

УДК 665.9

# ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЯК ЕНЕРГЕТИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛУ В ЗОНІ ТЕРТЯ

**В. М. Крамар**

Доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач кафедри  
Кафедра загальної фізики  
Чернівецький Національний університет  
ім. Юрія Федьковича  
вул. Коцюбинського, 12, Чернівці, Україна, 58000  
E-mail: v.kramar@chnu.edu.ua

**М. В. Кіндрачук**

Доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри\*  
E-mail: nau12@ukr.net

**В. Я. Лобурак**

Аспірант\*  
E-mail: vloburak2@mail.ru  
\*Кафедра машинознавства  
Національний авіаційний університет  
пр. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680

*В роботі наведено результати дослідження процесів руйнування при терті на прикладі композиційних електролітичних покриттів. Методами аналізу теоретичних та експериментальних результатів дослідження в рамках енергетичної моделі утворення частинок зносу в приповерхневих зонах пари тертя зроблено оцінку процесу руйнування поверхневих шарів. Встановлено наявність залежності розмірів частинок зносу від механічних властивостей матеріалу*

*Ключові слова: тертя, частинки зносу, композиційне покриття, дислокація, структура, зміцнення, кристалічна ґратка*

*В работе приведены результаты исследования процессов разрушения при трении на примере композиционных электролитических покрытий. Методами анализа теоретических и экспериментальных результатов исследования в рамках энергетической модели образования частиц износа в приповерхностных зонах пары трения сделана оценка процесса разрушения поверхностных слоев. Установлено наличие зависимости размеров частиц износа от механических свойств материала*

*Ключевые слова: трение, частицы износа, композиционное покрытие, дислокация, структура, упрочнение, кристаллическая решетка*

## 1. Вступ

Дослідження зносостійкості матеріалів як експериментальним, так і теоретичним методом приводить до висновку, що руйнування є заключною фазою складного багатоетапного процесу пошкоджуваності, що закономірно розвивається на атомарному та мезоскопічному рівнях задовго до появи зовнішньо спостережуваних проявів їх руйнування і проявляється як неперервний процес збільшення внутрішньої енергії кристалічної ґратки, що висвітлено в працях Ібатуліна І.Д. [1]. В роботах [2, 3] показано, що міцність шару поверхні тертя залежить від структури і, в першу чергу, зернистості фаз в зоні тертя. Такі дослідження набувають цінності особливо, коли йдеться про зносостійкість нанесених покриттів.

## 2. Методика та аналіз результатів дослідження

В роботах [4 – 8] досліджено та систематизовано триботехнічні характеристики дифузійних осаджених і напилених покриттів, включаючи композитні електролітичні покриття (КЕП) на нікелевій основі з різними твердими фазами наповнювача в якості зміцнюючої складової.

На рис. 1 приведено характер зносостійкості системи покриття Ni-SiC від вмісту наповнювача, а на рис. 2 – залежність від розміру частинок SiC.

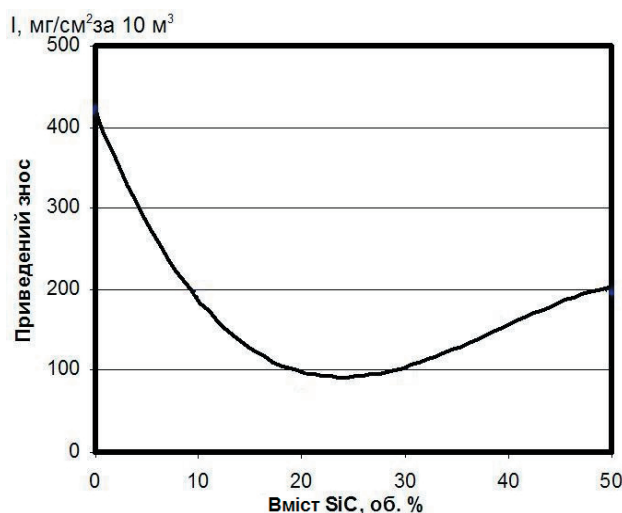


Рис. 1. Залежність зносостійкості КЕП Ni-SiC від вмісту наповнювача при навантаженні 20 Н і швидкості тертя 0,5 м/с. Величина частинок 28/20 мкм [5]

