

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(95).16557

В. М. БОРОДІЙ, О. О. МІКОСЯНЧИК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, С. М. ЗАНЬКО,  
І. В. МАЛЯРЧУК

*Національний авіаційний університет, Україна*

## ОЦІНКА ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ САМОФЛЮСУЮЧОГО ПОКРИТТЯ ЗА СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

*В роботі представлено спосіб оцінки питомої роботи тертя в триботехнічному контакті для прискорених лабораторних випробувань при дослідженні конструкційних матеріалів. Визначено, що шляхом підбору оптимальної товщини покриття на основі нікелю, одержаного методом газополуменевого напилення самофлюсуючого гранульованого порошку ПГ–АН9, можна одержати покриття, які характеризуються високою зносостійкістю в умовах кочення з проковзуванням. Загальний лінійний знос випереджаючої та відстаючої поверхонь в умовах кочення з проковзуванням становить 9,9 : 3,54 : 2,12 мкм відповідно для покриття товщиною 0,3, 0,7 та 1,2 мм. Встановлено, що збільшення товщини самофлюсуючого покриття до 1,2 мм обумовлює підвищення мікротвердості поверхневих шарів, зростання антифрикційних властивостей та зниження інтенсивності зношування. Самофлюсуюче покриття проявляє високу несучу здатність в діапазоні контактного навантаження 150...450 МПа, що обумовлено наявністю наноструктурних дисперсних частинок в матриці.*

**Ключові слова:** *питома робота тертя, самофлюсуюче покриття, мікротвердість, кочення з проковзуванням.*

**Вступ та постановка задач дослідження.** Можливість оцінки довговічності машин та механізмів пов'язана з необхідністю досить точної ідентифікації домінуючих видів зношування та пошкоджень технічних систем. Це є основою для моделювання процесів зношування та прогнозування ресурсу деталей, які враховують такі чинники, як навантаження, кінематику контакту, енергетичні характеристики та закономірності зміни трибологічних параметрів в процесі експлуатації технічних систем. В якості критеріїв зносостійкості повинні розглядатися структурно-енергетичні характеристики матеріалів, розкриття яких можливе на основі аналізу термодинамічних закономірностей пошкоджуваності матеріалів при оцінці їх довговічності.

Сучасна трибологія розглядає пружно-пластичну деформацію поверхонь тертя як основний механізм перетворення та розсіювання енергії при терті. Одним з найбільш перспективних підходів до прогнозування зносостійкості пар тертя є аналіз швидкості зношування трибовузла з позицій оцінки кінетики зміни таких структурно-енергетичних характеристик поверхневих шарів матеріалів, як енергія активації процесів атомно-молекулярних перегрупувань, дисипативна структура, щільність потоку ентропії, глибина проникнення пластичної деформації тощо. При цьому критерієм зносостійкості та довговічності матеріалів може бути усереднена енергетична характеристика потужності деформації.

Математичний опис характеристик тертя має основне значення для аналітичних і чисельних рішень і часто залежить від якості математичної моделі та її здатності виражати реальні властивості механічної структури. Вплив навантажувально-швидкісних та температурних чинників на процеси тертя та зношування трибосистем в процесі експлуатації конструкційних матеріалів найбільш суттєво проявляється при

граничному режимі мащення, при терті кочення з проковзуванням, при нестационарних умовах роботи елементів трибоспряження. При зміні режимів експлуатації стрибкоподібно змінюються структурно-енергетичні характеристики поверхневих шарів матеріалів, що може призвести до інтенсифікації зношування.

Дослідження енергобалансу трибосистеми та встановлення його кореляційного зв'язку зі швидкістю зношування контактних поверхонь в реальних умовах тертя пов'язане з серйозними труднощами і, в першу чергу, необхідністю забезпечення складного процесу моніторингу трибосистем в експлуатаційних умовах або проведення експерименту, що дозволяє отримувати достовірні результати. Актуальним напрямком вирішення цього питання є розробка методик оцінки енергетичних характеристик трибоконтакту та встановлення закономірностей структурно-енергетичної еволюції поверхонь тертя при структурній пристосованості елементів трибоспряження, на основі яких можливо розробляти експлуатаційні критерії зносостійкості та прогнозувати довговічність трибосистем.

**Аналіз останніх публікацій з даної проблеми.** У процесі еволюції трибосистем відбувається обмін енергією та речовиною з навколишнім середовищем, що призводить до ефектів самоорганізації дисипативних структур внаслідок структурної пристосованості контактних поверхонь. При цьому деформоване тверде тіло розглядається як дисипативна система, що характеризується спонтанною перебудовою дислокаційних структур у процесі пластичної деформації. Для визначення характеру структурних перетворень в поверхневих та приповерхневих шарах елементів трибоспряжень необхідно одночасно розглядати енергетичну природу тертя (пластичної деформації) з використанням структурно-енергетичних та молекулярно-кінетичних уявлень.

З рівнянь енергетичного балансу тертя випливає, що еволюція трибосистеми (контакту) має адаптивно-дисипативний характер [1]. Коефіцієнт тертя при цьому має енергетичну інтерпретацію. Зазначено, що в процесі еволюції фрикційного контакту формується елементарна трибосистема як енергетичний трансформатор при терті. При найбільш повній еволюції фрикційного контакту (елементарної трибосистеми) утворюється унікальна наноструктура (трибопідсистема); основою цієї наноструктури є механічний (нано) квант [2]. Експлуатація зубчастих коліс та інших важконавантажених трибосистем піддається моделі наноквантового демпфування, коли стандартом контактної структури та зносу є один механічний квант.

