

Дворук В.І.Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна
E-mail: vidvoruk@gmail.com**МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОШУВАННЯ МЕТАЛІВ
ПРИ ТЕРТІ КОВЗАННЯ З ПОЗИЦІЙ
КІНЕТИЧНОЇ ПРИРОДИ МІЦНОСТІ
ТВЕРДИХ ТІЛ**

УДК 621.891

З позицій кінетичної природи міцності твердих тіл отримано адекватну модель зношування металів при терті ковзання, яка враховує їх довговічність, а також умови взаємодії нерівностей поверхонь пари тертя.

Ключові слова: зношування, довговічність, утомне руйнування, термофлуктуаційний процес, скоплювання, площа дотику.

Вступ

При зношуванні твердих тіл руйнування локалізується в невеликому об'ємі матеріалу, що видається із зони тертя у вигляді частинок зносу. Більшою частиною зношування відбувається в результаті утомного механізму руйнування. Такий механізм, перш за все, зумовлений тим, що внаслідок шорсткості реальних тіл їх взаємодія при терті відбувається на окремих ділянках, сукупність яких утворює фактичну площину дотику. Виступи шорстких поверхонь під нормальним навантаженням взаємно занурюються або зминаються, завдяки чому в області плям дотику виникають відповідні напруження та деформації. В процесі тертя ковзання певний об'єм матеріалу, що знаходиться в приповерхневому шарі, зазнає циклічної (повторно - змінної) силової дії.

Аналіз характеру дії, проведений на моделі жорсткого сферичного виступу, що ковзає деформованим напівпростором, показав наявність складного напруженого стану в останньому: перед виступом існує зона стиску, а за ним – зона розтягу. В результаті виникає знаковмінний цикл навантаження матеріалу. Після кожного такого циклу в матеріалі накопичуються послаблюючі пошкодження, які в підсумку призводять до його руйнування.

Утомна теорія зношування була розроблена І.В.Крагельським [1 - 3] і отримала визнання серед трибологів всього світу. За схемою, що запропонована в цій теорії, отримані загальні аналітичні формули для розрахунку інтенсивності зношування металів при пружному і пластичному контакті, які адекватно описують процес зношування в широкому діапазоні вихідних параметрів.

Стосовно до полімерів утомна теорія зношування отримала розвиток в роботі [4], де за такою самою схемою отримані відповідні адекватні рівняння інтенсивності зношування в умовах пружного і пластичного контакту.

Однак вказані формули для металів і полімерів є досить громіздкими. Вони містять в собі величини, визначення яких потребує проведення значного обсягу вимірювань та обробки їх результатів, а також використання вузькоспеціалізованої довідкової інформації (таблиць, номограм, графіків тощо), що в літературі загальнотехнічного профілю, як правило, відсутня. З цих причин практичне застосування формул при виборі матеріалів для вузлів тертя розрахунками на зносостійкість в стадії проектування машин істотно ускладнюється.

Усунення таких недоліків може бути досягнуто шляхом зміни підходу до врахування утомних явищ, що був використаний при їх отриманні [2, 4]. Один з можливих підходів спирається на кінетичну природу міцності твердих тіл, яка зумовлена вирішальною роллю теплового руху атомів в процесі утомного руйнування [5]. Ця ідея знайшла успішне застосування для опису зношування полімерних матеріалів [6], однак для опису зношування металевих матеріалів вона досі не залучалась.

Постановка проблеми

Метою даної статті є побудова моделі зношування металевих матеріалів при сухому терті ковзання в повітрі з позицій кінетичної природи міцності твердих тіл, що зумовлена вирішальною роллю теплового руху атомів в процесі утомного руйнування тертьової поверхні.

Основний матеріал

Відомо [7], що між лінійною інтенсивністю зношування та кількістю циклів до руйнування металу існує обернено пропорційна залежність:

$$I_h = \frac{c}{N_p}, \quad (1)$$

де I_h – лінійна інтенсивність зношування;

c – коефіцієнт, що залежить від амплітуди напружень в контакті;

N_p – кількість циклів до руйнування металу.

Розглядаючи ковзання двох металевих поверхонь, що притиснуті одна до одної, та, урахувавши дискретність контакту, тобто взаємодію окремих нерівностей, неважко бачити, що швидкість ковзання повинна бути пропорційною частоті взаємодій дискретних контактів.

Дійсно, оскільки контактуючі поверхні, що знаходяться під певним навантаженням мають деяку фактичну площину дотику, то після їх зміщення на шлях тертя, який дорівнює діаметру плями дотику знову виникне така ж сама фактична площина дотику. Очевидно, що на повному шляху тертя фактична площина дотику відтворюватиметься кількість разів, яка дорівнює:

$$m = \frac{L}{d}, \quad (2)$$

де m – кількість разів відтворення фактичної площини дотику на повному шляху тертя;

L – повний шлях тертя;

$d = 30 - 50$ мк – діаметр плями дотику.

