, тогда напряжение определяется соотношением  $\sigma = \sigma_0 \exp(\varepsilon)$ , а система уравнений (6)–(7) имеет вид [2]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = b \sigma_0^m (1-\omega)^{-q} \exp(m\varepsilon), \quad (9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = c \sigma_0^n (1-\omega)^{-r} \exp(n\varepsilon). \quad (10)$$

Таким образом, уравнения (9)–(10) описывают поведение несжимаемой среды, для которой введение понятия поврежденности нельзя считать обоснованным.

**Критерий хрупкого (квазихрупкого) разрушения, основанный на концепции разрыхления материала.** Далее считаем, что пористость является основной характеристикой поврежденности, а в качестве интегральной меры пористости принимается изменение плотности, разрыхление материала. В соответствии с этими представлениями параметр сплошности (поврежденности) задается в виде  $\psi = \rho / \rho_0$ , где  $\rho_0$  – начальная  $\rho$  – текущая плотность образца. В начальном состоянии  $\rho = \rho_0$ ,  $\omega = 0$ ,  $\psi = 1$  в момент разрушения  $\rho = 0$ ,  $\psi = 0$ ,  $\omega = 1$ . В работах [14, 15] рассматривалась система кинетических уравнений для деформации ползу-

чести и параметра сплошности. В данной работе представлен модифицированный вариант этих уравнений. Рассмотрим следующую систему уравнений:

$$\psi^\beta \frac{d\varepsilon}{dt} = B\sigma^m, \quad (11)$$

$$\psi^\alpha \frac{d\psi}{dt} = -A\sigma^n, \quad (12)$$

где  $B, \alpha, \beta$  – постоянные;  $\sigma = \sigma_0 F_0 / F$ .

Учитывая закон сохранения массы  $\rho_0 l_0 F_0 = \rho l F$ , уравнения (11)–(12) можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = B\sigma_0^m \psi^{m-\beta} e^{m\varepsilon}, \quad (13)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = -A\sigma_0^n \psi^{n-\alpha} e^{n\varepsilon}. \quad (14)$$

Аналитическое решение системы уравнений (13)–(14) не представляется возможным. Далее рассматриваются некоторые приближенные решения. Если ограничиться случаем малых деформаций, тогда можно считать  $e^{n\varepsilon} \approx 1$ ,  $e^{m\varepsilon} \approx 1$ , и из решения уравнений (13)–(14) при начальных условиях, соответственно,  $t=0$ ,  $\varepsilon=0$  и  $t=0$ ,  $\psi=1$ , следуют соотношения для деформации ползучести и параметра поврежденности:

$$\varepsilon = \frac{B\sigma_0^{m-n}}{A\gamma} \left\{ 1 - \left[ 1 - (\alpha - n + 1) A\sigma_0^n t \right]^{\frac{\gamma}{\alpha - n + 1}} \right\}, \quad (15)$$

$$\psi = \left[ 1 - (\alpha - n + 1) A\sigma_0^n t \right]^{\frac{1}{\alpha - n + 1}}, \quad (16)$$

где  $\gamma = m - \beta + \alpha - n + 1$ .

На рисунке 1 представлены теоретические кривые ползучести согласно соотношению (15) для различных значений коэффициента  $\alpha$  ( $\alpha = 8$  – кривая 1,  $\alpha = 6$  – кривая 2,  $\alpha = 4$  – кривая 3). Как видно на рисунке, предложенная система уравнений способна описать третий участок кривых ползучести. При расчетах были приняты следующие значения коэффициентов:  $n = 2$ ,  $m = 4$ ,  $A = 10^{-9} [\text{МПа}]^{-2}$ ,  $\sigma_0 = 100 \text{ МПа}$ ,  $B = 5 \cdot 10^{-17} [\text{МПа}]^{-4}$ ,  $\beta = 1$ .

На рисунке 2 представлены кривые изменения параметра сплошности согласно формуле (16) при различных значениях коэффициента  $\alpha$  ( $\alpha = 6$  – кривая 1,  $\alpha = 4$  – кривая 2,  $\alpha = 2$  – кривая 3 и  $\alpha = 1,1$  – кривая 4), которые находятся в качественном согласии с соответствующими опытными кривыми [7–13]. При расчетах были приняты следующие значения коэффициентов:  $n = 2$ ,  $A = 10^{-9} [\text{МПа}]^{-2}$ ,  $\sigma_0 = 100 \text{ МПа}$ .

