

УДК 531.4:620.22-419.8

# МАТЕМАТИЧНЕ ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСУ БАГАТО- КОМПОНЕНТНИХ КОМПОЗИТІВ У ЗОНІ ТЕРТЯ

*Запропоновано математичне описування прогнозування зносу багатокомпонентних композитів у зоні тертя. Експериментально досліджено масове зношення структурно-неоднорідного сплаву на основі кальцієвого бабіту та графіту із захисно-зміцнюючим покриттям*

*Ключові слова: багатокомпонентні композити, зона тертя, знос, прогнозування, структурно-неоднорідний сплав, захисно-зміцнююче покриття*

*Предложена математическое описание прогнозирования износа многокомпонентных композитов в зоне трения. Экспериментально исследован массовый износ структурно-неоднородного сплава на основе кальциевого баббита и графита с защитно-упрочняющим покрытием*

*Ключевые слова: многокомпонентные композиты, зона трения, износ, прогнозирование, структурно-неоднородный сплав, защитно-упрочняющее покрытие*

*Mathematical formulation for process of the wear multicomponent composites in the zone of friction is offered. It is experimentally researched the mass wear of structurally-heterogeneous alloy on the basis of calcium babbitt and graphite with protective-consolidating coverage*

*Keywords: multicomponent composites, zone of friction, the wear, prognostication, structurally-heterogeneous alloy, protective-consolidating coverage*

**В.О. Скачков**

Кандидат технічних наук, доцент\*  
Контактний тел.: (06 12) 223-83-10  
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

**В.І. Іванов**

Старший викладач\*  
Контактний тел.: (06 12) 223-83-24  
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

**С.А. Воденніков**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедру  
Кафедра металургії чорних металів\*\*  
Контактний тел.: (06 12) 223-82-03  
E-mail: mf@zgia.zp.ua

**С.С. Сергієнко**

Аспірант\*  
Контактний тел.: (06 12) 223-83-10  
E-mail: colourmet@zgia.zp.ua

\*Кафедра металургії кольорових металів\*\*

\*\*Запорізька державна інженерна академія  
пр. Леніна, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006

## 1. Вступ

Працездатність вузлів тертя визначається зносом фрикційної пари, що, в свою чергу, залежить від значення сили тертя та фізичних характеристик компонентів композиту.

У роботі [1] запропоновано модель розрахунків коефіцієнтів тертя багатокомпонентних композитів, що обумовлюють появу сили тертя.

Відповідно до уявлень І. Крагельського [2] та Г. Шпенькова [3], знос поверхонь тертя відповідає втому руйнуванню, яке реалізується у поверхневих і підповерхневих шарах, та характеризується процесом

накопичення мікроструктурних руйнувань, що мають випадковий характер, обумовлений структурою поверхні тертя та випадковим розподілом діючих напружень. А. Ковшов [4] розглядає процес зносу поверхонь тертя з позицій детермінованих енергетичних критеріїв.

## 2. Постановка завдання

Поширюючи можливості підходу роботи [1], розроблено модель прогнозування зносу багатокомпонентних композитів у зоні тертя.

### 3. Розробка математичної моделі та оцінка її працездатності

Під час моделювання композиту середовищем класу В2 фізичні рівняння для умов накопичення пошкоджень можна подати у вигляді:

$$\xi_{ij} = \sum_{k=1}^N Q_{ij\alpha\beta}^k \cdot (I_{\alpha\beta\gamma\delta} - \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^k) \cdot \lambda_k \cdot [\epsilon_{\gamma\delta} - \sum_{m=1}^N b_{\gamma\delta}^m (1 - \phi^k) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T], \quad (1)$$

де  $\xi_{ij}$ ,  $\epsilon_{mn}$  – мікроструктурні напруження та деформації відповідно;  $Q_{ijmn}^k$ ,  $b_{ij}^k$  – випадкові модулі пружності та коефіцієнти лінійного термічного поширення компоненту композиту з номером  $k$  відповідно;  $T$  – температура процесу;  $\Psi_{ijmn}^k$ ,  $\phi_k$  – випадкові структурні функції, що встановлюють залежність пружних характеристик і коефіцієнтів лінійного термічного поширення компоненту композиту з номером  $k$  від ступеня структурних перетворень відповідно;  $\lambda_k$  – випадкова індикаторна функція;  $I_{ijmn}$  – одиничний тензор четвертого рангу;  $N$  – кількість компонентів у композиті.