В роботі [3] встановлені істотні структурні змін поверхонь тертя внаслідок протікання трибологічних процесів, що впливає на зміну механічних характеристик. В результаті зростання сили тертя пропорційно збільшується робота сили тертя, що йде на активацію процесів відновлення та руйнування поверхні. Зокрема, це обумовлює реалізацію конкуруючих процесів у поверхневих шарах металу - оксидні плівки у фрикційному контакті або стираються під дією тертя, або відновлюються, активуючись силами тертя під дією спрямованого електростатичного поля.

За параметр пошкоджуваності та критерій руйнування запропоновано приймати щільність внутрішньої енергії, накопиченої в деформованому елементі тіла [4]. Накопичена внутрішня енергія визначається як сума двох складових - потенційної (прихованої) і кінетичної (теплової). Потенційна складова внутрішньої енергії пов'язана з пошкоджуваністю матеріалу, а кінетична складова обумовлює інтенсифікацію процесів термічного знеміцнення матеріалу контактних поверхонь, отже, в цілому, внутрішня енергія є небезпечною та відповідальною за руйнування.

В роботі [5] з метою виявлення різних режимів мащення трибосистем були проведені експерименти з застосуванням установки Bruker UMT-3. Результати експерименту показують, що енергетичні характеристики діапазону частот вібраційних сигналів тертя відрізняються при різних режимах мащення. На основі цього в роботі запропоновано метод розпізнавання режиму мащення з комплексною емпіричною модовою декомпозицією, в якому вібраційні сигнали розбиті на скінченну кількість стаціонарних функцій внутрішньої моди. На основі експериментальних даних визначено шість основних компонентів, що містять основну інформацію про тертя, та є основою для розрахунку відношення енергії та побудови вектора ознак. Результати показують, що енергія діапазону частот сигналів тертя вібрації є ефективною ознакою для ідентифікації різних режимів мащення, при цьому якщо реалізація змішаного режиму мащення ідентифікується на сто відсотків, то існують складнощі між ідентифікацією граничного та сухого режимів мащення.

Важливим експлуатаційним параметром трибосистеми є енергонавантаженість фрикційного контакту, яку можна оцінити за кінетикою зміни питомої роботи тертя [6]. Даний параметр залежить від типу мастильного матеріалу, матеріалу контактних поверхонь, умов роботи трибосистеми. Одержані експериментальні значення питомої роботи тертя в діапазоні 1186...6328 Дж/мм<sup>2</sup> характеризують нормальні умови роботи трибосистеми – забезпечується реалізація гідродинамічного режиму мащення, а метал характеризується високою зносостійкістю. Нестабільність питомої роботи тертя, розширення діапазону коливань даного параметру в межах 1300...33430 Дж/мм<sup>2</sup>, призводить до інтенсифікації деструкційних процесів в приповерхневих шарах металу та зниженню його зносостійкості, в середньому, в 1,35 разів.

Важливим напрямом при оцінці енергетичних параметрів трибоспряження є розробка вимірювального устаткування, методології вимірювання, простоти застосовуваної вимірювальної системи та ефективних методів оцінки вимірюваних величин. Сучасні розробки спрямовані на модернізацію засобів вимірювань з точки зору збільшення точності, отримання менших помилок та відхилень, тим самим зменшуючи похибку вимірювання [7, 8]. Зокрема, запропонований в роботі [9] метод визначення кінетичного коефіцієнта тертя і енергії, що витрачається на тертя, менш технічно складний через простоту вимірювальної системи, що застосовується. Метод може бути ефективно використаний у трибологічних експериментах при високих температурах у вакуумі, терті в контрольованому газі, мастильних середовищах та інших умовах тертя. Однак, за даним методом неможливо визначити та ідентифікувати внутрішню енергію пошкоджуваності матеріалу контактних поверхонь.

Відомий спосіб визначення питомої роботи тертя при нестационарних режимах роботи за цикл в умовах пусків – зупинок [10]. Згідно з цим способом, питома робота тертя визначається на етапі від страгування контактних поверхонь до точки стабілізації моменту тертя, який вимірюється тензометричним методом. Розрахунок роботи тертя проводять на ЕОМ шляхом інтегрального обчислення площі, обмеженої кривою моменту тертя та віссю абсцис, яка відповідає куту повороту контактних поверхонь ( $\alpha$ ), в межах страгування з місця при  $\alpha=0$  і до утворення несучого змащувального шару при  $\alpha_{\beta}$ . Питому роботу тертя визначають як різницю роботи тертя та кінетичної енергії обертальних деталей, віднесену до номінальної площі контакту по Герцу. До недоліків зазначеного методу визначення

питомої роботи тертя слід віднести: для визначення моменту тертя використовується напівмостова схема з'єднання тензометричних датчиків; не розраховується кінетика зміни питомої роботи тертя в довільний час напрацювання, а представлено тільки усереднене її значення за цикл, за яким неможливо оцінити енергетичну напруженість контакту в довільно обраний час тривалості циклу; застосування даного методу можливо лише для пар тертя, що працюють в умовах кочення з проковзуванням (до 15%).