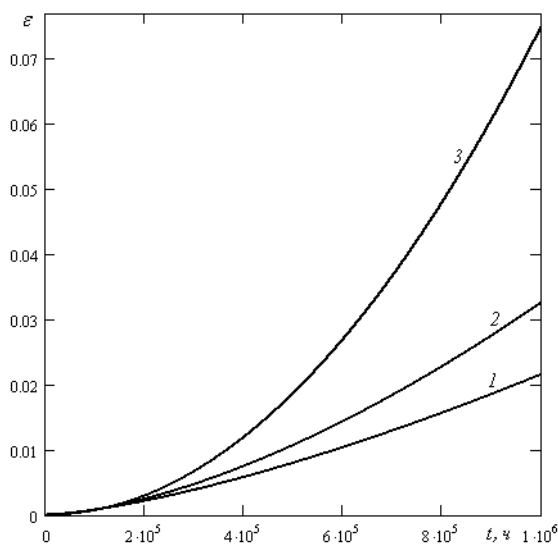


Рисунок 1 – Кривые ползучести согласно формуле (15):  $\alpha = 8$  – кривая 1;  $\alpha = 6$  – кривая 2;  $\alpha = 4$  – кривая 3

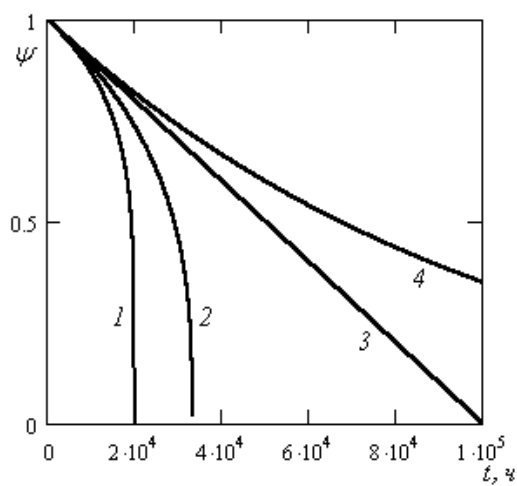


Рисунок 2 – Кривые изменения параметра сплошности  $\psi$  согласно формуле (16):  $\alpha = 6$  – кривая 1;  $\alpha = 4$  – кривая 2;  $\alpha = 2$  – кривая 3;  $\alpha = 1,1$  – кривая 4

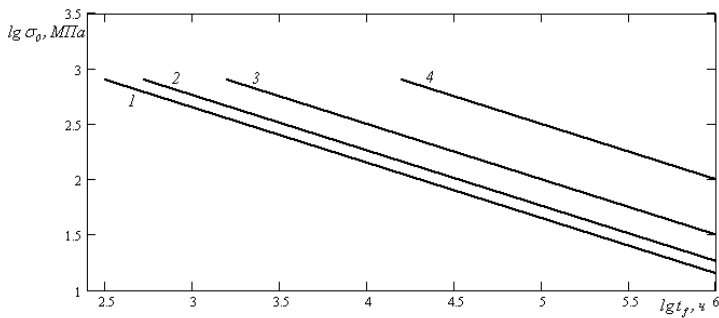


Рисунок 3 – Кривые длительной прочности согласно критерию (17):  $\alpha = 6$  – кривая 1;  $\alpha = 4$  – кривая 2;  $\alpha = 2$  – кривая 3;  $\alpha = 1,1$  – кривая 4

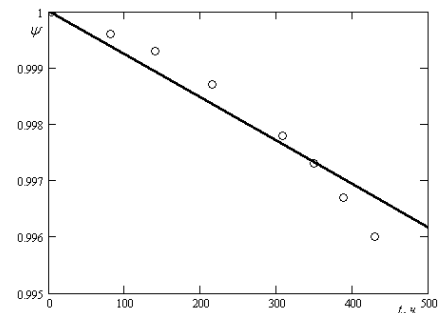


Рисунок 4 – Кривые поврежденности согласно решению (16) и экспериментальные результаты для сплава никель-0,1 ат. % палладия согласно работе [11] при 1300 °С

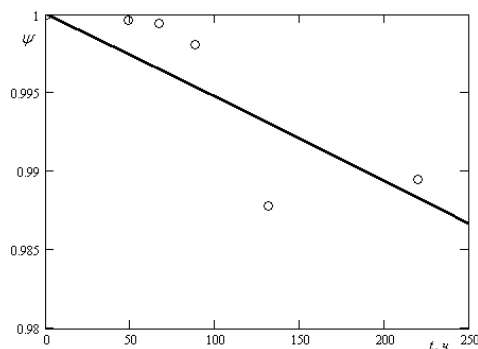


Рисунок 5 – Кривые поврежденности согласно решению (16) и экспериментальные результаты для алюминия согласно работе [12] при 250 °С

Принимая условие разрушения  $t = t_f$ ,  $\psi = 0$ , из (16) получим критерий длительной прочности:

$$t_f^b = \frac{I}{(\alpha - n + 1) \cdot A\sigma_0^n} \quad (17)$$

При  $\alpha = 2n$  критерий (17) совпадает с критерием Качанова–Работнова (5).

