

УДК 621.891:539.217.1

## СТРУКТУРНО-ДИФфуЗИОННЫЙ МЕХАНИЗМ ЗАЛЕЧИВАНИЯ МИКРОТРЕЩИН ПРИ ИЗНАШИВАНИИ

В. Э. ЗАВИСТОВСКИЙ<sup>+</sup>, Е. А. БОГДАНОВА, С. Э. ЗАВИСТОВСКИЙ

Рассмотрено взаимодействие микропор с трещиной в твердом теле в процессе изнашивания. Предложена математическая модель описания механизма залечивания трещины в равновесных условиях в зависимости от радиуса трещины, температуры и структурных особенностей материала.

**Ключевые слова:** изнашивание, концентрация микропор, диффузия, трещина, залечивание, математическая модель.

**Введение.** Для элементов пар трения характерно то, что место нагружения в значительной мере совпадает с местом возможного повреждения. Эти повреждения могут быть механического происхождения (усталость, растрескивание, накопление пластических деформаций и др.) или физико-химического (коррозия, диффузия, адсорбция и др.). Для описания процессов изнашивания используют полуэмпирические модели накопления повреждений, которые служат для решения инженерных задач, связанных с расчетом долговечности и прогнозированием ресурса [1—3]. Полуэмпирические модели достаточно просты и позволяют использовать в качестве исходной информации минимальное число опытных данных, однако они не позволяют анализировать физические явления, происходящие в материале в процессе его повреждения. Область применения этих моделей ограничена условиями, близкими к условиям базовых ресурсных испытаний.

Структурные модели накопления повреждений и разрушения материалов при описании процессов изнашивания крупногабаритных изделий дают лучшие результаты при прогнозировании ресурса на время, превышающее базу испытаний [3].

Элементы структуры конструкционных материалов весьма разнообразны, их размеры изменяются от размеров атомов до размеров деталей. Физика твердого тела занимается описанием элементов структуры материала и их взаимодействия в диапазоне размеров  $10^{-10} \div 10^{-3}$  м. В этом же диапазоне находятся размеры линий и полос скольжения ( $10^{-6} \div 10^{-4}$  м), микропор и микровключений ( $10^{-6} \div 10^{-4}$  м), зерен и микротрещин ( $10^{-5} \div 10^{-3}$  м).

В данной работе сделана попытка объединить два подхода: структурную модель описания процесса зарождения и роста трещины [3] и диффузионную модель взаимодействия дефектов с порами в твердом теле [4]. Рассмотрена диффузия микропор в объеме, прилегающем к открытой трещине цилиндрической формы.

**Допущения.** Предполагаем что:

- свойства материала одинаковы во всем объеме;
- трещина есть продукт конечного числа соседних разрушенных элементов или микротрещин, имеющая длину  $l$ , превосходящую ее радиус  $R$ ;
- трещина имеет свою область влияния, в которой все микропоры этой области взаимодействуют только с ней;
- радиус трещины  $R$  изменяется под действием растягивающих напряжений, одинаковых во всем объеме;

Полоцкий государственный университет. 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.

+ Автор, с которым следует вести переписку.

- зародыши микротрещин образуются с постоянной скоростью;
- микрповреждения исчезают на дислокациях или границах зерен со скоростью пропорциональной их концентрации.

**Постановка задачи и основные уравнения.** Известно, что вблизи трещины (поры) радиуса  $R$  концентрация микропор  $C(R)$  выше, чем концентрация в объеме тела  $C_0$ :

$$C(R) = C_0 \left( 1 + \frac{2\alpha\Omega}{kTR} \right). \quad (1)$$

В равновесных условиях градиент концентрации обеспечивает поток микропор в веществе и трещина залечивается. Под действием сжимающих напряжений процесс залечивания ускоряется, так как действие давления  $p$  понижает равновесное давление вблизи трещины:  $C < C_{0p}(R)$ . При действии растягивающих напряжений  $\sigma$  концентрация пор повышается ( $C_{0s} > C_0$ ); при  $C(R) = C_{0s}$  поток микропор на поверхность трещины отсутствует; при  $C(R) < C_{0s}$  микропоры диффундируют к трещине, вызывая ее рост (рисунок).

При описании процесса повреждения на стадии постоянной скорости изнашивания, когда мера повреждения мало изменяется во времени [2], можно предположить, что концентрация микропор не зависит от времени и эффективный коэффициент диффузии есть величина постоянная.

Уравнение диффузии для равновесных условий при сделанных предположениях имеет вид:

$$D_{ef} \left( \frac{d^2 C}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dC}{dr} \right) + n_1 - n_2 C = 0. \quad (2)$$

Граничные условия задаются соотношениями:

$$C(r) \Big|_{r=R} = C_0 \left( 1 + \frac{2\alpha\Omega}{kTR} \right) \quad (3)$$

$$C(r) \text{ ограничено при } r \rightarrow \infty \quad (4)$$

$$C(r) \Big|_{r \rightarrow \infty} = C_0. \quad (5)$$

Вдали от трещины диффузией можно пренебречь ( $D_{ef} = 0$ ), тогда для  $C_0$  получим:  $n_1 - n_2 C_0 = 0$  и  $C_0 = n_1/n_2$ .

