

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КІНЕТИКИ ЗНОШУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ

**М. Пашечко**, д-р наук, проф.;

*Люблінська політехніка, Польща*

**М. Денисенко**, канд. тех. наук

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*У статті описана математична модель процесу кінетики зношування захисних зносостійких покриттів. Модель дозволяє прогнозувати підвищення довговічності деталей тертя за рахунок покращення триботехнічних властивостей поверхневих шарів.*

**Ключові слова:** *сільськогосподарські машини, абразивне зношування, композиційні покриття евтектичного типу, наробіток, математична модель.*

**Суть проблеми.** Під час розробки математичної моделі розрахунку на зношування деталей машин необхідно враховувати конструктивні особливості спряження, що визначають механіку деформування і кінетику контакту, параметри зовнішнього впливу на нього (навантаження, швидкість, температура) і здатність матеріалу чинити опір зношуванню. Принципове значення має вибір і обґрунтування елементного закону зношування матеріалів і форм його представлення.

Розвиток комп'ютерних технологій відкриває нові можливості для розробки математичних моделей за розрахунком на зношування деталей машин.

**Мета дослідження.** Побудувати математичну модель кінетики зношування захисних зносостійких покриттів та закономірності її утворення.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Зношування деталей і робочих органів сільськогосподарських машин є неминучим і закономірним процесом. Багатьма дослідженнями встановлено, що у 80-90% випадках працездатність машин втрачається внаслідок зношування їх рухливих з'єднань. Від зношування змінюються геометричні форми і розміри деталей, технічний стан їх робочих поверхонь, що призводить до поступового зниження функціональних якостей деталей і продуктивності машин в цілому.

У триботехніці використовуються ряд характеристик тертя, зношування, контакту і кінематики тіл. Експериментально визначається знос (лінійний, масовий і об'ємний), що є абсолютною характеристикою процесу. Як правило, за відсутності єдиної методики випробовувань матеріалів на



використання розробленого методу і на евтектичні покриття [6]. Згодом дослідження зношування матеріалів були продовжені і отримані важливі результати.

Згідно із загальною схемою дослідження кінетики зношування матеріалів трибосистем ковзання на першому етапі було необхідно вибрати обґрунтовану механічну модель пошкодження (знос) покриттів, що труться.

Велика кількість експериментальних досліджень [7] показує, що переважаючим механізмом фрикційного руйнування різних матеріалів є

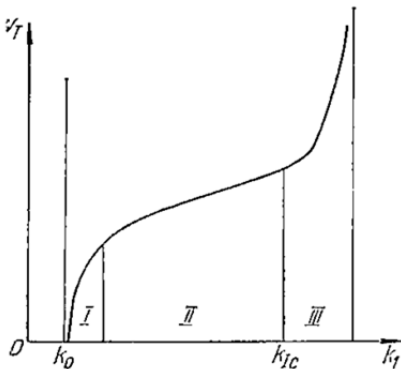


Рисунок 2 – Діаграма втомного руйнування матеріалу

втомом. У працях [8] сформульовані загальні принципи теорії втомного зносу, отримані результати, які мають фундаментальне значення у встановленні закономірностей зношування, як втомного процесу. Значно меншу увагу приділено дослідженню особливостей руйнування захисних покриттів під час трибоконтакту. Однак, як відомо, під час тертя і зношування фрикційному контактному впливу піддається тонкий приповерхневий шар. Тому, розглядаючи захисне покриття, як шар достатньої товщини у порівнянні з глибиною його деформування,