Якщо обидві частини рівняння (2) розділити на час тертя t , що відповідає шляху тертя L , отримаємо вираз:

$$\frac{m}{t} = \frac{L}{td}. \quad (3)$$

$$\text{Оскільки} \quad \frac{m}{t} = \omega, \quad (4)$$

де ω – частота взаємодій дискретних контактів:

$$\frac{L}{t} = V, \quad (5)$$

де V – швидкість ковзання тертьових поверхонь, то:

$$V = d\omega. \quad (6)$$

$$\text{Звідки:} \quad \omega = \frac{V}{d}. \quad (7)$$

Час τ руйнування (довговічність) металу дорівнює:

$$\tau = N_p T = N_p \frac{2\pi}{\omega}, \quad (8)$$

де T – період одного циклу навантаження.

Тоді кількість циклів до руйнування поверхні тертя може бути визначена як:

$$N_p = \frac{\tau\omega}{2\pi}. \quad (9)$$

Руйнування при утомному навантаженні – це термофлуктуаційний процес, в основі якого лежить накопичення розривів міжатомних зв'язків [5].

Згідно кінетичної природи міцності твердих тіл [5], довговічність τ та руйнівне напруження σ металу зв'язані одне з одним таким співвідношенням:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}, \quad (10)$$

де γ – структурно чутливий коефіцієнт металу;

T – абсолютна температура;

k – стала Больцмана;

U_0 – висота активаційного бар'єру;

τ_0 – період теплових коливань атомів металу.

При терті ковзання напружений стан металу в зоні фрикційної взаємодії визначається рівнодією нормальних напружень від занурених та сплюснених нерівностей, а також тангенціальних напружень від переміщення останніх поверхнею:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_\tau^2} = \sqrt{\sigma_n^2 + (f\sigma_n)^2} = \sigma_n \sqrt{1 + f^2}, \quad (11)$$

де σ_n – нормальне напруження в металі;

σ_τ – тангенціальне напруження в металі;

f – коефіцієнт тертя.

Тоді співвідношення (10) можна записати так

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma_n \sqrt{1 + f^2}}{kT}. \quad (12)$$

З урахуванням (7) та (12) кількість циклів до руйнування металу (9) дорівнюватиме:

$$N_p = \frac{\tau\omega}{2\pi} = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma_n \sqrt{1+f^2}}{kT} \frac{V}{2\pi d} \quad (13)$$

Після підстановки (13) в (1) для визначення інтенсивності отримаємо:

$$I_h = \frac{c}{N_p} = \frac{2\pi dc}{V\tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma\sigma_n \sqrt{1+f^2}}{kT}} \quad (14)$$

Для аналізу зношування металів в моделі (14) виділяли чотири групи факторів, що характеризували: 1) зовнішні умови тертя (σ_n , V , T); 2) рівняння довговічності металів (τ_0 , U_0 , γ); 3) площину дотику (d); 4) фрикційні властивості пари тертя (f).

З рівняння (14) випливає, що збільшення таких факторів як площина дотику d , структурно чутливий коефіцієнт металу γ , нормальне напруження σ_n , фрикційні властивості пари тертя f , температура випробувань T призводять до підвищення, а структурно нечутливих коефіцієнтів металу τ_0 , U_0 та швидкості ковзання V – до зниження інтенсивності зношування I_h металу. Причому від фактору d інтенсивність зношування I_h залежить прямо пропорційно, від факторів τ_0 і V – обернено пропорційно, а від решти факторів – обернено експоненціально. Такий характер вказаних залежностей узгоджується з відомими [2, 4] результатами відповідних досліджень зношування твердих тіл.

Урахування вказаних груп факторів дозволяє визначити шляхи керування зношуванням металів при терті ковзання.

Достовірність розробленої моделі (14) перевірялась шляхом лабораторних трибо технічних досліджень. Досліди проводились на машині тертя КЕ – 2 при сухому терті в повітрі. Випробуванням піддавались циліндричні зразки діаметру $8 \cdot 10^3$ м., що виготовлені з різних металів: Fe, Al, Cu, Pb, Co, Zn, Ni.

