

УДК 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.1(86).14484

М. В. ЧЕРНЕЦЬ, М. В. КІНДРАЧУК, А. О. КОРНІЄНКО, М. А. ГЛОВИН,
І. В. КОСТЕЦЬКИЙ

Національний авіаційний університет, Україна

ДО ПИТАННЯ ПРО МЕТОДИКУ ВИЗНАЧЕННЯ ІНДИКАТОРІВ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОЛІМЕРНИХ ЗМІЦНЕНИХ ПОЛІАМІДНИХ КОМПОЗИТІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

Подано методику модельних трибоекспериментальних досліджень матеріалів при терті ковзання за силовою схемою торцевого тертя. З її використанням визначено кількісні відносні індикатори зносостійкості поліаміду, зміцненого дисперсними скло- і вуглеволокнами, який може використовуватися у метало-полімерних підшипниках ковзання. Визначено характеристики зносостійкості вказаних композитів, як базові характеристики математичної моделі дослідження кінетики зношування матеріалів при терті ковзання. Також за даними проведених досліджень побудовано їх діаграми зносостійкості, як графічні індикатори зносостійкості у прийнятому діапазоні питомих сил тертя. Наведено залежності, які пов'язують характеристичні функції зносостійкості матеріалів розробленої математичної трибокінетичної моделі зношування з лінійними зношуваннями та ресурсом підшипника ковзання.

Ключові слова: *методика визначення індикаторів зносостійкості, зміцнений поліамід, дисперсні скло- і вуглеволокна, металополімерні підшипники ковзання*

Вступ. З метою оцінки зносостійкості матеріалів в практиці застосовують різні методики і силові схеми проведення трибоекспериментальних досліджень. Відповідно за їх результатами можна визначити абсолютні та відносні характеристики (показники, індикатори) матеріалів досліджуваних трибопар при прийнятих умовах. За ними можна провести порівняльну оцінку зносостійкості матеріалів за однакових зовнішніх умов досліджень. До найбільш поширених відносяться лінійне, масове та об'ємне зношування (абсолютні характеристики) та відповідна інтенсивність і швидкість зношування (відносні характеристики). Більш доцільними і поширеними є відносні характеристики зносостійкості. Вказані кількісні характеристики зносостійкості матеріалів визначаються при питоному нормальному навантаженні у трибопарі.

Однак у випадку використання розрахункових методів для оцінки зношування трибомеханічних систем ковзання зазначені відносні числові характеристики зносостійкості, які визначено, як правило, при одному певному навантаженні, не можуть бути використані для ширшого діапазону зміни навантаження трибоконтакту. З цією метою необхідно проводити модельні трибоекспериментальні дослідження трибопар в достатньо широкому діапазоні зміни навантажень, за результатами яких слід встановити базові характеристики зносостійкості математичних моделей кінетики зношування трибосистем.

У даній роботі наведено результати досліджень за методикою модельних трибоекспериментів [1; 3] для встановлення показників (індикаторів) зносостійкості полімерних зміцнених поліамідних композитів у парі зі сталлю, які використовуються для виготовлення втулок гібридних підшипників ковзання.

Експериментальне дослідження зносостійкості. Для дослідження зносостійкості полімерних наповнених композитів (скло- та вугленаповнений поліамід РА6) було вибрано силову схему торцевого тертя (композитні стержні – ста-

льний диск), при якій забезпечується незмінних умов тертя і зношування протягом експерименту, за вибраною програмою.

Програма досліджень: контактний тиск $p = 1, 2, 5, 10, 20$ МПа, швидкість ковзання $v = 0,4$ м/с, шлях тертя $L = 2000$ м, діаметр пальцевого зразка $d = 4$ мм. За результатами експерименту визначено масове зношування зразків ΔM , а в наступному обчислено їх усереднене лінійне зношування h за формулою

$$h = \frac{\Delta M}{\rho S}, \quad (1)$$

де ρ – густина поліамідного композиту; S – номінальна площа контакту.

Наступний етап обробки даних трибоекспериментальних досліджень – це встановлення дослідних індикаторів зносостійкості – функцій зносостійкості $\Phi_i(\tau_i)$ за формулою

$$\Phi_i(\tau_i) = L_i / h_i, \quad (2)$$

де $L = vt$, t – тривалість експерименту, h_i – лінійні зношування зразків, τ_i – дискретні величини питомих сил тертя при ступенях $i = 1, 2, 3, \dots$ навантаження.