вважаємо механізм його руйнування втомним. При цьому виходимо з того, що покриття, зокрема евтектичні, являють собою міцний і достатньо крихкий моно- або полі- шар на поверхні підкладки. За надійного зчеплення покриття з основою його руйнування відшаруванням і сколюванням неможливе. Отже, випробовуючи циклічне поверхнєве навантаження силами тертя, покриття як шар матеріалу, який деформується, схильне до зародження в ньому і зростанню мікронедосконалостей в умовах пружної деформації, яка призводить до крихкого руйнування. Необхідно відмітити, що товщина покриттів може бути різною. Умовно їх можна поділити на тонкі і товсті. Для тонких покриттів, тобто тих, які деформуються по всій товщині, руйнування (зношування), ймовірно, відбувається шляхом локальних сколів, котрі накопичуючись, повністю його руйнують. Через низку обставин (неоднорівна товщина покриття, ліквіація його структури за товщиною або протяжності, недосконалість геометрії поверхні) знос може локалізуватися на частині поверхні, призводячи надалі до появи патологічного зношування. Для товстих покриттів деформації розповсюджуються тільки на частку їх товщини, тому зношування як процес фракційної втоми виникає у разі зростання і поширення тріщин зсуву частини покриття, яка деформується.

Можливі покриття, які руйнуються квазікрихко, тобто з появою у вершинах мікротріщин локальних пластичних дільниць.

Втомне руйнування покриттів в умовах фрикційного контакту може утворюватись у разі великої кількості впливів, тобто багатоцикловим, або при відносно невеликій кількості впливів, тобто бути малоцикловим. Реалізація виду втоми залежить від зовнішніх умов процесу зношування, наявності поверхнево-активних, корозійних, пасивуючих і захисних середовищ, роду покриттів, технології їх отримання та інших факторів.

Наступним етапом рішення загальної задачі трибоконтактної взаємодії є побудова математичної моделі процесу.

Роздивимось постановку даної задачі. Нехай у сполученні знаходяться тіла, на поверхні яких створені захисні покриття деякої товщини  $h_1$  і  $h_2$  (рис. 1, (1 і 2)). Під час переміщення тіл на контакті виникають сили тертя, які призводять до їх зносу. Функції лінійного зносу покриттів  $\Delta_k$  ( $\xi, \eta, L_k$ ) ( $k$  – порядковий номер тіла,  $k = 1, 2$ ) кількісно оцінюють кінетику їх зношування. Вимірювання проводиться по нормалі до поверхонь тертя після закінчення деякого часу або шляху стирання. Функції зносу коректно описують зміну розмірів тіл(товщини покриттів), що сполучаються, за незмінності зовнішніх умов зношування в зоні тертя: постійності швидкості відносного переміщення і температурного фактора, а також видалення від неї продуктів зносу.

З теорії об'ємної втоми [9] силовим фактором, відповідальним за зародження і зростання різного роду недосконалості структури (типу мікротріщин), є зсувні (дотичні) напруги. Є досить обґрунтоване підтвердження, що зношування є процес фрикційної втоми. Тоді, допускаючи подібність механізмів об'ємної і фрикційної втоми, для процесу зношування покриттів вважається справедливою така гіпотеза: кількісна величина зносу залежить від рівня утвореної під час тертя питомої сили тертя. Лінійний знос оцінюється швидкістю або інтенсивністю (див. формулу (7.2)), тобто функції  $J_\Delta = J_\Delta(\tau)$  за постійності зовнішніх умов процесу однозначно описують знос кожного з елементів трибопари.

Функції  $J_\Delta$  і  $v$  зв'язані між собою так:

$$J_\Delta = v^{-1} \quad (4)$$

Відомо, що однією з характеристик порівняльної оцінки тріщиностійкості матеріалів є кінетична діаграма втомного руйнування. (рис. 2). Подібну діаграму – фрикційного втомного руйнування (рис. 3) – можливо побудувати за результатами експериментальних досліджень зношування.