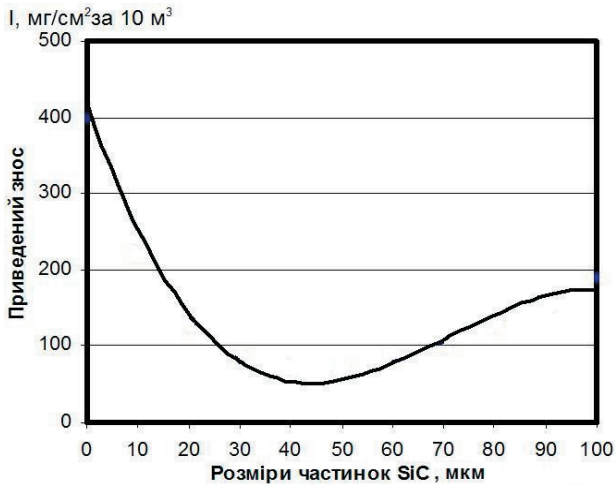


Рис. 2. Залежність зносостійкості КЕП Ni-SiC від розміру частинок SiC при навантаженні 20 Н і швидкості тертя 0,5 м/с. Об'ємний вміст наповнювача 24% [5]

З наведених даних видно, що зносостійкість КЕП змінюється зі змінною як кількості, так і розмірів частинок наповнювача, що характеризує структуру покриття, яку можна позитивно удосконалювати шляхом додаткової хіміко-термічної обробки [9]. Оцінити процес зношення такого покриття можна, виходячи з наступних уявлень.

На рис. 3 представлена схема площини тертя з розташуванням в одній із них твердої фази. Під дією сил тертя окремі частинки опиняються на вершині зубців нерівності і в матриці їх утримує енергія взаємодії, яка залежить як від природи матеріалу, так і величини частинок.

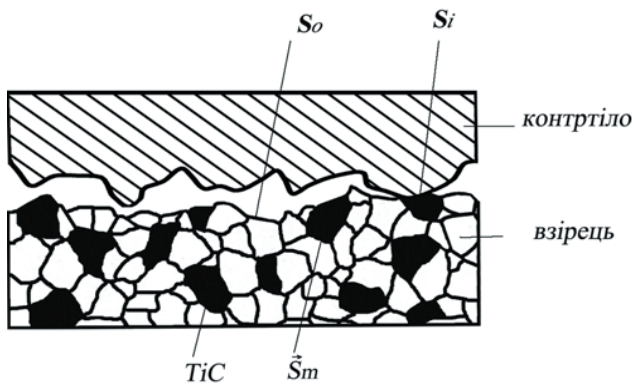


Рис. 3. Схема розташування частинок TiC у поверхневому шарі КЕП

Сили тертя обумовлюють пластичну деформацію, відсутність якої в зоні контакту приводить в ній до накопичення пружних деформацій і супроводжується розсіюванням частини енергії, затраченої роботою сил тертя. Оскільки ці процеси є термодинамічно невірноваженими, то їх можна описати з допомогою дисипативної функції [10]:

$$T \frac{dS_i}{dt} = \bar{\psi} = \sum \frac{dW_{\text{дис}}^i}{dt} + \bar{I}_c A_c,$$

де  $T$  - температура системи в  $^{\circ}\text{K}$ ;

$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{dS_i}{S_k dt} - \text{швидкість зміни енергії системи};$$

$$\frac{dW^i}{dt} = \frac{dW_{\text{дис}}^i}{S_k dt} - \text{швидкість розсіювання енергії};$$

$S_i$  - площа поверхні тимчасового контакту;

$\bar{I}_c A_c$  - потужність пливу попутних факторів.

Дисипативні функції процесів пластичної деформації та утворення вільних поверхонь взаємодії різних фаз в яких концентруються сили розсіювання енергії та зародження дефектів кристалічної структури – дислокацій, яким передують пластична деформація визначаються з таких міркувань. Дислокації накопичуються на границях фаз, що призводить до руйнування сил зв'язку між ними і, як результат – викришуванням однієї із фаз – у даному випадку йдеться про фазу TiC, яка сприяє виникненню абразивного зношування.

