

О. С. ВАСИЛЬЄВ, к. т. н.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В АБРАЗИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Актуальність проблеми. Аналізуючи основні види зношування [1] робочих поверхонь будівельних машин звернимо увагу на випадок руйнування робочих поверхонь потоком більш твердих частинок. Таке зношування часто називають ерозією, або зношуванням у потоці незакріпленого абразиву, або гідроабразивним зношуванням. Існує ряд експериментальних та теоретичних досліджень цього виду зношування [2, 3, 4], причому більшість їх базується на уявленні про абразивний механізм зношування.

Традиційно вважається, що в цьому випадку поряд з абразивною складовою, котра існує при малих кутах атаки, має місце ударна складова, яка існує при великих кутах атаки. Ця думка ґрунтується на тому, що при малих кутах атаки і відповідно значних переміщеннях частинок по поверхні, що зношується, видалення матеріалу з останньої відбувається в результаті мікрорізання. Але це не є явним.

Аналіз публікацій. На підставі узагальнення результатів багаторічних досліджень розроблена та експериментально підтверджена теорія втомлюваності для зношування [5,6] (особливо при застосуванні її до полімерних матеріалів). На наш погляд, недоліком цієї теорії є недостатнє врахування фрикційної складової (яку раніше називали абразивною) ерозійного зношування в розрізі уявлень про його механізм. У дослідженнях зносу полімерних матеріалів у потоці абразивних частинок отримані залежності величини зношування від швидкості частинок, температури, вмісту пластифікаторів тощо, але не встановлений і не досліджений механізм абразивного зношування, тобто мікрорізання [4].

Як і при фрикційній взаємодії поверхонь, у випадку, що розглядається, механізм руйнування поверхні може бути різним. Якщо напруження або деформації, які виникають при взаємодії частинок із поверхнею, що зношується, не досягають значень, при яких відбувається руйнування, то руйнування відбудеться після багатьох впливів, тобто в результаті фрикційно-контактної втоми. При пружній взаємодії частинок із

поверхнею, що зношується, втома поверхневого шару близька за своєю природою до звичайної втоми матеріалів при пластичному деформуванні – це малоциклова втома.

Подальші дослідження, відповідно, потребують створення моделі зношування поверхонь під дією незакріплених абразивних частинок, яка б описувала цей процес та давала змогу його аналізувати.

Формулювання цілей та задач. Метою даного дослідження є створення моделі процесу руйнування робочих поверхонь будівельних машин, які працюють в абразивному середовищі, котра б описувала цей процес та давала змогу його аналізувати.

Основна частина. Модель зношування робочих поверхонь будівельних машин під дією рухомих незакріплених абразивних часток ґрунтується на припущенні, що при зіштовхуванні під певним кутом із поверхнею, що піддається руйнуванню, тверда частинка занурюється в неї та проходить при цьому деяку відстань по поверхні. Ковзаючи, вона послідовно деформує декілька одиничних ділянок поверхні. Якщо прийняти, що одинична ділянка – це пляма контакту частинки з тілом, яке зношується, то кожний удар частинки буде приводити в цілому до декількох актів взаємодії (але на різних ділянках). Оскільки розмір плями контакту змінюється в процесі взаємодії частинок із поверхнею, то він природно буде характеризуватися визначеним спектром, навіть якщо всі частинки сферичні, однакового радіуса та маси, а також зіштовхуються з поверхнею під одним кутом і з однаковою швидкістю.

Для спрощення далі будуть розглянуті саме такі частинки. Крім того, враховуватиметься лише ковзання частинок по поверхні, а не можливе перекочування. Тобто досліджується лише фрикційна складова зношування, яка обумовлюється ковзанням частинок. Ударна ж його складова не розглядається.