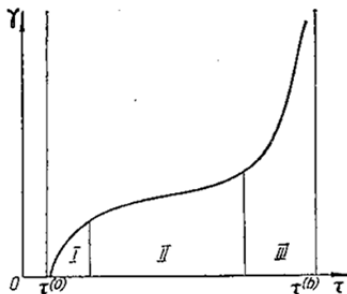


Рисунок 3 – Діаграма фрикційно-втомного руйнування матеріалу

Обидві діаграми, що підтверджується аналізом процесів руйнування, мають ділянки, де спостерігаються подібні фізичні явища. Зокрема тут існують порогові значення характеристик, які відповідають за тріщиноутворення: для ДВР (діаграма втомного руйнування) це  $k_0$ , для ДФВР (діаграма фрикційного втомного руйнування) -  $\tau^{(0)}$  (нижня межа зносу). При  $k_1 < k_0$  і  $\tau < \tau^{(0)}$  тріщиноутворення не спостерігається. При значенні коефіцієнта інтенсивності напруг  $k_1 = k_{1ш}$  швидкість росту тріщин  $v_t \rightarrow \infty$ , а при  $\tau = \tau^{(B)}$  (верхня межа зношування) спостерігається руйнування матеріалу, що зношується по всьому об'єму, який деформується, шляхом макрозрізування (зсуву), тобто  $\rightarrow \infty$ .

Залежність  $v_t$  від  $k_1$  у діапазоні  $k_0 \dots k_{1ш}$  і від  $\tau$  у діапазоні  $\tau^{(0)} \dots \tau^{(B)}$  мають три характерних ділянки. На ділянці I (початковій) значення  $v_t$  і малі, тут тільки для  $k_1$  і  $\tau$ , що достатньо перевищують  $k_0$  і  $\tau^{(0)}$ , спостерігається зростання тих, які є і зародження нових мікротріщин. Середня ділянка II відповідає встановленим процесам тріщиноутворення і зношування, де матеріал руйнується шляхом накопичення пошкоджень. Його тривалість на діаграмах залежить від зовнішніх умов роботи. Для ДФВР суттєвий вплив чинить середовище. Якщо вона чинить пасивувальний вплив, то процес нормального механічного зношування утворюється в ділянці великого тиску.

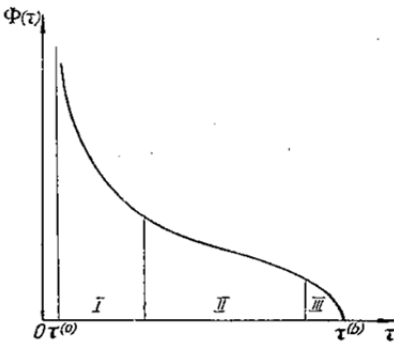


Рисунок 4 – Діаграма зносостійкості матеріалу

Такими середовищами є різні мастила, інші речовини, наприклад, гліцерин. Його використання в трибоспряженнях, де використовуються сплави на основі міді, призводить до явища без зношування. Наявність у зоні тертя поверхнево-активних речовин може привести до зменшення зони сталого зношування.

Ділянка III охоплює рівні  $k_{11}$  і  $\tau$ , за яких реалізуються нестабільні види руйнування матеріалу: циклічний долом за об'ємній втоми, задир, зрив або відшарування покриття, перенесення матеріалу контргіла за

фракційності втоми. Практично доцільно розглядати неповну ДФВР, що містить ділянки I і II.

Результати досліджень закономірностей зношування матеріалів при сухому терті [10], облік особливостей трибоконтактної взаємодії покриттів і гіпотеза про наявність функціонального зв'язку зносу і питомих сил тертя дозволяють записати таку систему кінетичних рівнянь зношування:

$$\text{—————} \quad (\tau) = 1. \quad (5)$$

Тут  $dL_k$  – базисний параметр математичної моделі зношування – характеристична функція зносостійкості покриття,  $dL_k = \nu dt_k$ ,  $\Phi_k(\tau)$ .

