

**Венцель Є.С.,
Євтушенко А.В.,
Щукін О.В.,
Орел О.В.**

Харківський національний
автомобільно - дорожній університет,
м. Харків, Україна
E-mail: alexhome88@gmail.com

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ ТРИБОСПОЛУЧЕНЬ

УДК 621.878

Відомо, що під час зношування на поверхнях тертя утворюються так звані вторинні структури, які мають вищу, чим підповерхневі шари, мікротвердість. Вторинні структури сприяють зменшенню зношування трибосполучень, тобто можна стверджувати, що останні є термодинамічною системою, в якій утворюється ентропія, тобто справедливі основні закони нерівновагової термодинаміки. Але до цього часу немає теоретичних залежностей, які би показали взаємозв'язок між інтенсивністю зношування та головними характеристиками поверхонь тертя, зокрема, щільністю дислокацій.

В цій статті наведено послідовність отримання і відповідна математична модель, аналіз якої показав, що інтенсивність зношування трибосполучення при нестационарному режимі прямо пропорційна середньому об'єму часток зношування та їх об'ємній концентрації у трибосполученні і його температурі, а також обернено пропорційна приповерхній щільності дислокацій та твердості поверхней.

Отримана математична модель справедлива для будь-яких трибосполучень, які виконують обертальний, поступовий та обертально-поступовий рух при нестационарних режимах роботи.

Ключові слова: трибосполучення, інтенсивність зношування, знос, шар, частинка.

Вступ

Відомо, що в процесі роботи трибосполучень формуються структура і властивості поверхневих шарів, які забезпечують мінімізацію сил тертя і швидкості зношування. На підставі розглянутих загальних закономірностей Б.І. Костецьким [1 - 3] була побудована теорія структурно - енергетичної адаптації (структурного пристосовування) поверхонь тертя при механічних і термохімічних процесах.

Згідно з цією теорією для всіх матеріалів та умов середовища існує визначений діапазон навантажень і швидкостей переміщення, при яких відбувається нормальне протікання механіко-хімічного зношування.

При цьому структура поверхневих шарів набуває найбільшу для даних умов міцність проти фізико-хімічного впливу. Такі структури Б.І. Костецький назвав вторинними.

Коли структура і властивості поверхневих шарів стають оптимальними, сили тертя і зношування квазістабілізуються, що характеризується мінімальними значеннями температури і швидкості зношування. В цьому випадку поверхні тертя адаптовані до умов тертя, тобто в максимальній степені наближені до стаціонарного стану [4].

Відомо також, що в реальній структурі кристалів завжди мають місце дефекти решітки, до яких належать дислокації. Особливостями їх структури, числом, закономірностями переміщення визначаються такі важливі характеристики металів, як пластичність, твердість і зносостійкість. Внаслідок дислокаційних процесів утворюються особливі структури поверхонь, які теж можна віднести до розряду вторинних. Велике значення при цьому має мастильне середовище, яке контактує з металевою поверхнею.

Мета і постановка задачі

Метою роботи є отримання математичної моделі, яка зв'яже інтенсивність зношування трибосполучень з характеристиками поверхонь тертя, зокрема, з щільністю дислокацій в приповерхневому шарі.

Виклад матеріалів дослідження

Поверхнево - активні речовини (ПАР), які виникають у змащувальному матеріалі (ЗМ) при окисленні полегшують вихід дислокацій на поверхню тіла, що приводить до пластифікування, а отже, до зміцнення поверхневих шарів, підвищення межі текучості та опору до зношування [5].

Для отримання математичної моделі, яка б пов'язувала знос пари тертя «вал - підшипник» при нестационарному режимі роботи з поверхневою щільністю дислокацій, скористаємося відомою теоремою І. Пригожина про наближення термодинамічної системи до стаціонарного стану, при якому виробництво ентропії прямує до мінімального значення [6]. При цьому будемо припускати, що пара трибосполучен-

ня – це динамічна дисипативна система, в якій реалізується деградація енергії макромеханічного руху, тобто виробляється ентропія [4].

Спочатку за допомогою теореми І. Пригожина отримаємо вираз для величини рівновагової тангенційної напруги σ_τ , яка зумовлена силою тертя.

Визначимо з урахуванням вкладу дислокацій об'ємне виробництво ентропії для елемента об'єма dV , що містить поверхню тертя, яка межує з середовищем, тобто ЗМ. Об'ємне виробництво ентропії $p_s = d\dot{s}/dV$, що зумовлено дислокаціями, визначається співвідношенням [7]:

$$P_{SD} = \frac{1}{T} \sigma_{ij} \dot{E}_{ij}, \quad (1)$$

де σ_{ij} – тензор напружень;

\dot{E}_{ij} – швидкість пластичних деформацій;

T – температура.

