

УДК 620.178.16:519.876.5(045)

О.А. Вишневський, асист.

**АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЮ АБРАЗИВНОГО ЗНОСУ МАТЕРІАЛІВ**

*Визначено критерій абразивної зносостійкості матеріалів відносно середнього тиску на поверхню тертя під час проведення всього експерименту. Установлено залежність інтенсивності лінійного зносу від тиску.*

*The criterion of abrasive wear resistance of materials concerning average pressure upon the friction surface during all experiment is defined. Dependence of a linear wear intensity on pressure is established.*

**Загальна постановка проблеми**

Побудова моделей процесу випробування матеріалів на абразивну зносостійкість за нежорстко закріплених частинок дає змогу впорядкувати експерименти, виокремити основні напрями досліджень, визначити параметри, які впливають на зносостійкість матеріалів.

Для визначення критерію абразивного зносу матеріалів треба замінити нерівномірний процес розподілу навантаження вздовж поверхні тертя рівномірним, що значно спрощує вигляд та зміст математичних викладок.

Ідеалізація складного процесу випробування матеріалів на абразивну зносостійкість полягає в тому, що нерівномірний тиск на поверхню тертя замінюють середнім тиском на весь час проведення експерименту.

Питанням побудови моделей абразивного зносу завжди приділялося багато уваги через значущість поставленого завдання та складність його вирішення. Важливість завдання впливає з можливості передбачати результати зносу за наперед заданими параметрами, що фактично визначає можливість конструювання матеріалів та їх покриттів із наперед заданими властивостями. Проблемність завдання виявляється в тому, що моделі, яка б охоплювала всі тертьові параметри, не існує.

**Огляд публікацій**

Побудові моделей абразивного зносу присвячено багато наукових праць. Були спроби визначення критерію абразивного зносу матеріалів, який мав порівняльний характер (ГОСТ 23.20879).

Основою одних існуючих моделей є імовірнісно-статистичний підхід [1], в інших моделях абразивного зносу не відображено того різноманіття складних фізичних процесів, які відбуваються під час випробування матеріалів на абразивну зносостійкість з нежорстко закріпленим абразивом [2]. Недолік цих моделей – громіздкість і незручність у використанні, а також обмеженість набору параметрів, які впливають на зносостійкість. Немає універсальності в побудові цих моделей для різних матеріалів і умов їх використання.

У праці [3] виявлено зв'язок величини абразивного зносу за масою з розмірами робочої частини експериментальної установки, лінійним зносом, площею тертя.

У праці [4] до перерахованих параметрів додано зернистість абразиву та навантаження, але середнє навантаження розглядається в певний момент часу, тобто за певного значення лінійного зносу.

Важливий параметр – величину деформації – розглянуто у працях [5; 6], а в праці [7] запропоновано основні принципи побудови узагальненої моделі випробування матеріалів на абразивну зносостійкість. У працях [8; 9] подано результати експериментів, що підтверджують правильність методу поетапного моделювання процесу зношування під час випробування матеріалів на абразивну зносостійкість.

**Мета дослідження** – аналітичне визначення критерію абразивної зносостійкості поверхонь матеріалів унаслідок навантаження і встановлення залежності інтенсивності лінійного зносу від середнього тиску за час проведення всього експерименту.

За наявності числового критерію абразивної зносостійкості матеріалів можна сформулювати банк даних матеріалів.

Знайдений критерій є складовою частиною моделі зносу під час випробування матеріалів на зносостійкість.

За допомогою моделі можна передбачити величину зносу за масою залежно від параметрів, які впливають на зносостійкість:

- лінійного зносу;
  - площі поверхні стикання гумового ролика зі зразком;
  - навантаження  $P$ ;
  - твердості абразиву та зразка;
  - розмірів гумового ролика, що використовується у дослідницькому обладнанні для випробування матеріалів на абразивну зносостійкість.
- Метою дослідження є визначення впливу геометричних форм та розмірів робочої частини експериментальної установки на результати абразивного зносу поверхонь матеріалів.

