

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 приводит к интенсивному образованию локальных микронесплошностей типа пор и трещин и в результате к окончательному разрушению материала. Тонкие 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 микропоры, 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 частицах 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, $k_0 = k_0(\sigma, T)$ (σ —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 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 σ , 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 ω 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 порообразования будем рассматривать как потоки отказов, а скорость ползучести свяжем с интенсивностью отказов λ , зависимостью:

$$\lambda = r\dot{\epsilon} = rB\sigma^m \exp(k_1/N_* t) \quad (5)$$

где r —некоторый коррелирующий множитель.

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

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

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

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

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

$$R(t) = \exp \left[- \frac{rBz^m N_*}{k} (\exp(k/N_* t) - 1) \right] \quad (8)$$

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

$$M = \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau = \frac{N_*}{k} \exp \left(\frac{rBz^m N_*}{k} \right) J \quad (9)$$

$$J = \int_{-r}^{-\infty} \frac{e^z}{z} dz, \quad z = -r \exp(k/N_* t), \quad c = \frac{rBz^m N_*}{k}$$

Формулу (9) можно рассматривать как критерий длительной прочности, связывающий напряжение с 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]

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

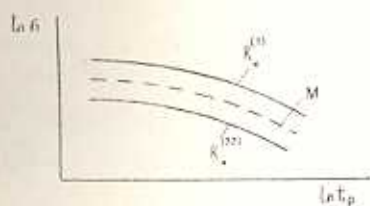
Внося (10) в (8) и принимая условие $t = t_p$, $N = N_*$, $R = R_*$, получим критерий длительной прочности, связывающий время до разрушения t_p с заданным уровнем надежности R_* .

$$t_p = \frac{N_*}{k} \ln \left[1 + \frac{k \ln \frac{1}{R_*}}{rBz^m N_*} \right] \quad (11)$$

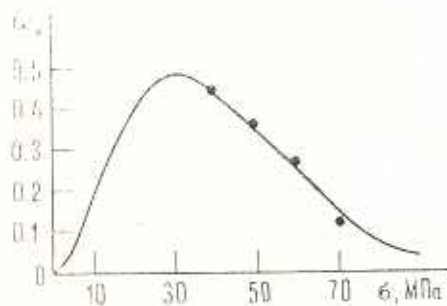
Теоретические кривые длительной прочности показаны схематически на фиг. 1. Пунктирная линия на этом рисунке соответствует математическому ожиданию срока службы материала (9), а сплошные кривые построены согласно критерию (11) для двух уровней надежности $R_*^{(1)}$ и $R_*^{(2)}$, которые можно подобрать 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 ω_* в опытах на ползучесть и разрушение образцов из технической чистой меди марки МЗ при температуре 400°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 заполнении поперечного сечения трещинами. В опытах подтверждается существование указанных выше двух механизмов разрушения в области относительно больших и ма-



Фиг. 1



Фиг. 2

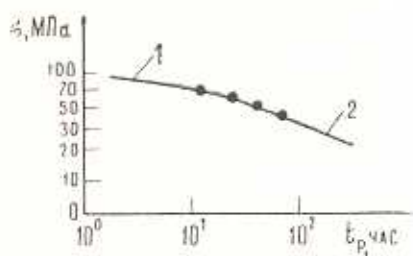
лых величин напряжений. Наблюдается также существенная зависимость величины от напряжения. При больших напряжениях наступает в результате развития необратимых сдвиговых деформаций, связанных, по-видимому, с переползанием дислокаций. Поэтому количество пор и трещин относительно невелико. При малых напряжениях ползучесть сопровождается процессами поро- и трещинообразования по границам зерен и последующим межзеренным разрушением. Учитывая эти результаты и данные работы [3] о немономонном 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:

$$t_p = \frac{1 - R_*}{r B \sigma^m} = \frac{N_* / N_0}{r B \sigma^m} = \frac{\omega_*(\sigma)}{r B \sigma^m} \quad (12)$$

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

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) разрушений.

ON EFFECT OF PORE GENERATION UNDER DISRUPTION IN A CREEP CONDITIONS

R. A. ARUTUNIAN

ՍՈՂԲ ԳՈՅԲԱՆՆԵՐՈՒՄ ՔՈՅՔՈՅԻՄ ԺՅՄԱՆԱ ՀՈԳՈՒ
ԱՌՁՁՅՈՒՄԻ ԳԵՐԻ ԴԱՌՆ

Ր. Ա. ԱՐՄՈՒՆՅԱՆ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Վ

Սողբի պայմաններում շոգու առաջացման պրոցեսները բնարկվում են որպես խափանումների հոսքեր, որոնց ինտենսիվությունը կապվում է սողբի արագության հետ:

Ներմուծվում է Հուսալիության ֆունկցիա և որոշվում է նյութի ժառանգության ժամկետի մաթեմատիկական սպասումը: Հուսալիության ֆունկցիայի առարկի որոշման դեպքում նկարագրվում է նաև ժամանակի փորձնական արժեքների բնական ցրումը մինչև թայթայումը՝ նշելով նյութի աշխատանքային վերին և ներքին սահմանները:

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов А. Н. Введение в теорию дефектов в кристаллах. М.: Высшая школа, 1983. 143 с.
2. Мартин Дж. У. Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов. М.: Металлургия, 1983. 166 с.
3. Cain J., Middleton C. Y. Intergranular creep-cavity formation in lowalloy bainitic steels /Metal science, 1981.—vol. 15. № 7, p. 295-301.
4. Работнов Ю. П. 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., Беллев Ю. К., Соловьев А. Л. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
7. Бологин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 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.1983