

УДК 519.876.5:620.178.16(045)

О.А. Вишневський

МОДЕЛЬ КРИТЕРІЮ ТА ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ БАНКУ ДАНИХ АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ

НАУ, кафедра вищої математики, e-mail: eco@nau.edu.ua; www.nau.edu.ua

Побудовано узагальнену модель критерію абразивного зносу поверхонь матеріалів при нежорстко закріплених частинках. Визначено принцип побудови банку даних абразивної зносостійкості матеріалів вузлів тертя.

Загальна постановка проблеми

Математичне моделювання такого складного та непередбачуваного явища, яким є знос поверхонь матеріалів при терті об нежорстко закріплені абразивні частинки, викликає підвищений інтерес.

Багатопараметричність цього процесу дозволяє здійснювати моделювання різними шляхами.

Головним питанням залишається вибір оптимальної моделі, що поєднує в собі залежність від більшості характерних параметрів зносостійкості, а також простоту використання.

Питанням побудови моделей абразивного зносу завжди приділялося багато уваги через важливість поставленої задачі й одночасно складність її вирішення.

Важливість задачі зумовлена можливістю передбачувати результати зносу за заданими параметрами, що фактично визначає можливість конструювання зносостійких матеріалів, відносно до абразивного зносу.

Складність задачі виявляється в тому, що моделі, яка охоплювала б все різноманіття параметрів, що впливають на підсилення зносостійкості матеріалів, не існує.

Огляд публікацій

Проблемам побудови моделей абразивного зносу приділялося багато уваги в наукових публікаціях.

Основою одних існуючих моделей є ймовірнісно-статистичний підхід [1], в інших існуючих моделях абразивного зносу не відбите все різноманіття складних фізичних процесів, що відбуваються при абразивному зносі з нежорстко закріпленим абразивом [2].

Недоліком цих моделей є громіздкість і незручність у використанні в поєднанні з обмеженістю набору параметрів, які впливають на зносостійкість. У побудові цих моделей для різних матеріалів і умов використання немає універсальності.

У праці [3] виявлено зв'язок величини абразивного зносу за масою з розмірами робочого ролика, лінійним зносом, площею поверхні прилягання гумового ролика та зразка.

У праці [4] до цих параметрів додали зернистість абразиву та навантаження, але середнє навантаження розглядається в даний момент часу, тобто при даному значенні лінійного зносу h .

У працях [5; 6] визначена залежність величини зносу від деформації робочої частини устаткування для оцінювання абразивної зносостійкості матеріалів.

Мета дослідження

У процесі експлуатації деталей різного профілю важливе значення має передбачення величини зносу при взаємодії зразка з абразивними частинками різної твердості та величини.

За наявності моделі зносу об нежорстко закріплені абразивні частинки 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.

Мета дослідження – побудувати узагальнену модель та визначити критерій абразивного зносу поверхонь матеріалів при нежорстко закріплених частинках. Необхідно визначити принципи побудови банку даних абразивної зносостійкості матеріалів.

Результати досліджень

Випробування матеріалів на абразивну зносостійкість при нежорстко закріплених частинках є невід'ємною складовою частиною прогнозування термінів роботи вузлів тертя.

Математичне моделювання процесу зносу поверхонь матеріалів дає можливість задіяти більшість визначальних параметрів, що впливають на підвищення зносостійкості.

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

На рис.1 показана схема установки експериментального дослідження матеріалів на абразивну зносостійкість при нежорстко закріплених абразивних частинках.

Пристрій для контролю сумарної кількості обертів ролика 13 у процесі випробувань виконано у вигляді шестирядного механічного лічильника з кулачковим механізмом.

