

Периодическая эволюция ансамбля дефектов в кристаллах при сухом трении

© А.Л. Колесникова, И.А. Овидько, А.Е. Романов*

Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
199178 Санкт-Петербург, Россия

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 23 сентября 1996 г.)

Предлагается модель разрушения поверхностного слоя твердых тел при трении. В качестве основных элементов модель включает ансамбли взаимодействующих дислокаций и микротрещин, кинетика которых описывается системой связанных нелинейных дифференциальных уравнений. Объяснен эффект периодического изменения параметров изнашивания контактирующих материалов.

Эффект периодического изменения физико-механических свойств пластически деформируемых кристаллических материалов (см., например, [1,2]) может быть представлен как проявление самоорганизации ансамбля дислокаций при пластической деформации [2–4]. Недавно экспериментально было обнаружено сходное явление периодического изменения параметров (числа отслаивающихся микрочастиц, интенсивности сигналов акустической эмиссии, генерируемых микротрещинами) изнашивания кристаллических материалов при сухом трении [5–7]. Этот эффект, имеющий несомненную прикладную значимость, по своей природе связан с процессами разрушения поверхностного слоя и с предваряющей разрушение пластической деформацией поверхностного слоя. Основная цель настоящей работы — построение теоретической модели эффекта периодического изменения параметров изнашивания кристаллических материалов при сухом трении с помощью представлений о периодических трансформациях ансамблей взаимодействующих дислокаций (носителей пластической деформации) и микротрещин (носителей разрушения).

В рамках предлагаемой модели дефектная структура поверхностного слоя при сухом трении эволюционирует следующим образом. Вначале под действием механической нагрузки, обусловленной контактом с перемещающимся контртелом трения, в поверхностном слое интенсивно генерируются дислокации. Плоские скопления дислокаций, заторможенные границами зерен и другими внутренними препятствиями, служат зародышами микротрещин, рост которых происходит за счет поглощения дислокаций. Развитие системы микротрещин, сопровождающееся поглощением дислокаций, приводит к быстрому слиянию микротрещин и в итоге к лавинообразному отслоению (отламыванию) микрочастиц поверхностного слоя. Микрочастицы разрушения, отслаиваясь от материала, "уносят" с собой трещины и "обнажают" новый поверхностный слой для контакта с контртелом тре-

ния. В новом поверхностном слое вновь происходит накопление дислокаций и микротрещин. При этом процесс отслаивания микрочастиц затормаживается. Затем в результате развития системы микротрещин вновь происходит лавинообразное отслаивание микрочастиц, обнажающее новый поверхностный слой и т. д.

В рамках предлагаемой модели эволюция ансамбля взаимодействующих дислокаций и микротрещин в поверхностном слое в первом приближении описывается следующей системой уравнений:

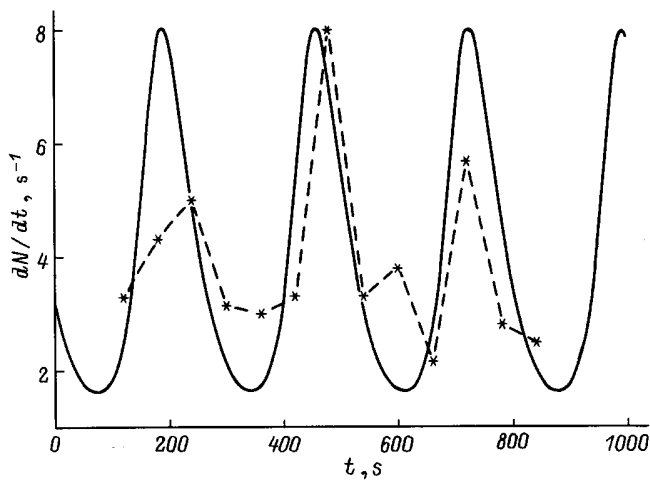
$$\frac{d\rho}{dt} = A\rho - B\rho^2 - C\rho m, \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = C_1\rho m - Dm, \quad (2)$$

где ρ — плотность дислокаций, m — суммарная площадь поверхности микротрещин в единице объема, t — время, A, B, C, C_1, D — постоянные коэффициенты. В правой части (1) первый член характеризует размножение дислокаций под воздействием механической нагрузки, второй описывает аннигиляцию дислокаций, а третий — поглощение дислокаций микротрещинами и уменьшение плотности дислокаций, связанное с отслаиванием микрочастиц (уносящих с собой дислокации). В правой части (2) первый член характеризует рост микротрещин за счет поглощения дислокаций, а второй — уменьшение плотности микротрещин, связанное с отслаиванием микрочастиц (уносящих с собой трещины).