Проведений аналіз оцінки енергетичних характеристик трибоконтакту дозволяє припустити про ефективність застосування в якості вихідної теоретичної концепції узагальненої структурно-енергетичної моделі еволюційних процесів самоорганізації дисипативних структур. Актуальним напрямком досліджень є розробка методик та засобів реєстрації кінетики зміни енергетичних характеристик трибоконтакту в режимі реального часу, не впливаючи на нормальну роботу трибосистеми. Встановлення закономірностей кінетики зміни енергетичних характеристик трибоконтакту, ступеня пошкоджуваності та швидкості зношування трибосистеми є одним з першочергових завдань прогнозування зносостійкості та довговічності не тільки матеріалів та покриттів, але й різноманітних деталей машин та механізмів

**Мета роботи** – розробка методики оцінки питомої роботи тертя в контакт при нестационарних умовах роботи трибосистеми.

**Методика експериментальних досліджень.** На програмно-апаратному комплексі за допомогою роlikової аналогії моделюється робота зубчастих передач в умовах кочення з проковзуванням [11]. З метою підвищення достовірності та точності оцінки реєстрації моменту тертя та визначення кінетики зміни питомої роботи тертя в нестационарному режимі роботи трибоелементів в довільний час тривалості циклу розроблено програмне забезпечення для прийому даних від електронного блоку машини тертя (ЕБМТ), автоматичного контролю та обробки триботехнічних параметрів досліджуваних зразків.

Від електронного блоку машини тертя по RS-232 каналу підпрограма приймає коди сигналів прийому та первинної обробки даних датчиків крутного моменту та частоти обертання випереджаючого та відстаючого роликів. Прийняті коди надходять на програмний блок фільтрації та нормування (БФН), призначений для блокування помилково прийнятих сигналів, згладжування та перетворення кодів у реальні фізичні величини (рис. 1). Для графічного представлення фізичних величин вхідних сигналів у підпрограмі встановлено програмний модуль ПЛОТЕР. Після закінчення експерименту графіки зберігаються для наступних обчислень триботехнічних параметрів підпрограмою обробки даних.

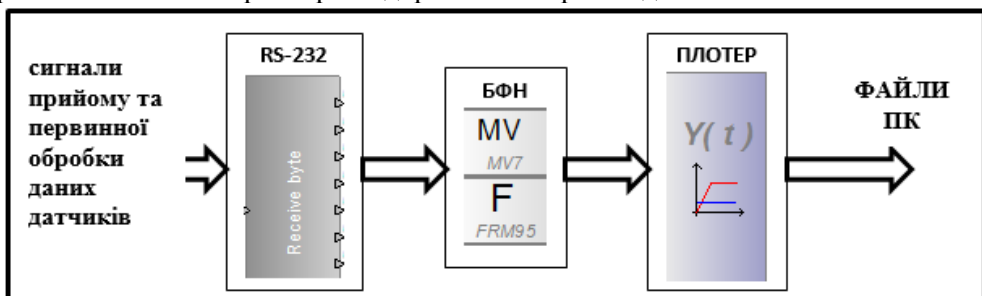


Рис. 1. Функціональна схема підпрограми «Прийом та обробка вихідних сигналів».

Програмний блок математичної обробки даних здійснює обчислення за заданими формулами. Результати обчислень після закінчення циклу випробувань зберігаються у таблиці. Після обробки всіх циклів результати обчислень таблиць експортуються в програму EXCEL для подальшого аналізу.

Розроблені програмні блоки забезпечують реєстрацію в режимі реального часу нестационарної роботи трибоелементів через визначені короткі рівні проміжки часу моменту тертя в контакті та частоти обертання контактних поверхонь. Розрахунок питомої роботи тертя проводять шляхом інтегрування площі, обмеженої кривою моменту тертя, та вибору довільного діапазону інтегрування по вісі абсцис за координатою часу напрацювання елементів трибоспряження, по якій визначається кут повороту контактних поверхонь за зафіксованою їх частотою обертання в певний обраний час наробітки, з урахуванням кінетичної енергії обертальних деталей за формулою:

$$A = \left[ \int_0^{t_i} M_i(t) \cdot 2\pi n_i(t) dt - \frac{1}{2} \sum_0^{i=n t_i} J_{\pi i} \cdot \omega_i^2 \right] / S, \quad (1)$$

де  $M$  – момент тертя;  $n, \omega$  – відповідно частота обертання та кутова швидкість обертання однієї контактної поверхні при ковзанні та чистому коченні (при проковзуванні обчислюється середнє арифметичне значення даних параметрів для двох елементів трибоспряження);  $t$  – час тривалості циклу;  $J_{\pi}$  – полярний момент інерції обертальних деталей триботехнічної установки, які впливають на точність вимірювання моменту тертя в контакті;  $S$  – номінальна площа контакту по Герцу.

На рис. 2 представлена загальна схема вимірювання питомої роботи тертя при досягненні максимального проковзування контактних поверхонь в режимі кочення з проковзуванням в довільний час розрахунку  $t_1$  в період стаціонарної роботи циклу (рис. 2).