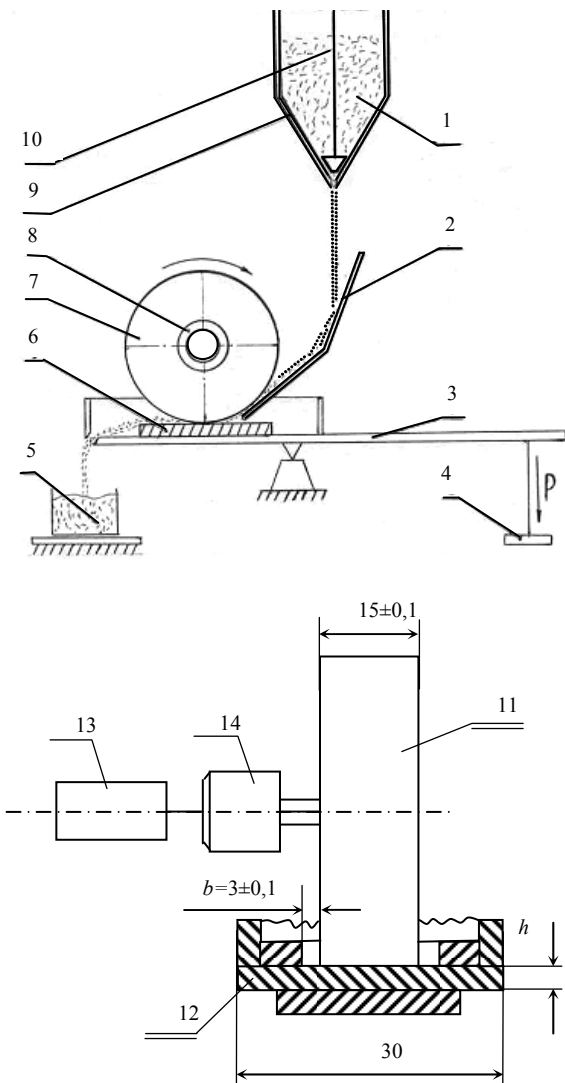


Рис. 1. Схема експериментальної установки типу "Бринеля":

1 – вільний абразив; 2 – лоток для подачі абразиву; 3 – важіль для регулювання зусилля притискування ролика до поверхні зразка; 4 – навантаження P_0 ; 5 – бункер для збирання відпрацьованого абразиву; 6, 12 – зразок досліджуваного матеріалу; 7, 11 – гумовий ролик; 8 – втулка для ролика; 9 – бункер для вільного абразиву; 10 – важіль для регулювання швидкості подачі абразиву; 13 – пристрій для контролю сумарної кількості обертів ролика; 14 – привід, який забезпечує обертання навколо горизонтальної осі гумового ролика

Робочу частину експериментальної установки для визначення абразивної зносостійкості поверхонь матеріалів прив'яжемо до прямокутної системи координат (рис. 2).

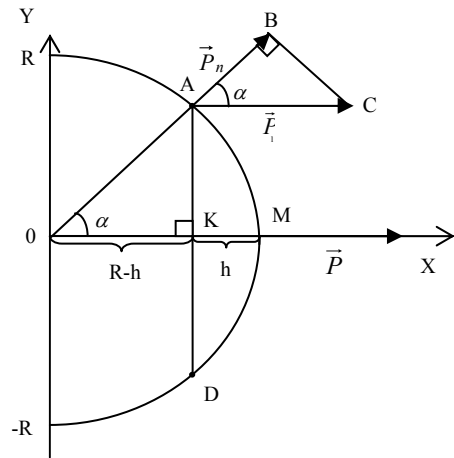


Рис. 2. Прив'язка ролика експериментальної установки на абразивний знос і поверхні зразка до декартової системи координат: пряма AD – рівень поверхні зразка; точка O – проекція осі ролика на площину XOY

Розглянемо модель залежності величини об'ємного зносу та зносу за масою від площі поверхні тертя та розмірів робочої частини установки для визначення абразивної зносостійкості матеріалів при нежорстко закріплених частинках [3]:

$$W_v = \frac{1}{2} R \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR} \right) \quad (1)$$

