

УДК 621.891

**Андрій Гупка, к.т.н., доц.; Олег Цьонь, к.т.н., доц.; Олег Ляшук, д.т.н., проф.;
Тетяна Пиндус; Степан Остапчук**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

Анотація. У роботі розглянуто закономірності структурно-енергетичної пристосовуваності трибоспрямижень у процесах тертя та зношування. Запропоновано критерії оцінювання стану вторинних структур на основі параметрів контактного електроопору. Досліджено процеси переходу від режиму нормального зношування до об'ємної деструкції поверхневих шарів. Встановлено кореляцію між параметрами контактного електроопору, інтенсивністю зношування та коефіцієнтом тертя.

Ключові слова: трибоспрямиження, контактний електроопір, вторинні структури, структурно-енергетична пристосовуваність, зношування, руйнування.

Andrii Gypka, PhD, Associate Professor; Oleh Tson, PhD, Associate Professor; Oleh Liashyk, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tetiana Pyndus, Assistant; Stepan Ostapchuk, Postgraduate Student.

STRUCTURAL-ENERGY CRITERIA FOR EVALUATING FRICTION AND WEAR PROCESSES

Abstract. The paper considers the regularities of structural-energy adaptability of tribosystems during friction and wear processes. Criteria for evaluating the state of secondary structures based on contact electrical resistance parameters are proposed. The transition processes from normal wear to volumetric destruction of surface layers are investigated. Correlations between contact electrical resistance, wear intensity, and friction coefficient are established.

Keywords: tribosystems, contact electrical resistance, secondary structures, structural-energy adaptability, wear, destruction.

На сучасному етапі розвитку трибології актуальним є дослідження процесів, що відбуваються у зоні фрикційного контакту, а також розроблення матеріалів і конструкцій із підвищеною зносостійкістю. Одним із ключових напрямів є вивчення феномену самоорганізації матеріалів, який у режимі граничного тертя проявляється як структурно-енергетична пристосовуваність (СЕП). Вона супроводжується утворенням вторинних структур (ВС), що запобігають прямому контакту поверхонь, зменшують інтенсивність зношування та перешкоджають розвитку об'ємної деструкції [1].

Встановлено, що в діапазоні СЕП процеси утворення та руйнування вторинних структур перебувають у динамічній рівновазі, що забезпечує мінімальні значення інтенсивності зношування (I) та коефіцієнта тертя (μ). Однак традиційні методи оцінювання зношування потребують значного часу досліджень і характеризуються високим розсіюванням результатів. Тому важливим є розроблення експресних методів контролю процесів тертя та руйнування поверхневих шарів.

Одним із найбільш чутливих методів є визначення контактного електроопору (КЕО) пари тертя. Метод КЕО дозволяє у реальному часі контролювати інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя та кінетику структурних змін у зоні контакту. Високі значення КЕО відповідають формуванню оптимальних вторинних структур, що характеризуються підвищеною зносостійкістю та стабільністю [2].

Експериментальні дослідження проводилися на серійній та спеціально розробленій машині тертя за схемою контакту «диск – торець пальця» при швидкостях ковзання $V = 0,12\text{--}11$ м/с та питомих навантажень $P = 0,3\text{--}35$ МПа. Конструкція вузла тертя забезпечувала мінімізацію динамічних навантажень у перехідних режимах, а автоматизована система змащування дозволяла використовувати рідкі та пластичні мастильні матеріали.

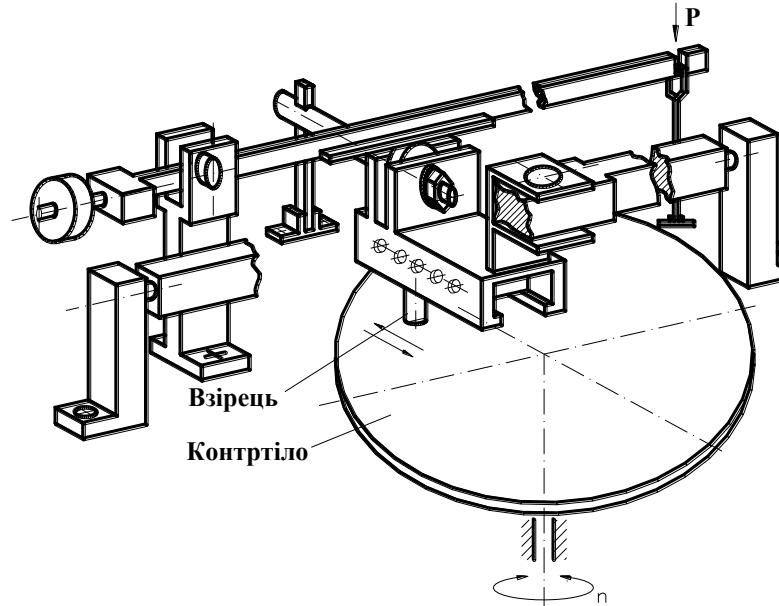


Рисунок 1. Схема вузла тертя та механізму навантаження машини тертя

Для досліджень використовували зразки зі сталі 45 (42–45 HRC, $R_a = 0,125$ мкм) та бронзи ОЦС 5-5-5 діаметром 6 мм і довжиною 25 мм. Як мастильні матеріали застосовували вазелінове масло та вазелінове масло з додаванням 2 % присадки Англамол 99.

Інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя визначали традиційними методами, а контактний електроопір (КЕО) — за спеціально розробленою методикою. Структуру поверхонь тертя та вторинних структур досліджували за допомогою електронного мікроскопа CamScan 44DV з приставкою Linc 860.

Результати досліджень показали існування діапазону навантажень, у межах якого інтенсивність зношування (I) та коефіцієнт тертя (μ) мають мінімальні й стабільні значення, а КЕО — максимальні. Це свідчить про динамічну рівновагу процесів утворення та руйнування вторинних структур.

Встановлено кореляцію між параметрами I , μ , КЕО та типом вторинних структур, що дозволило експериментально визначити діапазон структурно-енергетичної пристосовуваності (СЕР), який відповідає області максимальних і стабільних значень КЕО.

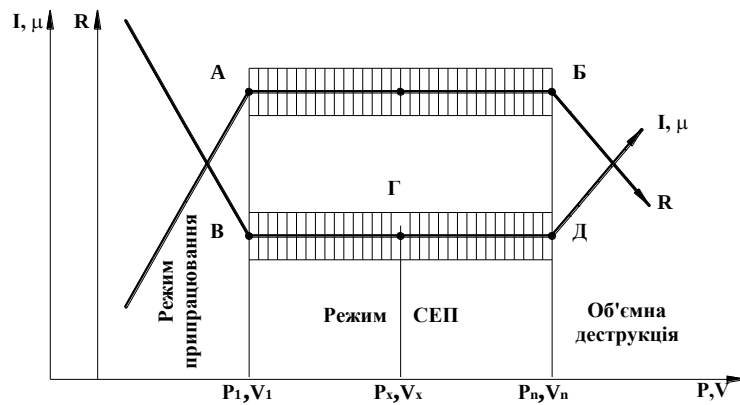


Рисунок 2. Спосіб визначення діапазону та рівня нормального тертя та зношування.

В діапазоні СЕП властивості ВС змінюються в широких границях під впливом зовнішніх параметрів, що свідчить про можливості їх внутрішньої перебудови. Для оцінки структурно-енергетичного стану ВС запропоновано наступні критерії: $\frac{\Delta R}{R_{вих}}$, Δt (рис. 3).

де ΔR - величина падіння КЕО після кожного етапу навантаження, (ΔP , ΔV),

- вихідне (стабільне) значення КЕО,

Δt - час стабілізації КЕО після кожного етапу навантаження.

В діапазоні СЕП критерії $\frac{\Delta R}{R_{вих}}$, Δt стабільні і мінімальні (оптимальні властивості ВС), в діапазоні припрацювання і об'ємної деструкції значення даних параметрів максимальні. Після кожного етапу навантаження (ΔP , ΔV) відбувається падіння вихідного значення КЕО ($R_{вих}$) на певну величину ΔR з подальшою його стабілізацією на іншому рівні ($R_{ст}$) через певний період часу (Δt).

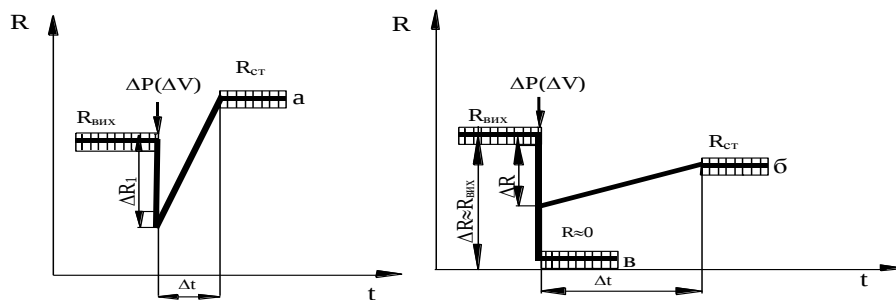


Рисунок 3. Залежність параметрів $\frac{\Delta R}{R_{вих}}$, Δt від режимів тертя та зношування: а – режим припрацювання, б – режим структурно-енергетичної пристосовуваності (СЕП), в – режим об'ємної деструкції.

Дослідження, спрямовані на вибір ефективних мастильних матеріалів у поєднанні з конструктивними та технологічними рішеннями, залишаються актуальними, оскільки вони спрямовані на вирішення проблеми підвищення експлуатаційної надійності транспортних засобів шляхом оптимізації трибологічної ефективності важконавантажених вузлів деталей, систем і агрегатів.