Обмежуючись режимом пластичного контакту при нестационарному режимі роботи і враховуючи, що швидкість пластичної деформації у площині ковзання згідно з даними роботи [8], $\dot{E}_{xy} = b\rho_D v_D$, отримаємо наступний вираз для виробництва ентропії, обумовлений дислокаціями:

$$v_D = \frac{10\sigma_\tau b^3 C_t}{3kT}, \quad (2)$$

де σ_τ – компонента тензору напруження, яка зумовлена питомою силою тертя;

b – абсолютна величина вектора Бюргерса;

C_t – швидкість звуку;

k – стала Больцмана;

T – температура.

На підставі даних, наданих у роботі [4], можна показати, що вклад у виробництво ентропії сил тертя враховується членом:

$$P_{ST} = \frac{\sigma_\tau |\vec{v}| \vec{k}_0}{Tn} \text{grad } n, \quad (2.5)$$

де \vec{v} – вектор швидкості переміщення поверхонь трибовузла;

\vec{k}_0 – одиничний вектор;

n – об'ємна концентрація часток зносу в трибовузлі.

Тоді повне виробництво ентропії буде мати дві складові частини, що залежать від σ_τ та визначаються виразами (2.3) і (2.5) з урахуванням виразу (2.4):

$$P_S = \rho_D \frac{10\sigma_\tau^2 b^4 C_t}{3kT^2} + \frac{\sigma_\tau |\vec{v}| \vec{k}_0}{Tn} \text{grad } n \vec{k}_0 + \sum \vec{J}_i \vec{X}_i, \quad (4)$$

де ρ_D – щільність дислокацій у приповерхневій зоні;

\vec{J}_i – термодинамічний потік;

\vec{X}_i – термодинамічна сила.

Остання складова частина у цьому виразі містить потоки і термодинамічні сили, що не залежать від σ_τ .

Оскільки згідно з теоремою І. Пригожина повне виробництво ентропії у стаціонарному стані, коли інтенсивність зношування та сили тертя постійні, прямує до мінімуму, то умовний екстремум по σ_τ

має вигляд $dp_s/d\sigma_\tau$, звідки, згідно з даними роботи [8], впливає наступний вираз для σ_τ , що відповідає стаціонарному стану:

$$\sigma_\tau = \frac{3|\vec{v}|\text{grad } n \vec{k}_o}{20b^4 \rho_d C_i n} kT. \quad (5)$$

Виразимо концентрацію n через характеристики поверхонь тертя трибовузлів.

Якщо внаслідок зношування руйнується об'єм $\Delta V_{ИЗ}$, тоді утворюються частки зносу, що характеризуються середнім об'ємом V_0 . Кількість цих часток та їх концентрація в об'ємі V_{TV} трибосполучення визначаються співвідношеннями:

$$N = \frac{\Delta V_{ИЗ}}{V_0}, \quad n = \frac{\Delta V_{ИЗ}}{V_0 V_{TV}}. \quad (6)$$

Якщо площа перетину трибосполучення Ω , товщина зношеного шару h_u , а середній зазор між підшипником та валом H (рис. 1), то:

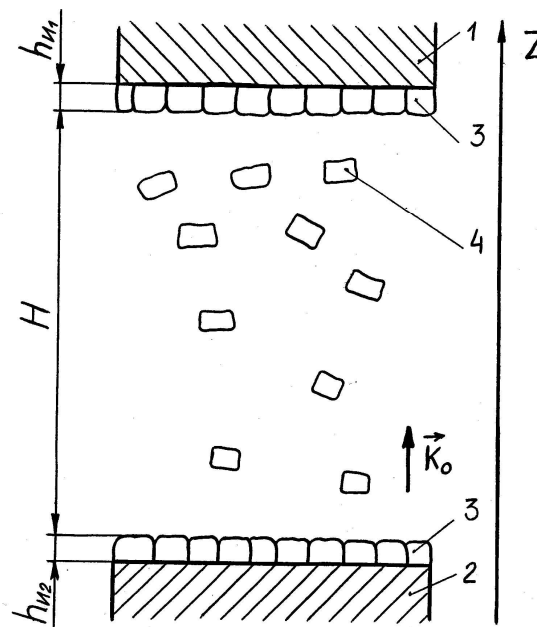


Рис. 1 – Схема трибосполучення:
1, 2 – поверхні тертя;
3 – шар, що зазнає зношування;
4 – частинки, що відділилися