Перевіримо роботу моделі (1) у граничних умовах:
 – якщо $Q \rightarrow 0$, одержимо, $\lim_{Q \rightarrow 0} W_v = 0$, що очевидно, бо на початку експерименту об'ємне зношування дорівнює нулю;
 – якщо $Q \rightarrow \pi Rb$, одержимо

$$\begin{aligned} \lim_{Q \rightarrow \pi Rb} W_v &= \frac{R\pi Rb}{2} - \frac{1}{2} bR^2 \sin \frac{\pi Rb}{bR} = \\ &= \frac{\pi R^2 b}{2} - \frac{1}{2} bR^2 \sin \pi = \frac{\pi R^2 b}{2}, \end{aligned}$$

що відповідає дійсності, оскільки при $h = R$ маємо лунку, що дорівнює половині об'єму гумового ролика експериментальної установки.

Для знаходження величини зносу за масою використаємо таку формулу

$$W_m = \rho W_v = \frac{1}{2} \rho R \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR} \right).$$

Визначимо середнє значення навантаження на лінію нормального перерізу площиною поверхні прилягання експериментального ролика та зразка [4; 7].

При взаємодії ролика та зразка сума проєкцій функції розподіленого вздовж осі OY навантаження $P_p(y)$ повинна дорівнювати $|\bar{P}|$.

Для визначення середнього навантаження необхідно розв'язати інтегральне рівняння:

$$\int_0^{\sqrt{2Rh-h^2}} P_p(y) dy = \frac{P}{2}. \quad (2)$$

Розв'язок рівняння (2) має такий вигляд

$$\bar{P}_p(y) = P \frac{\sqrt{2Rh-h^2-y}}{2Rh-h^2}.$$

Функцію навантаження вздовж дуги перерізу нормальної до осі ролика площини і поверхні прилягання ролика та зразка $\bar{P}(y)$ запишемо у вигляді $\bar{P}(\alpha)$ [7]:

$$\begin{aligned} \bar{P}(y) &= \bar{P} \frac{\sqrt{2Rh-h^2-y}}{\sqrt{2Rh-h^2}} = \\ &= \bar{P} \frac{\sqrt{2\frac{h}{R}-\left(\frac{h}{R}\right)^2} - \sin \alpha}{\sqrt{2\frac{h}{R}-\left(\frac{h}{R}\right)^2}} = \bar{P}(\alpha). \end{aligned}$$

Нормальну складову навантаження $\bar{P}_n(\alpha)$ знайдемо з прямокутного $\triangle ABC$, зображеного на рис. 2:

$$P_n(\alpha) = P(y) \cos \alpha = P \frac{\sqrt{2\frac{h}{R}-\left(\frac{h}{R}\right)^2} - \sin \alpha}{\sqrt{2\frac{h}{R}-\left(\frac{h}{R}\right)^2}} \cos \alpha.$$

Середнє навантаження вздовж дуги АМ при даному значенні лінійного зносу h можна знайти за формулою

$$P_{\text{сеп}} = \frac{\int_0^{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)} P_n(\alpha) d\alpha}{\alpha}.$$

Середнє навантаження вздовж всієї дуги АМД дорівнює [7]:

$$P_c = 2P_{\text{сеп}} = \frac{P_0 \sqrt{2\frac{h}{R}-\left(\frac{h}{R}\right)^2}}{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)}.$$

Враховуючи конструктивні особливості випробувальної установки типу „Бринеля”, допуски на використання моделі, що визначає P_c такі:

$$0,8R \leq h \leq R.$$

Побудуємо модель залежності зносу за масою та об'ємом від середнього тиску на поверхню стику. Величина абразивного зносу за масою пропорційна середньому тиску на поверхню тертя за весь час проведення експерименту:

$$W_m = kN_c,$$

де N_c – середній тиск на площину поверхні тертя:

$$N_c = \frac{P_{\text{сеп}}(l, h)}{Q_{\text{сеп}}(h)},$$

$P_{\text{сеп}}(l, h)$ – середнє навантаження:

$$P_{\text{сеп}}(l, h) = \frac{PR}{h} \int_0^{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)} \frac{(\sin t)^2}{t} dt;$$