Модель в предлагаемом виде использует следующие основные упрощающие предположения: 1) не учитываются кристаллографические особенности кристаллического материала; 2) считается, что величины ρ и m пространственно однородны в поверхностном слое.

В физически интересном диапазоне коэффициентов A, B, C, C_1 и D система (1), (2) имеет решения в виде затухающих колебаний $\rho(t)$ и $m(t)$ с периодом



Зависимость скорости отслаивания частиц dN/dt от времени t . Сплошная кривая — расчет, штриховая — эксперимент.

при больших t , равным

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{DA - BD^2/C_1 - (BD/2C_1)^2}}. \quad (3)$$

Скорость отслаивания микрочастиц dN/dt связана с величиной m следующим приближенным соотношением:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\alpha k S D m}{d^2 m_{\text{loc}}}, \quad (4)$$

где α — доля зарегистрированных частиц ко всем отслоившимся за период регистрации, k — отношение непосредственно контактирующей площади ко всей рабочей площади образца ($k < 1$ из-за шероховатости образца), S — площадь поверхности образца, d — размер области локализации разрушения, m_{loc} — плотность внутренней свободной поверхности, при которой происходит разрушение. Отсюда колебания $m(t)$ определяют соответствующие колебания характеристики $dN(t)/dt$ процесса изнашивания.

На рисунке приведен в качестве примера график величины $dN(t)/dt$ (сплошная кривая), полученный с помощью соотношения (4) и численного решения $m(t)$ системы уравнений (1), (2) для характерных значений параметров $A = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, $B = 2.5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $C = 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $C_1 = 3 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $D = 3 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ и при начальных условиях $\rho(0) = 5 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-2}$, $m(0) = 1.6 \cdot 10^5 \text{ m}^{-1}$. Сравнение данного графика с экспериментально полученной [7] кривой $\Delta N(t)/\Delta t$ (ΔN — доля зарегистрированных частиц за время Δt) (штриховая кривая) для латуни при линейной скорости контртела $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ давлении $P = 3 \text{ МПа}$, $\alpha = 0.2$, $k = 0.01$, $S = 10^{-4} \text{ m}^2$, $d = 10^{-6} \text{ m}$ и $m_{\text{loc}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m}^{-1}$ свидетельствует об удовлетворительном количественном соответствии результатов предлагаемой модели с экспериментальными данными.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 95-02-03807 и 96-02-16807-с), а также в рамках проекта INTAS-94-4380.

Список литературы

- [1] Я.Д. Вишняков. Современные методы исследования структуры деформируемых кристаллов. М. (1975). 480 с.
- [2] В.К. Barakhtin, S.A. Ivanov, I.A. Ovid'ko, A.E. Romanov, V.I. Vladimirov. J. Phys. **D22**, 4, 519 (1989).
- [3] Б.К. Баракхтин, В.И. Владимиров, С.А. Иванов, И.А. Овидько, А.Е. Романов. ФММ **63**, 6, 1185 (1987).
- [4] А.Е. Romanov, E.C. Aifantis. Scripta Met. Mat. **30**, 10, 1293 (1994).
- [5] Ю.А. Фадин, А.М. Лексовский, Б.М. Гинзбург, В.П. Булатов. Письма в ЖТФ **19**, 5, 10 (1993).
- [6] Ю.А. Фадин, О.В. Полевая, И.Н. Попов. Письма в ЖТФ **20**, 17, 47 (1994).
- [7] Ю.А. Фадин, О.В. Полевая, И.Н. Попов. Письма в ЖТФ **19**, 11, 62 (1993).