

МОДЕЛЬ ЗНОШУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ РОЗЧИНОНАСОСІВ ПІД ДІЄЮ РУХОМИХ НЕЗАКРІПЛЕНИХ АБРАЗИВНИХ ЧАСТИНОК ПІСКУ

Визначено залежності складових, що обумовлюють величину зношування робочих поверхонь диференційних розчинонасосів під дією незакріплених абразивних частинок піску, та факторів впливу на процес зношування.

Ключові слова: розчинонасос, зношування, абразивна частинка, пружний контакт, пластичний контакт.

Определены зависимости составляющих, что обуславливают величину изнашивания рабочих поверхностей дифференциальных растворонасосов под действием незакрепленных абразивных частиц песка, и факторов влияния на процесс изнашивания.

Ключевые слова: растворонасос, изнашивание, абразивная частица, упругий контакт, пластический контакт.

This article defines the correlation of components determining the amount of working surfaces amortization of differential mortar-pump under loose abrasive sand particles action and the factors effecting the wear process.

Key words: mortar-pump, wear process, abrasive particle, elastic contact, ductile contact.

Постановка проблеми. Серед різноманіття основних видів зношування насосної частини розчинонасоса особливе місце займає випадок руйнування робочих поверхонь потоком більш твердих частинок піску. Таке зношування часто називають ерозією, або зношуванням у потоці незакріпленого абразиву, або гідроабразивним зношуванням. Існує ряд експериментальних та теоретичних досліджень цього виду зношування [1], причому більшість їх базується на уявленні про абразивний механізм зношування.

Звичайно 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 останніх досліджень і публікацій та виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У працях, опублікованих раніше, розроблена та експериментально підтверджена теорія втомлюваності для зношування [2] (особливо при застосуванні до полімерних матеріалів), але не достатньо розглянуто фрикційну складову (яку раніше називали абразивною) ерозійного зношування в розрізі уявлень про його механізм. У дослідженнях зношення полімерних матеріалів у потоці абразивних частинок отримані залежності величини зношування від швидкості частинок, температури, вмісту пластифікаторів тощо [3, 5, 6], але не встановлений і не досліджений механізм абразивного зношування, тобто мікрорізання.

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 [4, 7]. 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 [2].

Формулювання цілей статті. Метою даного дослідження є створення моделі зношування поверхонь розчинонасосів під дією незакріплених абразивних частинок, яка б описувала цей процес та давала змогу його аналізувати.

Виклад основного матеріалу. 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 під одиничною ділянкою вважати пляму 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

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

де I – інтенсивність зношування;

V – об'єм матеріалу, видаленого на шляху ковзання dx ;

A_a – номінальна поверхня тертя;

A_r – фактична площа контакту;

i – питоме зношування.

Відповідно питоме 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

$$dV = \frac{V_D}{n \cdot l} dx. \quad (3)$$

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, що викликала цей знос частинок,

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

де V – знаходиться інтегруванням виразу (3) або визначається експериментально;

ρ_s – щільність матеріалу, який зношується;

ρ_r – щільність матеріалу частинок;

R – радіус частинок;

q – кількість частинок, що викликають зношування V .

Пружний контакт. Нехай на плоску поверхню пружного матеріалу діє потік твердих сферичних частинок, які летять зі швидкістю v_0 під кутом α до поверхні (рис. 1, а). Кожна частинка після удару пружно деформує тіло, котре зношується, та ковзає з тертям відносно його поверхні. Якщо прийняти, що нормальна компонента швидкості $v_0 \cdot \sin \alpha$ викликає лише пружне деформування матеріалу без втрат, то при відскакуванні ця компонента швидкості зберігається по абсолютній величині. Дотична компонента швидкості $v_0 \cdot \cos \alpha$ частково або повністю

гаситься тертям. При цьому відбувається фрикційно-контактна втома, що призводить до руйнування та відділення матеріалу, тобто до зношування.