Обозначим  $2\alpha\Omega/kT = \gamma$ , тогда с учетом  $C_0 = n_1/n_2$  граничное условие (3) примет вид

$$C(R) = \frac{n_1}{n_2} \left( 1 + \frac{\gamma}{R} \right). \quad (6)$$

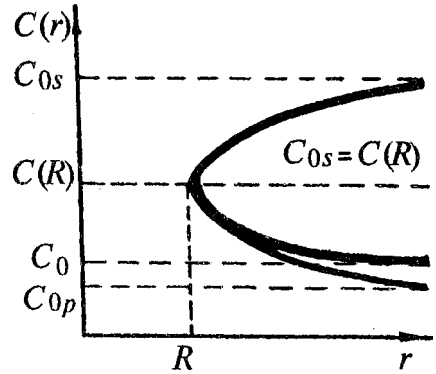
Уравнение (2) является обобщенным уравнением Бесселя и его решение, ограниченное для больших  $r$  имеет вид

$$C(r) = AK_0(r\sqrt{n_2/D_{ef}}) + B. \quad (7)$$

Из граничного условия (5) следует, что  $B = n_1/n_2$ . Из условия (6) находим  $A$ :

$$AK_0(R\sqrt{n_2/D_{ef}}) + n_1/n_2 = (n_1/n_2)(1 + \gamma/R).$$

Отсюда



Концентрация микропор  $C(R)$  вблизи трещины радиуса  $R$

$$A = \frac{n_1 \gamma}{n_2 R} / K_0(R \sqrt{n_2/n_1}).$$

Распределение микропор имеет вид

$$C(R) = \frac{n_1}{n_2} \left[ 1 + \frac{K_0(r \sqrt{n_2/D_{ef}})}{K_0(R \sqrt{n_2/D_{ef}})} \right]. \quad (8)$$

Поток микропор на поверхность единицы длины трещины рассчитывается по формуле

$$f = D_{ef} \frac{dC}{dr} \Big|_{r=R} = \frac{\gamma n_1}{R} \sqrt{\frac{D_{ef}}{n_2}} \left[ \frac{K_0'(R \sqrt{n_2/D_{ef}})}{K_0(R \sqrt{n_2/D_{ef}})} \right].$$

Используя равенство  $K_0'(z) = -K_1(z)$ , получим

$$f = \frac{\gamma n_1}{R} \sqrt{\frac{D_{ef}}{n_2}} \frac{K_1(R \sqrt{n_2/D_{ef}})}{K_0(R \sqrt{n_2/D_{ef}})}. \quad (9)$$

Так как  $K_1(z)/K_0(z) > 1$ , поток микропор направлен в объем материала и его величина тем больше, чем меньше радиус трещины.

Исследования показали, что в условиях трения скольжения [5] наблюдается значительное повышение расчетных значений коэффициентов диффузии  $D_{ef}$ . При этом под поверхностным слоем в результате перераспределения элементов при трении появляется тонкий, обедненный диффундирующим элементом, слой  $\sim 10^{-5}$  м. Наличие микронесовершенств в активном слое трущегося материала может повлиять на механизм изнашивания, так как толщина трущегося слоя зависит от концентрации и размера структурных составляющих. С ростом количества твердых включений толщина активного слоя уменьшается.

**Результаты расчета и их обсуждение.** Оценим величину потока микропор на единицу длины поверхности трещины при различных значениях параметров, входящих в выражение (9). Пусть  $R = 10^{-3}$  м;  $T = 350$  °С;  $D_{ef} = 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с;  $n_1 = 10^6$  м<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>;  $n_2 = 10^{-6}$  с<sup>-1</sup>;  $\alpha = 1,3$  Дж/м<sup>2</sup>;  $\Omega = 5 \cdot 10^{-19}$  м<sup>3</sup>;  $k = 1,38 \cdot 10^{-6}$  Дж/град;  $\gamma = 2,7 \cdot 10^4$ .

Используя асимптотическое разложение функций  $K_0(z)$  и  $K_1(z)$  для больших  $z$  запишем

$$K_0(z) \approx \left(\frac{\pi}{2z}\right)^{0,5} e^{-z} \left[ 1 - \frac{1}{8z} + \frac{3^2}{2!(8z)^2} - \frac{3^2 \cdot 5^2}{3!(8z)^3} + \dots \right],$$

$$K_1(z) \approx \left(\frac{\pi}{2z}\right)^{0,5} e^{-z} \left[ 1 + \frac{3}{8z} + \frac{3(-5)}{2!(8z)^2} + \dots \right].$$

Поток микропор на поверхность единицы длины трещины  $f(R) = -2,8 \cdot 10^8$  м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>; поверхность единицы длины трещины  $S = 2\pi R h = 6,28 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>; число микропор  $n$ , достигших трещины за 1 с равно  $1,8 \cdot 10^4$ ; скорость изменения единичного объема единицы длины трещины равна  $1,8 \cdot 10^4 \Omega = 9 \cdot 10^{-15}$  м<sup>3</sup>с<sup>-1</sup>; изменение объема трещины за одни сутки  $\Delta V = 7,8 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>.