Випадкову термоструктурну функцію у рівнянні (1) задають як співвідношення

$$\Psi_{ijmn}^k(\vec{r}, S, \xi) = P_0^k(\vec{r}, S^k, \xi^k) \cdot I_{ijmn} + P_{ijmn}^k(\vec{r}, S^k, \xi^k), \quad (2)$$

де  $P_0^k(\vec{r}, S^k, \xi^k)$  – скалярна випадкова функція, що описує накопичення тривимірних дефектів;  $P_{ijmn}^k$  – випадкова тензорна функція, що описує накопичення плоских дефектів;  $S^k$  – випадковий тензор міцності структурного елемента композиту з номером  $k$ .

Компоненти випадкової тензорної функції (2) однозначно визначаються розподілом мікронапружень і тензорами міцності структурних елементів композиту. У загальному випадку, коли головні осі симетрії структурних елементів не співпадають з напрямками головних напружень, тензор  $\Psi_{ijmn}$  несиметричний і його компонентами є 36 випадкових функцій. У ряді окремих випадків симетрія функції (2) збільшується.

Для визначення компонентів випадкових тензорних функцій мікропошкодження та статистичних параметрів мікронапружень і мікрдеформацій вирішують статистичну краєву задачу мікромеханіки композитів, зв'язану за процесами деформації та руйнування. У постановці даної задачі додатково до рівнянь (1) додають рівняння рівноваги, геометричні співвідношення та межові умови:

$$\xi_{i\alpha\alpha} = 0; \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{ij} = 0,5(\chi_{i,j} + \chi_{j,i}); \quad (3.2)$$

$$\chi_{i|3} = \chi_i^3, \quad (3.3)$$

де  $\chi_i$ ,  $\chi_i^3$  – вектор випадкових переміщень в обсязі та на межі тіла відповідно.

Усреднюючи рівняння (1) та виділяючи частину, що є відповідальною за пружні характеристики матеріалу, одержують співвідношення

$$C_{ijmn}^1 = \sum_{k=1}^N \langle Q_{ij\alpha\beta}^k \rangle [I_{\alpha\beta\gamma\delta} - \langle \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^k \rangle] \langle \lambda_k \Phi_{\gamma\delta mn} \rangle, \quad (4)$$

де  $C_{ijmn}^1$  – макроскопічні модулі пружності композиту;  $\Phi_{ijmn}^1$  – флуктуація тензора четвертого рангу, залежного від властивостей компонентів композиту [5];  $\langle \dots \rangle$  – оператор статистичного усереднювання.

Вирішення системи рівнянь (3) з урахуванням співвідношення (4) для флуктуацій мікроструктурних напружень  $\xi_{ij}$  можна записати як

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_{ij} = & \sum_{k=1}^N [\dot{\theta}_{ij\alpha\beta}^k \cdot (I_{\alpha\beta\gamma\delta} - \langle \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^k \rangle) - C_{ij\alpha\beta}^k \langle \Psi_{\alpha\beta\gamma\delta}^k \rangle] \times \lambda_k \times \\ & \times [\epsilon_{\gamma\delta} - \epsilon_{\gamma\delta} - \sum_{k=1}^N \langle b_{\gamma\delta}^k \rangle \cdot (1 - \langle \phi^k \rangle) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T], \end{aligned} \quad (5)$$

де  $e_{ij}$  – макроскопічна деформація;  $\dot{\theta}_{ijmn}^k$ ,  $C_{ijmn}^k$  – флуктуації та середні значення модулів пружності компонентів композиту відповідно.