$$n = \frac{h_u \Omega}{V_0 V_{TV}} = \frac{h_u}{V_0 H}. \quad (7)$$

Пов'яжемо товщину зношеного шару h_u з переміщенням поверхонь тертя Δl , використовуючи величину лінійного зношування $I_h = -\Delta h_u / \Delta l$. Нехай за проміжок часу τ_0 частка зносу середніх розмірів перемістилась вздовж осі Z на величину середнього зазору H . За цей же час вона переміститься вздовж поверхні тертя на відстань $\Delta l = v \tau_0$. Тоді $h_u = I v \tau_0$ і рівноважна концентрація, яка встановлюється за час формування τ_0 трибосполучення:

$$n = \frac{I v \tau_0}{V_0 H}, \quad (8)$$

де I – інтенсивність зношування;
 v – швидкість переміщення поверхонь тертя.
 Підставляючи співвідношення (8) до (5), отримаємо:

$$\sigma_{\tau} = \frac{3V_o H |\text{grad } n| kT}{20b^4 \rho_D I \tau_0 C_t}. \quad (9)$$

Перетворимо вираз (9) наступним чином: якщо повна концентрація усіх часток на поверхнях тертя дорівнює n_0 , а в деякому місці $z' = \alpha H$ ($\alpha < 1$), вона внаслідок зменшення досягає значення $n_{\min} \ll n_0$. Тоді, вважаючи, що:

$$\text{grad } n = \frac{\partial n}{\partial Z} \vec{k}_O = \text{const}, \text{ маємо:}$$

$$n_0 - n_{\min} \approx n_0 = \int_0^{\alpha H} \frac{\partial n}{\partial Z} dZ = \frac{\partial n}{\partial Z} \int_0^{\alpha H} dZ = |\text{grad } n| \alpha H. \quad (10)$$

Тоді, замінюючи у виразі (9) $H |\text{grad } n| = \frac{n_0}{\alpha}$, та враховуючи, що:

$C_t = \sqrt{G/\rho}$ остаточно отримаємо:

$$\sigma_{\tau} = \frac{3V_o n_0 kT}{20\alpha b^4 \rho_D I \tau_0} \sqrt{\frac{\rho}{G}}, \quad (11)$$

де ρ – щільність;

G – модуль зсуву.

З отриманого виразу випливає, що рівновагова тангенційна напруга пропорційна середньому об'єму v_0 часток зносу та повній концентрації часток на поверхні тертя і обернено пропорційна поверхневій щільності дислокацій на поверхні тертя.

Оскільки вираз (11) справедливий для усієї ділянки пластичної деформації, то він повинен бути справедливим і для випадку, коли тангенційна напруга σ_{τ} дорівнює межі текучості σ_T . Скориставшись тим, що σ_T і твердість пов'язані співвідношенням $HB = 3 \sigma_T$ нарешті отримаємо таку математичну модель інтенсивності зношування поверхонь трибосполучення:

$$I = \frac{9V_o n_0 kT}{20\alpha b^4 \rho_D HB} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \approx \frac{V_o n_0 kT}{2\alpha b^4 \rho_D \tau_0 HB} \sqrt{\frac{\rho}{G}}, \quad (12)$$

де V_o, n_0 – відповідно, середній об'єм та об'ємна концентрація часток зносу у трибосполученні;

k – стала Больцмана;

T – температура;

α – коефіцієнт пропорційності;

b – абсолютна величина вектора Бюргерса;

ρ_D – щільність дислокацій у приповерхневій зоні;

τ_0 – інтервал часу;

ρ – щільність;

HB – твердість поверхні;

G – модуль зсуву матеріалу поверхні.

З виразу (12) виходить, що величина інтенсивності зношування трибосполучення при нестационарному режимі прямо пропорційна середньому об'єму частинок зношування та їх об'ємній концентрації

у трибосполученні і його температурі, а також обернено пропорційна приповерхній щільності дислокацій та твердості поверхней.

Отримана математична модель справедлива для будь-яких трибосполучень, які виконують обертальний, поступовий та обертально-поступовий рух при нестационарних режимах.

Висновок

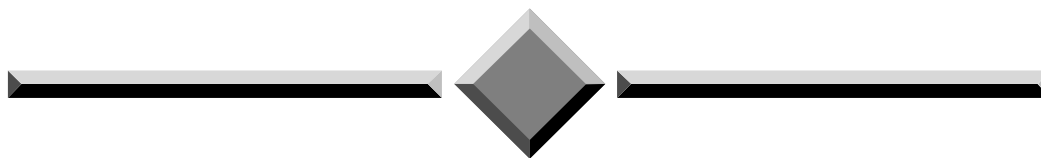
Трибосполучення можна розглядати як термодинамічну систему, до якій справедливі головні закони нерівновагової аеродинаміки.