Для зручності введемо поняття хімічного потенціалу дислокації – робота, яка затрачається для утворення одиничної дислокації:

$$\varphi_d = \frac{\tau}{\beta}, \quad A_d = \Delta\varphi_d = \frac{\Delta\tau}{\Delta\beta},$$

де  $\varphi_d$  - хімічний потенціал дислокації;  $\tau$  - діючі в металах напруження;  $\beta$  - число дислокацій, яке припадає на одиницю деформованої речовини;  $A_d$  - утворення та переміщення дислокацій;  $\Delta\varphi_d$  - різниця хімічних потенціалів для двох напружених станів матеріалу;  $\Delta\tau$  - зміцнення матеріалу в процесі його пластичного деформування.

У свою чергу, робота пластичної деформації, яка призводить до виникнення дислокації, записується:

$$dW_{\text{пл}} = d\bar{D} A_d,$$

де  $d\bar{D} = \frac{dD}{S_i}$  - швидкість накопичення дислокацій в системі.

Поділивши обидві частини цього рівняння на  $dt$ , отримаємо вираз для дисипативної функції пластичного деформування матеріалу:

$$\varphi_{\text{дис}} = \frac{dW_{\text{пл}}}{dt} = \frac{d\bar{D}}{dt} A_d = \bar{I}_d A_d,$$

де  $\bar{I}_d = \frac{d\bar{D}}{dt}$  - швидкість накопичення дислокацій, віднесеної до одиниці поверхні контакту і залежить від енергії пластичної деформації в зоні контакту.

Представляючи процес руйнування в зоні тертя як відколювання частинок на границях їх об'єму за рахунок накопичення по них дислокацій, запишемо:

$$\sum \sigma_i dS_i = \sigma_m d\bar{S}_m + \sigma_0 dS_0 - \sigma_d d\bar{S}_d,$$

де  $\sigma_0$  - питома поверхнева енергія в зоні контакту;  $dS_0$  - питома площа поверхні контакту (зона пластичної деформації);  $\sigma_m$  - питома поверхнева енергія в процесі зміни площі контакту  $dS_m$ ;  $\sigma_d$  і  $d\bar{S}_d$  - питома поверхнева енергія і зміна площі поверхні дислокаційних границь.

Отже, дисипативна енергія пластичнодеформованих поверхонь контакту тертя з врахуванням швид-

кості зміни їх площі (швидкість тертя) приводить до виразу дисипативної функції:

$$\Psi_s = \frac{d\bar{S}_0}{dt}(-\Delta\sigma_0) + \frac{d\bar{S}_m}{dt}(-\Delta\sigma_m),$$

де  $\Delta\sigma_0 = \sigma_0 - \frac{\sigma_d^0}{2}$ ,  $\Delta\sigma_m = \sigma_m - \frac{\sigma_d^m}{2}$ .

Вирази  $\frac{d\bar{S}_0}{dt}$  та  $\frac{d\bar{S}_m}{dt}$  є показниками швидкості зміни дисипативної енергії пластичної деформації на площах контакту в процесі тертя і залежить від багатьох факторів і в першу чергу від навантаження та швидкості процесу тертя. Це знаходить підтвердження в роботах багатьох дослідників [10], які показали, що енергія тертя трансформується в енергію дислокацій і це призводить до крихкості поверхневих шарів і сколювання окремих фаз у зоні тертя.

Вводячи у вираз дисипативної функції коефіцієнти, які характеризують фактори умов тертя (навантаження, швидкість руху, циклічність, температуру і т.п.), а також структурну будову речовини, можна ексклюзивно оцінити характер і ступінь зношування матеріалу при терті.