Як відомо, інтенсивність зношування при терті твердих поверхонь виражається співвідношенням:

$$I = \frac{1}{A_a} \cdot \frac{dV}{dy} = i \frac{A_r}{A_a}, \quad (1)$$

де I – інтенсивність зношування; V – об'єм матеріалу, видаленого на шляху ковзання dy ; A_a – номінальна поверхня тертя; A_r – фактична площа контакту; i – питома зношування.

Відповідно питома зношування виражається співвідношенням:

$$i = \frac{\Delta V}{l \cdot A_r} = \frac{V_d}{l \cdot A_r \cdot n}, \quad (2)$$

де ΔV – об’єм матеріалу, видаленого з фактичної площини A_r при переміщенні на середній діаметр плями дотику l ; n – кількість циклів до руйнування; V_d – деформований об’єм.

На підставі залежностей (1) та (2) отримаємо

$$dV = \frac{V_d}{n \cdot l} \cdot dy \quad (3)$$

Рівняння (3) не містить величин A_r та A_a і тому може бути використане для аналізу зношування у нашому випадку.

У якості характеристики зношування приймаємо безрозмірну величину відношення маси зношеного матеріалу до маси частинок, що викликали цей знос:

$$J = \frac{M_s}{M_r}, \quad (4)$$

де M_s – маса зношеного матеріалу; M_r – маса частинок, що викликали знос.

Будуть вірні також співвідношення:

$$M_s = V_s \cdot \rho_s, \quad (5)$$

де V_s – об’єм зношеного матеріалу; ρ_s – щільність матеріалу, який зношується;

$$M_r = V_r \cdot \rho_r, \quad (6)$$

де V_r – об’єм матеріалу, що викликає знос; ρ_r – щільність матеріалу частинок;

$$V_r = V_1 \cdot q, \quad (7)$$

де V_1 – об’єм однієї частинки, що викликає знос; q – кількість частинок, що викликають зношування V ;

$$V_1 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3, \quad (8)$$

де R – радіус частинок.

Отже, підставимо у вираз (4) залежності (5), (6), (7) та отримаємо:

$$J = \frac{V \cdot \rho_s}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_r \cdot q}, \quad (9)$$

де V знаходимо шляхом інтегрування виразу (3) або визначаємо

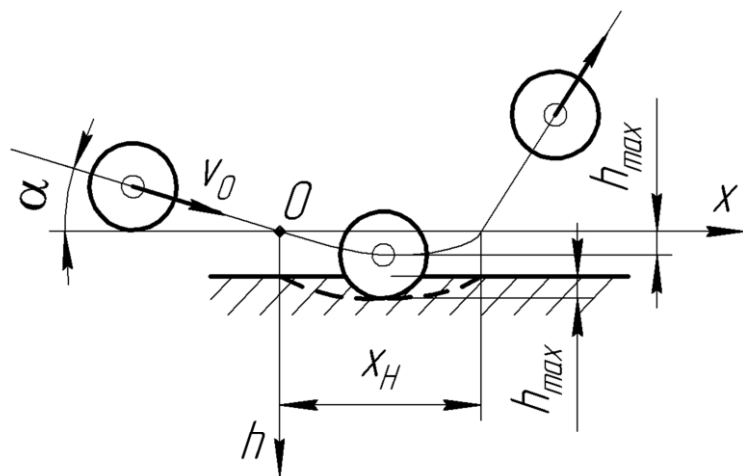


Рис.1 Пружна взаємодія твердої сферичної частинки з напівпростором, обмеженим площиною .

експериментально.

Розглянемо детальніше пружний контакт. Нехай на плоску поверхню пружного матеріалу діє потік твердих сферичних частинок, які рухаються зі швидкістю U_0 під кутом α до поверхні (рис. 1). Кожна частинка після удару пружно деформує тіло, котре зношується, та ковзає з тертям відносно його поверхні. Якщо прийняти, що нормальна компонента швидкості $U_0 \cdot \sin \alpha$ викликає лише пружне деформування матеріалу без втрат, то при відскоку ця компонента швидкості зберігається по абсолютній величині. Дотична компонента швидкості $U_0 \cdot \cos \alpha$ частково або повністю гаситься тертям. При цьому відбувається фрикційно-контактна втома, що призводить до руйнування та відділення матеріалу, тобто до зношування.