Отримана математична модель, яка пов'язує інтенсивність зношування трибосполучень з головними характеристиками їх поверхонь тертя. Згідно з отриманою математичною моделлю інтенсивність зношування трибосполучень прямо пропорційна середньому об'єму та об'ємній концентрації частинок зносу у трибосполученні і його температурі, а також обернено пропорційна приповерхній щільності дислокацій та твердості поверхні.

Література

1. Костецкий Б.И. Классификация видов поверхностного разрушения и общие закономерности трения и изнашивания / Б.И. Костецкий // Вестник машиностроения. 1984. – № 11. – С. 10-12.
2. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б.И. Костецкий // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, №4. – С. 622-637.
3. Костецкий Б.И. Трение, смазка, износ / Б.И. Костецкий. – К. : Техника, 1970. – 396 с.
4. Березняков А.И. Комплексная структурная приспособляемость трибосопрежений в аспекте теоремы И. Пригожина / А.И. Берзняков, Е.С. Венцель // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, №1. – С. 194–202.
5. Венцель Е.С. Механизм улучшения противоизносных свойств масел при гидродинамическом диспергировании / Е.С. Венцель // Трение и износ. – 1992. – Т. XIII, №5. – С. 905-910.
6. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций ПМ / П.Гленсдорф, И.Пригожин. – Мир, 1973. – 280 с.
7. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред : пер. с англ / Дж.Мейз. – М. : Мир, 1974. – 319 с.
8. Хирт Дж. Теория дислокаций : пер. с англ. / Дж. Хирт, И. Лоте. – М. : Атомиздат, 1972. – 599 с.

Надійшла в редакцію 15.03.2018



Проблеми трибології
“Problems of Tribology”
E-mail: tribosensor@gmail.com

Ventsel Ye. S., Ewtushenko A.V., Shchukin O. V., Orel O.V. **Mathematical model of the intensity of wear of friction surfaces of tribo-couplings.**

It is known that during wear on friction surfaces, the so-called secondary structures are formed that have higher microhardness than subsurface layers. Secondary structures contribute to the reduction of wear of the tribosystem, that is, it can be argued that the latter are a thermodynamic system in which entropy is formed, that is, the basic laws of nonequilibrium thermodynamics are applied. But by this time there are no theoretical dependencies, which would indicate the relationship between the intensity of wear and the main characteristics of the friction surfaces, in particular, the density of dislocations.

In this paper, we present the sequence of obtaining and the corresponding mathematical model, the analysis of which showed that the intensity of the wear of tribo-coupling in a nonstationary mode is directly proportional to the average volume of wear particles and their volume concentration in tribobodies and its temperature, and also inversely proportional to near-surface- its density of dislocations and surface hardness.

The mathematical model, which relates the intensity of wear of tribo-combinations with head-them characteristics of their friction surfaces, is obtained. According to the obtained mathematical model, the intensity of wear of tribotic compounds is directly proportional to the average volume and volume concentration of wear particles in the tribo-combination and its temperature, and also inversely proportional to the surface density of the dislocations and the surface hardness.

Key words: tribo combination, intensity of wear, wear, layer, particle.

References

1. Kosteckij B.I. Klassifikacija vidov poverhnostnogo razrushenija i obshhie zakonomernosti trenija i iznashivaniya. Vestnik mashinostroenija. 1984. №11. S. 10-12.
2. Kosteckij B.I. O roli vtorichnyh struktur v formirovanii mehanizmov trenija, smazochno go dejstvija i iznashivaniya. Trenie i iznos. 1980. T.1, №4. S. 622-637.
3. Kosteckij B.I. Trenie, smazka, iznos. K. Tehnika, 1970. 396 s.
4. Bereznjakov A.I. Kompleksnaja strukturnaja prisposobljaemost' tribosoprjazhenij v aspekte teoremy I. Prigozhina. A.I. Berznjakov, E.S. Vencel'. Trenie i iznos. 1993. T.14, №1. S. 194-202.
5. Vencel' E.S. Mehanizm uluchshenija protivoznosnyh svojstv masel pri gidrodinamicheskom dispergirovanii. Trenie i iznos. 1992. T.HIII, №5. S. 905-910.
6. Glesdorf P. Termodinamicheskaja teorija struktury, ustojchivosti i fluktuacij PM. P.Glesdorf, I Prigozhin. Mir, 1973. 280 s.
7. Mezh Dzh. Teorija i zadachi mehaniki sploshnyh sred : per. s angl. Dzh.Mejz. M. Mir, 1974. 319 s.
8. Hirt Dzh. Teorija dislokacij : per. s angl. Dzh. Hirt, I. Lote. M. Atomizdat, 1972. 599 s.