

УДК 621.891

М. В. КИДРАЧУК, В. В. ХАРЧЕНКО, Ю. О. ЦИБРІЙ, І. В. КОСТЕЦЬКИЙ,  
М. А. ГЛОВИЙ

*Національний авіаційний університет, Київ*

## АНАЛІЗ РУЙНУВАННЯ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ

*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 поверхні шарів. Встановлено наявність залежності розмірів частинок зносу від механічних властивостей матеріалу. Виконаний аналіз результатів зносостійкості покриттів.*

**Ключові слова:** *тертя, частинки зносу, композиційне покриття, структура, зміцнення, енергія активації*

**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 роботах 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.

Композиційні електролітичні покриття є ефективними в першу чергу на нержавіючих сталях групи X18N10T, які є достатньо корозійностійкими в багатьох агресивних середовищах, але володіють низькою зносостійкістю, що обмежує їх застосування в техніці в якості конструкційних матеріалів [4]. Осадження КЕП на нікелевій основі на поверхню таких сталей зберігає їх корозійну стійкість та підвищує зносостійкість, крім цього властивості таких покриттів можна з великою вірогідністю запрограмувати та додатково зміцнювати різними способами: дифузійне відпалювання, оплавлення, лазерна і електроіскрова, хіміко-термічна обробка та інші.

**Методики та аналіз результатів дослідження.** Осадження покриттів проводилось з електроліту нікелю з різним вмістом в ньому дисперсної фази в широкому діапазоні розмірів частинок та вмісту їх у ванні. Кислотність ванни складала 10 А/дм<sup>2</sup>, а температура процесу відповідала 25°C.

На прикладі TiB<sub>2</sub> включень в осаді показана зносостійкість таких КЕП в залежності від вмісту і дисперсності боридної фази. На рис. 1 наведений характер зносостійкості системи покриття Ni-TiB<sub>2</sub> від вмісту наповнювача, а на рис. 2 – залежність її від розміру частинок TiB<sub>2</sub>. Аналогічні результати залежності отримані для систем Ni-TiC та Ni-SiC і це дає підставу стверджувати, що зносостійкість такого покриття суттєво залежить від розмірів зерна наповнювача.

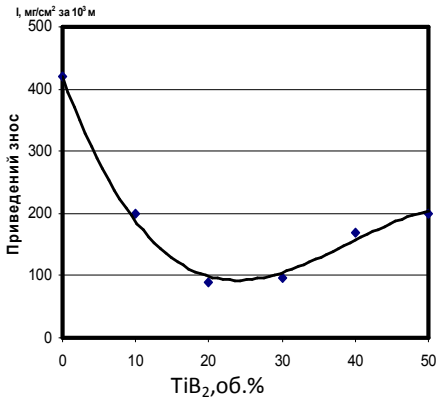


Рис. 2. Залежність зносостійкості КЕП Ni-TiB<sub>2</sub> від вмісту наповнювача при навантаженні 20Н і швидкості тертя 0,5м/с. Величина частинок 28/20 мкм

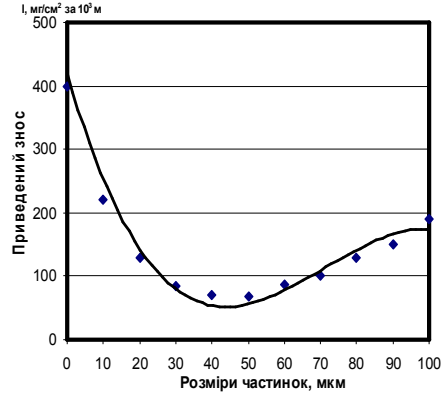


Рис. 3. Залежність зносостійкості КЕП Ni-TiB<sub>2</sub> від розміру частинок TiB<sub>2</sub> при навантаженні 20Н і швидкості тертя 0,5м/с. Об'ємний вміст наповнювача 24%

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

В роботі [Ошибка! Неизвестный аргумент ключа.], адаптуючи розроблену Д. Г. Громаковським енергетичну модель аналізу кінетики втомного зношування здійснений аналіз умов утворення частинок зносу.

Умовою руйнування матеріалу (утворення частинок зносу) є виконання нерівності:

$$E_{def} \geq E_S, \quad (1)$$

де  $E_{def}$  – енергія деформації, що накопичується в процесі тертя, при цьому

$$E_{def} = \frac{\sigma_{max}^2}{2E} \cdot \frac{\pi d^3}{12}, \quad (2)$$

де  $\sigma_{max}$  – максимальне напруження;  $E_S$  – енергія активації руйнування, визначається когезійними властивостями матеріалу, при цьому

$$E_S = 2\gamma\pi d^2, \quad (3)$$

де  $\gamma$  – питома енергія когезії;  $d$  – розмір частинок зносу.