За умов незалежної одна від одної дії частинок можна скористатися основним співвідношенням Герца:

$$l = 2\sqrt{R \cdot h}, \quad (10)$$

де l – середній діаметр плями дотику; h – глибина занурення частинок.

$$p_r = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (11)$$

де E – модуль пружності матеріалу, який зношується; μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу, який зношується, а також отриманим раніше [7] співвідношенням, що описує криву втоми в умовах фрикційно-контактної дії,

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{k \cdot f \cdot p_r} \right)^t. \quad (12)$$

Підставимо співвідношення (11) в (12), отримаємо

$$n = \left(\frac{\sigma_0 \cdot 3\pi \cdot (1-\mu^2)}{k \cdot f \cdot 4E} \left(\sqrt{\frac{R}{h}} \right) \right)^t = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\pi \cdot (1-\mu^2) \cdot \sigma_0}{E \cdot k \cdot f} \cdot \left(\frac{R}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^t, \quad (13)$$

де R – радіус частинок; σ_0 – вихідна міцність матеріалу; p_r – середній тиск на контакт; f – коефіцієнт тертя ковзання частинки по матеріалу, який зношується; t – коефіцієнт втоми матеріалу; k – коефіцієнт пропорційності.

Якщо в даний момент з поверхнею взаємодіють q частинок, то

$$V_{д1} = q \cdot V_{д1} = q \cdot \pi \cdot R \cdot h^2, \quad (14)$$

де $V_{д1}$ – деформований об'єм, що припадає в кожний момент на одну частинку, яка взаємодіє.

Підставимо залежності (10), (13) і (14) у вираз (3) та отримаємо

$$\begin{aligned}
 dV &= \frac{q \cdot \pi \cdot R \cdot h^2}{\left(\frac{3}{4} \cdot \frac{\pi \cdot (1 - \mu^2) \cdot \sigma_0}{E \cdot k \cdot f} \cdot \left(\frac{R}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^t} \cdot dy = \\
 &= q \cdot \pi \cdot R \cdot h^2 \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{E \cdot k \cdot f \cdot \left(\frac{h}{R} \right)^{\frac{1}{2}}}{\pi \cdot (1 - \mu^2) \cdot \sigma_0} \right)^t \cdot \frac{R^{-\frac{1}{2}} \cdot h^{-\frac{1}{2}}}{2} \cdot dy = \\
 &= \frac{q \cdot \pi}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right)^t \cdot R^{\frac{1-t}{2}} \cdot h^{\frac{3+t}{2}} \cdot dy.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Інтегруючи вираз (15) по шляху ковзання частинок, одержимо

$$V = \frac{q \cdot \pi}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right)^t \cdot R^{\frac{1-t}{2}} \cdot \int_0^{y^*} h^{\frac{t+3}{2}} \cdot dy, \tag{16}$$

де y^* – шлях ковзання частинки по поверхні тіла, котре зношується, при одному зіткненні.

Прийmemo, що в розглянутому випадку так же, як і при нормальному зіткненні жорсткої сфери з пружним напівпростором, обмеженим площиною, максимальне занурення частинок можна записати у вигляді:

$$h_{\max} = R \cdot \left(\frac{5 \cdot \pi \cdot \rho_r \cdot (1 - \mu^2) \cdot v_0 \cdot \sin^2 \alpha}{4 \cdot E} \right)^{\frac{2}{5}}. \tag{17}$$

Уведемо безрозмірне занурення $\varepsilon = h/h_{\max}$ та безрозмірне ковзання $\xi = y/h_{\max}$ відповідно $d\varepsilon = dh/h_{\max}$ та $d\xi = dy/h_{\max}$, використаємо співвідношення (9) з урахуванням виразу (16)

$$\frac{J \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_r \cdot q \right)}{\rho_s} = \frac{q \cdot \pi}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right)^t \cdot R^{\frac{1-t}{2}} \cdot h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \cdot \int_0^{\xi^*(\varepsilon^*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \cdot d\xi, \tag{18}$$

де ξ^* – безрозмірний шлях ковзання частинки від моменту дотику до припинення ковзання; ε^* – безрозмірне занурення, при якому припиняється ковзання.