Т. к. объем трещины  $V_d$  имеющей радиус  $R = 10^{-3}$  м, равен  $3,14 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>, то за сутки залечится 2,5% ее объема ( $\Delta V/V_d \cdot 100\%$ ).

При увеличении температуры коэффициент диффузии может возрасти на несколько порядков, скорость образования микропор и время их жизни также изменится.

Оценим скорость залечивания трещины при  $T = 1000$  °С;  $D_{ef} = 10^{-12}$  м<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>;  $n_1 = 10^6$  м<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>;  $n_2 = 10^{-6}$  с<sup>-1</sup>;  $\gamma = 0,94 \cdot 10^4$ .

Поток микропор на единицу длины поверхности трещины равен  $f = -9,4 \cdot 10^4 [K_1(1)/K_0(1)]$ .

Для  $K_0(z)$  имеем следующее разложение

$$K_0(z) = -\left(c + \ln \frac{z}{2}\right) I_0(z) + \left(\frac{1}{2z}\right)^2 + \frac{\left(\frac{1}{2z}\right)^4}{(2!)} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) + \frac{\left(\frac{1}{2z}\right)^6}{(3!)} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) + \dots \quad (10)$$

$$I_0(z) = 1 + \left(\frac{z}{2}\right)^2 + \frac{(z/2)^4}{2^2} + \frac{(z/2)^6}{2^2 \cdot 3^2} + \dots \quad (11)$$

$$I_1(z) = \frac{z}{2} + \frac{(z/2)^3}{2} + \frac{(z/2)^5}{2^2 \cdot 3} + \frac{(z/2)^7}{2^2 \cdot 3^2 \cdot 4} + \dots \quad (12)$$

Функции  $I_0(z)$ ,  $I_1(z)$ ,  $K_0(z)$ ,  $K_1(z)$  связаны между собой следующим соотношением:

$$I_0(z) K_1(z) + K_0(z) I_1(z) = \frac{1}{z}. \quad (13)$$

Вычислим  $I_0(1)$ ,  $I_1(1)$  и  $K_0(1)$  из уравнений (10)—(12) и найдем  $K_1(1)$  из уравнения (13):  $K_0(1) \approx 0,422$ ;  $I_0(1) \approx 1,27$ ;  $I_1(1) \approx 0,565$ ;  $K_1(1) = [1/I_0(1)][1 - K_0(1)I_1(1)] = 0,6$ . Тогда  $f = 1,3 \cdot 10^5$ . За сутки объем поры  $\Delta V$  уменьшится на  $3,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ , т. е. уменьшение составит 11%. Время, необходимое для полного исчезновения поры может быть найдено (без учета изменения потока от  $R$ ) из соотношения  $2\pi f R h \Omega = V_0 \rightarrow t = 8 \cdot 10^5 \text{ с}$ .

**Заключение.** Таким образом, наличие микронесовершенств в активном слое трущегося материала влияет на механизм изнашивания, так как при этом повышаются значения коэффициентов диффузии. В равновесных условиях трещина залечивается со скоростью, зависящей от радиуса трещины, температуры и структурных особенностей материала.

### Обозначения

$R$  — радиус трещины;  $l$  — длина трещины;  $k$  — постоянная Больцмана;  $C_0$  — стационарная концентрация микропор в объеме;  $C(R)$  — концентрация микропор;  $D_{ef}$  — эффективный коэффициент диффузии;  $n_1, n_2$  — константы;  $\alpha$  — удельная поверхностная энергия;  $\Omega$  — характерный объем одной микропоры;  $T$  — абсолютная температура;  $\sigma$  — напряжение;  $r$  — расстояние от оси трещины до рассматриваемой точки тела;  $K_i(z)$  — цилиндрическая функция Макдональда  $i$ -го порядка;  $p$  — давление.

### Литература

1. Пробст Р., Фляйшер Г. Проблемы обеспечения высокой надежности трибологических систем // Проблемы машиностроения и автоматизации (1990), № 32, 41—55
2. Болотин В. В. Ресурс машин и конструкций. Москва: Машиностроение (1990)
3. Болотин В. В. Объединенные модели в механике разрушения // Известия АН СССР: Механика твердого тела (1984), № 3, 127—137
4. Гегузин Я. Е. Физика спекания. Москва: Наука (1967)
5. Финкель В. М. Физические основы торможения разрушения. Москва: Металлургия (1977)

Поступила в редакцию 18.02.97.

Zavistovskii V. E., Bogdanova E. A., Zavistovskii S. E. Structural and diffusional mechanism of healing wear microcracks.

A mathematical model is advanced describing the mechanism of healing the micropores appearing during cracking in a solid body under equilibrium conditions. It takes account crack radius, temperature and structural features of material.