

УДК 621.878

DOI: 10.15276/pidtt.2.70.2025.03

¹Щукін О. В., ¹Орел О. В., ²Зіборов К. А., ³Шуляк М. Л.¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет²НТУ «Дніпровська політехніка»³Сумський національний аграрний університет

ПРО ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ІНТЕНСИВНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ПІДШИПНИКА КОВЗАННЯ З МАТЕРІАЛЬНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ І МАСТИЛА ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ МЕХАНІЗМІВ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН

Анотація. Отримано рівняння для виробництва ентропії в процесі взаємодії молекулярних диполів мастильного матеріалу з диполями, зумовленими флуктуаціями поверхневої густини дислокацій. Показано, що інтенсивність зношування, зумовлена цією складовою виробництва ентропії, зменшується зі зростанням величини дипольного моменту молекул мастильного матеріалу.

Показано, що інтенсивність зношування підшипника ковзання колінчастого валу автогрейдера ДЗк-250 при пружно-пластичному контакті зростає зі збільшенням поверхневої щільності дислокацій при низьких її значеннях та зменшується зі збільшенням^У в діапазоні великих значень.

Ключові слова: моторне мастило, контакт, підшипник ковзання, ентропія, інтенсивність зношування, дислокація.

Постановка проблеми. Відомо, що тертя є дисипативним процесом, за якого відбуваються руйнування і структурні зміни шарів тіл, що труться. Вивчення цих процесів ускладнюється відсутністю інформації про фізико-хімічні властивості приповерхневих шарів, які безпосередньо піддаються високим швидкостям деформації, значним температурним градієнтам і силовим впливам, тому створення адекватної моделі тертя і зношування являє собою надзвичайно складне завдання. Тим складнішим є завдання дослідження процесів тертя і зношування для конкретних систем, що працюють у механічних і теплових умовах, які змінюються.

Розглянемо як таку систему підшипник ковзання, який встановлюється у двигуні автогрейдера ДЗк-250.

Мета роботи – встановити взаємозв'язок між величинами, що визначають вироблення ентропії в поверхневому шарі підшипника

ковзання колінчастого валу автогрейдера ДЗк-250, і його зносостійкістю.

Виклад основного матеріалу. У [1] показано, що величина інтенсивності зношування підшипника ковзання при пружному і пружнопластичному контакту визначається за виразом

$$I = C_1 \cdot \alpha_{\Gamma e} \cdot p_a \cdot \tau_0^{\frac{t'}{2}} \cdot \theta^{1-\frac{t'}{2}} \cdot \left(\frac{K' \cdot f}{\sigma_0'} \right), \quad (1)$$

де $C_1 = 0,1216^{\frac{2t'}{5}} 2,6^{\frac{5-t'}{5}} p_a$ – номінальний тиск; τ_0 – зсувний опір;
 $\theta = \frac{1-\mu^2}{E}$ – пружна постійна Кірхгофа; μ – коефіцієнт Пуассона; K' – коефіцієнт, величина якого близька до трьох; f – коефіцієнт тертя; t' – показник кривої фрикційної втоми; σ_0' – напруження втомного руйнування; $\alpha_{\Gamma e}$ – коефіцієнт гістерезисних втрат.

Остання величина визначається відношенням втрати (дисипації) енергії в одиниці об'єму за цикл (період) ΔW_σ до максимальної щільності пружної енергії W_0 системи [2].

$$\alpha_\Gamma = \frac{\Delta W_\sigma}{2\pi W_0}. \quad (2)$$

Під час пластичного деформування дисипація енергії описується дисипативною функцією

$$D = \sigma_{ij}^D e_{ij}, \quad (3)$$

де σ_{ij}^D – тензор дисипативних напружень; e_{ij} – тензор швидкостей пластичних деформацій.

Очевидно, що інтеграл від величини дисипативної функції за період τ дорівнює втраті енергії за цей проміжок часу, тобто

$$\Delta W_\sigma = \int_0^\tau D dt. \quad (4)$$

Величина максимальної щільності пружної енергії становить

$$W_0 = \frac{\sigma_0 \cdot \epsilon_0}{2}, \quad (5)$$

де σ_0 – максимальне напруження; ϵ_0 – максимальна відносна деформація.

Тоді відповідно до виразів (2), (4) і (5)

$$\alpha_\Gamma = \frac{\int_0^\tau D dt}{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \sigma_0}. \quad (6)$$

Оскільки дисипативна функція D і виробництво ентропії P_s пов'язані співвідношенням $D = P_s T$ (де T – температура), отримаємо вираз коефіцієнта гістерезисних втрат через виробництво ентропії:

$$\alpha_\Gamma = \frac{\int_0^\tau p_s \cdot T \cdot dt}{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \sigma_0}. \quad (7)$$

Розглянемо роль виробництва ентропії в процесах тертя і зношування стосовно підшипника ковзання.

