

В.М. Крамар¹, П.І. Мельник², М.В. Кіндрачук³

Аналіз кінетики руйнування поверхневих шарів пар тертя на основі енергетичної моделі

¹Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 12, Чернівці, 58000, Україна, e-mail: v.kramar@chnu.edu.ua

²Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ, 76000, Україна

³Національний авіаційний університет, 03680, Київ, пр. Космонавта Комарова, 1, Україна.

Методами фізики міцності та термодинаміки в рамках енергетичної моделі утворення частинок зносу в приповерхневих зонах пари тертя досліджено кінетику руйнування поверхневих шарів. Встановлено наявність залежності розмірів частинок зносу від механічних властивостей матеріалу.

Ключові слова: тертя, частинки зносу, деформація кристалічної ґратки.

Стаття поступила до редакції 03.12.2012; прийнята до друку 15.12.2012.

Вступ

Проблемам тертя і зносостійкості металів посвячено чимало робіт теоретичних і експериментальних. Згідно з уявленнями сучасної фізики міцності матеріалів їх руйнування є заключною фазою складного багатостадійного процесу пошкоджуваності, що закономірно розвивається на атомарному, нано- та мезоскопічному рівнях (див., наприклад, [1 - 3]). Саме перебіг фундаментальних термофлуктуаційних процесів на вказаних рівнях організації матерії [4] зумовлює незворотні зміни структури кристалів задовго до появи зовнішньо спостережуваних проявів їх руйнування – утворення тріщин, частинок зносу і т.п. Дискретний процес накопичення пошкоджень кристалічної ґратки на макрорівні проявляється як неперервний процес збільшення внутрішньої енергії деформованої внаслідок тертя поверхні кристалу [5].

I. Модель і результат дослідження

У роботах Федорова [6] показано, що зростання з часом внутрішньої енергії кристалу при дії зовнішніх механічних навантажень у парах тертя здійснюється за законом, близьким до лінійного. З досягненням деякого критичного значення внутрішньої енергії матеріалу (енергія активації), відбувається руйнування матеріалу. Отже, руйнування є наслідком нестійкості деякого об'єму матеріалу при досягненні критичного значення густини його внутрішньої енергії.

Розглядаючи фізично нескінченно малий об'єм твердого тіла як відкриту термодинамічну систему, що знаходиться, за усталених зовнішніх умов, у стані локальної термодинамічної рівноваги, умову руйнування матеріалу можна подати у вигляді

$$\Delta u = u_0, \quad (1)$$

де Δu та u_0 , відповідно, – зміна молярної внутрішньої енергії системи та її молярна енергія активації руйнування. Остання з цих величин є фундаментальною енергетичною характеристикою міцності матеріалу. Перша – накопичується з часом у процесі тертя. При досягненні нею значення, рівного u_0 , відбувається руйнування матеріалу.

Зміна внутрішньої енергії системи описується фундаментальним рівнянням Гіббса [7]

$$\Delta u = T\Delta S - P\Delta V + \sum_i m_i \Delta w_i, \quad (2)$$

де T – абсолютна температура, P – тиск, V – об'єм, S – ентропія, w_i – хімічний потенціал i -го компонента, молярна частка якого у системі дорівнює w_i .

У загальному випадку внутрішня енергія твердого тіла змінюється внаслідок комплексного впливу різноманітних термодинамічних процесів: механічних, теплових, дифузійних, хімічних, електромагнітних та ін. З урахуванням цих факторів умову руйнування матеріалу в приповерхневому шарі пари тертя можна записати [5] у вигляді

$$TR \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) + V_m 10^{-6} \left(\frac{\Delta S^2}{2E} + s \bar{\alpha} \right) + \Delta u_i + \Delta g \geq u_0. \quad (3)$$

Перший доданок у (3) визначає приріст внутрішньої енергії одного моля речовини

приповерхневого шару за рахунок збільшення ентропії, другий – внаслідок зростання енергії пружних і пластичних деформацій кристалічної ґратки (відповідно, перший та другий доданки виразу в дужках), третій – у результаті технологічної обробки поверхні; четвертий – через фізико-хімічні взаємодії з навколишнім середовищем. Тут R – універсальна газова стала, V_m – молярний об'єм, σ – напруження, E – модуль пружності, $\bar{\epsilon}$ – середня швидкість непружних деформацій, t – час перебування системи у навантаженому стані, а t_0 – період теплових коливань атомів.

Виконане у роботі [5] дослідження впливу ролі кожного доданку в лівій частині нерівності (3) показало, що основний внесок у процес руйнування матеріалу дає деформаційна частина, значення якої з часом монотонно зростає майже за лінійним законом.

Енергія пружних деформацій є функцією миттєвого значення напруження, а тому вона не накопичується з часом у матеріалі. Для її оцінки за наявності динамічних впливів типу періодичних навантажень у якості ефективного значення $\Delta\sigma$ приймається максимальне значення напруження σ_{\max} .

У процесах зносу тертя акт руйнування локалізується в малому об'ємі матеріалу, який при досягненні критичних напружень відлущується і переноситься на поверхню контратіла у вигляді частинок переносу. Акумуляція їх на поверхні контратіла внаслідок адгезійного переносу призводить до утворення частинок зносу, які в подальшому відіграють роль абразиву, що

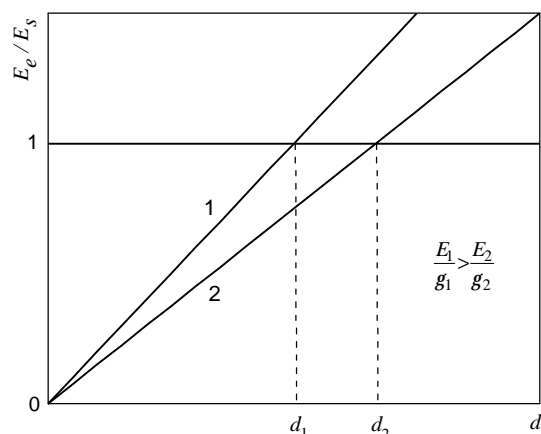


Рис. 1. Зміна розміру частинки переміщення (d) при зміні механічних властивостей матеріалу (E – модуль пружності, γ – питома енергія когезії).