Виходячи з рекомендацій [8], за здатністю до розвитку процесів схоплювання та окислювання, а також зносостійкістю оксидних плівок, що утворюються на поверхнях тертя вказана підборка металів містить у собі представників чотирьох груп: 1) значно схильних до схоплювання та окислювання з утворенням плівок, зносостійкіших, ніж метал (Fe, Al); 2) не схильних до схоплювання, але схильних до окислювання з утворенням плівок оксидів, зносостійкіших ніж метал (Cu, Pb); 3) не надто схильних до схоплювання, але схильних до схоплювання з утворенням плівок оксидів менш зносостійких, ніж метал (Co, Zn); 4) схильних до схоплювання та окислювання з утворенням плівок оксидів менш зносостійких, ніж метал (Ni).

Тертя цих зразків здійснювали об обертовий диск із сталі 45. Швидкість відносного переміщення тертьових поверхонь складала 6 м/с, а питомий тиск на зразок – 7,5 Па. Під час випробувань вимірювали лінійну інтенсивність зношування та силу тертя.

Результати визначення параметрів рівняння довговічності, а також експериментальних та розрахункових величин триботехнічних характеристик досліджених металів представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення параметрів, що визначають довговічність металів та їх трибо технічні властивості

Метали	Параметри, що визначають довговічність металів			Триботехнічні властивості металів		
	період теплових коливань атомів $\tau_0 \cdot 10^{-13}$, с	висота активаційного бар'єру $U_0 \cdot 10^{-19}$, Дж	структурно чутливий коефіцієнт $\gamma \cdot 10^{-25}$, м ³	сила тертя F_T , Н	інтенсивність зношування $I_h \cdot 10^{-7}$, експеримент	інтенсивність зношування $I_h \cdot 10^{-7}$, розрахунок
Fe	1	7,8	1,72	67	154	165
Al	1	4	1,03	56	44,5	44,5
Cu	1	5,84	2,66	26	1,29	3,4
Pb	1	2,58	1,25	32	8,04	7,6
Co	1	7,61	3,16	30	12,2	27,7
Zn	1	2,98	0,96	43	37	66
Ni	1	7,44	1,59	69	419	278

Їх аналіз показав, що розсіювання експериментальних значень інтенсивності зношування металів є дуже значним і перевищує два порядки. Тому адекватно описати таку виборку за допомогою однієї ма-

тематичної формули в межах вибраної розрахункової схеми (14) практично неможливо. Разом з тим, звертає на себе увагу (табл. 1), що за величиною зносостійкості досліджені метали можна розділити на три групи.

В першу групу входять Fe та Ni, які проявляли значну схильність до схоплювання 2-го роду. Інтенсивність зношування цих металів була найбільшою ($I_h = (1,54 - 4,19) \cdot 10^{-5}$), а наявність оксидних плівок та їх зносостійкість не чинила впливу на неї. Висока здатність до схоплювання вказаних металів підтверджується великими значеннями сили тертя. Руйнування вузлів схоплювання зразків, швидше за все, відбувалось за механізмом квазістатичної утоми, який іменується ще циклічною повзучістю [9].

До другої групи відносяться Al, Zn, Co, що не проявляли великої схильності до схоплювання. Серед досліджених металів інтенсивність зношування цих металів знаходилась на середньому рівні ($I_h = (1,22 - 4,45) \cdot 10^{-6}$). На такому ж самому середньому рівні знаходилась і сила тертя. Крихкі плівки, які утворювали вказані метали в процесі випробувань легко руйнувались, сприяючи підвищенню інтенсивності зношування. Руйнування вузлів схоплювання, сформованих на поверхнях зразків, відбувалось за механізмом високоамплітудної малоциклової утоми.

Третю групу складають Pb та Cu, що не схильні до розвитку процесів схоплювання. Інтенсивність їх зношування була найнижчою ($I_h = (1,29 - 8,04) \cdot 10^{-7}$). Цей факт можна пояснити утворенням на поверхнях пари тертя плівок оксидів, які добре опираються зношуванню. На можливість позитивного впливу плівок вказують, зокрема, низькі значення сили тертя. В таких умовах найімовірнішим механізмом руйнування поверхонь зразків є малоциклова утома.

З викладеного вище випливає такий висновок: головною причиною значного розсіювання результатів експериментального визначення інтенсивності зношування є зміна механізму руйнування зразка, залежно від схильності до схоплювання та окислювання, а також зносостійкості плівки оксиду металу. Тому для адекватного математичного опису зношування металів розроблена модель (14) повинна кількісно відбивати такі зміни. З цією метою проведено підбір числових коефіцієнтів С у вказаній моделі для кожної групи металів. В результаті було встановлено, що прийнятні розходження розрахункових величин інтенсивності зношування з експериментальними спостерігались при таких значеннях коефіцієнтів для металів: 1 групи – $C = 2,65 \cdot 10^{-5}$; 2 групи – $2,65 \cdot 10^{-6}$; 3 групи – $2,65 \cdot 10^{-7}$.