З виразу (18) винесемо J та отримаємо залежність:

$$J = \frac{3 \cdot \rho_s}{4 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_r \cdot q} \cdot \frac{q \cdot \pi}{2} \cdot \left(\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right)^t \cdot R^{\frac{1-t}{2}} \cdot h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \cdot \int_0^{\xi^*(\varepsilon^*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \cdot d\xi. \tag{19}$$

Спростимо вираз (19)

$$J = \frac{3 \cdot \rho_s}{8 \cdot \rho_r \cdot R^3} \cdot \left(\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right)^t \cdot R^{\frac{1-t}{2}} \cdot h_{\max}^{\frac{t+5}{2}} \cdot \int_0^{\xi_*(\varepsilon_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \cdot d\xi, \quad (20)$$

$$J = \frac{3 \cdot \rho_s}{8 \cdot \rho_r} \cdot \left(\frac{h_{\max}}{R} \right)^{\frac{t+5}{2}} \cdot \left(\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right)^t \cdot \int_0^{\xi_*(\varepsilon_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \cdot d\xi. \quad (21)$$

Підставимо у вираз (21) співвідношення (17)

$$J = \frac{3 \cdot \rho_s}{8 \cdot \rho_r} \cdot \left(\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right)^t \cdot \left(\frac{5 \cdot \pi \cdot \rho_r \cdot (1 - \mu^2)}{4 \cdot E} \right)^{\frac{t+5}{5}} \times \\ \times (v_0 \cdot \sin \alpha)^{2+\frac{2}{5}t} \cdot \int_0^{\xi_*(\varepsilon_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi. \quad (22)$$

Для спрощення аналізу та сприйняття проведемо перетворення виразу (22) та отримаємо:

$$J = \frac{15}{8} \cdot \rho_s \cdot (5 \cdot \rho_r)^{\frac{t}{5}} \cdot (v_0 \cdot \sin \alpha)^{2+\frac{2}{5}t} \cdot \left(\frac{k \cdot f}{3 \cdot \sigma_0} \right)^t \cdot \left(\frac{4 \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{\frac{4}{5}t-1} \cdot \int_0^{\xi_*(\varepsilon_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi. \quad (23)$$

Розглянемо детальніше пластичний контакт. При пластичному контакті частинка також деформує тіло, що зношується. Енергія частинки витрачається як на пластичне деформування матеріалу, так і на подолання сил адгезії. Як і при терті шорстких тіл, у даному випадку можна використовувати коефіцієнт тертя в якості інтегральної характеристики дисипації енергії при дотичному переміщенні. Крім того належить указати, що при дотичному переміщенні твердої сфери по пластично деформованому

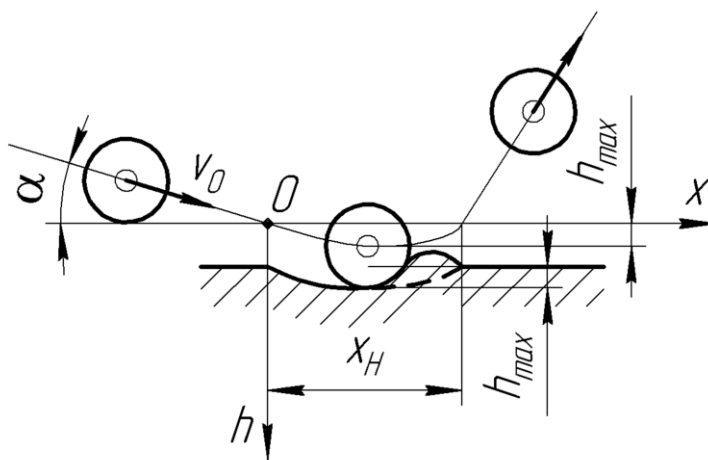


Рис.2. Пластична взаємодія твердої сферичної частинки з напівпростором, обмеженим площиною.