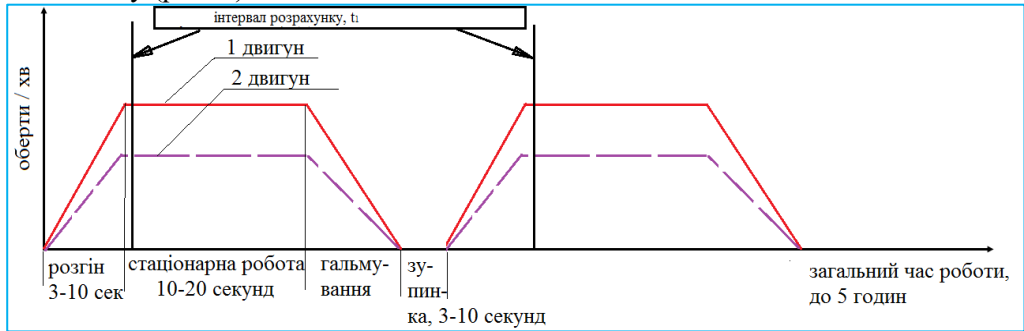


Рис. 2. Схема інтервалу розрахунку питомої роботи тертя

В інтервалі циклу запуск – максимальне проковзування  $t_1$  питома робота тертя становить:

$$A = 0,1 \left[ \int_0^{2\pi n} M_{t_1} \times 2\pi n t_1 - \frac{1}{2} \times 0,2346 \times \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 \right] / S, \quad (1)$$

де  $n$  та  $M_{t_1}$  – відповідно частота обертання випереджаючого ролика та момент тертя при  $t_1$ .

Технічний результат, що підтверджує підвищення достовірності та точності визначення питомої роботи тертя в контакті полягає в наступному. Вимірювання моменту тертя здійснюється чотирма тензодатчиками (для підвищення чутливості та компенсування похибки вимірювання), які включаються в електричний ланцюг за мостовою схемою. Тензодатчики наклеєні на балку з двох сторін (два датчика на стиск – знизу, два датчика на розтяг – зверху), що дозволяє реєструвати

різні за напрямом деформації та визначати крутний момент незалежно від направлення прикладання сили тертя при розгоні, стаціонарній роботі та гальмуванні дослідних зразків. Балка одним кінцем консольно закріплена до нерухокої станини пристрою, іншим кінцем вона фіксується через блоки підшипників, які нерухохо закріплені до мотор – вагах. В умовах примусового гальмування направлення сили тертя та напрям деформації балки змінюються, крутний момент ресструється як від'ємний, що враховується в розрахунковій формулі шляхом обчислення його зміни за модулем.

Питома робота тертя визначалась за умов ступеневого підвищення контактного навантаження по Герцу ( $\sigma_{\max}$ ) в нестационарних умовах тертя для контакту ролик-ролик за схемою: початкове  $\sigma_{\max}$  становило 150 МПа при перших 200 циклах напрацювання, надалі через кожні 200 циклів  $\sigma_{\max}$  збільшувалось на 100 МПа. Частота обертання роликів становила 800 і 600 об/хв відповідно для випереджаючої і відстаючої поверхонь.

В якості мастильного матеріалу використовувалась універсальна синтетична енергозберігаюча малов'язка моторна олива Агрінол SAE 5W-30 SL/CF. Об'ємна температура оливи становила 100 °С.

В якості зразків використовувалися ролики із загартованої сталі 45 (HRC 38), на робочу поверхню яких наносився методом газополуменевого напилення самофлюсуючий гранульований порошок ПГ–АН9 (ПР–НХ8Д6СРП), розроблений Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України згідно ТУ 374-83 [12]. Основна фракція порошку за гранулометричним складом відповідає розміру часток 60 – 100 мкм. Загальна товщина покриттів для кожної пари досліджуваних зразків після шліфування становить 0,3; 0,7 і 1,2 мм.

**Обговорення основних результатів.** Самофлюсуючі сплави - це широко поширені матеріали в техніці створення зносостійких і стійких до хімічної корозії та окислення покриттів. Сплав на основі ПГ–АН9 легований бором і кремнієм, що утворюють легкоплавкі флюси при взаємодії матеріалу покриття з поверхнею сталі 45, що сприяє утворенню покриття з низькою пористістю та високою міцністю зчеплення покриття з основою. Використання методу газополуменевого напилення порошку дозволяє отримувати доволі дрібні частинки боридів і карбідів, рівномірно розподілених у матричному твердому розчині на основі нікелю. Відповідно до фазових діаграм, в системі Ni–Cr–B–C можуть утворюватися різні типи боридних і карбідних фаз [13], які характеризуються високою зносостійкістю.

Оскільки деформаційні зміни в матеріалі при терті локалізуються в локальному об'ємі, в його приповерхневих шарах, необхідною умовою підвищення зносостійкості є забезпечення високої твердості покриття. Встановлено, що мікротвердість напиленого шару залежить від його товщини (табл. 1). Збільшення товщини покриття до 1,2 мм обумовлює підвищення мікротвердості поверхневих шарів в 2,6 рази, в порівнянні з покриттям товщиною 0,3 мм, що пов'язано з зростанням тривалості дії температурного чинника при пошаровому нанесенні самофлюсуючого порошку з подальшим оплавленням напилених шарів.

Мікротвердість поверхневих шарів покриття є важливою характеристикою міцності матеріалу в умовах складно-напруженого стану при коченні з проковзуванням. В свою чергу, міцнісні характеристики безпосередньо впливають на інтенсивність зношування контактних поверхонь. Загальний лінійний знос

випереджаючої та відстаючої поверхонь становить 9,9 : 3,54 : 2,12 мкм відповідно для покриття товщиною 0,3, 0,7 та 1,2 мм (табл. 2).