Питома сила тертя τ , рівень якої визначає швидкість зношування елементів трибосистеми, обчислюється за формулою Амонтона - Кулона

$$\tau = fp, \quad (3)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання; p – номінальний контактний тиск.

Завершальним етапом обробки даних експериментальних досліджень є визначення базових характеристик зносостійкості для математичної моделі дослідження кінетики зношування матеріалів при терті ковзання [1, 3] з використанням встановлених на попередньому етапі дискретних дослідних індикаторів зносостійкості – функцій зносостійкості $\Phi_k(\tau_k)$. Відповідно їх апроксимація проводиться за таким співвідношенням [3]:

$$\Phi_k(\tau) = B_k \frac{\tau_{k0}^{m_k}}{(\tau - \tau_{k0})^{m_k}}, \quad (4)$$

де B_k, m_k, τ_{k0} – характеристики зносостійкості матеріалів досліджуваної трибопари, які визначаються за методом найменших квадратів, $k = 1; 2$ – нумерація елементів трибопари.

Характеристична функція зносостійкості $\Phi_k(\tau)$ є базовим інтегральним параметром розробленої математичної моделі зношування.

За наведеною вище методикою було визначено характеристики зносостійкості досліджуваних поліамідних композитів [4] в парі зі сталлю:

- вугленаповненого PA6+30CF: $B_{1CF} = 24 \cdot 10^{10}$, $m_{1CF} = 1,9$, $\tau_{10} = 0,05$ МПа.
- склонаповненого PA6+30GF: $B_{2GF} = 6,67 \cdot 10^{10}$, $m_{2GF} = 1,9$, $\tau_{20} = 0,05$ МПа;

Відповідно на рис. 1 точками показано експериментальні дискретні значення індикаторів зносостійкості $\Phi_i(\tau_i)$ обох композитів, а лініями зображено діаграми їх зносостійкості $\Phi(\tau) \sim \tau$, як індикатори зносостійкості цих матеріалів у досліджуваному діапазоні питомих сил тертя.

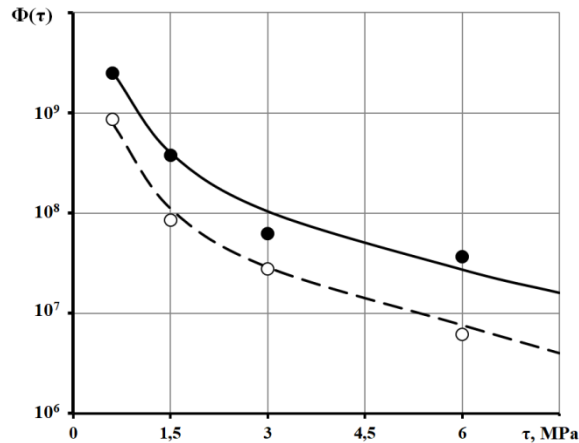


Рис.1. Діаграми зносостійкості поліамідних композитів: суцільна лінія – вуглеком-
позит, штрихова лінія – склокомпозит; експериментальні значення функції зносостійко-
сті: вуглекомпозит – темні значки, склокомпозит – світлі значки

Наведена діаграма зносостійкості матеріалу (ДЗМ) уможливорює візуальну оцінку зносостійкості матеріалу на усьому діапазоні зміни питомих сил тертя. Тут також можливо шляхом екстраполяції встановити передбачувану зносостійкість матеріалу при більших питомих силах тертя, ніж вони були при трибо-експериментальних дослідженнях, за умови збереження того ж механізму зношування. Зазначена риса цього графічного індикатора зносостійкості матеріалу є вельми корисною, оскільки при трибоекспериментальних дослідженнях часом важко, а то і неможливо, забезпечити вищі значення питомих сил тертя, які реально виникають у триботехнічних системах ковзання. Крім того при дослідженні зношування декількох матеріалів, легко порівняти їх зносостійкість при різних значеннях питомих сил тертя.

На основі отриманих результатів трибоекспериментальних досліджень цих композитів по їх ДЗМ проведено оцінку їх порівняльної зносостійкості і встановлено, що вуглезаповнений композит буде у $\Phi_1(\tau)/\Phi_2(\tau) = 3.6$ рази зносостійкішим, ніж склозаповнений.