напівпростору на неї діє реакція, одна складова якої – дотична, тобто сила тертя, котра гальмує рух, а інша складова прагне виштовхнути частинку з матеріалу (рис. 2).

При терті твердих тіл обидві складові врівноважуються зовнішніми силами, при

ударі – динамічними силами, що визначаються прискоренням та масою частинки. Максимально занурившись, частинка, якщо вона продовжує своє дотичне переміщення, буде виштовхуватися (що є нормальною реакцією матеріалу) і, природно, буде продовжувати гальмуватися силою тертя. Як тільки частинка припинить своє дотичне переміщення, не відбуватиметься і її виштовхування з матеріалу. Ураховуючи викладене, для пластичного контакту можна залишити той же підхід до розрахунку зношування, що і для пружного контакту.

Скористаємось наступними співвідношеннями, відомими з теорії ковзання жорсткої сфери по пластично деформованому напівпростору:

$$l = 2\sqrt{R \cdot h}, \quad (24)$$

$$V_{\mathcal{D}_1} = \pi \cdot R \cdot h^2, \quad (25)$$

а також отриманим раніше [7] співвідношенням, що описує криву фрикційно-контактної втоми при пластичному контакті,

$$n = \left(e_0 \sqrt{\frac{R}{2h} \cdot \frac{1 - k' \cdot f}{1 + k' \cdot f}} \right)^t, \quad (26)$$

де e_0 – вихідна руйнуюча деформація матеріалу.

Підставимо вирази (24), (25) і (26) у формулу (3) та одержимо

$$dV = \frac{q \cdot \pi \cdot R \cdot h^{\frac{t+3}{2}}}{2\sqrt{R \cdot h} \cdot \left(e_0 \sqrt{\frac{R}{2h} \cdot \frac{1 - k' \cdot f}{1 + k' \cdot f}} \right)^t} \cdot dy. \quad (27)$$

Інтегруючи по шляху ковзання частинок, отримаємо

$$V = \frac{\pi \cdot q}{2R^{\frac{t-1}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{2 \cdot \frac{1 + k' \cdot f}{1 - k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{y_*} h^{\frac{t+3}{2}} dy. \quad (28)$$

Уведемо безрозмірні координати $\varepsilon = h/h_{\max}$ та $\xi = y/h_{\max}$ і перетворимо вираз (28)

$$V = \frac{\pi \cdot q \cdot h_{\max}^{\frac{t+5}{2}}}{2R^{\frac{t-1}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{2 \cdot \frac{1 + k' \cdot f}{1 - k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{\varepsilon_*(\xi_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi. \quad (29)$$

Підставимо вираз (29) у рівняння (9) та одержимо:

$$J = \frac{3 \cdot \rho_s}{4 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \rho_r \cdot q} \cdot \frac{\pi \cdot q}{2} \cdot \frac{h_{\max}^{\frac{t+5}{2}}}{R^{\frac{t-1}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{2 \cdot \frac{1+k' \cdot f}{1-k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{\varepsilon_*(\xi^*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi \quad (30)$$

Проведемо спрощення у виразі (30)

$$J = \frac{3\rho_s}{8\rho_r} \cdot \left(\frac{h_{\max}}{R} \right)^{\frac{t+5}{2}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{2 \cdot \frac{1+k' \cdot f}{1-k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{\varepsilon_*(\xi^*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi \quad (31)$$