Таблиця 1

### Мікротвердість самофлюсуючого покриття на нікелевій основі

Товщина покриття на основі ПГ–АН9	Мікротвердість, Н <sub>100</sub> , МПа			
	Випереджаюча поверхня		Відстаюча поверхня	
	Вихідна	Після тертя	Вихідна	Після тертя
0,3 мм	2370	2310	2370	2171
0,7 мм	4200	3070	4200	2600
1,2 мм	6120	5680	6100	5069

Таблиця 2

### Параметри зношування контактних поверхонь залежно від товщини покриття

Товщина покриття на основі ПГ–АН9	Випереджаюча поверхня		Відстаюча поверхня	
	Лінійний знос, мкм	Інтенсивність зношування	Лінійний знос, мкм	Інтенсивність зношування
0,3 мм	4,7	$1,1 \cdot 10^{-9}$	5,2	$1,32 \cdot 10^{-9}$
0,7 мм	0,74	$7 \cdot 10^{-10}$	2,8	$3 \cdot 10^{-10}$
1,2 мм	1,01	$4,5 \cdot 10^{-11}$	1,11	$5,2 \cdot 10^{-11}$

Несуча здатність покриття, що визначалась за умов прояву перших ознак схоплювання при ступеневому підвищенні навантаження, безпосередньо визначається його міцністю. При  $\sigma_{\max}$  150 МПа зафіксовано перші ознаки схоплювання на 120 циклі напрацювання для покриття товщиною 0,3 мм, для якого встановлена найменша мікротвердість. Для покриття товщиною 0,7 мм перші ознаки схоплювання встановлені при  $\sigma_{\max}$  250 МПа, а для покриття товщиною 1,2 мм встановлено нормальну роботоздатність до 450 МПа, ознак схоплювання не зафіксовано до закінчення експерименту, що становило 700 циклів напрацювання. Незважаючи на те, що при терті відбувається знеміцнення поверхневих шарів обох контактних поверхонь з максимально досліджуваною товщиною покриття, встановлено їх високі зносостійкі властивості за рахунок наявності в матричній основі нікелю дисперсних частинок боридів нікелю та хрому, карбідів хрому та силцидів нікелю [14]. Також досліджуване наноструктуроване покриття товщиною 1,2 мм характеризується високими антифрикційними характеристиками та сприяє ефективному зниженню питомої роботи тертя в контакті (рис. 1, 2).

Середні показники питомої роботи тертя зафіксовані на рівні 6500, 9200 та 3500 Дж/мм<sup>2</sup> для покриття товщиною 0,3, 0,7 та 1,2 мм відповідно. В зв'язку з тим, що значна частина роботи при терті направлена на структурно-деформаційні зміни приповерхневих шарів металу та формування дисипативних структур, розглянемо механізм зношування покриття з застосуванням структурно-енергетичних аспектів. Оскільки при терті в умовах кочення з проковзуванням глибина локалізації максимальних дотичних напруг зсуву становить, згідно [15],  $0,78b$ , де  $b$  – напівширина площадки контакту, то в досліджуваному діапазоні максимальних контактних навантажень від 150 до 450 МПа даний параметр становить 3...10 мкм, що свідчить про локалізацію дотичних напруг зсуву в матеріалі покриття. Таким чином, пластична деформація покриття при прикладанні навантаження пов'язана з локальною втратою його зсувної стійкості в приповерхневих шарах, де зароджуються деформаційні дефекти.

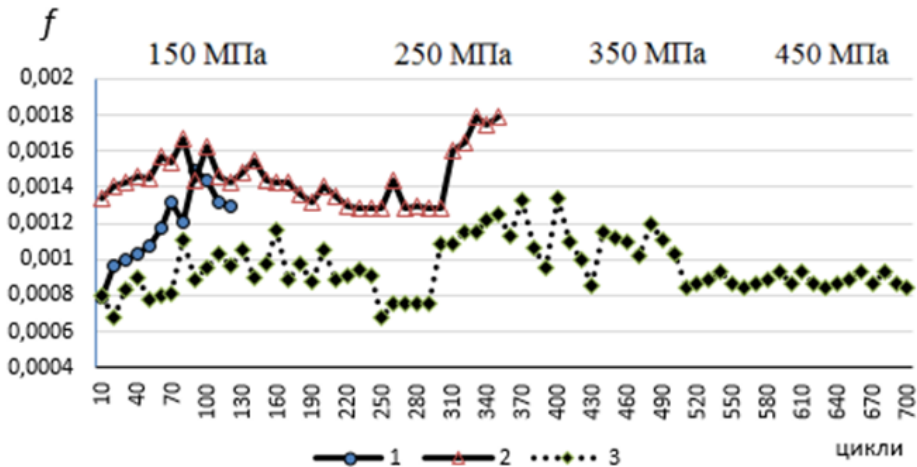


Рис. 1. Кінетика зміни коефіцієнту тертя при напрацюванні для покриття на основі нікелю: 1 – товщина покриття 0,3 мм, 2 – товщина покриття 0,7 мм, 3 – товщина покриття 1,2 мм.

