

УДК 539.4

МИКРОМЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© 2011 г.

Э.Б. Завойчинская

Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова

elen@altomira.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматривается математическая модель для описания микроразрушения металлов при простых процессах гармонического нагружения, постулирующая взаимосвязь между вероятностью микроразрушения и процессом последовательного развития субмикро-, микро-, коротких и макротрещин. Учитываются основные закономерности процесса разрушения, установленные по результатам экспериментального изучения разрушения металлов при симметричном нагружении методами физики и механики твердого тела.

Ключевые слова: субмикроскопические, микроскопические и короткие трещины, структурные параметры сталей, простое нагружение, вероятность микроразрушения.

Рассмотрим процесс микроразрушения металлов. Инкубационный период развития микроразрушения характеризуется скоплением дефектов, зарождением дислокаций, их движением и накоплением в определенных областях. Дислокации подходят к границам зерен, преодолевают барьер, возникает локальный разрыв – образование микродефектов типа субмикроскопических трещин с характерной средней длиной $l_1 \leq 10^{-5}$ мм и микроскопических трещин длиной $l_2 \in (10^{-5} - 10^{-3})$ мм, слияние которых приводит к образованию коротких нераспространяющихся трещин длиной $l_3 \in (10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2})$ мм [1–5].

В механике разрушения упругих тел изменение длины l трещины нормального отрыва характеризуется коэффициентами интенсивности напряжений K_I и трещиностойкости K_{Ic} и числом циклов нагружения [6]. В предлагаемой модели микроразрушения вводятся понятия приведенной длины i -го вида трещин $l_i^* = l_i^*(t)$ и вероятности микроразрушения как меры достижения ею соответствующего порогового значения \tilde{l}_i^* . При этом $l_i^*(t) = V_c q_i(t) l_i$, $i = 1, 2, 3$, где V_c – характерный объем макрообразца, l_i – среднее значение длины и $q_i = q_i(t)$ – объемная плотность i -го вида трещин на интервале времени $t \in [0, t^*]$ [1–3]. Для одномерного симметричного нагружения постулируется существование зависимости между вероятностью микроразрушения $P_i = P_i(l_i^*, \tilde{l}_i^*, \sigma_a, n)$, коэффициентом интенсивности напряжений $K_I^i = K_I^i(l_i^*, \sigma_i)$ и коэффициентом трещиностойкости $K_{Ic}^i = K_{Ic}^i(\tilde{l}_i^*, \sigma_i)$, в следующем виде:

$$P_i = \Phi_i \left(\frac{K_I^i(\sigma_a, l_i^*) - K_I^i(\sigma_{i-1}, l_i^*)}{K_{Ic}^i(\sigma_i, \tilde{l}_i^*) - K_{Ic}^i(\sigma_{i-1}, \tilde{l}_i^*)} \right),$$

$$0 < P_i \leq 1; \quad P_{i-1} \left(\frac{\tilde{n}_i}{\tilde{n}_{i-1}} \right) = p_{i-1},$$

$$p_{i-1} = \text{const}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где $K_I^i(\sigma_a) = \sigma_a \sqrt{\pi l_i^*}$, $K_{Ic}^i(\sigma_i) = \sigma_i \sqrt{\pi \tilde{l}_i^*}$; $\sigma_i = \sigma_i(n, \omega)$ – базовые функции амплитуды напряжений от числа циклов нагружения n ; \tilde{n}_i – число циклов достижения приведенной длиной $(i-1)$ -го вида трещин порогового значения для начала образования i -го вида трещин; p_{i-1} – вероятность микроразрушения $(i-1)$ -го вида, после достижения которой начинается развитие i -го вида микроразрушения, σ_a – амплитуда напряжений, ω – частота нагружения [1–5]. При определенных предположениях, в том числе

$$l_i^* = l_i^1 (\lg n - \lg \tilde{n}_i(n, \sigma_a)),$$

$$\tilde{l}_i^* = l_i^1 (\lg N_i - \lg n_i(N_i, \sigma_i)),$$

имеем

$$P_i = h(\sigma_a - \sigma_{i-1}(n, \omega)) \frac{\sigma_a - \sigma_{i-1}(n, \omega)}{\sigma_i(n, \omega) - \sigma_{i-1}(n, \omega)} \times \\ \times \sqrt{\frac{\lg n - \lg n_i(\sigma_a)}{\lg N_i - \lg n_i(\sigma_i(N_i, \omega))}}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где $h = h(x)$ – функция Хевисайда, N_i – базовые числа циклов. Базовые значения амплитуд напряжений $\sigma_i = \Phi_i(p_s, T)$, $\tau_i = F_i(p_s, T)$ и чисел циклов $N_i = N_i(p_s, T)$ являются функциями структурных параметров p_s и температуры.

