

УДК 621.73

В. І. Савуляк д. т. н., доц.;

А. В. Губанов асп.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРТЯ СПОКОЮ В ПІДШИПНИКАХ КОВЗАННЯ ШЕСТЕРЕННОЇ ГІДРОМАШИНИ

*Визначені характеристики тертя спокою в парі вал-шестірня—підшипник ковзання гідромотора в різних умовах роботи. Досліджено вплив покриття нанесеного методом електроіскрового легування на підшипник ковзання. Запропоновано конструкцію та виготовлено експериментальну установку.*

### Вступ

Вибір або синтез матеріалів триботехнічних пар для використання в приводах технологічних машин відіграє важливу роль не тільки з погляду мінімізації енергетичних втрат і зносу, але і як важливий фактор забезпечення стійкості руху. Це особливо актуально для механізмів з широким діапазоном робочих швидкостей, для запуску під навантаженням та з високими вимогами до плавності та точності переміщень. Для таких механізмів важливо мати малі коефіцієнти тертя. Особливо жорсткі вимоги висуваються до характеристик тертя у напрямних металорізальних верстатів, розподільних пар гідромоторів та інших точних механізмів, що працюють в умовах підвищених навантажень запуску. Рядом дослідників встановлено, що нелінійність характеристик тертя є причиною виникнення автоколивань [1]. Для різних пар матеріалів і режимів тертя, параметрів приводу існують закони зміни коефіцієнта тертя від тривалості нерухомого контакту, швидкості ковзання, виду і складу мастила та ін. Як правило, для кожної конструкції і поєднання матеріалів пари тертя необхідно на етапі дослідного конструювання експериментально визначити можливість реалізації варіанта проектного рішення і вносити необхідні корективи [1, 2].

### Постановка задачі

Метою даного дослідження є аналіз коефіцієнтів тертя спокою в парі відповідно з антифрикційного сплаву та сталі 18ХГТ. На деталь (підшипник) з алюмінієвого сплаву нанесено зносостійке композиційне покриття, отримане методом електроіскрового легування. Дослідження виконуються для умов граничного та сухого тертя. Порівняльним зразком виступає стандартний підшипник ковзання без покриття. Робоча рідина — моторне мастило М—10 Г<sub>2</sub>К.

### Основна частина

Пропонована методика і результати експериментального визначення залежності коефіцієнта тертя спокою від таких факторів: нормальна сила, яка притискає підшипник ковзання до вала-шестірні, виду тертя (сухе чи граничне). Для цього виготовлена експериментальна установка (рис. 1), що складається з досліджуваної пари тертя та механізму створення навантаження. Механізм для створення навантажень дозволяє отримувати стабільні значення навантажень в парі тертя.

Досліджувана пара тертя виконана у вигляді підшипника ковзання гідромотора ГМШ-10, на робочі поверхні якого нанесено композитне покриття, отримане методом електроіскрового легування, та вала-шестірні гідромотора (18ХГТ) [3].