Виходячи з отриманих результатів, знаходяться пояснення екстремальних результатів залежності зносостійкості від розмірів частинок наповнювача в КЕП, тобто, чим більший розмір частинок наповнювача, тим швидше дисипативна енергія по границі зерна перетвориться в пружну енергію, яка веде до окрихчування – втрати сил зв'язку з матрицею і, як результат, його викришування. В подальшому ці карбіди забезпечують абразивне зношування. Підвищення зносостійкості за наявності включень карбідів з величиною зерна до певних розмірів пов'язано, очевидно, із закономірностями пропрацювання пари тертя та незруйнованими силами зв'язку зерна з матрицею із-за недостатньої кількості накопиченої пружної енергії, яка забезпечує крихке відшарування карбідного зерна.

Відомо, що внутрішня енергія системи залежить як від взаємодії атомів в кристалічній ґратці, так і від дії зовнішніх сил. У роботі [1] 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 відкрити термодинамічну систему, що знаходиться, за усталених зовнішніх умов, у стані локальної термодинамічної рівноваги, умову руйнування матеріалу можна подати у вигляді:

$$\Delta u = u_0,$$

де  $\Delta u$  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 у процесі тертя. При досягненні нею значення, рівного  $u_0$ , відбувається руйнування матеріалу [10].

Зміна внутрішньої енергії системи описується фундаментальним рівнянням Гіббса:

$$\Delta u = T\Delta S - P\Delta V + \sum_i \mu_i \Delta w_i,$$

де  $T$  – абсолютна температура;  $P$  – тиск;  $V$  – об'єм;  $S$  – ентропія;  $\mu_i$  – хімічний потенціал  $i$ -го компонента, молярна частка якого у системі дорівнює  $w_i$ . У загальному випадку внутрішня енергія системи змінюється внаслідок комплексного впливу різноманітних термодинамічних процесів: теплових, механічних, хімічних, дифузійних, електромагнітних та ін. З урахуванням цих факторів умову руйнування матеріалу в приповерхневому шарі пари тертя можна записати [10] у вигляді:

$$TR \ln\left(\frac{t}{\tau_0}\right) + V_m 10^{-6} \left(\frac{\Delta\sigma^2}{2E} + \sigma \bar{\epsilon} t\right) + \Delta u_n + \Delta g \geq u_0. \quad (1)$$

Перший доданок у (1) 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,  $\sigma$  – напруження,  $E$  – модуль пружності,  $\bar{\epsilon}$  – середня швидкість непружних деформацій,  $t$  – час перебування системи у навантаженому стані, а  $\tau_0$  – період теплових коливань атомів.

Виконане у роботі [10] дослідження впливу ролі кожного доданку в лівій частині нерівності (1) 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  $\sigma_{max}$ .

У процесах зносу тертя акт руйнування локалізується в малому об'ємі матеріалу, який при досягненні критичних напружень відщупується 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 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 (1), в об'ємі відщупуваного фрагменту.

Для оцінки розмірів частинки переносу припускають, що вона обмежена півсферою радіусу  $d/2$ , де  $d$  – діаметр плями контакту. 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:

$$E_{\text{def}} \geq E_s,$$

де  $E_{\text{def}} = \frac{\pi d^3}{12} 10^{-6} \left( \frac{\Delta \sigma_{\text{max}}^2}{2E} + \sigma_{\text{max}} \bar{\epsilon} t \right)$  – енергія деформації;

$$E_s = v \left( u_0 - TR \ln \left( \frac{t}{\tau_0} \right) - \Delta u_n - \Delta g \right)$$
 – 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-хімічної 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  $S = \pi d^2/2$ . Коефіцієнт пропорційності визначається когезійними властивостями матеріалу в приповерхневій зоні:

$$E_s = 2\gamma \frac{\pi d^2}{2},$$

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

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

пропорційна величині модуля пружності  $E$ . Тоді:

$$\frac{E_{\text{def}}}{E_s} \sim \frac{E}{\gamma} d.$$

На рис. 4 показана залежність розміру частинок переміщення від механічних властивостей матеріалу. Тобто розмір частинки викришування залежить від модуля пружності речовини, а попадання її в зону тертя – від питомої енергії когезії.