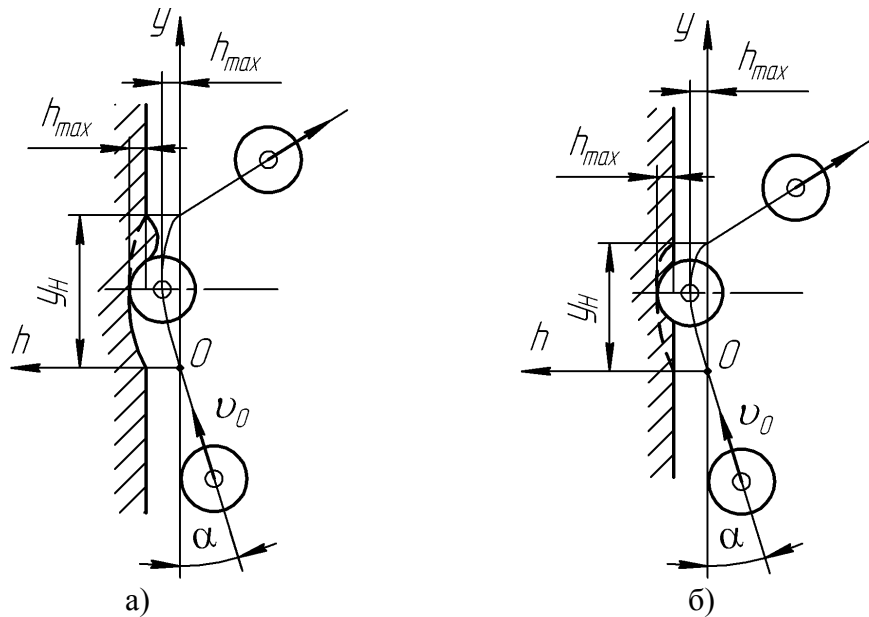


Рисунок 1 – Взаємодія твердої сферичної частинки з напівпростором, обмеженим площиною:

а – пружним; б – пластичним

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

$$l = 2\sqrt{R \cdot h}; \quad (5)$$

$$p_r = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (6)$$

а також отриманим раніше [5] співвідношенням, що описує криву втоми в умовах фрикційно-контактної дії,

$$n = \left(\frac{\sigma_0}{k \cdot f \cdot p_r} \right)^t = \left[\frac{3\pi \cdot (1-\mu^2) \cdot \sigma_0}{4E \cdot k \cdot f} \right] \cdot \left(\frac{R}{h} \right)^{t/2}, \quad (7)$$

де R – радіус частинок;

h – занурення частинок;

E – модуль пружності матеріалу, який зношується;

μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу, що зношується;

σ_0 – вихідна міцність матеріалу;

p_r – середній тиск на контакті;

f – коефіцієнт тертя ковзання частинки по матеріалу, який зношується;

t – коефіцієнт втоми матеріалу;

k – коефіцієнт пропорційності.

Якщо в даний момент часу з поверхнею взаємодіють q частинок, то

$$V_D = q \cdot V_{D_1} = q \cdot \pi \cdot R \cdot h^3. \quad (8)$$

Підставимо залежності (5), (7) і (8) у вираз (3) та отримаємо

$$dV = \frac{q \cdot V_{D_1}}{n \cdot l} \cdot dy = \frac{\pi}{2} \cdot q \cdot \frac{h^{\frac{t+3}{2}}}{R^{\frac{t-1}{2}}} \cdot \left[\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right]^t \cdot dy, \quad (9)$$

де V_{D_1} – деформований об'єм, що припадає в кожний момент часу на одну частинку, яка взаємодіє.

Інтегруючи по шляху ковзання частинок, одержимо

$$V = \frac{\pi \cdot q}{2 \cdot R^{\frac{t-1}{2}}} \cdot \left[\frac{4 \cdot E \cdot k \cdot f}{3 \cdot \pi \cdot \sigma_0 \cdot (1 - \mu^2)} \right]^t \cdot \int_0^{y_*} h^{\frac{t+3}{2}} \cdot dy, \quad (10)$$

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

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

$$h_{\max} = R \cdot \left[\frac{5 \cdot \pi \cdot p_r \cdot (1 - \mu^2) \cdot v_0 \cdot \sin^2 \alpha}{4 \cdot E} \right]^{\frac{2}{5}}. \quad (11)$$

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 (4) з урахуванням виразів (10) і (11)

$$J = \frac{15}{8} \cdot \rho_s \cdot (3\rho_r)^{\frac{t}{5}} \cdot (v_0 \cdot \sin \alpha)^{2+\frac{2}{5}t} \cdot \left(\frac{k \cdot f}{3\sigma_0} \right)^t \cdot \left[\frac{4E}{\pi(1-\mu^2)} \right]^{\frac{4}{5}t-1} \cdot \int_0^{\xi_*(\varepsilon_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi, \quad (12)$$

де ξ_* – безрозмірний шлях ковзання частинки від моменту дотику до припинення ковзання;

ε_* – безрозмірне занурення, при якому припиняється ковзання.

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 напівпростору на неї діє реакція, одна складова якої – дотична, тобто сила тертя, котра гальмує рух, а інша складова прагне виштовхнути частинку з матеріалу (рис. 1, б).

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 відбудуватиметься і її виштовхування з матеріалу. Ураховуючи викладене, для пластичного контакту можна залишити той самий підхід до розрахунку зношування, як і для пружного контакту.