**Результати досліджень**

Процес стандартного випробування матеріалів на абразивну зносостійкість у разі нежорстко закріплених частинок є невід’ємною складовою частиною прогнозування термінів роботи вузлів тертя. Математичне моделювання процесу зносу поверхонь матеріалів дає змогу задіяти більшість визначальних параметрів, що впливають на підвищення зносостійкості матеріалів.

Математична модель дозволяє визначити взаємний вплив цих параметрів на кінцевий результат зносу та рівень зносостійкості матеріалів.

Схему розподілу навантаження вздовж дуги тертя під час випробування матеріалів на абразивну зносостійкість з нежорстко закріпленими частинками показано на рис. 1.

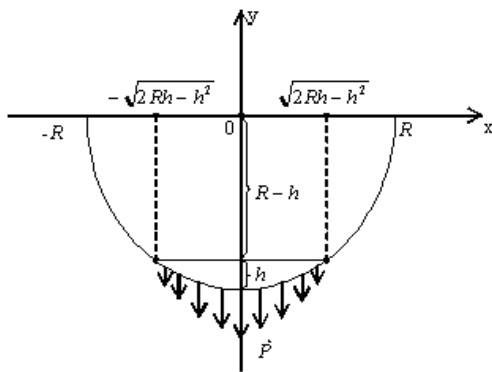


Рис. 1. Діаграма розподілу навантаження вздовж дуги руху абразивної частинки

У цій роботі всі рисунки і математичні моделі побудовано без урахування деформації.

Прив’язку перерізу робочої частини експериментальної установки до прямокутної системи координат показано на рис. 2.

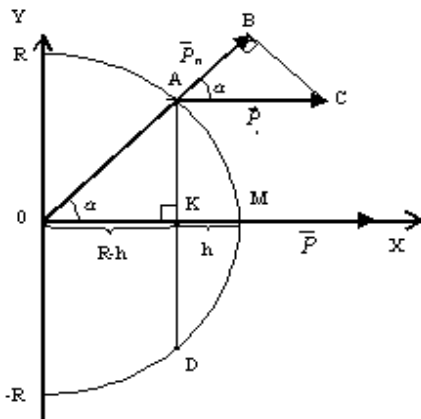


Рис. 2. Прив’язку ролика експериментальної установки на абразивний знос і поверхні зразка до декартової системи координат: пряма AD – рівень поверхні зразка; точка O – проекція осі ролика на площину XOY

Переріз виконано перпендикулярно до осі експериментального ролика.

На рис. 2 показано складові навантаження в кожній точці поверхні тертя.

Експериментально встановлено, що знос за об’ємом пропорційний середньому тиску зі змінним коефіцієнтом пропорційності k, що залежить від часу, властивостей матеріалу (твердості, пластичності).

Важливе значення має визначення аналітичної залежності для критерію абразивного зносу матеріалів, що напряму пов’язаний з коефіцієнтом k(t), який визначає величину зносу матеріалу абразивним потоком під дією тиску.

Формулу об’ємного руйнування можна записати у вигляді, зручному у використанні:

$$W_v = \frac{k(t)P_0 \int_0^{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)} \frac{\sin^2 t}{t} dt}{2b \int_0^h \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz} \quad (1)$$

Для того щоб аналітично оцінити значення коефіцієнта k, треба розв’язати таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} W_m = \frac{k(t)\rho P_0 \int_0^{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)} \frac{\sin^2 t}{t} dt}{2b \int_0^h \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}; \\ W_m = \frac{1}{2} \rho R \left( Q - bR \sin \frac{Q}{bR} \right). \end{cases} \quad (2)$$

Розв’язком системи (2) буде таке значення k:

$$k(t) = \frac{bR \left( Q - bR \sin \frac{Q}{bR} \right) \int_0^h \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}{P_0 \int_0^{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)} \frac{\sin^2 t}{t} dt} \quad (3)$$

Кожному матеріалу або покриттю відповідає своє значення коефіцієнта руйнування k(t), який характеризує їх зносостійкість.