Взаємозв'язок індикаторів зносостійкості матеріалів з триботехнічними характеристиками. Якщо врахувати, що зносостійкість є оберненою характеристикою щодо інтенсивності зношування то, відповідно, дослідна обернена функція лінійної зносостійкості $1/\Phi_i(\tau_i)$ буде дослідною функцією інтенсивності лінійного зношування $I_{hi}(\tau_i)$ при дискретних значеннях питомої сили тертя τ_i

$$\frac{1}{\Phi_i(\tau_i)} = \frac{h_i}{L_i} = I_{hi}(\tau_i). \quad (5)$$

Також функція зносостійкості $\Phi_i(\tau_i)$ пов'язана із функцією швидкості лінійного зношування $\gamma_{hi}(\tau_i)$ такою залежністю:

$$\Phi_i(\tau_i) = v / \gamma_{hi}(\tau_i), \quad (6)$$

і обернено

$$\gamma_{hi}(\tau_i) = v / \Phi_i(\tau_i) = v I_{hi}(\tau_i), \quad (7)$$

Тобто результати експериментальної оцінки зносостійкості матеріалів за розробленою методикою можна співставити з наявними у літературі результатами за аналогічних умов зношування, в першу чергу за однакових питомих сил тертя та швидкостей ковзання.

Слід відзначити, що вказані базові модельні індикатори зносостійкості $\Phi_k(\tau)$ можуть бути використані для обчислення сумарного лінійного зношування елементів трибomeханічної системи ковзання, якщо відомо зношування одного з її елементів. Особливо це важливо у випадку різної зносостійкості матеріалів та неоднакових умов трибоконтракту її елементів. На загал сумарне лінійне зношування розраховується так:

$$h_{\Sigma} = h_1 + h_2 = h_1(1 + h'_1) = h_2(1 + h'_2), \quad (8)$$

де h'_1, h'_2 – відносні лінійні зношування.

Вони встановлюються через $\Phi_k(\tau)$ з урахуванням (4) за такими залежностями:

$$h'_1 = \frac{h_2}{h_1} = \frac{\Phi_1(\tau)}{\Phi_2(\tau)} = \frac{B_1 \tau_{10}^{m_1} (\tau - \tau_{20})^{m_2}}{B_2 \tau_{20}^{m_2} (\tau - \tau_{10})^{m_1}} K_t^{(2)}, \quad h'_2 = \frac{h_1}{h_2} = \frac{\Phi_2(\tau)}{\Phi_1(\tau)} = \frac{B_2 \tau_{20}^{m_2} (\tau - \tau_{10})^{m_1}}{B_1 \tau_{10}^{m_1} (\tau - \tau_{20})^{m_2}} K_t^{(1)}, \quad (9)$$

де $K_t^{(1)}, K_t^{(2)}$ – коефіцієнти взаємного перекриття елементів трибосистеми при рухомому контакті.

Відповідно у підшипнику ковзання

$$h_{\Sigma} = h_k (K_t^{(k)} + h'_k), \quad h_{\Sigma} = h_1 (-K_t^{(1)} + h'_1), \quad h_{\Sigma} = h_2 (K_t^{(2)} - h'_2); \quad K_t^{(1)} = 1, \quad K_t^{(2)} = \alpha_0 / \pi, \quad (10)$$

де α_0 – півкут контакту у підшипнику, який визначається шляхом розв'язання плоскої контактної теорії пружності для такого виду з'єднань [1 - 3].

Лінійні зношування h_k елементів підшипника є взаємопов'язаними, тобто

$$h_1 = h_2 h'_2 / K_t^{(2)}, \quad h_2 = h_1 h'_1 / K_t^{(1)}. \quad (11)$$

З урахуванням (2)

$$vt_1 = \Phi_1 h_1, \quad vt_2 = \Phi_2 h_2.$$

Відповідно відносні довговічності t'_k елементів трибomeханічної системи будуть

$$t'_1 = \frac{t_2}{t_1} = \frac{\Phi_2(\tau) h_2 K_t^{(2)}}{\Phi_1(\tau) h_1 K_t^{(1)}} = \frac{\Phi_2^2(\tau)}{K_t^{(1)} \Phi_1^2(\tau)}, \quad t'_2 = \frac{t_1}{t_2} = \frac{\Phi_1(\tau) h_1 K_t^{(1)}}{\Phi_2(\tau) h_2 K_t^{(2)}} = \frac{\Phi_1^2(\tau)}{K_t^{(2)} \Phi_2^2(\tau)} \quad (12)$$

Тоді

$$t_1 = t_2 \Phi_1^2(\tau) / \Phi_2^2(\tau) K_t^{(2)} = t_2 t'_2, \quad t_2 = t_1 \Phi_2^2(\tau) / \Phi_1^2(\tau) K_t^{(1)} = t_1 t'_1. \quad (13)$$

За співвідношеннями (13) обчислюється ресурс елементів трибосистеми ковзання до досягнення ними однакового лінійного зношування у випадку різної зносостійкості їх матеріалів.