Флуктуації мікроструктурних напружень у рівнянні (5) визначають відповідно до уявлень роботи [5]:

$$\dot{\xi}_{ij} = \int_V G_{i\varphi,j} \cdot \Pi_{\varphi\alpha,\alpha} dV, \quad (6)$$

де  $G_{i\alpha}$  – тензор Гріна для тіла з об'ємом  $V$ . Параметр  $\Pi_{ij}$  у рівнянні (6) задають у вигляді

$$\begin{aligned} \Pi_{ij} = & \sum_{k=1}^N [\dot{\theta}_{ij\gamma\delta}^k \cdot (I_{\gamma\delta\alpha\beta} - \langle \Psi_{\gamma\delta\alpha\beta}^k \rangle) \cdot \langle \lambda_k \rangle + \langle \theta_{ij\alpha\beta}^k \rangle \langle \Psi_{\gamma\delta\alpha\beta}^k \rangle \lambda_k] \times \\ & \times [\epsilon_{\alpha\beta} - \sum_{k=1}^N \langle b_{\alpha\beta}^k \rangle \cdot (1 - \langle \phi^k \rangle) \cdot \lambda_k \cdot \Delta T]. \end{aligned} \quad (7)$$

Дисперсії мікроструктурних напружень розраховують за формулою:

$$D_{ij}^{mn} = \langle \xi_{ij} \xi_{mn} \rangle. \quad (8)$$

Середні значення та дисперсії мікроструктурних напружень у компонентах композитів обчислюють відповідно до роботи [5]:

$$\sigma_{ij}^k = \sigma_{ij} + \langle \lambda_k \rangle^{-1} \cdot \langle \lambda_k \cdot \xi_{ij} \rangle. \quad (9)$$

$$\begin{aligned} D_{ijmn}^k = & \sigma_{ij} \cdot \sigma_{mn} + D_{ij}^{mn} - \sigma_{ij}^k \cdot \sigma_{mn}^k - \langle \lambda_k \rangle \cdot [\langle \lambda_k \cdot \xi_{ij} \cdot \xi_{mn} \rangle + \\ & + \sigma_{mn} \langle \lambda_k^2 \cdot \xi_{ij} \rangle + \sigma_{ij} \cdot \langle \lambda_k^2 \cdot \xi_{mn} \rangle]. \end{aligned} \quad (10)$$

Компоненти випадкових термоструктурних функцій у співвідношенні (2) задають у вигляді:

$$\langle P_0^k \rangle = \int_0^{\tau} \Omega_0^k \cdot F^k(\tau) d\tau; \quad (11)$$

$$\langle P_{ijmn}^k \rangle = \int_0^{\tau} \Omega_{ijmn}^k \cdot F^k(\tau) d\tau; \quad (12)$$

$$\Omega_0^k = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot D_{ijij}^k} \cdot \int_{\sigma_{ij}^{B-(k)}}^{\sigma_{ij}^{B+(k)}} \exp\left[-\frac{(x - \sigma_{ij}^k)^2}{D_{ijij}^k}\right] dx; \quad (13)$$

$$\Omega_{ijmn}^k = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot D_{ijmn}^k}} \times \int_{\sigma_{ij}^{B+}}^{\sigma_{ij}^{B-}} \int_{\sigma_{mn}^{B+}}^{\sigma_{mn}^{B-}} \exp\left[\frac{(x - \sigma_{ij}^k)(y - \sigma_{mn}^k)}{D_{ijmn}^k}\right] dx dy ; \tag{14}$$

$$F^k(\tau) = \sum_{i=1}^M F_{i1}^k \cdot \exp[F_{21}^k \cdot (\tau_i^k - \tau)] , \tag{15}$$

де  $\tau$  – час експлуатації пари тертя;  $\sigma_{ij}^{B-(k)}$ ,  $\sigma_{ij}^{B+(k)}$  – компоненти меж міцності компоненту композиту з номером  $k$  на розтягування та стиснення відповідно;  $F_{i1}^k$ ,  $F_{21}^k$  – експериментальні константи;  $M$  – кількість характеристичних часових точок, за яких змінюється характер залежності пружних властивостей компонентів композиту під час зносу;  $\tau_i^k$  – характерні відрізки часу, на яких змінюються пружні характеристики компоненту композиту з номером  $k$  у процесі зносу.

Середні значення випадкових функцій  $\phi_k$  у рівнянні (1) можна подати у вигляді залежності:

$$\langle \phi^k \rangle = \int_0^{\tau} \sum_{i=1}^M \phi_{i1}^k \cdot \exp[\phi_{21}^k \cdot (\tau_i^k - \tau)] d\tau , \tag{16}$$

де  $\tau_i^k$  – характеристичні відрізки часу, на яких змінюються коефіцієнти лінійного термічного поширення компоненту композиту з номером  $k$ ;  $\phi_{i1}^k$ ,  $\phi_{21}^k$  – експериментальні константи;  $M$  – кількість точок, за яких характеристично змінюється поведінка коефіцієнтів лінійного термічного поширення компонентів композиту.