Ураховуючи зернистість, залежність (3) запишемо у вигляді

$$k = \frac{b(R+2r) \left( Q - b(R+2r) \sin \frac{Q}{b(R+2r)} \right)}{P_0 \int_0^{\frac{Q}{2b(R+2r)}} \frac{\sin^2 t}{t} dt} \times \int_0^h \arcsin \sqrt{2 \frac{z}{R+2r} - \left( \frac{z}{R+2r} \right)^2} dz. \quad (4)$$

Аналітично визначимо критерій абразивного зносу матеріалів.

Характер залежності коефіцієнта  $k$  від тиску на поверхню тертя та час проведення експерименту робить можливим подати коефіцієнт  $k$  у вигляді  $k = \alpha t + \beta$ ,

де  $\alpha, \beta$  – числові коефіцієнти;

$t$  – час проведення експерименту.

Для прив'язки часу  $t$  необхідно просто брати відповідне значення шляху тертя. Шлях переміщення абразивної частинки дорівнює добутку лінійної швидкості руху випробувального ролика і часу. Таким чином, час проведення випробування на абразивну зносостійкість можна знайти за формулою

$$t = \frac{x}{v},$$

де  $x$  – шлях руйнування, м;

$v$  – швидкість (стала величина).

Лінійну швидкість можна виразити через період обертання та радіус експериментального ролика:

$$v = \frac{2\pi R}{T};$$

$$v = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,025 = 0,157 \text{ м/с.}$$

Розглянемо експериментальну залежність процесу зносу поверхні зразка зі сталі 30 абразивним потоком під дією тиску за навантаження

$P_0 = 44,1\text{Н}$ , заздалегідь підрахувавши для кожного наведеного шляху тертя відповідний час.

Побудуємо графік залежності коефіцієнта  $k(t)$  від часу проведення експерименту на підставі даних табл. 1 та залежності (4).

Таблиця 1

**Знос поверхні зразка сталі 30**

Шлях тертя, м	Знос, м		Час, с	Коефіцієнт, $k$
	Лінійний, м	Експериментальний, кг		
0	0	0		0
30	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	191	$1,8 \cdot 10^{-14}$
60	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	382	$3,9 \cdot 10^{-14}$
90	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$	573	$6,2 \cdot 10^{-14}$
120	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$	764	$7,9 \cdot 10^{-14}$
150	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	955	$9,6 \cdot 10^{-14}$

Аналіз залежності значення коефіцієнта  $k$  від часу проведення експерименту показує, що можна визначити залежність коефіцієнта  $k$  від максимальної глибини лунки руйнування або від площі поверхні тертя.

Для цієї залежності (рис.3) числового значення коефіцієнта від часу проведення експерименту найкращою апроксимувальною функцією буде функція, отримана через лінійну регресію:

$$k(t) = \alpha + \beta t. \quad (5)$$

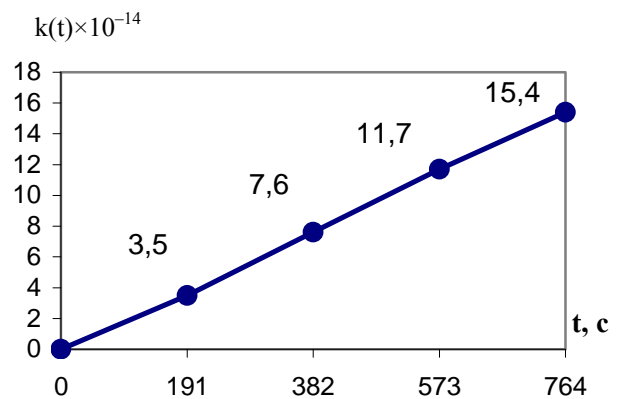


Рис. 3. Залежність коефіцієнта  $k$  від часу для сталі 30

Використовуючи програму MathCAD можна отримати числові значення коефіцієнтів  $\alpha, \beta$ :

$$x := (0 \ 191 \ 382 \ 573 \ 764 \ 955)^T;$$

$$k := (0 \ 1,8 \cdot 10^{-14} \ 3,9 \cdot 10^{-14} \ 6,2 \cdot 10^{-14} \ 7,9 \cdot 10^{-14} \ 9,6 \cdot 10^{-14})^T;$$

$$\text{line}(x, y) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,010261102104712 \end{pmatrix}.$$

Матриця  $R1$  відповідає шуканим коефіцієнтам  $R1_0, R1_1$ , а в цьому випадку відповідно  $\alpha, \beta$ .

