

УДК 539.376

О РОЛИ ПОРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ В УСЛОВИЯХ  
 ПОЛЗУЧЕСТВИ

АРУТЮНЯН Р. А.

Современные физические представления о процессе разрушения конструкционных материалов сводятся к описанию эволюции его дефектной структуры [1]. Под воздействием постоянных или переменных напряжений этот процесс становится направленным. Возникновение новых дефектов и их слияние приводят к интенсивному образованию локальных микронесплошностей типа пор и трещин и в результате к окончательному разрушению материала. Точные экспериментальные методы исследования способствовали выявлению механизмов поро- и трещинообразования при различных уровнях действующих напряжений и температур.

В условиях повышенных напряжений и относительно низких температур возникают клиновидные трещины на границах зерен. При длительном воздействии низких напряжений и высоких температур развиваются преимущественно межзеренные разрушения. Вместо клиновидных трещин образуются микрогоры, например, по механизму конденсации вакансий. В литературе по теории ползучести детально изучены схемы образования пор и трещин для «чистых» металлов. В случае конструкционных металлических материалов, большинство из которых являются сложными композициями с частицами вторичных фаз выделений, существует еще одна возможность образования пор — на частах второй фазы. Условием зарождения пор при этом является низкая адгезия на поверхности раздела частица-матрица [2]. Для отрыва частицы от матрицы нет необходимости в конденсации вакансий — нарушение сцепления между частицей и матрицей осуществляется при помощи деформационных процессов. По мере увеличения деформации растут и поры, которые затем укрупняются по механизму образования внутренней шейки. Поэтому поверхность разрушения имеет характерную форму чашечного излома. Во многих случаях при оптических и электронно-микроскопических исследованиях внутри пор обнаруживали частицы включений, а количество пор пропорционально количеству частиц второй фазы. При длительных высокотемпературных испытаниях возможны и другие механизмы порообразования [2].

Обратимся также к работам, в которых исследуется кинетика накопления пор. На основе экспериментальных исследований порооб-

разования в условиях ползучести в работе [3] предложено следующее кинетическое уравнение для числа пор  $N(t)$ :

$$\dot{N} = k_0(1 - N/N_*) \quad (1)$$

где  $N_*$  — количество пор в момент разрушения,  $k_0 = k_0(\sigma, T)$  ( $\sigma$  — напряжение,  $T$  — температура).

При условии  $t = 0, N = 0$  и  $k_0 = \text{const}$ , из решения уравнения (1)

$$\frac{N}{N_*} = (1 - \exp(-k_0 N_* t)) \quad (2)$$

следует, что накопление пор в процессе ползучести происходит неравномерно. Интенсивное накопление на первых стадиях процесса постепенно устанавливается и с достижением некоторой критической величины  $N = N_*$  наступает макроразрушение. В отличие от существующих представлений нельзя считать  $N_*$  постоянной величиной материала. Опыты показывают, что эта величина зависит от напряжения. Более того, эта зависимость является немонотонной [3].

При построении уравнений теории ползучести воспользуемся известным кинетическим подходом [4, 5]. Параметр повреждаемости определим соотношением  $\omega = N/N_*$  ( $0 \leq \omega \leq 1$ ). В начальном состоянии  $N = 0, \omega = 0$ , то есть материал считается абсолютно неповрежденным. При  $N = N_*$  наступает полное поврежденное состояние и происходит разрушение. Принимая степенной закон связи между скоростью деформации  $\dot{\epsilon}$  и напряжением  $\sigma$ , можно записать следующее уравнение:

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^m (1 - \omega)^{-k_1} \quad (3)$$

где  $B, m, k_1$  — постоянные.

Внося выражение (2) для параметра  $\omega$  в (3), получим закон ползучести, учитывающий кинетику поробразования:

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^m \exp(k_1 N_* t) \quad (4)$$

где  $k = k_0 k_1$ .

Перейдем к проблеме разрушения в условиях ползучести. Подходя к этой проблеме с позиций теории надежности, процессы поробразования будем рассматривать как потоки отказов, а скорость ползучести свяжем с интенсивностью отказов  $\lambda$ , зависимостью:

$$\lambda = r\dot{\epsilon} = rB\sigma^m \exp(k N_* t) \quad (5)$$

где  $r$  — некоторый коррелирующий множитель.