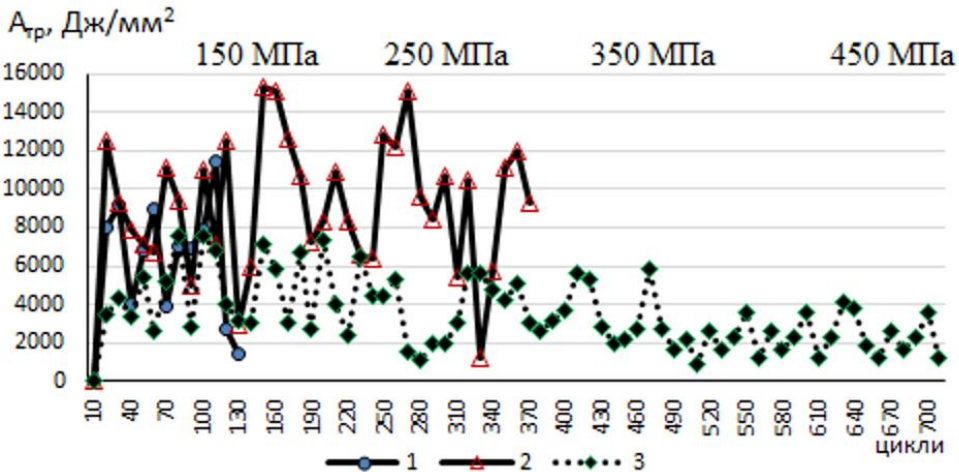


Рис. 2. Залежність питомої роботи тертя ( $A_{тр}$ ) в контакті від товщини покриття на основі нікелю: 1 – товщина покриття 0,3 мм, 2 – товщина покриття 0,7 мм, 3 – товщина покриття 1,2 мм.

Для покриття товщиною 0,3 мм припускаємо наступний механізм зношування. Оскільки дане покриття характеризується високою пластичністю та низькою міцністю, про що свідчить мікротвердість поверхневих шарів на рівні 2,3 ГПа, то домінує пластичне руйнування матеріалу покриття внаслідок дії дотичних напружень зсуву в умовах кочення з проковзуванням. Деформаційні процеси призводять до утворення сітки тріщин в покритті (рис. 3, а) та його інтенсивному відшаруванню, що обумовлює зростання питомої роботи тертя. Питома робота тертя нестабільна, коливається в широкому діапазоні - 1300...11450 Дж/мм<sup>2</sup>, що свідчить про відсутність структурної пристосованості при терті та домінування деструкційних процесів.

При збільшенні товщини покриття до 1,2 мм змінюється механізм зношування, про що свідчать наступні чинники. По-перше, міцність покриття при терті залишається високою і становить 5,6 та 5,0 ГПа для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно, що обумовлено наявністю наноструктурних дисперсних частинок боридів нікелю та хрому, карбідів хрому та силіцидів нікелю. Це забезпечує високу зносостійкість покриття за рахунок зростання його стійкості до



дотичних напружень зсуву. По-друге, в процесі тертя спостерігається ефективна структурна пристосованість покриття в умовах дії циклічного навантаження, про що свідчить стійкість покриття до утворення тріщин (рис. 3, б).

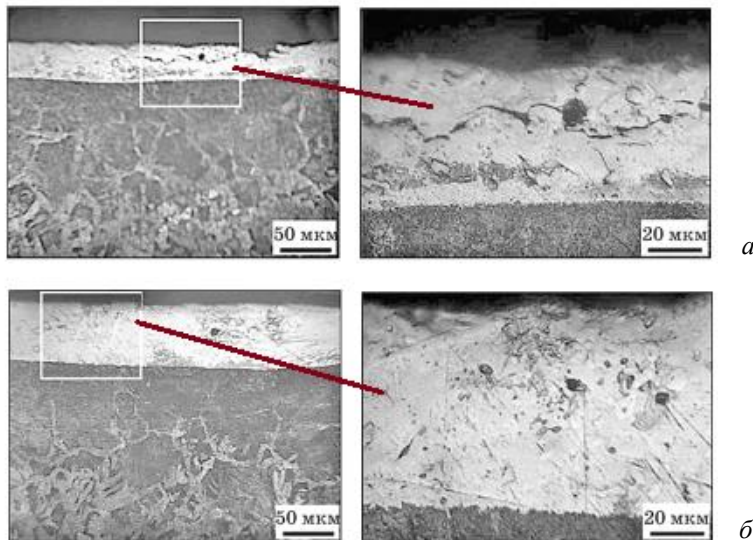


Рис. 3. Оптично-мікроскопічні зображення поперечних перерізів пар тертя з покриттям на основі нікелю: *а* – товщина покриття 0,3 мм, *б* – товщина покриття 1,2 мм.

Наноструктурована поверхня покриття ефективно знижує пластичну деформацію на мезорівні та підвищує напруги зародження та розвитку тріщин, імовірно, за рахунок реалізації таких деформаційних механізмів, як проковзування ультрамілких структурованих зерен та їх обертання. В покритті під навантаженням не відбувається інтенсивних структурно-енергетичних перетворень, про що свідчить кінетика зміни питомої роботи тертя при напрацюванні. Якщо на початковому етапі припрацювання, при контактному навантаженні 150 МПа питома робота тертя становила  $4800 \text{ Дж/мм}^2$ , то в процесі тертя даний параметр знижується в 2,1 рази, незважаючи на зростання контактного навантаження до 450 МПа. Основним критерієм ефективної структурної пристосованості покриття є його висока зносостійкість, яка становить  $2,2 \cdot 10^{11}$  та  $1,9 \cdot 10^{11}$  відповідно для випереджаючої та відстаючої поверхонь.

Таким чином, шляхом підбору оптимальної товщини покриття на основі нікелю, одержаного методом газополуменового наплення самофлюсуєчого гранульованого порошку ПГ–АН9, можна одержати покриття, які характеризуються високою зносостійкістю в умовах кочення з проковзуванням.

### Висновки.

1. Запропонований спосіб оцінки питомої роботи тертя в триботехнічному контакті для прискорених лабораторних та стендових випробувань при дослідженні конструкційних матеріалів можливо застосовувати для прогнозування кінетики зміни енергоємності контакту, ступеня активації металу, інтенсивності його деформування з часом – основні показники, які впливають на довговічність роботи вузлів тертя машин та механізмів.