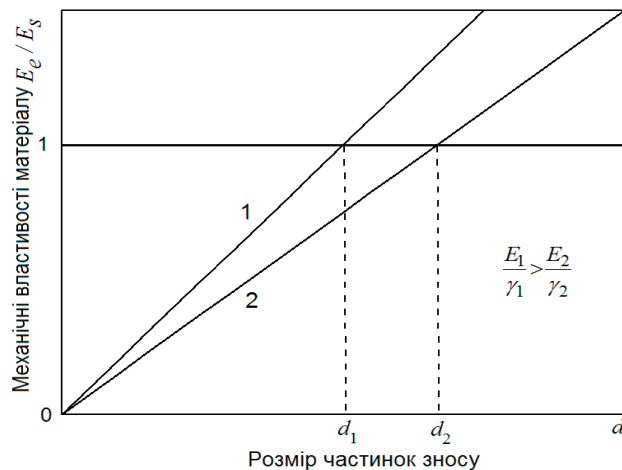


Рис. 4. Зміна розміру частинки переміщення ( $d$ ) при зміні механічних властивостей матеріалу ( $E$  – модуль пружності,  $\gamma$  – питома енергія когезії)

### 3. Висновки

З аналізу випливає, що умова руйнування матеріалу в процесі тертя досягається швидше для частинок переносу більших розмірів. До того ж, розмір частинок переносу менший у матеріалі з більшою твердістю (великі значення  $E$ ), але більший у матеріалі з більшою міцністю (великі значення  $\gamma$ ).

### Література

1. Ибатуллин, И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев [Текст] / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самарский гос. тех. ун-т, 2008. – 387 с.
2. Кіндрачук, М.В. Вплив дисперсності твердої фази в електролітичному покритті на його зносостійкість при терті ковзання [Текст] / М.В. Кіндрачук, А.О. Корнієнко, В.Я. Лобурак, А.Л. Головін // Проблеми трибології. – 2013. – № 1. – С. 30–36.
3. Кіндрачук, М.В. Формування зносостійких композиційних електролітичних покриттів, зміцнених наночастинками карбиду кремнію / М.В. Кіндрачук, М.В. Лучка, А.О. Корнієнко, Я.П. Замора [Текст] // Металознавство та обробка металів. – 2005. – № 2. – С. 3–8.
4. Кіндрачук, М.В. Структурутворювання та формування триботехнічних властивостей евтектичних покриттів [Текст] / М.В. Кіндрачук, Ю.А. Куницький, О.І. Дудка. – К.: Вища школа, 1997. – 120 с.
5. Кіндрачук, М.В. Експериментально – аналітичні дослідження триботехнічних характеристик покриттів матричнонаповненого типу [Текст] / М.В. Кіндрачук, М.В. Лучка, А.О. Корнієнко // Проблеми трибології. – 2005. – № 2. – С. 74–80.
6. Эволюция структуры и свойств эвтектических покрытий при трении [Текст] / М.В. Кіндрачук, Ю.Я. Душек, М.В. Лучка, А.М. Гладченко // Порошковая металлургия. – 1995. – № 5–6. – С. 104–110.
7. Кіндрачук, М.В. Трибологія покриттів матрично-наповненого типу [Текст] / М.В. Кіндрачук, М.В. Лучка, І.М. Джамаль, А.О. Корнієнко // Проблеми тертя та зношування. – 2006. – Вип. 45. – С. 127–140.
8. Кіндрачук, М.В. Трибологічні характеристики гетерогенних карбидовмісних покриттів [Текст] / М.В. Кіндрачук, Е.А. Кульгавий, Д.І. Перро, В.О. Подлесний // Наукоємні технології. – 2009. – № 4. – С. 32–35.
9. Лучка, М.В. Износостойкие композиционные диффузионно-легируемые электролитические покрытия [Текст] / М.В. Лучка, М.В. Кіндрачук, Р.Ю. Микитюк. – К.: Техника, 1993. – 143 с.
10. Gassner, E. On the influence of fretting corrosion on the fatigue life of notched specimen of an Al – Cu – Mg 2 Alloy [Текст] / E. Gassner // Fatigue Aircraft Struct. Oxford – L – N – Y – Paris, Pergamon Press, 1963. – p. 87–95.