Початкові умови мають вид

$$\Delta_1 = \Delta_2 = 0 \text{ при } L = 0;$$

$$\Phi_k(\tau) = 0 \text{ при } L = 0; L > 0, \nu = \text{const} > 0 \quad (6)$$

Для процесу сталого зносу функція зносостійкості визначається так:

$$\Phi_k(\tau) = L_k/\Delta_k, \text{ або } \Phi_k(\tau) = \nu t_k/\Delta_k. \quad (7)$$

Для розрахунку ресурсу трибоспряження систему (2) доцільно представити таким чином:

$$\frac{1}{\nu} \frac{d\Delta_k(\xi, \eta, L_k)}{\nu t_k} \Phi_k(\tau) = 1. \quad (8)$$

Зусилля тертя, що виникають на трибоконтакті, як свідчать дані багатьох експериментальних досліджень (наприклад, [11]), досить коректно визначаються співвідношенням (3). так як характеристикою завантаженості контакту є тиск, то відповідно співвідношення записується у вигляді закону Амонтона – Кулона

$$\tau(\xi, \eta, L, \Delta_k) = f_c \rho(\xi, \eta, L, \Delta_k), \quad (9)$$

де  $f_c$  визначається, як правило, експериментально або приймається за довідковими даними.

Функція зносостійкості  $\Phi(\tau)$  представляє собою інваріанту розглянутих вище швидкості  $\dot{\gamma}$  та інтенсивності  $J_\Delta$  лінійного зносу. Зіставлення формул (2) і (4) показує, що  $J_\Delta = \Phi^{-1}(\tau)$  і  $\dot{\gamma} = \nu \Phi^{-1}(\tau)$ . Тому подібно до ДФВР (рис. 3), можна запропонувати діаграму зносостійкості матеріалу (покриття) ДЗМ (рис. 4), який є дзеркальним відображенням S-подібної ДФВР. Вказана діаграма може розглядатися як характеристика порівняльної зносостійкості покриттів, оскільки її наявність для декількох покриттів дозволяє наочно за однакових рівнів  $\tau$  оцінити їх стійкість проти зношування.

Внаслідок високої міцності покриттів можна очікувати, що пластичні деформації тут при значеннях  $\tau$ , що наближаються до  $\tau^{(b)}$  (межа міцності на зріз), малі, тобто деформації покриттів є пружними, а руйнування – крихким (квзакрихким). Тому цілком ймовірно, що вдасться побудувати повну ДЗМ, яка включає три дільниці (рис. 4). На дільниці *I* спостерігається знос внаслідок багато циклової втоми, на дільниці *II* знос зростає і відповідно зменшується кількість циклів навантажень, переходячи потім на ділянці *III* в зону малоциклової втоми. Більш вірогідно, що зі зростанням навантаження фрикційного контакту внаслідок появи значних градієнтів температури, при прояву релаксаційних властивостей покриттів, неоднорідності їх структури і зміни фазового стану компонентів реально вдасться отримати неповну діаграму зносостійкості, що включає дільниці *I* і *II*.

Для побудови діаграм зносостійкості необхідно обчислити значення функції  $\Phi(\tau)$  відповідно до виразу (4). Тут шлях тертя ковзання визначається з кінематичного аналізу силової схеми тертя, а лінійний знос зразків

встановлюється або їх безпосереднім виміром або – за рівномірного розподілу зносу по третьових поверхнях – за першим із співвідношень (7.1):

$$\Delta_k = M_k / \rho_k A_d k_{вз}, \quad (10)$$

де  $k_{вз}$  визначається, зважаючи на геометрію трибоспряження [12],

$$k_{вз} = A_d / A_\tau (k_{вз} = 0 \dots 1).$$

Встановлені значення  $\Phi = \Phi(\tau)$  з метою побудови ДЗМ апроксимуються достатньо коректно такими функціями:

$$\Phi_k(\tau) = A_k \left[ \left( \frac{\tau_k^{(в)} - \tau_k^{(0)}}{\tau - \tau_k^{(0)}} \right)^{m_k} - 1 \right]; \quad (11)$$

$$\Phi_k(\tau) = B_k / [\tau - \tau_k^{(0)}]^{m_k}; \quad (12)$$

$$\Phi_k(\tau) = C_k / \tau^{m_k}, \quad (13)$$

де  $A_k$ ,  $B_k$ ,  $C_k$ ,  $m_k$ ,  $\tau_k^{(в)}$ ,  $\tau_k^{(0)}$  – характеристики зносостійкості трибопари ( $\tau_k^{(в)}$  – межа міцності на зрізування).