2. Збільшення товщини самофлюсоєчого покриття до 1,2 мм обумовлює підвищення мікротвердості поверхневих шарів в 2,6 рази, зростання антифрикційних

властивостей та зниження інтенсивності зношування, в порівнянні з покриттям товщиною 0,3 мм.

3. Самофлюсуюче покриття на основі нікелю товщиною 1,2 мм проявляє високу несучу здатність в діапазоні контактного навантаження 150...450 МПа, що обумовлено наявністю наноструктурних дисперсних частинок в матриці, за рахунок чого досягається висока стійкість до дотичних напружень зсуву.

4. За показниками питомої роботи тертя можливо оцінити інтенсивність структурно-енергетичних перетворень в покритті під навантаженням.

### Список літератури

1. Fedorov S.V. Structural-Energy Interpretation of the Friction / S.V. Fedorov // in M.A. Chowdhury (Ed.): Friction, Lubrication and Wear, London, United Kingdom, IntechOpen Ltd., 2019. - P. 35-52.
2. Fedorov S.V. Analysis of the energy balance of friction on the rolling contact / S.V. Fedorov // Tribology in Industry. – 2021. - Volume 43, No 2. – P. 283-297.
3. Лопаткин С.Ю., Лопаткин Р.Ю. Модель протекания процессов изнашивания и восстановления рабочей поверхности канала ствола при трибохимическом взаимодействии / С.Ю. Лопаткин, Р.Ю. Лопаткин // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2004. - №13(72). - с. 164-172.
4. Федоров С. В. Аксиоматика феномена трения как основная методология его изучения / С. В. Федоров // Вісн. Нац. техн. ун-ту України "КПІ". Сер. Машинобудування. - 2012. - Вип. 64. - С. 244-254.
5. Lubrication State Recognition Based on Energy Characteristics of Friction Vibration with EEMD and SVM / Hai-jie Yu, Hai-jun Wei, Jing-ming Li and other // Shock and Vibration. – 2021. - vol.2021. - Article ID 9972119. – 7 p.
6. Evaluation of operational properties of aviation oils by tribological parameters / О.О. Mikosianchuk, О.Ye. Yakobchuk, R. H. Mnatsakanov, А.М. Khimko // Problems of Tribology. – 2021. - V. 26, No 1/99. – P. 43-50.
7. Blau, J. P. The significance and use of the friction coefficient / J. P. Blau, // Tribology International. -2001. 34(9). – P.585-591.
8. Fujii, Y. Method for measuring transient friction coefficients for rubber wiper blades on glass surface. Tribology International. 2008. - 41(1). – P.17-23.
9. A novel method for determination of kinetic friction coefficient using inclined plane / D. Vukelic, P. Todorovic, K. Simunovic and other // Tehnički vjesnik. – 2021. - 28, 2. – P. 447-455.
10. Дмитриченко Н.Ф., Мнацаканов Р.Г. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения: Монография/ Дмитриченко Н.Ф., Мнацаканов Р.Г. –Житомир: ЖИТИ. – 2002. – 308с.
11. Оцінка триботехнічних характеристик та контактної витривалості зубчастої передачі героторного масляного насосу / В. М. Бородій, О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, О. С. Якобчук // Проблеми тертя та зношування – 2022. - 1 (94). – С. 4-16
12. Харламов Ю. А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ю. А. Харламов, И. А. Будагянц. – Луганськ: СУНУ ім. Володимира Даля, 2003. – 495 с.
13. Campbell C.E., Kattner U.R. Assessment of the Cr-B system and extrapolation to the Ni-Al-Cr-B quaternary system // Calphad. – 2002. – Vol. 26, Issue 3. – P. 477-490.
14. Mordyuk B. N., Mikosyanchik O. O., Mnatsakanov R. G. Structure-Phase State and Wear of Ni–Cr–B–Si–C Coating on Steel 1045 under Friction Conditions with the Shear Load Component / B. N. Mordyuk, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. -2020. - 42, No. 2. – P. 175–195 (in Ukrainian).
15. Johnson K. L. The strength of surfaces in rolling contact / K. L. Johnson // Proc. Inst. Mech. Eng. C. – 1989. – Vol. 203, № 3. – P. 151-163.

Стаття надійшла до редакції 05.06.2022.

V. M. BORODIY, O. A. MIKOSIANCHYK, R. G. MNATSAKANOV, S. M. ZANKO,  
I. V. MALJARCHUK

### EVALUATION OF TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF SELF-FLUXING COATING BASED ON STRUCTURAL-ENERGY PARAMETERS

It was determined that one of the most promising approaches to predicting the wear resistance of friction pairs is the analysis of the wear rate of the friction unit by assessing the kinetics of changes in the structural and energy characteristics of the surface layers of materials. The paper presents a method for estimating the specific friction in tribotechnical contact for accelerated laboratory and bench tests in the study of structural materials, which can be used to predict the kinetics of changes in energy intensity of contact, the degree of activation of metal, the intensity of its deformation over time - the main indicators that affect the durability of the friction units of machines and mechanisms. It was determined that by selecting the optimal thickness of the nickel-based coating obtained by gas-flame spraying of self-fluxing granular powder PG-AN9 (ПГ-АН9), it is possible to obtain coatings characterized by high wear resistance in rolling with slippage conditions. The total linear wear of the leading and lagging surfaces in rolling with slippage conditions is 9.9 : 3.54 : 2.12  $\mu\text{m}$  for coatings with a thickness of 0.3, 0.7 and 1.2 mm respectively. It was determined that increasing the thickness of the self-fluxing coating to 1.2 mm defines an increase in the microhardness of the surface layers, an increase in antifriction properties and a decrease in the intensity of wear. The self-fluxing coating exhibits a high load-bearing capacity in the contact load range of 150...450 MPa, which is due to the presence of nanostructured dispersed particles in the matrix. The coating under load does not undergo intense structural and energy transformations, as evidenced by the kinetics of changes in the specific work of friction during performance period: at the initial stage of performance, at a contact load of 150 MPa specific friction was 4800 J/mm<sup>2</sup>, during friction process, by increase of contact load up to 450 MPa, this parameter is reduced by 2.1 times. The main criterion of effective structural suitability of the coating is its high wear resistance, which is  $2,2 \cdot 10^{11}$  and  $1,9 \cdot 10^{11}$  for leading and lagging surfaces respectively.