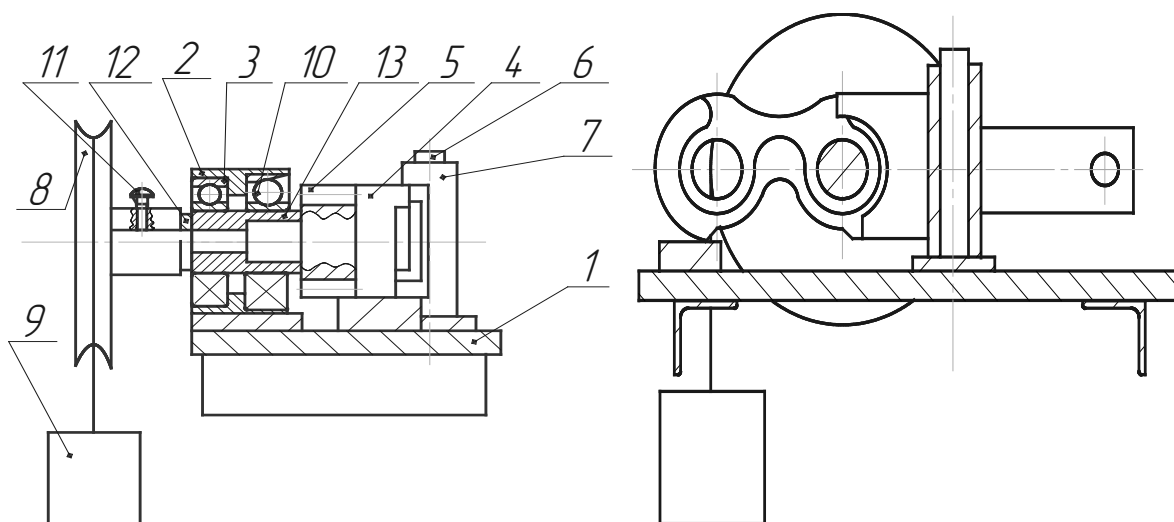


Рис. 1. Установка для експериментального визначення коефіцієнтів тертя спокою: 1 — базова плита; 3, 10 — підшипники в корпусі 2; 4 — дослідний зразок підшипника ковзання; 5 — вал-шестірня; 6 — вісь; 7 — притиска вилка; 8 — шків; 9 — навантаження; 11 — фіксувальний гвинт; 12 — кільця; 13 — втулка

Експерименти проводилися з різною силою, яка діє у напрямку нормалі до поверхні контакту (далі — нормальна сила) у парі *підшипник ковзання—вал-шестірня*. Навантаження створювалося за допомогою тягарців. Установка є системою, де перекося пари тертя та несиметричні навантаження відносно фрикційного контакту поверхонь тертя малоїмовірні.

Вимірювання сили тертя спокою виконувалось в умовах процесу початку руху, які наближені до реальних умов роботи гідромотора. При цьому вивчалася залежність коефіцієнта тертя від ступеня навантаження, яке необхідне для зрушення вала-шестірні. Тертям в підшипниках кочення можна знехтувати, так як коефіцієнти тертя кочення не перевищують 7 % від значень коефіцієнтів тертя ковзання в парі тертя.

Установка для визначення статичного коефіцієнта тертя пари підшипник ковзання—вал-шестірня гідромотора ГМШ-10 складається з основи, на яку встановлено корпус підшипників з запресованими в нього підшипниками кочення 204. В підшипниках встановлено вал-шестірню гідромотора ГМШ-10. На вихідному кінці вала-шестірні встановлено шків, який жорстко фіксується. Крутний момент на валу-шестірні, необхідний для подолання моменту тертя спокою, створюється за допомогою підвішеного вантажу. На іншому кінці вала-шестірні встановлено підшипник ковзання з нанесеним покриттям в першій серії дослідів, або без покриття для іншої серії дослідів. Зусилля, яке необхідне для імітації реальних умов роботи, створюється за допомогою вилки, яка притискає підшипник тертя до вала-шестірні.

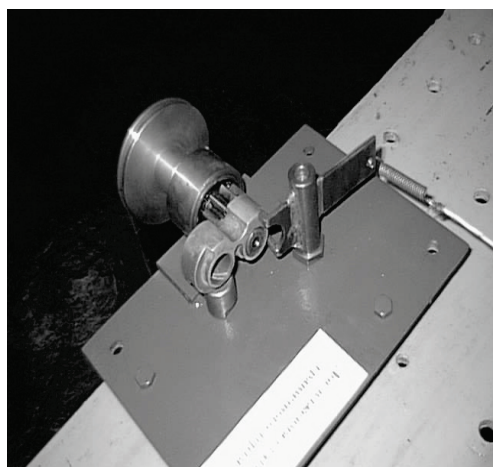


Рис. 2. Фото установки для експериментального визначення коефіцієнтів тертя спокою