Як показано в [3], під час руху дислокацій у поверхневому шарі створюються пластичні деформації, які зумовлюють виробництво ентропії

$$P_{sl} = \frac{10 \cdot \gamma \cdot b^4 \cdot \sigma_\tau^2}{3 \cdot k \cdot T^2}, \quad (8)$$

де σ_τ – тангенціальне напруження; b – величина вектора Бюргерса; γ – поверхнева густина дислокацій; k – постійна Больцмана.

Другою причиною виникнення виробництва ентропії в шарі тертя відповідно до [4] є загасання поверхневих акустичних хвиль (релеївських хвиль) на дислокаціях поверхневого шару. Як показано в [4], густина потоку релеївської хвилі на відстані z від поверхні визначається рівнянням

$$J_{vz} = 2\pi \cdot \sigma_s \cdot \sigma_\tau \cdot u_R \cdot n_s \cdot \exp(-2\alpha \cdot z) \quad (9)$$

де α – коефіцієнт поглинання; U_R – швидкість релеївської хвилі; σ_s – поперечний переріз розсіювання хвилі; n_s – концентрація поверхневих неоднорідностей.

В отриманому рівнянні поверхневе тангенціальне напруження σ_τ залежить від координати z , що відповідає численним експериментальним даним, узагальненим у [1], і може бути представлене у вигляді

$$\sigma_\tau = \sigma_{\tau 0} + \frac{d\sigma_\tau}{dz} \lambda_R \quad (10)$$

де $\sigma_{\tau 0}$ – тангенціальна напруга на поверхні тертя; λ_R – довжина релеївської хвилі, яка є інтервалом локалізації хвильового поля вздовж осі z .

Підставляючи (10) у (9) і з огляду на те, що за великих порівняно з довжиною хвилі перешкод поперечний переріз розсіювання σ_s хвилі пропорційний четвертому ступеню її частоти, представимо (9) у вигляді

$$j_{Vz} = 2\pi\zeta\omega^4 u_R n_s \sigma_{\tau 0} \lambda_R \left(\frac{1}{\lambda_R} + \frac{1}{\sigma_{\tau 0}} \frac{d\sigma_\tau}{dz} \right) \exp(-2\alpha z), \quad (11)$$

де ζ – коефіцієнт пропорційності між σ_s і ω^4 .

З отриманого виразу видно, що густина потоку енергії об'ємної хвилі, яка виникає під час розсіювання поверхневих хвиль Релея,

пропорційна градієнту величини тангенціального напруження $\frac{d\sigma_\tau}{dz}$, з якою природно пов'язати термодинамічну силу. Визначимо відповідну густині потоку об'ємних хвиль термодинамічну силу X_v , що відповідає густині потоку об'ємних хвиль, за допомогою співвідношення

$$X_{Vz} = \frac{1}{\sigma_{\tau 0}} \frac{d\sigma_\tau}{dz} \quad (12)$$

Тоді, враховуючи, що виробництво ентропії дорівнює добутку густини потоку на відповідну йому термодинамічну координату, знайдемо виробництво ентропії, зумовлене поглинанням пружних хвиль

дислокаціями (взявши до уваги малість другого члена в дужках рівняння (11) порівняно з першим):

$$p_{s2} = 2\pi\zeta \frac{\omega^4 u_R n_s}{T} \exp(-2\alpha z) \frac{d\sigma_\tau}{dz} \quad (13)$$

Будемо вважати, що середнє значення виробництва ентропії в шарі локалізації хвильового поля є близьким до його величини в точці $z = \lambda_R / 2$, тобто

$$\langle p_{s2} \rangle = 2\pi\zeta \frac{\omega^4 u_R n_s}{T} \exp(-\alpha \lambda_R) \frac{d\sigma_\tau}{dz} \quad (14)$$

Коефіцієнт поглинання α в останньому рівнянні зумовлений головним чином дислокаціями та відповідно до моделі дислокаційних струн Гранато-Люкке-Келера [5] має вигляд

$$\alpha = \frac{d_0 \gamma \Delta_0 \eta^2}{2\pi C_\tau \left[\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega} \right)^2 + d_0^2 \right]} \quad (15)$$

де ω_0 – власна частота коливань дислокаційних струн; Δ_0 – постійна порядку одиниці; d_0 – коефіцієнт загасання дислокаційних струн; G – модуль зсуву; C_τ – швидкість поширення поперечних акустичних хвиль (поперечна швидкість звуку); $\eta^2 \approx 2C_\tau^2$.