Для досліджуваних пар тертя визначено такі параметри: режим СЕП -,; режим припрацювання -,; режим об'ємної деструкції $\frac{\Delta R}{R_{\text{вих}}} \approx 1$, Існування діапазону СЕП зумовлено наявністю оптимальних ВС завдяки динамічній рівновазі процесів їх утворення (V_v) та руйнування (V_d) (рис. 4). В режимі СЕП $V_v = (t_v =)$, в режимі об'ємної деструкції $V_v < (t_v >)$.

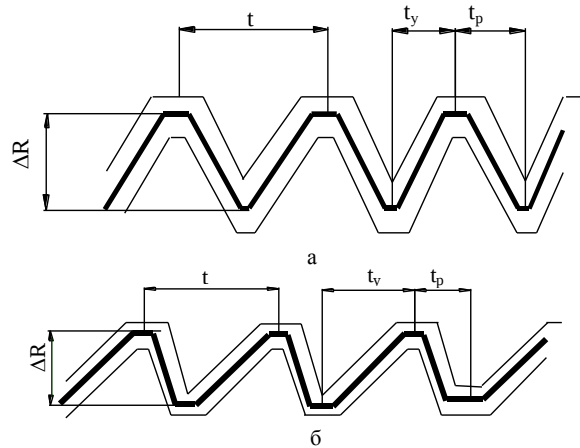


Рисунок 4. Циклограми змін параметрів вторинних структур (ВС) при різних режимах тертя та зношування

а – режим структурно-енергетичної пристосовуваності (СЕП); б – режим об'ємної деструкції; t_v - час утворення ВС; t_d - час руйнування ВС; t - час існування новоутворених ВС.

Як показали проведені дослідження в режимі СЕП параметр ΔR являється залежним від товщини (h) та площі (S) ВС:

$$\Delta R = f(h, S(BC)).$$

Швидкості процесів утворення та руйнування ВС:

$$V_v =; \frac{h_{BC}}{t_v} = \frac{h_{BC}}{t_p} - \text{режим СЕП};$$

$$V_v <; \frac{h_{BC}}{t_v} < \frac{h_{BC}}{t_p} - \text{режим об'ємної деструкції}.$$

Запропоновані критерії дають можливість здійснювати безперервний контроль процесів тертя та зношування, а також досліджувати кінетику утворення, трансформації й руйнування вторинних структур. Їх використання у поєднанні з металографічним аналізом поверхонь тертя дозволяє більш повно розкрити фізичні закономірності трибологічних взаємодій у зоні контакту.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили, що керування трибологічною ефективністю важконавантажених спряжень деталей транспортних засобів є складним багатофакторним завданням. Розроблення сучасних методів дослідження та контролю процесів тертя і зношування створює передумови для суттєвого підвищення експлуатаційної надійності вузлів, механізмів та агрегатів транспортної техніки.

Експериментально встановлено, що в межах діапазону структурно-енергетичної пристосовуваності (СЕП) вторинні структури характеризуються оптимальними фізико-механічними властивостями. Такий стан забезпечується динамічною рівновагою між

процесами формування та руйнування вторинних структур, що супроводжується мінімальними значеннями інтенсивності зношування (I) та коефіцієнта тертя (μ) при одночасному максимальному значенні контактного електроопору (КЕО).

Запропонований метод визначення контактного електроопору показав високу чутливість та ефективність під час контролю процесів тертя й зношування. Метод дозволяє оцінювати кінетику формування, зміни та руйнування вторинних структур у режимі реального часу, що має важливе значення для виявлення критичних моментів переходу від нормального режиму зношування до процесів пошкоджуваності та руйнування поверхневих шарів.

Розроблені критерії оцінювання стану вторинних структур, зокрема стабільність параметрів КЕО та кінетика структурних змін, можуть бути використані для організації безперервного моніторингу стану поверхонь тертя. Це створює основу для розроблення систем адаптивного керування процесами тертя і зношування з метою підвищення ефективності функціонування вузлів транспортних засобів.

Подальше вдосконалення методів дослідження, зокрема металографічного аналізу та комп'ютерного моделювання, дозволить глибше дослідити фізичну природу трибологічних процесів. Це відкриває перспективи для оптимізації конструкцій пар тертя, вибору матеріалів та створення високоефективних мастильних середовищ із покращеними експлуатаційними властивостями.

Таким чином, запропоновані методичні підходи та отримані результати досліджень можуть стати основою для розроблення нових рекомендацій і стандартів у галузі триботехніки, спрямованих на підвищення надійності, довговічності та ефективності транспортних систем і машин.

Перелік посилань

1. Aulin, V., Gypka, A., Liashuk, O., Stukhlyak, P., & Hrynkiv, A. (2024). A comprehensive method of researching the tribological efficiency of couplings of parts of nodes, systems and aggregates of cars. *Problems of Tribology*, 29(1/111), 75–83. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-75-83>
2. Gypka A. The tribology of the car: Research methodology and evaluation criteria / O. Lyashuk, Y. Pyndus, V. Gupka, M. Sipravska, M. Stashkiv // ICCPT 2019: Current Problems of Transport : Proceedings of the 1st International Scientific Conference, May 28-29, 2019, Ternopil, Ukraine. R. - 231-237. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3387620>