Для визначення залежності коефіцієнта тертя спокою виконувалися дослідів з визначення впливу різних факторів. До них віднесені: навантаження на підшипник ковзання, час витримування фрикційних поверхонь у нерухомому контакті, вплив напрямку руху перед витримкою, а також характер встановлювальних переміщень підшипника ковзання перед початком експериментів. Встановлено, що перераховані вище фактори не мають істотного впливу на формування фрикційних зв'язків і величину сили тертя спокою. Винятком є випадки, коли фрикційний контакт навантажувався рушійною силою, яка майже забезпечує зрушення та витримувався в такому стані певний час. В цьому випадку тертя спокою має величину, що перевищує його значення за інших умов. Слід зазначити, що при цьому істотний вплив на силу тертя спокою має ступінь близькості рушійної сили до сили тертя спокою. Очевидно, що збільшення міцності фрикційних зв'язків є наслідком

їх упорядкування в процесі попереднього мікрозсуву, характерного для подібних пар тертя. Для кращого притискання підшипника ковзання до вала-шестірні застосовувалась притискна вилка, яка була виготовлена з врахуванням рельєфу поверхні підшипника ковзання.

В результаті розрахунків були отримані такі значення залежностей коефіцієнтів тертя від нормальної сили, яка притискає підшипник ковзання до вала-шестірні та від умов тертя (сухого або з мастилом) (рис. 3).

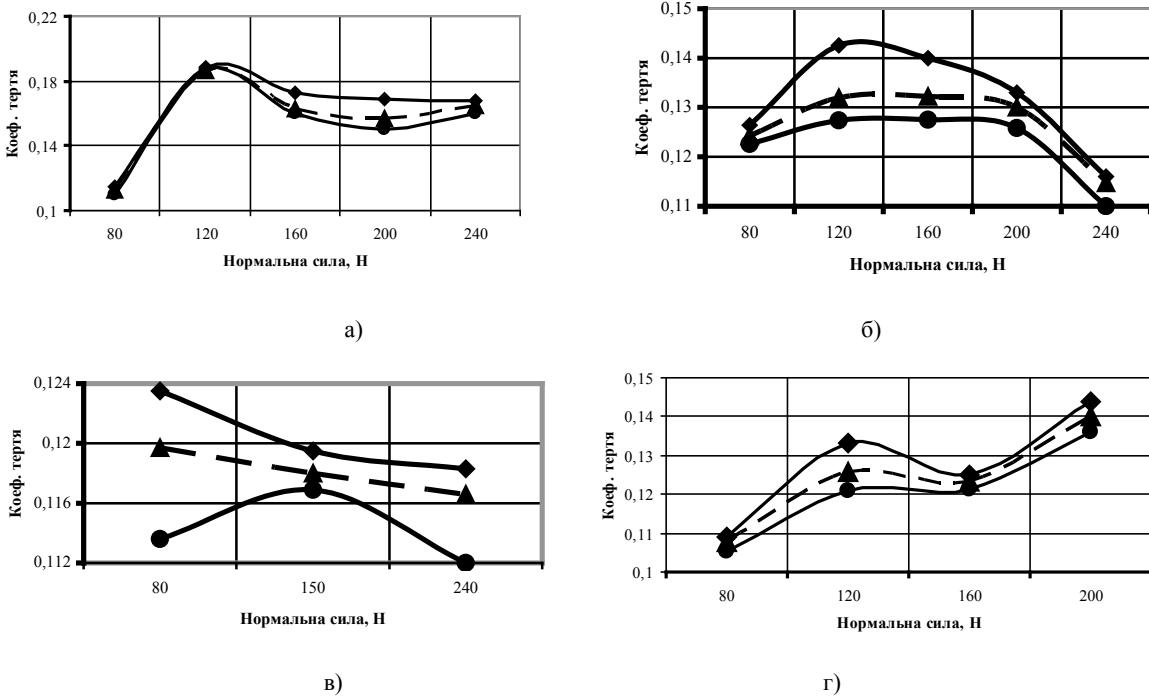


Рис. 3. Поле розсіювання коефіцієнтів тертя спокою для видів тертя: —◆— — максимальні значення коефіцієнтів тертя; —▲— — середнє значення коефіцієнтів тертя; —●— — мінімальне значення коефіцієнтів тертя; а) сухе тертя за наявності покриття на підшипнику; б) сухе тертя підшипника без покриття; в) тертя підшипника з