Використовуючи раніше опубліковане [7], запишемо h_{\max}

$$h_{\max} = 2v_0 \cdot R \cdot \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_r}{3c \cdot \sigma_s}} \quad (32)$$

Тоді на підставі залежностей (31) та (32) отримаємо

$$J = \frac{3\rho_s}{8\rho_r} \cdot \left(2 \cdot v_0 \cdot \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_r}{3c \cdot \sigma_s}} \right)^{\frac{t+5}{2}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{2 \cdot \frac{1+k' \cdot f}{1-k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{\varepsilon_*(\xi^*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi \quad (33)$$

Проведемо нескладні перетворення виразу (33)

$$J = \frac{\rho_s}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{\rho_r}{3} \right)^{\frac{t+1}{4}} \cdot \left(\frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{\sqrt{c \cdot \sigma_s}} \right)^{\frac{t+5}{2}} \cdot \left(\frac{2}{e_0} \sqrt{\frac{1+k' \cdot f}{1-k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{\varepsilon_*(\xi^*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi \quad (34)$$

Для визначення чисельної характеристики зношування різних матеріалів, під дією потоку твердих частинок піску, необхідно використати отримані аналітичні залежності (23) та (34).

В обох рівняннях присутній інтегральний вираз, тому виникає необхідність проведення його оцінювання:

$$I = \int_0^{\varepsilon} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \cdot d\xi \quad (35)$$

Залежність між $d\xi$ та $d\varepsilon$ беремо:

$$d\xi = \left(f \pm \frac{ctg\alpha - f}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \right) \cdot d\varepsilon \quad (36)$$

Згідно кривої рис. 3, що показує схему занурення частинки, маємо:

$$\begin{aligned} I &= \int_0^1 \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \cdot \left(f + \frac{ctg\alpha - f}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \right) \cdot d\varepsilon + \int_1^0 \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} \cdot \left(f - \frac{ctg\alpha - f}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \right) \cdot d\varepsilon = \\ &= 2 \cdot (ctg\alpha - f) \cdot \int_0^1 \frac{\varepsilon^{\frac{t+3}{2}}}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} \cdot d\varepsilon. \end{aligned} \quad (37)$$

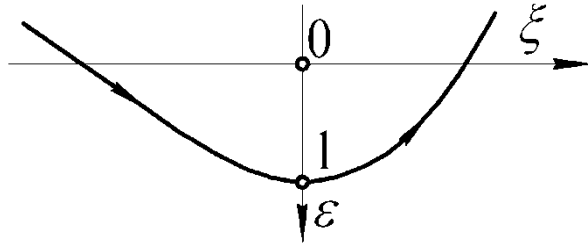


Рис. 3. Крива занурення частинки в матеріал.

Проведемо порівняння характеристики зношування J для гуми та поліуретану. Для цього з рівнянь (23) та (34) виділимо частину виразу, яка суттєво відрізняється для цих матеріалів, та частину, яка має еквівалентні значення. Використавши довідник [8] було встановлено, що для гуми та поліуретану величини $\rho_s, \rho_r, \nu_0, \sigma_0, E, \mu, c$ є еквівалентними, а коефіцієнт тертя суттєво відрізняється $f_p = 1,79$, $f_n = 1,1$. Тому оцінка зношування цих матеріалів повинна проводитись, виходячи, саме з цього. Приймаємо, кут під яким частинка прямує до поверхні $\alpha = 15^\circ$, $\text{ctg}\alpha = \text{ctg}15^\circ = 3,7$, показники кривої, що описує фрикційно-контактну втому $t \approx 2$, $k \approx 0,5$.

Отже, для зручності розрахунку частину виразу (23) та (34), яка складається з еквівалентних характеристик позначимо буквами a_i .