Проведено дослідження зносу багатокомпонентного структурно-неоднорідного сплаву на основі бабіту, що містить інтерметалідні компоненти.

Випробування на знос проводили за умов сухого тертя на машині тертя СМТ-1 з використанням схеми «диск-колодка». Диск діаметром 50 мм виготовляли з сірого чавуну; колодку розмірами 11 x 16 x 10 мм<sup>3</sup>, притерту за радіусом 25 мм, виконували з композитів, що досліджують. Змінювання маси зразків визначали за допомогою аналітичних вагів із точністю 0,0001 г.

Зносостійкість структурно-неоднорідного сплаву на основі бабіту залежить від вмісту кальцію, який значною мірою визначає його твердість. Твердість сплаву визначали за методом Бріннеля на твердомірі ТК-2М.

На рис. 1 подано залежність масового зносу сплаву від твердості для вказаних рівнів питомого тиску.

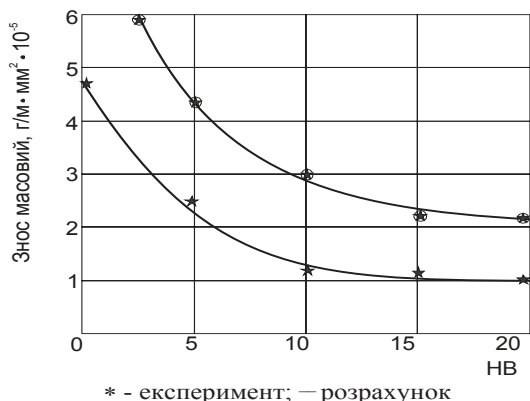


Рис. 1. Залежність масового зносу від твердості структурно-неоднорідного сплаву: 1 - питомий тиск 1,0 МПа, 2 - 1,5 МПа

Також розглянуто пористі матеріали на основі пресованого графіту із різним захисно-зміцнюючим покриттям – карбиду кремнію, дибориду титану та міді. Нанесення покриттів здійснювали електролізом відповідних іонних розплавів за щільності струму в межах 0,1...1,1 А/см<sup>2</sup>.

Результати експериментів щодо вивчення масового зносу графітових матеріалів із переліченим захисно-зміцнюючим покриттям, одержаним за різних параметрів електролізу, подано на рис. 2. Встановлено, що щільність струму електролізу суттєво впливає на масовий знос. Так, за значенням щільності струму до 0,60 А/см<sup>2</sup> знос знижується більше ніж у п'ять разів, аж до 6,2·10<sup>-9</sup> г/(м·мм<sup>2</sup>). Далі в інтервалі щільності струму 0,60...0,70 А/см<sup>2</sup> інтенсивність масового зносу є мінімальною величиною.

Найбільш стійким до зносу є покриття на основі карбиду кремнію, що цілком узгоджується з даними металографічного аналізу. На графіті формується найбільш щільна структура, що складається з дифузійного інтерметалідного шару глибиною 450 мкм, який позитивно впливає на зносостійкість. Показники зносостійкості покриття на основі дибориду титану мають декілька нижчі значення. Так, мінімальний масовий знос складає 6,7·10<sup>-9</sup> г/(м·мм<sup>2</sup>), що на відміну від попереднього покриття, можна пояснити незначною концентрацією матеріалу покриття у недостатньо протязному дифузійному шарі (до 150 мкм).

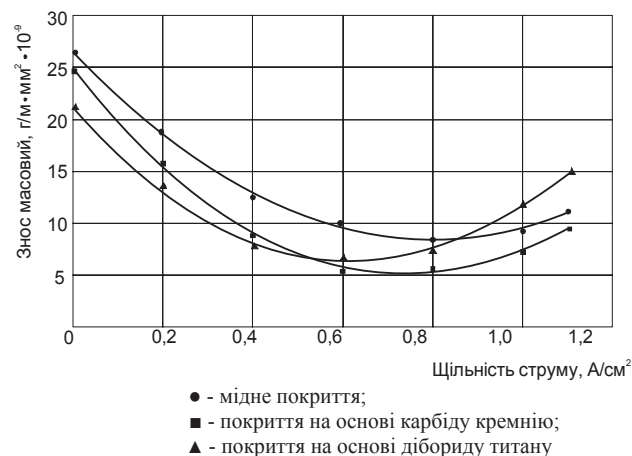


Рис. 2. Вплив щільності струму на масовий знос графіту із захисним зміцнюючим покриттям

Мідне покриття на графіті характеризується мінімальним зносом [(8,1·10<sup>-9</sup> г/(м·мм<sup>2</sup>)] за щільності струму 0,8 А/см<sup>2</sup>. Збільшення щільності струму призводить до накопичення електролітичної міді на поверхні графіту, що безпосередньо знижує стійкість до стирання.