$Q_{\text{сеп}}(h)$ – середня площа тертя:

$$Q_{\text{сеп}}(h) = \frac{2bR}{h} \int_0^h \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R}-\left(\frac{z}{R}\right)^2} dz.$$

Експериментально встановлено, що знос за об'ємом пропорційний середньому тиску з коефіцієнтом пропорційності k , що залежить від властивостей матеріалу (твердості, пластичності). Крім цього, знос за об'ємом прямо пропорційний ширині випробувального ролика при постійному значенні лінійного зносу h .

Таким чином, модель, що визначає величину об'ємного зносу, можна подати у вигляді

$$\begin{aligned} W_v &= \frac{bPkR \int_0^{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{2bR \int_0^h \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R}-\left(\frac{z}{R}\right)^2} dz} = \\ &= \frac{Pk \int_0^{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{2 \int_0^h \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R}-\left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}. \end{aligned}$$

Модель показує, що знос за об'ємом, а значить, і за масою не залежить від ширини ролика. Це підтверджують результати експерименту з випробування сталі Ст. 30 (нормалізованої) на абразивну зносостійкість.

Результати експерименту були виконані при терті протяжністю 50 м (зернистість 200–250 мкм) і занесені у таблицю.

Абразивний знос за масою

Ширина ролика, мм	Навантаження P_0, H		
	44,1	29,8	16,2
15	0,0042	0,0020	0,0010
10	0,0042	0,0021	0,0009

Результати експериментів показують, що знос за об'ємом, а значить, і за масою не залежить від ширини випробувального ролика, що пояснюється збільшенням тиску при зменшенні площі поверхні тертя.

Математична модель залежності абразивного зносу за масою від лінійного та геометричних розмірів робочої частини установки набуде вигляду

$$W_m = \frac{\rho P k \int_0^{\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right)} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{2 \int_0^h \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}$$

Побудуємо модель залежності абразивного зносу за масою від площі поверхні тертя, коефіцієнта k , навантаження P . З цією метою використаємо формулу зв'язку площі тертя з лінійним зносом [3]

$$h = R \left(1 - \cos \frac{Q}{2bR}\right).$$

Модель абразивного зносу за масою набуває більш компактного вигляду

$$W_m = \frac{\rho P k \int_0^{\frac{Q}{2bR}} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{2 \int_0^{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right)} \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}$$

Залежність величини зносу за об'ємом від площі тертя Q , коефіцієнта k і радіуса ролика R має вигляд

$$W_v = \frac{P k \int_0^{\frac{Q}{2bR}} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{2 \int_0^{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right)} \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}$$

Залежність зносу за масою та об'ємом від характерних параметрів k, R, b, P, Q, ρ можна визначити почленним множенням двох рівнянь, що оцінюють величину зносу:

$$W_m = \frac{\rho P k \int_0^{\frac{Q}{2bR}} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right) \int_0^{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right)} \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}; \quad (3)$$

$$W_m = \frac{1}{2} \rho R \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR}\right). \quad (4)$$

Після почленного множення рівнянь (3), (4) отримаємо формулу

$$W_m^2 = \frac{kR\rho^2 P_0 \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR}\right)^{2bR} \int_0^{\frac{Q}{2bR}} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{4 \int_0^{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right)} \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}$$

Отже,

$$W_m = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{kRP \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR}\right)^{2bR} \int_0^{\frac{Q}{2bR}} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right) \int_0^{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right)} \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}}. \quad (5)$$

Із залежності (5) дістанемо модель об'ємного абразивного зносу:

$$W_v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{kRP \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR}\right)^{2bR} \int_0^{\frac{Q}{2bR}} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right) \int_0^{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right)} \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}}$$