Используя подход теории предельных процес-

сов нагружения хрупких материалов [7], постулируется определение вероятности микроразрушения металлов по субмикро-, микро- и коротким трещинам по следующей зависимости [8, 9]:

$$P_i = \frac{(\tau_{\max} - \sigma_n - \tau_{i-1}(\omega))h(\tau_{\max} - \sigma_n - \tau_{i-1}(\omega))}{\tau_i(\omega) - \tau_{i-1}(\omega)} \times \\ \times \varphi_{i,\tau}(n_i) + \frac{(2\sigma_n - \sigma_{i-1}(\omega))h(2\sigma_n - \sigma_{i-1}(\omega))}{\sigma_i(\omega) - \sigma_{i-1}(\omega)} \varphi_{i,\sigma}(n_i), \\ n_i = \frac{\lg n - \lg \tilde{n}_i}{\lg N_i - \lg \tilde{n}_i};$$

$$P_{i-1}(\tau_{\max}, \sigma_n, \tilde{n}_i) = p_{i-1} = \text{const}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где τ_{\max} , σ_n – максимальные значения касательной и нормальной компонент вектора напряжений на площадке максимальных касательных напряжений соответственно; $\sigma_i = \sigma_i(\omega)$, $\tau_i = \tau_i(\omega)$ – базовые функции амплитуды напряжений от числа циклов нагружения при симметричных одномерных растяжении-сжатии и сдвиге соответственно; $0 \leq \varphi_{i,\sigma}(n_i) \leq 1$; $0 \leq \varphi_{i,\tau}(n_i) \leq 1$ – монотонно возрастающие функции числа циклов нагружения при сдвиге и одномерном нагружении соответственно.

Предлагаемая модель отражает основные закономерности развития микротрещин и микро-механизмы разрушения в металлах по экспериментальным результатам физики твердого тела [10, 11] и усталостной прочности металлов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-08-00933.

Список литературы

1. Завойчинская Э.Б. Об одной модели описания

микроразрушения металлов // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2009. №1. С. 60–65.

2. Завойчинская Э.Б. Об одной гипотезе микроразрушения металлов при полигармоническом нагружении // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. №3. С. 27–34.

3. Завойчинская Э.Б. К проблеме микроразрушения металлов при циклических нагрузках // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №1. С. 43–52.

4. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении // Справочник. Инженерный журнал. 2010. №3. С. 41–46.

5. Завойчинская Э.Б. Микромеханика разрушения элементов конструкций при циклическом нагружении (продолжение). Ч. 2 // Справочник. Инженерный журнал. 2010. №7. С. 16–22.

6. Завойчинская Э.Б., Кийко И.А. Введение в теорию процессов разрушения твердых тел. М.: МГУ, 2004. 168 с.

7. Завойчинский Б.И. Долговечность магистральных и технологических трубопроводов. Теория, методы расчета, проектирование. М.: Недра, 1992. 271 с.

8. Завойчинский Б.И., Завойчинская Э.Б. Механика субмикроскопических, микроскопических и коротких трещин при сложном напряженном состоянии // Справочник. Инженерный журнал. 2010. №10. С. 22–27.

9. Завойчинская Э.Б. Микро- и макромеханика разрушения металлов при сложном напряженном состоянии // Упругость и неупругость. М.: МГУ, 2011. С. 346–352.

10. Ботвина Л.Р. Разрушение. Кинетика, механизмы, общие закономерности. М: Наука, 2008. 334 с.

11. Новиков И.И., Ермишкин В.А. Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. 323 с.

MICROMECHANICS OF METAL FRACTURE UNDER CYCLIC LOADING

E.B. Zavoychinskaya

A mathematical model of microfracture of metals under proportional cyclic loading is considered. The relation between the microfracture probability and the process of consecutive development of submicro-, micro-, short and macrocracks is derived. The main experimental relations of metal fracture under symmetric loading established by physics and mechanics of solid bodies are considered.

Keywords: submicroscopic, microscopic and short cracks, steel structural parameters, proportional loading, microfracture probability.