Для визначення технологічних факторів формування покриттів на деталях, що найбільше впливають на коефіцієнт тертя, характер і ступінь їх впливу на нього, тобто для встановлення безпосередніх зв'язків між режимом нанесення покриттів та їх властивостями, було проведено дослідження з використанням методів багатofакторного експерименту.



Рис. 4. Залежність статичного коефіцієнта тертя пари підшипник ковзання – вал-шестірня від нормальної сили: 1 – сухе тертя за наявності покриття на підшипнику; 2 – сухе тертя підшипника без покриття; 3 – тертя підшипника з покриттям за наявності мастила; 4 – тертя підшипника без покриття за наявності мастила

На основі проведених експериментів обрано такі фактори:

- зусилля, в парі тертя, що діє на підшипник ковзання;
- шорсткість робочої поверхні підшипника ковзання;
- в'язкість мастила.

Вважалось на основі попередніх даних, що всі ці параметри, як фактори експерименту дослідження коефіцієнта тертя, відповідають умовам їх керованості, незалежності і сумісності між собою. Керованість факторів розглядали як можливість надавати їм довільні значення в області допустимих і фіксувати незмінними протягом всього дослідження, незалежність — як відсутність між ними кореляційного зв'язку, а сумісність — як можливість зафіксувати кожний з них на будь-якому рівні незалежно від значень рівнів інших факторів.

Проведення повного багатofакторного експерименту сплановане в інтервалі допустимих значень цих трьох факторів, які визначено попередніми розрахунками та експериментальними дослідженнями.

ми. Обрано методику розробки математичної моделі зносостійкості покриттів, яка дозволяє представити його у вигляді поліному першого степеня [4]:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (1)$$

Обрані фактори позначені через  $X_1, X_2, X_3$ . Для спрощення розрахунку було використано кодові змінні. Рівні факторів, експерименту та інтервали зміни в натуральних і кодових значеннях наведено в таблиці.

**Рівні факторів експерименту та інтервали зміни в натуральних і в кодових значеннях**

Рівні факторів	Найменування факторів та їх натуральні значення		
	Зусилля у парі тертя, Н $X_1 (N)$	Шорсткість поверхонь тертя, мкм $X_2 (Ra)$	В'язкість мастила, $\frac{M^2}{c} \cdot 10^{-6}$ $X_3 (v)$
З покриттям			
Основний рівень (0)	139,345	4	7
Інтервал варіювання (1)	59,72	2,4	3
Верхній рівень (+1)	199,06	6,4	10
Нижній рівень (-1)	79,625	1,6	4
Без покриття			
Основний рівень (0)	139,345	0,48	7
Інтервал варіювання (1)	59,72	0,32	3
Верхній рівень (+1)	199,06	0,8	10
Нижній рівень (-1)	79,625	0,16	4

Однорідність дисперсії паралельних дослідів перевірялась за критерієм Кохрена. Гіпотеза про однорідність дисперсій підтвердилась, тому що розрахункові значення критерію не перевищують допустимих значень. Дисперсії повторюваності дорівнюють  $4,44 \cdot 10^{-5}$  для варіанта тертя з покриттям та  $2,06 \cdot 10^{-5}$  — без покриття, а похибка експериментів складає 0,0067 та 0,0045, відповідно.

Розрахунки виконувались за допомогою спеціальної програми на мові Паскаль.