Висновки

1. З позицій кінетичної природи міцності твердих тіл отримано модель зношування металів при сухому терті ковзання в повітрі яка ураховує довговічність металів та умови взаємодії нерівностей тертьових поверхонь.

2. За допомогою розробленої моделі проаналізовано роль факторів, що контролюють інтенсивність зношування металів. Визначено шляхи керування зношуванням металів при терті ковзання в повітрі.

3. Встановлено, що головною причиною значного розсіювання інтенсивності зношування вибраних металів при лабораторних випробуваннях є зміна механізму руйнування поверхні тертя, залежно від схильності до схоплювання та окислювання, а також зносостійкості оксидних плівок металів.

4. Результатами лабораторних триботехнічних випробувань підтверджено ефективність запропонованої моделі зношування, що дає підстави рекомендувати її для практичного застосування при підборі матеріалів в стадії проектування вузлів тертя машин.

Література

1. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с. – Библиогр.: С. 483 - 513.
3. Польшер Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с. – Библиогр.: С. 232 - 247.
4. Бартенев Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. – Ленинград: Химия, 1972. – 240 с. – Библиогр.: С. 236 - 238.
5. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел. / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с. – Библиогр.: С.536 - 560.
6. Ратнер С.Б. Истирание полимеров как кинетический термоактивационный процесс / С.Б. Ратнер, Е.Г. Лурье // ДАН СССР. – 1966, Т. 166. – №4. – С. 909 - 912.
7. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении / Е.А. Марченко. – М.: Наука, 1979. – 166 с.
8. Голего Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения / Н.Л. Голего – К.: Техніка, 1965. – 231 с.
9. Механика разрушения и прочность материалов: [Справочное пособие]: В 4 т. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наукова думка, 1988 -1990. –Т.4. / О.В. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др. – К.: Наукова думка, 1990. – 680 с.: Библиогр.: С. 627 – 674.

Dvoruk V.I. Modeling of metals wear friction viewpoint of nature kinetic strength of solids.

The purpose of this article is to build a model wearing metallic materials in dry sliding friction in the air from the standpoint of the kinetic nature of the strength of solid, due to the decisive role of the thermal motion of atoms in the friction arising fatigue fracture surface.

The proposed model takes into account the conditions the durability of metal surfaces interact merivnostey friction pair. With it analyzes the factors that control the intensity of wear metals and the ways of managing it.

The main cause significant scattering intensity change vyznachenno wear mechanism of destruction friction surface, depending on the susceptibility to seizure and durability of the metal oxide film.

The effectiveness of the model confirmed by laboratory tests tribotechnical.

Keywords: wear, durability, arising fatigue fracture, termoflukuating process setting, the plane touched.

References

1. Kragel'skij I.V. Trenie i iznos. – M.: Mashinostroenie, 1968. 480 s.
2. . Kragel'skij I.V. Osnovy raschetov na trenie i znos. I.V. Kragel'skij, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov. M.: Mashinostroenie, 1977. 526 s. Bibliogr.: S. 483 – 513.
3. Pol'cer G. Osnovy trenija i iznashivaniya. G. Pol'cer, F. Majssner. M.: Mashinostroenie, 1984. 264 s. Bibliogr.: S. 232 – 247.
4. Bartenev G.M. Trenie i znos polimerov. G.M. Bartenev, V.V. Lavrent'ev. Leningrad: Himija, 1972. 240 s. Bibliogr.: S. 236 – 238.
5. Regel' V.R. Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel. V.R. Regel', A.I. Slucker, Je.E. Tomashevskij. M.: Nauka, 1974. 560 s. Bibliogr.: S.536 – 560.
6. Ratner S.B. Istiranje polimerov kak kineticheskij termoaktivacionnyj process. S.B. Ratner, E.G. Lur'e . DAN SSSR. 1966, T. 166. - №4. S. 909 – 912.
7. Marchenko E.A. O prirode razrusheniya poverhnosti metallov pri trenii. E.A. Marchenko. M.: Nauka, 1979. 166 s.
8. Golego N.L. Shvatyvanie v mashinah i metody ego ustraneniya. K.: Tehnika, 1965. 231 s.
9. Mehanika razrusheniya i prochnost' materialov: [Spravochnoe posobie]: V 4 t. Pod obshh. red. V.V. Panasjuka. K.: Naukova dumka, 1988 1990. T.4. O.V. Romaniv, S.Ja. Jarema, G.N. Nikiforchin i dr. K.: Naukova dumka, 1990. 680 s.: Bibliogr.: S. 627 – 674.