**Key words:** specific work of friction, self-fluxing coating, microhardness, rolling with slippage.

#### References

1. Fedorov S.V. Structural-Energy Interpretation of the Friction / S.V. Fedorov // in M.A. Chowdhury (Ed.): Friction, Lubrication and Wear, London, United Kingdom, IntechOpen Ltd., 2019. - P. 35-52.
2. Fedorov S.V. Analysis of the energy balance of friction on the rolling contact / S.V. Fedorov // Tribology in Industry. – 2021. - Volume 43, No 2. – P. 283-297.
3. Lopatkyn S.Iu., Lopatkyn R.Iu. Model protekanyia protsessov yznashyvanyia y vosstanovlenyia rabochei poverkhnosti kanala stvola pry trybokhymycheskom vzaymodeistvyi / S.Iu. Lopatkyn, R.Iu. Lopatkyn // Visnyk Sumskoho derzhavnoho universytetu. Seriya Tekhnichni nauky. – 2004. - №13(72). - c. 164-172.
4. Fedorov S. V. Aksyomatyka fenomena trenyia kak osnovnaia metodolohyia eho yzuchenyia / S. V. Fedorov // Visn. Nats. tekhn. un-tu Ukrainy "KPI". Ser. Mashynobuduvannia. - 2012. - Vyp. 64. - S. 244-254.
5. Lubrication State Recognition Based on Energy Characteristics of Friction Vibration with EEMD and SVM / Hai-jie Yu, Hai-jun Wei, Jing-ming Li and other // Shock and Vibration. – 2021. - vol.2021. - Article ID 9972119. – 7 p.
6. Evaluation of operational properties of aviation oils by tribological parameters / O.O. Mikosianchuk, O.Ye. Yakobchuk, R. H. Mnatsakanov, A.M. Khimko // Problems of Tribology. – 2021. - V. 26, No 1/99. – P. 43-50.
7. Blau, J. P. The significance and use of the friction coefficient / J. P. Blau, // Tribology International. -2001. 34(9). – P.585-591.

8. Fujii, Y. Method for measuring transient friction coefficients for rubber wiper blades on glass surface. *Tribology International*. 2008. - 41(1). – P.17-23.
9. A novel method for determination of kinetic friction coefficient using inclined plane / D. Vukelic, P. Todorovic, K. Simunovic and other // *Tehnički vjesnik*. – 2021. - 28, 2. – P. 447-455.
10. Dmytrychenko N.F., Mnatsakanov R.H. Smazochные protsessы v uslovyakh nestatsyonarnoho treniya: Monohrafiya/ Dmytrychenko N.F., Mnatsakanov R.H. –Zhytomyr: ZhYTY. – 2002. – 308s.
11. Otsinka trybotekhnichnykh kharakterystyk ta kontaktnoi vytryvalosti zubchastoї peredachi herotornoho maslianoho nasosu / V. M. Borodii, O. O. Mikosianchuk, R. H. Mnatsakanov, O. Ye. Yakobchuk // *Problemy tertia ta znoshuvannia* – 2022. - 1 (94). – S. 4-16
12. Kharlamov Yu. A. Osnovy tekhnolohyy vosstanovleniya y uprochneniya detalei mashyn / Yu. A. Kharlamov, Y. A. Budahiants. – Luhansk: SUNU im. Volodymyra Dalia, 2003. – 495 s.
13. Campbell C.E., Kattner U.R. Assessment of the Cr-B system and extrapolation to the Ni-Al-Cr-B quaternary system // *Calphad*. – 2002. – Vol. 26, Issue 3. – P. 477-490.
14. Mordyuk B. N., Mikosyanchik O. O., Mnatsakanov R. G. Structure-Phase State and Wear of Ni–Cr–B–Si–C Coating on Steel 1045 under Friction Conditions with the Shear Load Component / B. N. Mordyuk, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* -2020. - 42, No. 2. – P. 175–195 (in Ukrainian).
15. Johnson K. L. The strength of surfaces in rolling contact / K. L. Johnson // *Proc. Inst. Mech. Eng. C*. – 1989. – Vol. 203, № 3. – P. 151-163.

**Бородій Віктор Миколайович** – заступник декана аерокосмічного факультету, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 70 10, E-mail: wiktbor@ukr.net.

**Мікосянчик Оксана Олександрівна** – д. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net.

**Мнацаканов Рудольф Георгійович** – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, E-mail: mnatsakanov@ukr.net

**Занько Сергій Миколайович** – канд. техн. наук, директор НДІ СЗПТІ, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 91, E-mail: snz707@ukr.net.

**Малярчук Ігор Володимирович** – випускник НАУ, магістр за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: igor1999m@gmail.com.