Прирівнюючи вирази 2 і 3 отримуємо  $d \sim \gamma/E$ , тобто умова руйнування матеріалу в процесі тертя визначається його механічними властивостями. Розмір частинок зносу менший у випадку матеріалу з більшою твердістю (з великим значенням  $E$ ), але більший – у матеріалі з більшою міцністю (великі значення  $\gamma$ ) (рис. 3).

У табл. наведено значення модулів пружності та енергії когезії TiB<sub>2</sub>, SiC та WC.

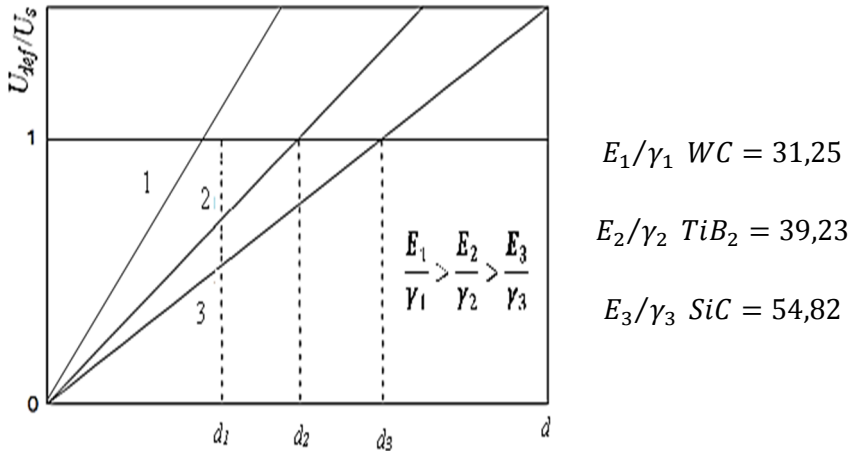


Рис. 3. Зміна розміру частинки зносу ( $d$ ) зі зміною механічних властивостей матеріалу ( $E$  – модуль пружності,  $\gamma$  – питома енергія когезії)

Таблиця

Величини модулів Юнга  $E$  та енергій когезії  $\gamma$  для  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{SiC}$  та  $\text{WC}$

Речовина	$E$ , ГПа	$\gamma$ , eВ	$E/\gamma$
Карбід кремнію	392 <sup>b)</sup>	12,68 <sup>d)</sup>	31,25
Диборид титану	530 <sup>b)</sup>	13,51 <sup>d)</sup>	39,23
Карбід вольфраму	710 <sup>b)</sup>	12,95 <sup>d)</sup>	54,82

а) за даними [5]    б) за даними [6]

с) за даними [7]    д) за даними [8]

Аналізуючи наведені на рис. 3 і табл. результати, можна зробити наступне трактування результатів, показаних на рис. 1 та рис. 2. За умови малого (згідно рис. 1 – до 24%) вмісту дибориду титану у шарі покриття  $\text{Ni-TiB}_2$ , матеріалом плям контакту переважно є нікель. Робота сил тертя витрачається на створення циклічно змінних деформаційних напружень у шарі покриття і, при накопиченні необхідного запасу внутрішньої енергії, починається його руйнування – відлущування частинок зносу. Переважно це – частинки нікелю певного характерного розміру  $d_{\text{Ni}}$ .

Збільшення частки дибориду титану у покритті збільшує енергію активації частинок зносу  $U_a$  (тим більше, чим більший вміст  $\text{TiB}_2$ , що має більшу питому енергію когезії, аніж  $\text{Ni}$ ). Це, за незмінних умов трибо-логічного експерименту, потребує більшої роботи сил тертя, а тому й часу, що спостерігається як зростання зносостійкості шару покриття (ліва гілка кривої питомого зносу на рис. 1). Зміна величини питомого зносу нелінійна, оскільки зі збільшенням вмісту  $\text{TiB}_2$  у шарі покриття усереднена твердість частинок зносу зростає – серед них збільшується частка частинок з дибориду титану, твердість якого більша, аніж твердість нікелю, а тому зношування набуває більш абразивного характеру [9, 10].