Визначення вказаних характеристик для побудови функцій (8) – (10) проводиться на ЕОМ методом найменших квадратів. Кожна з цих функцій дозволяє побудувати діаграми зносостійкості певного виду: функція (8) – повну діаграму, функції ((9) і (10) – неповні діаграми, причому функція (10) може бути використана у тих випадках, коли  $\tau^{(0)} \rightarrow 0$  або коли ті, що діючі  $\tau$  вельми високі, проте не реалізується повна ДЗМ.

## Висновки

1. В якості технологічного методу підвищення зносостійкості трибоспряжень і робочих органів сільськогосподарських машин застосовуються захисні евтектичні покриття. Їх використання дозволяє суттєво збільшити ресурс мобільних зчленувань, особливо важконавантажених, і які працюють в умовах абразивного зношування.

2. Побудована математична модель кінетики зношування захисних покриттів, яка дозволяє прогнозувати підвищення довговічності деталей тертя за рахунок покращення триботехнічних властивостей поверхневих шарів.

## Література

1. Похмурский В.И. Повышение долговечности деталей машин./ Похмурский В.И., Далисов В.Б., Голубец В.М.;-Киев: Наукова думка, 1980.-188 с.
2. Голубец В.М. О расчете долговечности диффузионных покрытий при абразивном изнашивании. / В.Голубец, М.Чернец.-ФХММ.-1983.-№6.-110-111 с.
3. Андрейкив А.Е. К теории износа материалов при сухом трении /Андрейкив А.Е., Панасюк В.В., Чернец М.В.; ФХММ.-1981.-№2.-51-57 с.

4. Чернец М.В. К вопросу об исследовании кинетики изнашивания материалов при некоторых видах трения скольжения / Чернец М.В.-М.: Трение и износ.-1987.-№4.-662-670 с.

5. Голубец В.М. О расчете долговечности диффузионных покрытий при абразивном изнашивании. /В. Голубец, М. Чернец.-ФХММ.-1983.-№6.-110-116 с.

6. Голубец В.М. Износостойкие покрытия из эвтектики на основе системы Fe-Mn-C-B./ В. Голубец, М. Пашечко.-Киев.: Наукова думка., 1989.-160 с.

7. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ./ Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.-Москва.: Машиностроение: 1977.-526 с.

8. Крагельский И.В. Износ как результат повторной деформации поверхностных слоев (частный случай контактирования деформируемой поверхности с абсолютно жесткой шероховатой). / Крагельский И.В. Известия высших учеб.заведений. Физика. 1958, №5.-119-127 с.

9. Панасюк В.В. Методы трещиностойкости конструкционных материалов / Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Ковчик С.Е.;-Киев: Наукова думка, 1977.-277 с.

10. Голубец В.М. Расчетная модель для определения ресурса трущихся деталей. / В.Голубец, М.Чернец.-II Всесоюз.съезд по теории машин и механизмов: Тез.доклад. (Одесса, 14-18 сент.1982 г.)-Киев: Наукова думка.-1982.-112-117 с.

11. Крагельский И.В. Коэффициенты трения. /И.Крагельский, И.Виноградов.-М.: Машгиз., 1962.-220 с.

12. Крагельский И.В. Трение и износ в машинах / Крагельский И.В.-М.: Машгиз, 1962.-384 с.

### ***Аннотация***

*В статье описана математическая модель процесса кинетики изнашивания защитных износостойких покрытий. Модель позволяет прогнозировать повышение долговечности деталей трения за счет улучшения триботехнических свойств поверхностных слоев.*

### ***Summary***

*This paper describes a mathematical model of the protective wear-resistant coatings wear kinetics process. The model allows forecast the increase of friction parts durability by improving tribotechnical properties of the surface layers.*