Характеристика зношування при пружному контакті:

$$a_1 = \frac{15}{8} \cdot \rho_s \cdot (5 \cdot \rho_r)^{\frac{t}{5}} \cdot (\nu_0 \cdot \sin \alpha)^{2+\frac{2t}{5}} \cdot \left(\frac{k}{3 \cdot \sigma_0}\right)^t \cdot \left(\frac{4 \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)}\right)^{\frac{4}{5}t-1}; \quad (38)$$

$$J_p = a_1 \cdot 1,79^2 \cdot (3,7 - 1,79) = a_1 \cdot 3,2 \cdot 1,91 = a_1 \cdot 6,112;$$

$$J_n = a_1 \cdot 1,1^2 \cdot (3,7 - 1,1) = a_1 \cdot 1,21 \cdot 2,6 = a_1 \cdot 3,146$$

Характеристика зношування при пластичному контакті:

$$a_2 = \frac{\rho_s}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{\rho_r}{3}\right)^{\frac{t+1}{4}} \cdot \left(\frac{\nu_0 \cdot \sin \alpha}{\sqrt{c \cdot \sigma_s}}\right)^{\frac{t+5}{2}} \cdot \left(\frac{2}{e_0}\right)^t; \quad (39)$$

$$J_p = a_2 \cdot \frac{1 + 0,5 \cdot 1,79}{1 - 0,5 \cdot 1,79} \cdot (3,7 - 1,79) = a_2 \cdot \frac{1,89}{0,11} \cdot 1,91 = a_2 \cdot 32,8;$$

$$J_n = a_2 \cdot \frac{1 + 0,5 \cdot 1,1}{1 - 0,5 \cdot 1,1} \cdot (3,7 - 1,1) = a_2 \cdot \frac{1,55}{0,45} \cdot 2,6 = a_2 \cdot 8,9$$

Отримані значення дають змогу оцінити, який матеріал має більшу стійкість до зношування та в якій мірі.

Висновки. Аналіз співвідношень (23) і (34) дозволяє відокремити вплив різних факторів – властивостей матеріалу та умов зношування – на величину зносу і встановити, що: 1. Швидкість частинок U_0 впливає на зношування в степені, більшому від двох ($J \propto U_0^{2+\frac{2}{t}}$ при пружному контакті та $J \propto U_0^{2+\frac{t+1}{2}}$ при пластичному), тобто сильніше, ніж за квадратичним законом; 2. Радіус частинки не впливає на величину зносу у випадку, коли цих частинок багато. Але форма частинки піску впливає на тиск, з яким вона занурюється (підвищення тиску збільшує зношування); 3. Збільшення тертя призводить до різкого підвищення зносу; 4. Поліпшення характеристик, що впливають на міцність (σ_0, e_0, t), спричиняє суттєве зменшення зносу; 5. Підвищення модуля пружності E призводить до збільшення зношування при $\sigma_0 = const$, а підвищення міцності матеріалу $c \cdot \sigma_s$ (при пластичному контакті) – до зменшення зношування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Браун Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191 с.
2. Крагельский И. В. Узлы трения машин: справочник / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
3. Хрущёв М. М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин / М. М. Хрущёв // Трение и износ в машинах. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – Вып. 3.- С. 5 – 17.
4. Хрущев М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущев, М. И. Бабичев. – М.: Изд-во АН СССР, 1970 – 252 с.
5. Буше Н. А. Трение, износ и усталость в машинах / Н. А. Буше. – М.: Транспорт, 1987. – 223 с.
6. Пукас В. В. Прогрессивные технологические способы повышения долговечности деталей машин / В. В. Пукас, И. В. Петко, И. Е. Муратов. – К.: Техника, 1978. – 80 с.
7. Виноградов В. Н. Абразивное изнашивание / В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, М. Г. Колокольников. – М.: Машиностроение, 1990. – 24 с.
8. Справочник по триботехнике: в 3-х т. / [Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе]. – М.: Машиностроение, 1989. – 416 с.