При досягненні певного рівня насичення диборидом титану (24% при незмінному розмірі зерна  $\text{TiB}_2$  28/20 мкм) у шарі покриття, очевидно, змінюється склад частинок зносу. Через те, що ймовірність появи зерна наповнювача у зоні контакту поверхонь пар тертя зростає, зростає ймовірність перетворення роботи сил тертя у внутрішню енергію саме цієї частини шару покриття. Тому створю-

ються умови для відлучення цілковитого зерна  $TiB_2$ . Зі збільшенням рівня насичення шару покриття їх частка серед частинок зносу зростає, зношування стає переважно абразивним, що й спричиняє відповідне зростання питомого зносу шару (права гілка кривої на рис. 1).

При фіксованому рівні насичення, але різному розмірі зерна наповнювача динаміка руйнування шару покриття виглядає такою. Усереднені за об'ємом характеристики шару покриття незмінні, а тому незмінним буде середній розмір частинок зносу  $d_{сер}$ .

До тих пір, поки розмір зерна наповнювача менший оптимального, що, згідно рис. 2, становить близько 42 мкм, він, очевидно, може бути меншим за розмір частинки зносу  $d_{сер}$ . За наявності в активаційному об'ємі зерна, відлучування частинки зносу найімовірніше почнеться вздовж границі зерна, оскільки вона є місцем стоку дислокацій, а отже – локалізації енергії деформації. Площа поверхні зерна, спільної з поверхнею викришуваної частинки зносу, зростає при збільшенні розміру зерна. Оскільки питома поверхнева енергія когезії карбиду кремнію суттєво більша, ніж у нікелю, то зростання частки спільної поверхні зерна і частинки зносу при збільшенні розміру зерна приводить до необхідності накопичення в активаційному об'ємі більшої енергії. Це потребує більшої кількості циклів трибоконтакту, що спостерігається як зростання зносостійкості покриття при збільшенні розмірів частинок наповнювача. Мінімум кривої питомого зносу відповідає рівності розміру зерна наповнювача величині  $d_{сер}$  (ліва частина кривої на рис. 2). Нелінійність залежності питомого зносу від розміру зерна наповнювача на цій ділянці графіка пояснюється відповідними змінами твердості частинок зносу – зі збільшенням розміру частинок наповнювача, характер зношування стає більш абразивним.

Якщо розмір зерен  $TiB_2$  стає більшим від середнього розміру частинки зносу, характерного для даного рівня насичення, то при їх попаданні в зону контакту поверхонь тертя викришуватися будуть частинки з середовища  $TiB_2$ . Оскільки, згідно табл. і рис. 3, розмір частинок зносу для дибориду титану більший, аніж для нікелю ( $d_{TiB_2} > d_{Ni}$ ), то частинки зносу будуть мати розмір тим більший, чим більший розмір зерна, з якого вони викришуються (характеристики активаційного об'єму тим ближчі до характеристик  $TiB_2$ , чим більший його вміст у цьому об'ємі). Збільшення ж розмірів частинок зносу великої, характерної для  $TiB_2$ , твердості збільшує зношуваність шару покриття (права гілка кривої приведенного зносу на рис. 2).

Отже, адаптація розробленої Д.Г. Громаковським енергетичної моделі аналізу кінетики втомного зношування дає змогу пояснити експериментально спостережувані закономірності процесів руйнування поверхонь пар тертя за умов адгезійного зношування. Зрозуміло, що визначення кількісних характеристик перебігу цих процесів потребує розробки методів теоретичних розрахунків, які би врахували більш тонкі механізми взаємодій у зоні тертя.

На рис. 4 наведені результати зносостійкості КЕП наповнювачами SiC,  $TiB_2$  та WC.

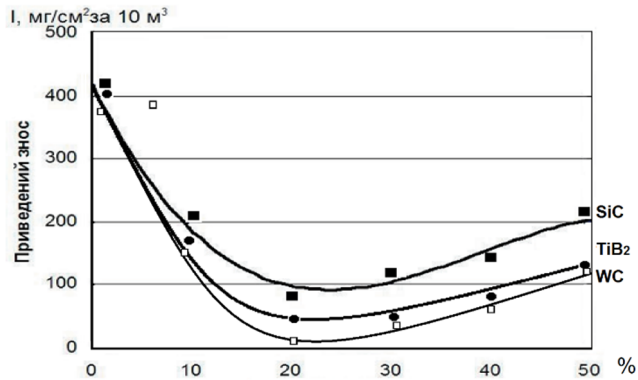


Рис. 4. Залежність зносостійкості КЕП Ni-TiB<sub>2</sub>, Ni-SiC та Ni-WC від вмісту наповнювача при навантаженні 20Н і швидкості тертя 0,5м/с. Величина частинок 28/20 мкм

**Висновки.** Проведений аналіз динаміки руйнування поверхневих шарів на основі енергетичної моделі. Визначено, що умова руйнування покриття в процесі тертя визначається його механічними властивостями і досягається швидше для частинок зносу більших розмірів  $d \sim \gamma/E$ . Розмір частинок зносу менший у випадку матеріалу з більшою твердістю (з великим значенням  $E$ ), але більший – у матеріалу з більшою міцністю (великі значення  $\gamma$ ).