Залежність коефіцієнта  $k$  від часу проведення випробування  $t$  можна записати формулу (5) у вигляді

$$k(t) = 0,010262 \cdot 10^{-14} t.$$

Середньоквадратична похибка апроксимації обчислюється за формулою

$$\sum_{n=1}^N (k(x_n) - k_e(x_n))^2 = 0,172 \cdot 10^{-28},$$

де  $k_e(x_n)$  – експериментальні значення  $k(t)$ .

Аналогічно можна отримати матрицю абразивної зносостійкості і для інших матеріалів (табл. 2).

Таблиця 2

## Абразивна зносостійкість міді

Коефіцієнт, $k$	Знос	
	Лінійний, м	Експериментальний, кг
0	0	0
$3,5 \cdot 10^{-14}$	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$
$7,6 \cdot 10^{-14}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,43 \cdot 10^{-5}$
$1,17 \cdot 10^{-13}$	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$
$1,54 \cdot 10^{-13}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$2,42 \cdot 10^{-5}$

Використовуючи програму MathCAD можна отримати числові значення коефіцієнтів  $\alpha, \beta$

$$x := (0 \ 191 \ 382 \ 573 \ 764)^T;$$

$$k := (0 \ 3,5 \cdot 10^{-14} \ 7,6 \cdot 10^{-14} \ 11,7 \cdot 10^{-14} \ 15,4 \cdot 10^{-14})^T;$$

$$\text{line}(x, y) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,0102617801 \quad 04712 \end{pmatrix}.$$

Залежність коефіцієнта  $k$  від часу проведення випробування  $t$  можна записати у вигляді

$$k(t) = 0,020419 \cdot 10^{-14} t - 0,159999 \cdot 10^{-14}.$$

Коефіцієнт  $\beta$  показує швидкість зносу за масою. Як бачимо, швидкість зносу за масою у міді майже у два рази більша, ніж у сталі 30, що відповідає експериментальним даним. Числове значення коефіцієнта  $\beta$  можна розглядати як критерій абразивного зносу матеріалів відносно середнього тиску на поверхню тертя.

Модель (1) після отриманих залежностей набуде вигляду

$$W_v = \frac{(\alpha + \beta t) P_0 \int_0^{\arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right)} \frac{\sin^2 t}{t} dt}{2b \int_0^h \arcsin \sqrt{2 \frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}.$$

Під час проведення експериментальних випробувань на зносостійкість було встановлено залежність інтенсивності лінійного зносу від середнього тиску на поверхню зразка. Причому середній тиск розглядається під час проведення всього експерименту.

Залежність інтенсивності лінійного зносу для сталі 30ХГСА, якщо  $P_0 = 44,1 \text{Н}$  і зернистість

абразиву 200–250 мкм, має лінійний характер (табл. 3, рис. 4).

Таким чином, інтенсивність лінійного зносу можна записати у вигляді формули.

$$I_h = \alpha N_c + \beta. \quad (6)$$

Після застосування системи MathCAD, отримаємо залежність інтенсивності лінійного зносу від середнього тиску для сталі 30ХГСА.

$$I_h = 1,57244 \cdot 10^{-9} + 5,0 \cdot 10^{-14} N_c.$$

Відомо, що інтенсивність лінійного зносу обернено пропорційна твердості матеріалу, а саме:

$$I_h = \frac{\gamma}{HB}. \quad (7)$$

Об'єднаємо залежності (6) і (7) в одну формулу:

$$\alpha N_c + \beta = \frac{\gamma}{HB}. \quad (8)$$

Із формули (8) можна отримати аналітичний вираз залежності середнього тиску твердості і навіпаки.