При підстановці цього виразу в (14) з урахуванням значення η^2 , а також того, що довжина релеєвської хвилі $\lambda_R = \frac{2\pi u_R}{\omega}$ і швидкість u_R мало відрізняється від швидкості поздовжньої хвилі C_t ($u_R \approx 0,9C_t$), отримуємо

$$\langle p_{s2} \rangle = 2\pi\zeta \frac{\omega^4 u_R n_s}{T} \exp \left\{ - \frac{2d_0 \gamma \Delta_0 C_\tau C_t}{\left[\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega} \right)^2 + d_0^2 \right] \omega} \right\} \frac{d\sigma_\tau}{dz} \quad (16)$$

Підставляючи вирази (8) і (16) для виробництва ентропії в рівняння (1) і (7) і взявши до уваги, що в стаціонарному режимі жодна з величин, які стоять під знаком інтеграла, не залежить від часу, а

$\int_0^{\tau} dt = \frac{2\pi}{\omega}$, одержимо таке рівняння для інтенсивності зношування підшипника ковзання за умови пружного контакту:

$$I = \frac{2C_1 p_a \tau_0^{\frac{1}{2}} \Theta^{1-\frac{1}{2}}}{e_0 \sigma_0} \left(\frac{k' f}{\sigma'_0} \right)^{t'} \left[\frac{10\gamma b^4 \sigma_\tau^2 C_t}{3kT\omega} + 2\pi\zeta\omega^3 u_R n_s \exp \left\{ - \frac{2d_0 \gamma \Delta_0 C_\tau C_t}{\left[\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega} \right)^2 + d_0^2 \right] \omega} \right\} \frac{d\sigma_\tau}{dz} \right] \quad (17)$$

З отриманого рівняння видно, що в умовах пружнопластичного контакту інтенсивність зношування підшипника ковзання зростає зі збільшенням поверхневої густини дислокацій γ за малих її значень та зменшується в області великих значень γ . При цьому слід мати на увазі, що перший член у рівнянні (17) зумовлений рухом дислокацій, який можливий за їхньої малої густини, що можливе лише на початкових стадіях припрацювання, тоді як сталий режим характеризується більшими значеннями γ і закріпленням дислокацій, у зв'язку з чим цей член рівняння обертається в нуль.

Однак пружне деформування є не єдиним і аж ніяк не домінуючим фактором, що визначає процес зношування в підшипнику ковзання. Згідно з даними робіт [6] і [7] інтенсивність зношування значною мірою залежить і від процесів взаємодії молекул мастила з поверхнею тертя. Молекулярні диполі, що входять до складу таких мастил і знаходяться в зазорі підшипника ковзання, піддаються впливу електричного поля, створеного флуктуаціями дислокацій, а також взаємодіють з поверхнею тертя за допомогою сил електростатичного зображення.

$$\langle p_{s3} \rangle = \sqrt{\frac{2}{3}} K^{3/2} \frac{n_p p_0^{7/6}}{T^{2/3} \ell_0^{6/5} \sqrt{m_p}} \left[\frac{p_0 + 7,7eL^2 \sqrt{\gamma(\xi-1)}}{1 + \frac{n_p p_0^2}{3\varepsilon_0 kT}} \right]^{7/6} \quad (18)$$

У рамках моделі взаємодії молекулярних диполів із флуктуаційними дислокаційними моментами фізичний механізм протизношувальної дії мастил і присадок полягає в адсорбції молекул мастила поверхнею вузла тертя та блокуванні молекулами мастила ядер

дислокацій, що призводить до зменшення електричних полів, які вони створюють, щонайменше до квадрупольного наближення і зменшення взаємодії між поверхнями тертя. На підставі аналізу даних, наведених у [6] і [7], можна одержати такий вираз для середньої величини вироблення ентропії, зумовленої взаємодією молекулярних диполів з дислокаціями, в об'ємі поверхневого шару тертя:

Визначимо тепер повне виробництво ентропії в поверхневому шарі тертя, що містить у собі деформований шар і шар адсорбованих речовин, підсумовуючи доданки P_{s1} , $\langle P_{s2} \rangle$, $\langle P_{s3} \rangle$, що визначаються рівняннями (8), (14) і (18), та з огляду на малу вагу доданка P_{s1} за великих значень γ

$$P_s = 2\pi\zeta \frac{\omega^4 u_R n_s}{T} \exp \left\{ - \frac{2d_0 \gamma \Delta_0 C_\tau C_t}{\left[\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega} \right)^2 + d_0^2 \right]} \right\} \left\{ \frac{d\sigma_\tau}{dz} + \frac{n_p}{T^{2/3} \sqrt{m_p}} \left[\frac{p_0 + 7,7eL^2 \sqrt{\gamma(\xi-1)}}{1 + \frac{n_p p_0^2}{3\epsilon_0 kT}} \right]^{7/6} \right\} \quad (19)$$

У роботі [8] показано, що виробництво ентропії P_s пов'язане з питомою силою тертя σ_{fr} співвідношенням

$$P_s = \frac{\sigma_{fr} u}{hT} \quad (20)$$

де u – відносна швидкість переміщення поверхонь трибосполучення; h – товщина поверхневого шару тертя.

Хоча між силою тертя та інтенсивністю зношування немає однозначної залежності, у роботі [9] між ними встановлено кореляційний зв'язок, використовуючи який, з урахуванням рівняння (20), можна отримати таке рівняння для інтенсивності зношування:

$$I = n_s R_\delta \sqrt{\Delta A_\tau} \left[I + \left[\frac{2\pi\zeta \omega^4 C_t n_s}{T} \exp \left\{ - \frac{2d_0 \gamma \Delta_0 C_\tau C_t}{\left[\left(\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\omega} \right)^2 + d_0^2 \right]} \right\} \frac{d\sigma_\tau}{dz} + \frac{n_p}{T^{2/3} \sqrt{m_p}} \left[\frac{7,7eL^2 \sqrt{\gamma(\xi-1)}}{1 + \frac{n_p p_0^2}{3\epsilon_0 kT}} \right]^{7/6} \right] \frac{2\pi h}{\langle \sigma_\tau \rangle \Lambda \omega} - \frac{\sigma_R}{\langle \sigma_\tau \rangle} \right], \quad (21)$$

де n_s – поверхнева щільність плям контакту; R_δ – середнє відхилення профілю; ΔA_τ – площа одиничного контакту; σ_R – реальна

межа міцності; $\langle \sigma_\tau \rangle$ – середня величина тангенціальних напружень; m_p – маса молекулярного диполя.

Проаналізуємо отримані результати. Насамперед зазначимо, що висновки, отримані на підставі аналізу вищеописаних моделей, мають повне відношення до умов роботи підшипників ковзання, тобто вони відносяться до перехідного між гідродинамічним і граничним режимами тертя, коли товщина змащувального шару досить велика, щоб можна було розглядати рух у ньому молекулярних диполів мастила. Як видно з рівняння (21), інтенсивність зношування найсильніше залежить від поверхневої концентрації неоднорідностей матеріалу, розміри яких перевищують довжину релеєвої хвилі (до них не відносяться дислокації, довжина ліній яких зазвичай менша за довжину хвилі), площі плям контакту та поверхневої щільності дислокацій. Вплив густини дислокацій на інтенсивність зношування проявляється у зменшенні інтенсивності зношування зі зростанням густини дислокацій, оскільки експоненціальне зменшення значно перевершує зростання за законом $\gamma^{7/12}$. Аналогічна залежність спостерігається і в моделі зношування, яка описується рівнянням (18). Фізична причина такого зростання пов'язана, як відомо, зі зміцненням кристала при зростанні щільності дислокацій. Залежність інтенсивності зношування від градієнта тангенціального напруження σ_τ відповідає правилу градієнта І.В. Крагельського [1], відповідно до якого в трибовузлі має дотримуватися умова $\text{grad } \sigma_\tau > 0$. Ця умова впливає з рівняння (16), що входить до структури рівняння (21), як наслідок невід'ємного значення виробництва ентропії. З рівняння (21) впливає зменшення інтенсивності зношування зі зростанням величини дипольного моменту молекул мастильної речовини, яке за своєю природою пов'язане з блокуванням молекулярними диполями флуктуаційних дислокаційних диполів.

Висновки. 1. Виробництво ентропії в умовах фрикційного контакту зумовлене рухом дислокацій (за їхньої порівняно невеликої концентрації порядку $10^{14} - 10^{15} \text{ м}^{-2}$) і загасанням пружних хвиль на дислокаціях, причому другий механізм відіграє істотнішу роль у сталому режимі тертя. З умови невід'ємності виробництва ентропії, зумовленої останнім чинником, впливає необхідність наявності позитивного градієнта тангенціального напруження в шарі тертя, що збігається з відомим «правилом градієнта» І.В. Крагельського.