#### 4. Висновки

Розроблено математичну модель прогнозування зносу за умов сухого тертя багатокомпонентних композитів. Працездатність моделі було оцінено під час прогнозування зношення структурно-неоднорідного сплаву на основі кальцієвого бабіту та пористих матеріалів із захисно-зміцнюючим покриттям. Встановлено взаємний вплив параметрів електролізу,

структури, фазового складу покриття, глибини дифузійного проникнення й інтенсивності масового зносу. Результатами досліджень показано, що інтенсивність масового зносу залежить від якісних характеристик поверхневого шару, а мінімальні його значення дово-

дяться на оптимальні параметри електролізу. Визначено, що найбільш стійким до стирання є покриття на основі карбіду кремнію, яке за товщини дифузійного проникнення у 450 мкм забезпечує знос не більше ніж  $5,1 \cdot 10^{-9}$  г/(м·мм<sup>2</sup>).

#### Література

1. Скачков В.О. Метод прогнозування коефіцієнтів тертя багатокомпонентних композитів [Текст] / В.О. Скачков, В.І. Іванов, В.Д. Карпенко // Матеріали V-ої між. научно-практич. конф. «Альянс наук: учений ученому». – Дніпропетровськ: ПрДА-БіА, 2011. – Вип. 2. – С. 78-81.
2. Крагельский И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
3. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения [Текст] / Г.П. Шпеньков – Минск: Машиностроение, 1991. – 296 с.
4. Ковшов А.Г. Физическая модель разрушения поверхностей трения [Текст] / А.Г. Ковшов // Актуальные проблемы трибологии: сб. трудов между. научно-техн. конф. – М.: Машиностроение, 2007. – Т. 2. – С. 206-213.
5. Волков С.Д. Статистическая механика композитных материалов / С.Д. Волков, С.Д. Ставров [Текст] – Минск: БГУ, 1978. – 204 с.

*У статті стисло розглянуто біографію та наукову діяльність В.М. Болтинського, його праці та вчення. Висвітлюються значення цих досліджень для сучасного розвитку тракторобудування. Описано внесок В.М. Болтинського у науково-педагогічний доробок машинобудування*

*Ключові слова: тракторобудування, сільське господарство, робота тракторного двигуна*

*В статье кратко рассмотрена биография и научная деятельность В.М. Болтинского, его труды и учения. Показано значение этих исследований для современного развития тракторостроения. Описан вклад В.М. Болтинского в научно-педагогические основы машиностроения*

*Ключевые слова: тракторостроение, сельское хозяйство, работа тракторного двигателя*

*The article briefly reviewed biography and scientific activity of V.M. Boltinskyi, his writings and teachings. The significance of these studies for the development of modern tractor industry is shown. The contribution of V.M. Boltinskyi in scientific and pedagogical foundations of Engineering is described*

*Key words: tractor industry, agriculture, operation of the tractor engine*

УДК 629.114.2

# РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ В. М. БОЛТИНСЬКОГО В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ ВІТЧИЗНЯНОГО ТРАКТОРОБУДУВАННЯ

**О.Г. Кривоконь**

Кандидат філософських наук, доцент  
Кафедра автомобіле- та тракторобудування  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут»  
вул. Фрунзе, 21, Харків, Україна, 61002  
Контактний тел.: (057) 707-64-64  
E-mail: kryvokon@mail.ru

#### 1. Вступ

Процес становлення вітчизняного тракторобудування бере свої витoki ще з початку 20-го сторіччя.

За цей час було створено багато типів сільськогосподарських машин та обладнання. Технології постійно вдосконалювались, і зараз ми можемо бачити сучасну конкурентоспроможну техніку. Розвиток галузі