переводить механізм тертя ковзання в слабоабразивне зношування, підвищуючи його інтенсивність. Критичні напруження визначаються умовами руйнування. Отже, утворення частинок переносу відбувається за умови виконання нерівності, подібної до (3), в об'ємі відлущуваного фрагменту.

Для оцінки розмірів частинки переносу припускають, що вона обмежена півсферою радіусу $d/2$, де d – діаметр плями контакту [8]. Тож об'єм її будемо вважати рівним $\pi d^3/12$. Якщо v – кількість

молів речовини в цьому об'ємі, то умовою утворення частинки переносу є виконання нерівності

$$E_{def} \geq E_s, \quad (4)$$

де

$$E_{def} = \frac{\pi d^3}{12} 10^{-6} \left(\frac{\Delta S_{\max}^2}{2E} + s_{\max} \bar{\epsilon} \right)$$

– енергія деформації, а

$$E_s = n \left(u_0 - TR \ln \left(\frac{t}{t_0} \right) - \Delta u_i - \Delta g \right)$$

– енергія активації руйнування (викришування фрагменту даного об'єму). Величина останньої визначається когезійними властивостями матеріалу (перший доданок) і зміною його внутрішньої енергії за рахунок збільшення ентропії, технологічної обробки поверхні та її фізико-хімічні взаємодії з навколишнім середовищем.

Оскільки викришування частинок пов'язане з утворенням нових поверхонь, то природно припустити, що енергія активації руйнування пропорційна до величини площі поверхні частинки переносу, рівної $\pi d^2/2$. Коефіцієнт пропорційності визначається когезійними властивостями матеріалу в приповерхневій зоні:

$$E_s = 2g \frac{\pi d^2}{2}, \quad (5)$$

де γ – питома енергія когезії. Поклавши $\sigma_{\max} = E \epsilon_{\max}$, де ϵ_{\max} – максимальна деформація, приходимо до висновку, що енергія деформації

$$E_{def} = \frac{\pi d^3}{12} 10^{-6} \left(\frac{\epsilon_{\max}}{2} + \bar{\epsilon} \right) \epsilon_{\max} E \quad (6)$$

пропорційна величині модуля пружності E . Тоді відношення енергій деформації до енергії активації руйнування

$$\frac{E_{def}}{E_s} \sim \frac{E}{g} d \quad (7)$$

виявляється лінійною функцією розміру частинки переміщення.

На рис. 1 показана залежність розміру частинки переміщення від механічних властивостей матеріалу. Тобто розмір частинки викришування залежить від модуля пружності речовини, а попадання її в зону тертя – від питомої енергії когезії.

Висновки

З аналізу (7) випливає, що умова руйнування матеріалу (4) в процесі тертя досягається швидше для частинок переносу більших розмірів.

Розмір частинок переносу визначається механічними властивостями поверхні тертя – значення його менше у твердішому (з великим значенням E), але більше – у міцнішому (з великим значенням γ) матеріалі.

Крамар В.М. – доктор фізико-математичних наук, професор;

Мельник П.І. – доктор технічних наук, професор;
Кіндрачук М.В. – доктор технічних наук, професор.

- [1] V.I. Vladimirov. Fizika iznosostojkosti poverhnostej metallov. L.: Fiz.-teh. institut im. A.F. Ioffe AN SSSR, 8 (1988).
- [2] O.M. Braun, A.G. Naumovets. Surf. Sci. Reports. 60, 79 (2006).
- [3] O.M. Braun. Aktual'nye problemy sovremennogo materialovedenija. 2, 253 (2008).
- [4] A.M. Nikolenko. Konceptija ierarhichnoї strukturi materialiv (Harkiv–Ivano-Frankivs'k, 2007).
- [5] I.D. Ibatullin. Kinetika ustalostnoj povrezhdaemosti i razrushenija poverhnostnyh sloev (Samara, 2008).
- [6] V.V. Fedorov. Kinetika povrezhdaemosti i razrushenija materialov. (1985).
- [7] E.P. Ageev. Neravnovesnaja termodinamika v voprosah i otvetah. (Jeditorial URSS, Moskva, 2001).
- [8] I.V. Kragel'skij, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov. Osnovy raschetov na trenie i iznos (Mashinostroenie, Moskva, 1977).

V.M. Kramar¹, П.І. Melnyk², M.V. Kindrachuk³

Analysis of the Kinetics of the Destruction of the Surface Layers of Friction Pairs Based on Energy Model

¹*Yuriy Fedkovych' Chernivtsi National University, Kotsubinsky Str., 12, Chernivtsi, 58000, Ukraine, e-mail: v.kramar@chnu.edu.ua;*

²*Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University, Shevchenko Str., 57, Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine*

³*National Aviation University, 03680, Kiev, Cosmonaut Komorov Ave. 1, Ukraine.*

We investigated the kinetics of destruction of the surface layers by the methods of strength physics and thermodynamics within the limits of the energy model of the wear particle formation in the surface areas of friction pair. The dependence of the wear particle size on the mechanical properties of the material has been established.