Для того, щоб оцінити коефіцієнт k , використаємо модель залежності зносу за масою від площі поверхні прилягання ролика та зразка [5]. Систему рівнянь розв'яжемо відносно k :

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

Після алгебричних перетворень отримаємо:

$$k = \frac{R \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR}\right)^{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right)} \int_0^{R\left(1-\cos\frac{Q}{2bR}\right)} \arcsin \sqrt{2\frac{z}{R} - \left(\frac{z}{R}\right)^2} dz}{P \int_0^{\frac{Q}{2bR}} \frac{(\sin t)^2}{t} dt}. \quad (6)$$

Кожному матеріалу або покриттю відповідає своє значення коефіцієнта k . Це значення (або аналітична залежність) характеризує їх зносостійкість.

Важливе значення має визначення аналітичного значення для коефіцієнта зносостійкості k , який визначає опір матеріалу абразивному руйнуванню.

Для врахування величини абразивних частинок у першому наближенні достатньо у формулу (1) замість R підставити $R+2r$, (r – радіус абразивної частинки сферичної форми).

Коефіцієнт k має вигляд експоненти залежності від h , тому його можна подати у вигляді

$$k = \beta \ell^{\alpha(H_a - H_c)h} - 1, \quad (7)$$

де H_a – твердість абразиву; H_c – твердість поверхні зразка.

Після алгебричних перетворень отримаємо аналітичне значення для коефіцієнта α , який вказує на зносостійкість цього матеріалу.

$$\ln\left(\frac{k+1}{\beta}\right) = \alpha(H_a - H_c)h.$$

Звідси

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{k+1}{\beta}\right)}{(H_a - H_c)h}.$$

Якщо знайти для кожного матеріалу відповідну пару коефіцієнтів зносостійкості α , β отримаємо фрагмент банку даних матеріалів вузлів тертя. Коефіцієнт зносу k можна виразити через твердість абразиву та матеріалу.

Після чого узагальнену модель зносу за масою можна записати у вигляді

$$W_m = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{(\beta \ell^{\alpha(H_a - H_c)h} - 1) R P \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR}\right)^{2bR} \int_0^Q \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{R \left(1 - \cos \frac{Q}{2bR}\right) \int_0^R \arcsin \sqrt{2 \frac{z}{h} - \left(\frac{z}{h}\right)^2} dz}}$$

Об'ємна модель зносу поверхонь матеріалів має вигляд

$$W_v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(\beta \ell^{\alpha(H_a - H_c)h} - 1) R P \left(Q - bR \sin \frac{Q}{bR}\right)^{2bR} \int_0^Q \frac{(\sin t)^2}{t} dt}{R \left(1 - \cos \frac{Q}{2bR}\right) \int_0^R \arcsin \sqrt{2 \frac{z}{h} - \left(\frac{z}{h}\right)^2} dz}}.$$

Коефіцієнт зносу k визначається залежностями (6), (7).

Висновки

1. Побудована математична модель визначення критерію абразивного зносу поверхонь матеріалів при нежорстко закріплених частинках.
2. Побудована узагальнена модель залежності величини абразивного зносу від геометричних розмірів робочої частини випробувальної установки та твердості абразиву і зразка.
3. Визначений принцип побудови банку даних абразивної зносостійкості матеріалів вузлів тертя.

Література

1. Сорокатый П.В. Моделирование поведения трибосистем 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.

Стаття надійшла до редакції 16.03.06.

Построена обобщенная модель критерия абразивного износа поверхностей материалов при нежестко закрепленных частицах. Определён принцип построения банка данных абразивной износостойкости материалов узлов трения.

The generalized model is created and the criterion of an abrasive wear of surfaces of materials is determined at not hard-mounted corpuscles. The principle of construction of a data bank of an abrasive wear resistance of materials of friction units is determined.