Початкове підвищення зносостійкості КЕП зі збільшенням умісту та розміру наповнювача контролюється відповідно твердістю ( $E$ ) і питомою енергією когезії ( $\gamma$ ). Мінімум приведенного зносу відповідає оптимальним значенням вмісту і розміру наповнювача, коли розмір зерна наповнювача відповідає розміру частинок зносу ( $d_{сер}$ ). Якщо розмір зерен наповнювача стає більшим від середнього розміру частинки зносу, характерного для даного рівня насичення, то частинками зносу будуть зерна наповнювача (TiB<sub>2</sub>). Характер зношування стає більш абразивним і знос росте.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що за однакової питомої когезії SiC (12,68 eВ) і TiB<sub>2</sub> (13,51 eВ) перевагу щодо підвищення зносостійкості потрібно надавати наповнювачу з більшою твердістю SiC (392 ГПа), TiB<sub>2</sub> (530 ГПа), тоді відповідно  $E/\gamma$  для SiC=31,25, для TiB<sub>2</sub>=39,23.

#### Список літератури

1. Ибатуллин, И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев [Текст] / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самарский гос. тех. ун-т, 2008. – 187 с.
2. Крамар В. М. Зносостійкість як енергетична характеристика міцності матеріалу в зоні тертя / В. М. Крамар, М. В. Кіндрачук, В. Я. Лобурак. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – т. 4, № 7(64) – С. 8–11.
3. Кіндрачук М.В. Формування зносостійких композиційних електролітичних покриттів, зміцнених наночастинками кремнію / М.В. Кіндрачук, М.В. Лучка, Л.О. Корнієнко, Я.И. Загора [Текст] // Металознавство та обробка металів. – 2005. №2. – С. 3 – 8
4. Кіндрачук М.В. Механізм зношування аустенітної сталі 12Х18Н9Т в широкому діапазоні зовнішніх навантажень / М.В. Кіндрачук, Р.Г. Мнацаканов, І.А. Гуменюк та ін. // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 2 (67). – С.18 – 27.
5. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. Т. 1 / В.И. Анурьев; 8-е изд., перераб. и доп. Под.ред. И.Н. Жестковой – М.: Машиностроение, 2001. – 34 с.

6. Кислый П.С. Карбидокремниевые материалы / П.С. Кислый – М.: Metallurgy, 1977. – 34 с.

7. Zhang R. Cohesive energy of elements / R. Zhang // <https://sites.google.com/site/zrftum/home/l/physical-properties/cohesive-energy-of-elements>

8. Harrison W.A., Krant E.A. Energy of substitution and solution in semiconductors / W.A. Harrison, E.A. Krant // Phys. Rev. B. – 1988. – V. 37, № 14. – P. 8244-8248.

9. M. Pashechko Functional Plasma-Deposited Coatings / M. Pashechko, M. Kindrachuk, I. Gumeniuk, O. Tisov, V. Zahrebelnyy // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2018. – 11(4). – pp. 301-304.

10. Гуменюк І. А. Триботехнічні властивості сталі 12Х18Н10Т, поверхнево модифікованої комбінованими покриттями : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 "Тертя та зношування в машинах" / Гуменюк І. А. – Київ, 2018. – 24 с.

Стаття надійшла до редакції 05.12.2018

**Кіндрачук Мирослав Васильович** - доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, Київ, Україна, E-mail: nau12@ukr.net.

**Харченко Володимир Володимирович** — аспірант кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, Київ, Україна, E-mail: nau12@ukr.net.

**Цибрій Юрій Олександрович** – кандидат техн. наук, асистент кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, Київ, Україна, E-mail: nau12@ukr.net.