Интенсивность отказов выражается через функцию надежности следующим дифференциальным уравнением [6, 7]:

$$\dot{R} = -\frac{R}{R} \lambda \quad (6)$$

Если интенсивность отказов  $\lambda(t)$  задана, то решая уравнение (6) при условии  $R(0) = 1$ , получим

$$R(t) = \exp \left[ - \int_0^t i(\tau) d\tau \right] \quad (7)$$

Внося (5) в (7) и интегрируя, приходим к выражению для функции надежности в виде распределения Гумбеля

$$R(t) = \exp \left[ - \frac{r B z^m N_0}{k} (\exp(k N_0 t) - 1) \right] \quad (8)$$

Для закона надежности (8) математическое ожидание срока службы материала вычисляется следующим образом:

$$M = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau = \frac{N_0}{k} \exp \left( \frac{r B z^m N_0}{k} \right) / \int_{-r}^{-\infty} \frac{e^z}{z} dz, \quad z = -r \exp(k/N_0 t), \quad r = \frac{r B z^m N_0}{k} \quad (9)$$

Формулу (9) можно рассматривать как критерий длительной прочности, связывающий напряжение  $\sigma$  математическим ожиданием времени до разрушения.

В рамках данного подхода имеется также возможность учета естественного разброса значений времени до разрушения в условиях ползучести. С этой целью перейдем к статическому определению функции надежности.

Пусть в начальном состоянии в материале имеются  $N_0$  потенциальных центров, на которых возможно образование и развитие пор, а  $N(t)$  — текущее число пор, тогда [7]

$$R(t) = 1 - \frac{N(t)}{N_0} \quad (10)$$

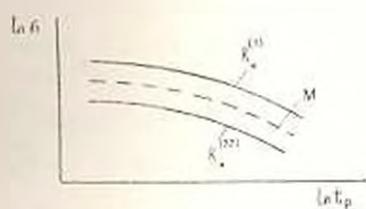
Внося (10) в (8) и принимая условие  $t = t_p$ ,  $N = N_k$ ,  $R = R_*$ , получим критерий длительной прочности, связывающий время до разрушения  $t_p$  с заданным уровнем надежности  $R_*$

$$t_p = \frac{N_0}{k} \ln \left[ 1 + \frac{k \ln \frac{1}{R_*}}{r B z^m N_0} \right] \quad (11)$$

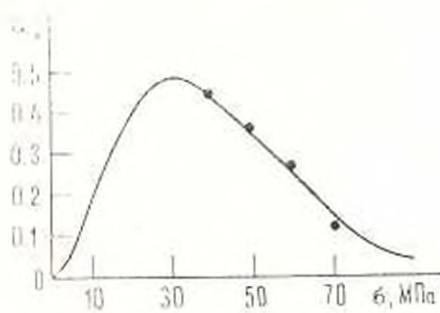
Теоретические кривые длительной прочности показаны схематически на фиг. 1. Пунктирная линия на этом рисунке соответствует математическому ожиданию срока службы материала (9), а сплошные кривые построены согласно критерию (11) для двух уровней надежности  $R_*^{(1)}$  и  $R_*^{(2)}$ , которые можно подобрать таким образом, чтобы охватить всю полосу разброса экспериментальных точек с указанием возможных нижней и верхней границ работоспособности материала.

Для проверки полученных соотношений обратимся к некоторым

экспериментальным результатам. В работе [8], по-видимому, впервые экспериментально материализован параметр повреждаемости  $\omega_*$  и опытах на ползучесть и разрушение образцов из технической чистой меди марки МЗ при температуре 100°C. В качестве меры повреждаемости принято отношение суммарной длины поперечных границ занятых порами и микротрещинами, к длине всех поперечных границ между зёрнами. При этом установлено, что разрушение при ползучести всегда наступает при неполном заглавлении поперечного сечения трещинами. В опытах подтверждается существование указанных выше двух механизмов разрушения в области относительно больших и ма-