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

$$l = 2\sqrt{R \cdot h}; \quad (13)$$

$$V_{Д_1} = \pi \cdot R \cdot h^2, \quad (14)$$

а також отриманим раніше [5] співвідношенням, що описує криву фрикційно-контактної втоми при пластичному контакті,

$$n = \left(e_0 \sqrt{\frac{R}{2h} \cdot \frac{1 - k' \cdot f}{1 + k' \cdot f}} \right)^t, \quad (15)$$

де e_0 – вихідна руйнуюча деформація матеріалу.

Підставимо вирази (13), (14) і (15) у формулу (3) та одержимо

$$dV = \frac{\pi \cdot q \cdot h^{\frac{t+3}{2}}}{2R^{\frac{t-1}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{\frac{1 + k' \cdot f}{1 - k' \cdot f}} \right)^t. \quad (16)$$

Інтегруючи по шляху ковзання частинок, отримаємо

$$V = \frac{\pi \cdot q}{2R^{\frac{t-1}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{\frac{1 + k' \cdot f}{1 - k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{y_*} h^{\frac{t+3}{2}} dy. \quad (17)$$

Уведемо безрозмірні координати $\varepsilon = h/h_{\max}$ та $\xi = y/h_{\max}$ і перетворимо вираз (17)

$$V = \frac{\pi \cdot q \cdot h_{\max}^{\frac{t+5}{2}}}{2R^{\frac{t-1}{2}}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{\frac{1 + k' \cdot f}{1 - k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{\varepsilon_*(\xi_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi. \quad (18)$$

Підставимо вираз (18) у рівняння (4) та одержимо

$$J = \frac{3\rho_s}{8\rho_r} \cdot \left(\frac{h_{\max}}{R} \right)^{\frac{t+5}{2}} \cdot \left(\frac{1}{e_0} \sqrt{\frac{1 + k' \cdot f}{1 - k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{\varepsilon_*(\xi_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi. \quad (19)$$

Використовуючи раніше опубліковане рівняння [7], обчислимо

$$h_{\max} = 2v_0 \cdot R \cdot \sin \alpha \sqrt{\frac{\rho_r}{3c \cdot \sigma_s}}. \quad (20)$$

Тоді на підставі залежностей (20) та (19) отримаємо

$$J = \frac{\rho_s}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{\rho_r}{3} \right)^{\frac{t+1}{4}} \cdot \left(\frac{v_0 \cdot \sin \alpha}{\sqrt{c \cdot \sigma_s}} \right)^{\frac{t+5}{2}} \cdot \left(\frac{2}{e_0} \sqrt{\frac{1 + k' \cdot f}{1 - k' \cdot f}} \right)^t \cdot \int_0^{\varepsilon_*(\xi_*)} \varepsilon^{\frac{t+3}{2}} d\xi. \quad (21)$$

Співвідношення (12) і (21) дозволяють проаналізувати вплив різних факторів – властивостей матеріалу та умов зношування – на величину зношення і зробити такі **висновки**.

1. Швидкість частинок v_0 впливає на зношування в степені, більший від двох ($J \sim v_0^{2+\frac{2}{5}t}$ при пружному контакті та $J \sim v_0^{2+\frac{t+1}{2}}$ при пластичному), тобто сильніше, ніж за квадратичним законом.

2. Радіус частинки не впливає на величину зносу у випадку, коли цих частинок досить багато. Але форма частинки піску впливає на тиск, з яким вона занурюється (підвищення тиску збільшує зношування [8]).

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.

Таким чином, на підставі створеної моделі зношування робочих поверхонь розчинонасосів під дією рухомих незакріплених абразивних частинок піску визначено основні фактори впливу властивостей матеріалу та умов зношування на величину зносу вузлів розчинонасосів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Николич А.С. Поршневые буровые насосы / А.С. Николич. – М.: Недра, 1973. – 225 с.
2. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 875 с.
3. Хрущев М.М. Абразивное изнашивание / М.М. Хрущев, М.И. Бабичев. – М., 1970. – 252 с.
4. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2-х кн./ под ред. И. В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978.
5. Н.М. Михин. Трение в условиях пластического контакта / Н.М. Михин. – М.: Наука, 1968.
6. Каучук и резина / И.В. Крагельский, М.М. Резниковский, Г.И. Бродский, Е.Ф. Непомнящий. – М., 1966.
7. Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа / АН СССР, Научный совет по трению и смазкам. – М.: Наука, 1971. – 241 с.
8. Онищенко А.Г. Изменение абразивных свойств строительных растворов при многократном перекачивании раствороносами / А.Г. Онищенко, А.С. Васильев, В.У. Устьянцев // Научные труды Кременчугского государственного политехнического университета (проблемы создания новых машин и технологий). – Кременчуг: КГПУ, 2001. – Вып. 1. – С. 474–475.