2. На підставі аналізу залежності виробництва ентропії від матеріальних і триботехнічних параметрів встановлено, що інтенсивність спрацювання підшипника ковзання за пружного та пружно-пластичного контакту зростає зі збільшенням поверхневої

густини дислокацій γ за малих її значень (порядку $10^{14} - 10^{15} \text{ м}^{-2}$) та зростає зі зростанням γ в царині великих значень цієї величини.

3. Отримано рівняння для виробництва ентропії в процесі взаємодії молекулярних диполів мастильного матеріалу з диполями, зумовленими флуктуаціями поверхневої густини дислокацій. Показано, що інтенсивність зношування, зумовлена цією складовою виробництва ентропії, зменшується зі зростанням величини дипольного моменту молекул мастильного матеріалу.

Подальші дослідження інтенсивності зношування підшипників ковзання доцільно проводити, визначаючи інші складові виробництва ентропії, що впливають на процеси тертя і зношування підшипників ковзання колінчастого валу автогрейдера ДЗк-250.

Список використаної літератури

1. Крагельський І.В. Узли тертя машин : довідник / І.В. Крагельський, М.М. Міхін – М.: Машинобудування, 1984. – 280 с.
2. Венцель Є.С. Електропровідність і механічна міцність мастильної плівки трибосполучень / Є.С. Венцель, В.А. Малащенко, О.В. Орел, О.В. Щукін // Вісник ХНАДУ. – 2020. – Вип. 88. – С. 112–115.
3. The equation of the entropy production in a tribounit / Ventsel Ye., Shchukin O., Orel O., Saienko N. // Problems of Tribology. – 2020. – V. 25, No 2/96. – Pp.12-18.
4. Березняков А. Про взаємозв'язок між акустичними процесами та матеріальними характеристиками поверхні трибо-з'єднання // Трибология Letters, 8 (2000). – С. 229–232
5. Technical research and development : collective monograph / Shchukin O., – etc. – International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2021. 616 p.
6. Венцель Є.С. Підвищення якості мастил, палив і трибовузлів машин : монографія / Є.С. Венцель, О.В. Орел, О.В. Щукін. – Х.: ФОП Бровін О.В., 2017. – 264 с.
7. Dependence of Wear Intensity on Parameters of Tribo Units / Ye. Ventsel, O. Orel, O. Shchukin, N. Saienko, A. Kravets' // Tribology in Industry. – 2018. – Vol. 40, № 2. – P. 195–202. – DOI: 10.24874/ti.40.02.03.
8. Березняков О.І. Про вплив полярних молекул мастильного матеріалу на силу тертя // Тертя і знос.–2001. – Т.22, №5. – С.513 – 519.
9. Березняков О.І. Про кореляцію між інтенсивністю зношування та силою тертя // Тертя і знос. –2001. – Т.22, №6. – С.619 – 624.

ON THE INTERRELATION OF SLIDING BEARING WEAR INTENSITY WITH MATERIAL CHARACTERISTICS OF FRICTION AND LUBRICATION SURFACES OF HEAVILY LOADED MECHANISMS OF CONSTRUCTION MACHINES

Shchukin¹ O. V., Orel¹ O. V., Ziborov² K. A., Shulyak³ M. L.

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University*

²*Dnipro University of Technology*

³*Sumy National Agrarian University*

Abstract. *Based on the analysis of the dependence of entropy production on material and tribotechnical parameters, it is established that the wear rate of a sliding bearing in elastic and elastoplastic contact increases with the increase of the surface density of dislocations at low values and decreases with the increase in the region of large values of this value. The equation for the production of entropy in the process of interaction of molecular dipoles of the lubricant with dipoles caused by fluctuations in the surface density of dislocations is obtained. It is shown that the wear intensity caused by this component of entropy production decreases with an increase in the dipole moment of lubricant molecules.*

Based on the analysis of the dependence of entropy production on material parameters, it is established that the intensity of bearing wear increases with the growth of the surface of dislocation density. An expression for entropy production in the case of fluctuations in the dislocation density surface is obtained.

It is shown that the wear intensity of the crankshaft sliding bearing of the motor grader DZk-250 in elastic-plastic contact increases with the increase of the surface density of dislocations at low values and decreases with an increase in the range of large values. The equation for the formation of entropy in the process of interaction of molecular dipoles of the lubricant with dipoles caused by fluctuations in the surface density of dislocations is obtained.

Keywords: *motor oil, contact, sliding bearing, entropy, wear intensity, dislocation.*