Фиг. 1



Фиг. 2

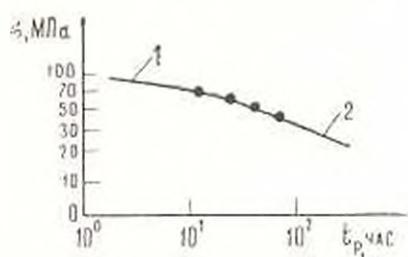
лых величины напряжении. Наблюдается также существенная зависимость величины от напряжения. При больших напряжениях наступает в результате развития необратимых сдвиговых деформаций, связанных, по-видимому, с перемещением дислокаций. Поэтому количество пор и трещин относительно невелико. При малых напряжениях ползучесть сопровождается процессами поро- и трещинообразования по границам зёрен и последующим межзеренным разрушением. Учитывая эти результаты и данные работы [3] о неомононом характере накопления повреждаемости в зависимости от напряжения, на фиг. 2 показан схематично возможный график функции  $\omega_*(\sigma)$ . Точки на этом рисунке соответствуют экспериментальным данным работы [8].

Для сравнения полученного критерия длительной прочности с данными опыта воспользуемся некоторыми приближенными оценками. Разлагая в (11) логарифмы в ряд и удерживая первые члены, получим следующую формулу

$$t_p = \frac{1-R_0}{rB\sigma^m} = \frac{N_0 \Lambda_0}{rB\sigma^m} = \frac{\omega_*(\sigma)}{rB\sigma^m} \quad (12)$$

На фиг. 3 в координатах  $\ln t_p - \ln \sigma$  показан критерий длительной прочности (12). Точками на фиг. 3 отмечены опытные данные работы [8]. Согласно этим результатам получены следующие величины коэффициентов:  $m=6$ ,  $B=1,2 \cdot 10^{-13} [\text{МПа}]^{-6} [\text{ч}]^{-1}$ ,  $r=13$ .

Критерий (12) дает качественно



Фиг. 3

правильную картину разрушения материала при ползучести, охватывающая участки квазивязкого (участок 1 на фиг. 3) и вязко-хрупкого (участок 2 на фиг. 3) разрушения.

## ON EFFECT OF PORE GENERATION UNDER DISRUPTION IN A CREEP CONDITIONS

R. A. ARUTYUNIAN

ՈՐԿՐԻ ԳՈՅՔԱՆՆԵՐՈՒՄ ՔՈՆՏՐԱԿՏԻ ԱՍՏՈՆՈՒ ՀՈՐՈՒՄ  
ԱՌՋՈՆՈՒՄԵ ՊԵՐԻ ՍՈՐՈՑ

Ռ. Ա. ԱՐՄԵՆՅԱՆԻԱՆ

Ս. Վ. Փ. Ո. Փ. Ո. Փ.

Առգրի պայմաններում շարժառարկայի պայմանները բնորոշվում են որպես խափանումների հոսքեր, որոնց բնանկարագրիչը կապվում է առգրի արագության հետ:

Կերամիզում է շտապիտայի ֆունկցիա և որոշվում է նյութի ծառայության ժամկետի մաթեմատիկական ապաստույթ: Շտապիտայի ֆունկցիայի ստատիկ որոշման ղեկավարում նկատագրվում է նաև ժամանակի փորձնական արժեքների բնական զրոյի միջին րաչառությունը՝ նշելով նյութի աշխատանքային վերին և ներքին սահմանները:

### ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов А. И. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высшая школа, 1983. 143 с.
2. Мартин Дж. Л. Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов. М.: Металлургия, 1983. 166 с.
3. Cane J., Abildgaard C. P. Intergranular creep cavitation in low alloy ferritic steels. Metal Matrix, 1981, vol. 15, № 7, p. 275-301.
4. Работнов Ю. И. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
5. Шестериков С. А., Локощенко А. М. Ползучесть и длительная прочность металлов.—В сб.: Итоги науки и техники. Механ. деформ. тверд. тела. Т. 13. М.: 1980, с. 3—104.
6. Гнеденко Б. В., Белая Ю. К., Соловьев А. Л. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
7. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машинностроение, 1984. 312 с.
8. Локощенко А. М. Исследование поверждаемости материала при ползучести и длительной прочности. Ж. прикладной мех. и тех. физики, 1982, № 6, с. 129-133.

Ленинградский госуниверситет  
им. А. А. Жданова

Поступила в редакцию  
18.IV.1988