Використання  $t$ -критерію Стьюдента дозволило зробити висновок про значимість всіх коефіцієнтів рівняння регресії (1). Рівняння регресії залежності коефіцієнта тертя від параметрів системи набуло вигляду:

— для варіанта з покриттям:

$$Y_1 = 0,1294 - 18,89 X_1 - 0,5438 X_2 - 9,057 \cdot 10^{-7} X_3 + 81,14 X_1 X_2 + 1,322 \cdot 10^{-4} X_1 X_3 - 3,81 \cdot 10^{-6} X_2 X_3 + 5,68 \cdot 10^{-4} X_1 X_2 X_3;$$

— для варіанта без покриття:

$$Y_2 = 0,1266 - 18,27 X_1 - 0,062 X_2 - 8,86 \cdot 10^{-7} X_3 + 8,786 X_1 X_2 + 1,279 \cdot 10^{-4} X_1 X_3 - 4,1 \cdot 10^{-7} X_2 X_3 + 5,784 \cdot 10^{-5} X_1 X_2 X_3.$$

Аналіз моделі на адекватність за критерієм Фішера дав позитивний результат. Адаптована математична модель з урахуванням одиниць вимірювань факторів ( $X_1$  (нормальна сила, Н) — Н,  $X_2$  (шорсткість, Ra) — мкм,  $X_3$  (в'язкість кінематична, v) —  $\frac{M^2}{c}$ ) набуде вигляду:

— для варіанта з покриттям:

$$f_1 = 0,1294 - 18,89 N - 0,5438 Ra - 9,057 \cdot 10^{-7} \cdot v + 81,14 N Ra + 1,322 \cdot 10^{-4} \cdot N v - 3,81 \cdot 10^{-6} \cdot R a v + 5,68 \cdot 10^{-4} \cdot N R a v;$$

— для варіанта без покриття:

$$f_2 = 0,1266 - 18,27 N - 0,062 Ra - 8,86 \cdot 10^{-7} \cdot v + 8,786 N Ra + 1,279 \cdot 10^{-4} \cdot N v - 4,1 \cdot 10^{-7} \cdot R a v + 5,784 \cdot 10^{-5} \cdot N R a v.$$

Всі обрані фактори, зі збільшенням в досліджуваному інтервалі, впливають на коефіцієнт тертя спокою в сторону його підвищення, оскільки коефіцієнти в рівнянні регресії, яке моделює процес тертя, від'ємні. Але кількісно вплив зусилля притискання підшипника ковзання до вала-шестірні значніший, ніж у такого фактора, як шорсткість поверхонь тертя, а коефіцієнти, що враховують ефекти взаємодії цього фактора з іншими виявилися теж значнішими.

### Висновки

1. Нанесення на підшипник ковзання електроіскрового покриття зменшує адгезійну складову коефіцієнта тертя спокою.
2. На початковій стадії припрацювання після нанесення покриття механічна складову коефіцієнта сухого тертя спокою зростає через збільшення шорсткості поверхні.
3. Змашування фрикційного контакту зменшує механічну складову коефіцієнта тертя спокою та сумарний коефіцієнт тертя.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с. с ил.
2. Комарова В. И., Басинюк В. Л., Комаров А. И. Новые композиционные пары трения // Наука — производству. — 1999. — № 6 (19). — С. 52—53.
3. Подчерняева И. А. Электродные материалы для электроискрового легирования. — М.: Наука, 1988. — 223 с.
4. Савуляк В. І. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. — 161 с.
5. D. Wolfe, J. Singh. Functionally Graded Ceramic // Metallic coatings for gas turbine components by high energy beams for temperature applications, NATO — Advanced study institute series proceedings, protective coatings and thin films (Ed.: Y. Pauleau, P. V. Barna). 1996. — Vol. 21. P 441—465.

Рекомендована кафедрою технології підвищення зносостійкості

Надійшла до редакції 14.12.04.  
Рекомендована до друку 5.01.05.

**Савуляк Валерій Іванович** — завідувач кафедри; **Губанов Андрій Васильович** — аспірант.  
Кафедра технології підвищення зносостійкості, Вінницький національний технічний університет