**Костецький Іван Володимирович** — студент Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Гловин Михайло Андрійович** — студент Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

M. V. KINDRACHUK, V. V. KHARCHENKO, TSUBRII Yu. O., I. V. KOSTECKSKII, M. A. GLOVIN

### ANALYSIS OF FRACTURE AND DURABILITY OF COMPOSITE COATINGS BASED ON THE ENERGY MODEL

The paper presents the research results of friction fracture processes with an example of composite electrolytic coatings. With the methods of analysis of theoretical and experimental results of the study using the energy model of the wear particles formation in near-surface zones of friction pairs is made by evaluating the process of the layers surface destruction. The presence of the dependence of the wear particles size on the material mechanical properties has been established. The results analysis of coatings durability is executed. It is established that the condition of the coating destruction in the process of friction is determined by its mechanical properties and is achieved faster for wear particles with larger sizes. The size of the wear particles is smaller in the case of a material with higher hardness (with a large value of Young's modulus of elasticity), but larger - in a material with greater strength (large values of specific energy of cohesion). The minimum resistance wear corresponds to the optimal content and the size of the filler, when the grain size of the filler corresponds to the size of the wear particles. If the size of the filler grains becomes larger than the average particle size of the wear characteristic of this saturation level, the particles of wear will be the filler grain ( $\text{TiB}_2$ ). The nature of wear becomes more abrasive and wear is growing. It is theoretically grounded and experimentally proved that for an equal specific cohesivity of SiC (12.68 eV) and  $\text{TiB}_2$  (13.51 eV), it is advisable to choose a filler with higher hardness SiC (392 GPa),  $\text{TiB}_2$  (530 GPa), respectively the ratio of Young's modulus of elasticity and specific energy of cohesion for SiC = 31.25, for  $\text{TiB}_2$  = 39.23.

**Key words:** friction, wear particles, composite coatings, structure, hardening, activation energy

#### References

1. Ibatullin, I.D. Kinetikaustalostnoj povrezhdanosti i razrushenijapoverh-nostnyhsloev [Tekst] / I.D. Ibatulin. – Smara: Samarskij gos. teh. un-t, 2008. – 187 s.
2. Kramar V. M. Znosostij kist` yakenergety` chnaxaraktery` sty` kamicnostimaterialu v zonitertya / V. M. Kramar, M. V. Kindrachuk, V. Ya. Loburak. // Vostochno-Evropesky` zhurnalperedovyx texnologij. – 2013. – t. 4, # 7(64) – S. 8–11.
3. Kindrachuk M.V. Formuvannyaznosostijky` xkompozy` cijny` xelektrolity` chny` xpokry`ttiv, zmiznenny` xnanochastnkamkremniyu / M.V. Kindrachuk, M.V. Luchka, L.O. Korniyenko, Ya.Y`. Zamora [Tekst] // Metaloznavstvotaobrobkametaliv. – 2005. #2. – S. 3 – 8.
4. Kindrachuk M.V. Mexanizmnoshuvannya austenitnoyistali 12X18N9T v shy` rokomudiapazonizovnishnixnavantazhen` / M.V. Kindrachuk, R.G. Mnacakanov, I.A. Gumenyuktain. // Problemy` tertyataznoshuvannya. – 2015. - # 2 (67). – S.18 – 27.
5. Anur'ev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelja v 3-h t. T. 1 / V.I. Anur'ev; 8-e izd., pererab. i dop. Pod.red. I.N. Zhestkovej – M.: Mashinostroenie, 2001. – 34 s.
6. Kislyj P.S. Karbidokremnievyematerialy / P.S. Kislyj – M.: Metallurgija, 1977. – 34 s.
7. Zhang R. Cohesive energy of elements / R. Zhang // <https://sites.google.com/site/zrftum/home/l/physical-properties/cohesive-energy-of-elements>
8. Harrison W.A., Krant E.A. Energy of substitution and solution in semiconductors / W.A. Harrison, E.A. Krant // Phys. Rev. B. – 1988. – V. 37, № 14. – P. 8244-8248.
9. M. Pashechko Functional Plasma-Deposited Coatings / M. Pashechko, M. Kindrachuk, I. Gumenyuk, O. Tisov, V. Zahrebelny // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2018. – 11(4). – pp. 301-304.
10. Gumenyuk I. A. Try` botexnichnivlasty` vostistali 12X18N10T, poverxnevomody` fikovanoyikombinovany` my` pokry`ttyamy` : avto ref. dy`s. nazdobuttyanauk. stupenyakand. texn. nauk : specz. 05.02.04 "Tertyataznoshuvannya v mashy`nax" / Gumenyuk I. A. – Ky`yiv, 2018. – 24 s.