Таблиця 3

## Залежність інтенсивності лінійного зносу від середнього тиску на поверхню тертя

Шлях, м	Лінійний знос, м	Інтенсивність лінійного зносу	Середній тиск, Па
30	$7,00 \cdot 10^{-6}$	$2,333 \cdot 10^{-7}$	$3,713 \cdot 10^6$
60	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,833 \cdot 10^{-7}$	$2,962 \cdot 10^6$
90	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$1,611 \cdot 10^{-7}$	$2,580 \cdot 10^6$
120	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$1,458 \cdot 10^{-7}$	$2,349 \cdot 10^6$
150	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$1,373 \cdot 10^{-7}$	$2,165 \cdot 10^6$

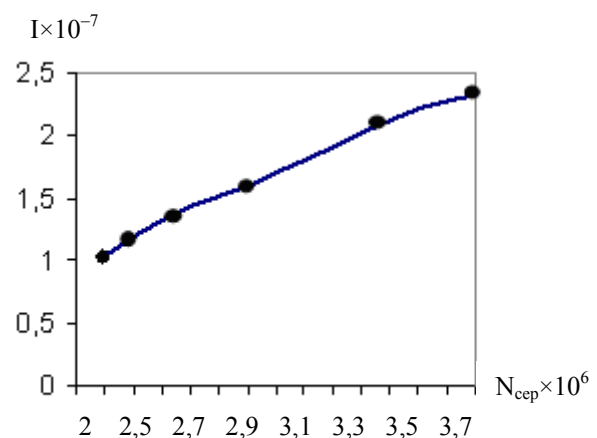


Рис. 4. Залежність інтенсивності лінійного зносу від середнього тиску

Добуток коефіцієнтів  $\alpha\gamma$  безпосередньо впливає на зростання, або зменшення інтенсивності лінійного зносу матеріалів. Цей добуток можна розглядати як критерій інтенсивності лінійного зносу поверхонь матеріалів під час їх випробування на абразивну зносостійкість із нежорстко закріпленими частинками.

#### Висновки

На основі знайденого критерію абразивного зносу матеріалів побудовано модель процесу об'ємного зносу під час випробувань на зносостійкість.

Установлено залежність інтенсивності лінійного зносу від середнього тиску на поверхню тертя під час проведення всього експерименту, а також твердості матеріалу.

Експериментально підтверджено залежність результату випробування матеріалів на абразивну зносостійкість із нежорстко закріпленими частинками від лінійних розмірів робочої частини експериментальної установки.

#### Література

1. Сорокатый Р.В. Моделирование поведения трибо-систем методом трибоэлементов // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 1. – С. 16–22.

2. Федоров С.В. Обобщенная модель трения // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 3. – С. 460–470.

3. Вишневецький О.А. Модель залежності величини абразивного зносу від лінійного // Вісн. НАУ. – 2004. – № 1. – С. 125–129.

4. Вишневецький О.А. Модель залежності оцінки абразивної зносостійкості матеріалів від навантаження та густини // Вісн. НАУ. – 2004. – № 2. – С. 86–90.

5. Вишневецький О.А., Давидов О.С. Нелінійне математичне моделювання процесу абразивного зносу поверхонь матеріалів // Вісн. НАУ. – 2005. – № 1. – С. 101–104.

6. Вишневецький О.А., Давидов О.С. Математичне моделювання процесів абразивного зносу поверхонь матеріалів з урахуванням деформації // Вісн. НАУ. – 2005. – № 3. – С. 99–103.

7. Вишневецький О.А. Узагальнена модель абразивного зносу поверхонь матеріалів // Вісн. НАУ. – 2005. – № 4. – С. 112–116.

8. Вишневецький О.А. Модель критерію та основні принципи побудови банку даних абразивної зносостійкості матеріалів // Вісн. НАУ. – 2006. – № 1. – С. 145–149.

9. Вишневецький О.А. Експериментальний моніторинг моделей абразивного зношування поверхонь матеріалів // Вісн. НАУ. – 2006. – № 2. – С. 89–92.

Стаття надійшла до редакції 24.09.07.