Висновки. Наведена методика модельних трибоекспериментальних досліджень матеріалів при терті ковзання за силовою схемою торцевого тертя забезпечує коректне визначення відносних індикаторів зносостійкості, необхідних для розрахункової оцінки зношування і довговічності металополімерних підши-

пників ковзання згідно розробленої раніше математичної трибокінетичної моделі дослідження кінетики зношування матеріалів при терті ковзання.

Список літератури

1. Андрейкив А.Е., Чернець М.В. Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин. – К.: Наукова думка, 1991.
2. Чернець М.В. Методологія оцінки характеристик контакту та прогнозування довговічності циліндричних трибосистем ковзання // Проблеми трибології. – 2000. - №1. – С. 14-22.
3. Чернець М., Пашечко М., Невчас А. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання. В 3-х томах. Т.1. Дослідження та розрахунок трибосистем ковзання, методи підвищення довговічності і зносостійкості. - Дрогобич: КОЛО, 2001.– 492 с.
4. Chernets M., Shil'ko S., Pashechko M. Study of wear resistance of reinforced polyamide composites for metal-polymer gear drives // Tribologia, 2018, №3, p.p. 19 – 23.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2020.

Чернець Мирон Васильович – докт. техн. наук, професор, Національний авіаційний університет, Київ, Україна; myron.czerniec@gmail.com

Кіндрачук Мирослав Васильович – докт. техн. наук, професор, Національний авіаційний університет, Київ, Україна; kindrachuk@ukr.net

Корнієнко Анатолій Олександрович – канд. техн. наук, доцент, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Гловин Михайло Андрійович – студент, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Костецький Іван Володимирович – студент, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

*M. V. CHERNETS, M. V. KINDRACHUK, A. O. KORNIENKO, M. A. GLOVIN,
I. V. KOSTETSKY*

**TO THE QUESTION ON THE METHOD OF DETERMINATION OF THE WEAR
RESISTANCE INDICATORS OF STRENGTHED POLYMER POLYAMIDE COM-
POSITES FOR HYBRID PLAIN BEARINGS**

The technique of model triboexperimental studies of materials at sliding friction according to the force scheme of front friction is presented. It uses quantitative relative indicators of the wear resistance of polyamide reinforced with dispersed glass and carbon fibers, which can be used in metal-polymeric plain bearings. The characteristics of the wear resistance of these composites were determined as the basic characteristics of a mathematical model for the study of the kinetics of material wear during sliding friction. Also, according to the conducted researches, the diagrams of wear resistance are plotted as graphical indicators of wear resistance in the accepted range of specific friction forces. The dependences that relate the characteristic features of the wear resistance of materials developed by the mathematical tribokinetic model of wear with linear wear and plain bearing service life are given.

Keywords: method of determination of wear resistance indicators, strengthened polyamide, dispersed glass and carbon fibers, metal-polymeric plain bearings

Reference

1. Andrejkiv A.E., Chernec M.V. Ocenka kontaktного vzaimodejstviya trushhihsja detalej mashin. – K.: Naukova dumka, 1991.
2. Chernets M.V. Metodolohiia otsinky kharakterystyk kontaktu ta prohnozuvannia dovhovichnosti tsylindrychnykh trybosystem kovzannia // Problemy trybolohii. – 2000. - №1. – S. 14-22.
3. Chernets M., Pashechko M., Nevchas A. Metody prohnozuvannia ta pidvyshchennia znoso-stiikosti trybotekhnichnykh system kovzannia. V 3-kh tomakh. T.1. Doslidzhennia ta rozrakhunok trybosystem kovzannia, metody pidvyshchennia dovhovichnosti i znosostiikosti. - Drohobych: KOLO, 2001.– 492 s.
4. Chernets M., Shilko S., Pashechko M. Study of wear resistance of reinforced polyamide composites for metal-polymer gear drives // Tribologia, 2018, №3, p.p. 19 – 23.