На рисунке 3 в двойных логарифмических координатах построены кривые длительной прочности согласно формуле (17) для разных значений коэффициента  $\alpha$ :  $\alpha = 6$  – кривая 1,  $\alpha = 4$  – кривая 2,  $\alpha = 2$  – кривая 3 и  $\alpha = 1,1$  – кривая 4.

Для экспериментального обоснования предложенного в работе параметра поврежденности  $\psi$ , были использованы имеющиеся в мировой научной литературе результаты опытов по изменению плотности в процессе ползучести, полученные для различных металлов и сплавов: медь [8, 10] алюминий [12], сплав Magnox AL80 [12], сплав никель-0,1 ат. % палладия [11], различные

жаропрочные сплавы. На рисунках 4, 5 показаны теоретические кривые изменения плотности согласно решению (16) и экспериментальные точки для некоторых из указанных металлов и сплавов. Опыты выполнялись при различных температурах и уровнях растягивающих напряжений. Времена выдержки под нагрузкой до разрушения варьировались в пределах 30–500 часов. На этом временном интервале функция поврежденности выражается в виде прямой линии. На этих рисунках видно, что экспериментальные точки согласуются с теоретическими кривыми.

**Заключение.** В работе учитывается сжимаемость металлических материалов и в качестве параметра сплошности рассматривается необратимое изменение плотности. На основе этого параметра и с учетом закона сохранения массы предложены взаимосвязанные уравнения для деформации ползучести и параметра сплошности. Получены аналитические выражения для деформации ползучести и параметра сплошности и сформулирован критерий длительной прочности. Построены соответствующие теоретические кривые. Показано, что теоретические кривые поврежденности хорошо описывают экспериментальные результаты по изменению плотности для различных металлических материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 14-01-00823, № 15-01-03159).

#### Литература

1. Арутюнян Р.А. Проблема охрупчивания в механике материалов / Р.А. Арутюнян // Вестн. С.-Петербург. ун-та. 2009. Сер.1. Вып. 1. С. 54–57.

2. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести / Л.М. Качанов // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 26–31.
3. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения / Ю.Н. Работнов // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР. 1959. С. 5–7.
4. Работнов Ю.Н. О разрушении вследствие ползучести / Ю.Н. Работнов // ПМТФ. 1963. № 2. С. 113–123.
5. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении / В.В. Новожилов // Прикладная математика и механика. 1965. № 4. С. 681–689.
6. Арутюнян Р.А. Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов / Р.А. Арутюнян. СПб.: Изд-во СПбГУ. 2004. 252 с.
7. Ratcliffe R.T. Mechanism of cavitation in magnesium during creep / R.T. Ratcliffe, G.W. Greenwood // Phil. Mag. 1965. Vol. 12. P. 59–69.
8. Boethner R.C. A study of the growth of voids in copper during the creep process by measurement of the accompanying change in density / R.C. Boethner, W.D. Robertson // Trans. of the Metallurg. Society of AIME. 1961. Vol. 221. № 3. P. 613–622.
9. Beghi C. Density measurements after tensile and creep tests on pure and slightly oxidised aluminium / C. Beghi, C. Geel, G. Piatti // J. Mat. Sci. 1970. Vol. 5. № 4. P. 331–334.
10. Brathe L. Macroscopic measurements of creep damage in metals / L. Brathe // Scand. J. Metal. 1978. Vol. 7. № 5. P. 199–203.
11. Woodford D.A. Density changes during creep in nickel / D.A. Woodford // Metal science journal. 1969. Vol. 3. № 11. P. 234–240.
12. Hanson D. The deformation of metals under prolonged loading. Part 1. The flow and fracture of aluminum / D. Hanson, M. Wheller // The Journal of the Institute of Metals. 1931. Vol. 45. P. 229–264.
13. Куманин В.И. Долговечность металла в условиях ползучести / В.И. Куманин, Л.А. Ковалева, С.В. Алексеева. М.: Металлургия. 1988. 223 с.
14. Арутюнян Р.А. Высокотемпературное охрупчивание и длительная прочность металлических материалов / Р.А. Арутюнян // Механика твердого тела. 2015. № 2. С. 96–104.
15. Arutyunyan R.A. High-temperature embrittlement and long-term strength of metallic materials / R.A. Arutyunyan // Mechanics of solids. 2015. Vol. 50. Iss. 2. P. 191–197.