

УДК 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.1(94).16467

М. В. ЧЕРНЕЦЬ, А. О. КОРНІЄНКО

*Національний авіаційний університет, Київ***ТРИБОЛОГІЧНА ПОВЕДІНКА ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ВУЗЛІВ СУХОГО ТЕРТЯ КОВЗАННЯ. ЧАСТ. 1. ПОЛІАМІДИ**

*За методикою модельних трибоекспериментальних досліджень матеріалів при терті ковзання за схемою торцевого тертя визначено зносостійкість поліамідів PA6, PA66 та композитів на основі поліаміду PA6: PA6+30GF, PA6+30CF, PA6+MoS<sub>2</sub>, PA6+Oil. Їх широко використовують у металополімерних (МП) зубчастих передачах та підшипниках ковзання, що працюють в умовах сухого тертя ковзання. Встановлено їх індикатори зносостійкості, на основі яких визначено характеристики їх зносостійкості, як використовуються у розрахункових методах дослідження вказаних гібридних трибомеханічних систем. За результатами досліджень побудовано їх діаграми зносостійкості цих полімерних матеріалів, як їх графічні індикатори зносостійкості у прийнятному діапазоні питомих сил тертя. Встановлено кількісні закономірності трибологічної поведінки вказаних поліамідів у трибопарі зі сталлю 45. Наведено результати впливу навантаження на зміну коефіцієнтів тертя ковзання.*

**Ключові слова:** методика визначення експериментальних індикаторів зносостійкості, сухе тертя ковзання, металополімерна пара тертя, поліаміди PA6, PA66 та композити PA6+30GF, PA6+30CF, PA6+MoS<sub>2</sub>, PA6+Oil; індикатори та характеристики їх зносостійкості, коефіцієнт тертя ковзання

**Вступ.** У металополімерних (МП) зубчастих передачах та підшипниках ковзання, що працюють в умовах сухого тертя ковзання, достатньо широко використовують поліаміди, зокрема PA6, PA66 та композити на їх основі. До поширених відносяться наповнені короткими скляними (PA6+30GF) чи вуглецевими (PA6+30CF) волокнами, дисульфідом молібдену (PA6+MoS<sub>2</sub>), литий з мастилом (PA6+Oil).

З метою оцінки зносостійкості матеріалів широко використовують схему торцевого тертя за умовами, поданими у стандарті ISO 7148-2 [1]. Вона забезпечує постійні умови навантаження та швидкості ковзання, а теж і постійні умови тертя і зношування протягом усього експерименту. Тому результати таких досліджень найбільш об'єктивно відображають абсолютні та відносні характеристики (показники, індикатори) зносостійкості матеріалів досліджуваних трибопар при прийнятих умовах, що дозволяє проводити їх порівняльну оцінку.

Згідно стандарту ISO 7148-2 тестування зношування матеріалів у трибоекспериментальних дослідженнях проводять при визначеній конкретній величині контактного тиску у трибопарі. Проте у розрахункових методах зношування трибомеханічних систем ковзання відносні характеристики зносостійкості матеріалів – інтенсивність та швидкість зношування, визначені при одному рекомендованому стандартному навантаженні, не можуть бути обгрунтовано використані при іншій величині навантаження. Це різко обмежує їх практичне застосування.

У літературі наявні деякі кількісні результати експериментальних досліджень за схемою pin-on-disk при сухому терті, що стосуються трибологічної поведінки поліамідів для МП трибопар [2 – 6]. Зокрема у [2] було досліджено зношування трибопари поліамід PA6 - сталь AISI 02. Найбільш широкомасштабні з них

проведено у роботі [3], де наведено результати дослідження двадцять одного інженерного комерційного полімеру, як ненаповнених, так і композиційних. Трибологічну поведінку поліаміду PA6 по сталі за різних умов випробувань, в т.ч. і при сухому терті, вивчено у [4 – 6].

Щоб уникнути вище вказаного обмеження для цього слід проводити трибоекспериментальні дослідження трибопар в певному діапазоні зміни навантажень і за їх результатами встановити характеристики (індикатори) зносостійкості, необхідні для використання у трибокінетичних моделях кінетики зношування трибосистем. Саме така необхідність виникає у розрахункових методах підшипників ковзання і різного виду зубчастих передач з металевих матеріалів [7 – 14] та вказаних металополімерних вузлів тертя [15; 16].

Нижче подано результати досліджень за методикою модельних трибоекспериментів [7; 14] по встановленню показників (індикаторів) зносостійкості поліамідів PA6, PA66 та композитів PA6+30GF, PA6+30CF, PA6+MoS<sub>2</sub>, PA6+Oil у парі зі сталлю 45.

**Трибоекспериментальні дослідження зносостійкості.** Для дослідження зносостійкості вказаних полімерних композитів використано схему торцевого тертя з двома композитами стержнями 4 і сталевий диском 5, при якій забезпечуються незмінні умови тертя і зношування протягом експерименту. Практична реалізація трибоекспериментів була виконана на трибометрі, схема якого подана на рис. 1.

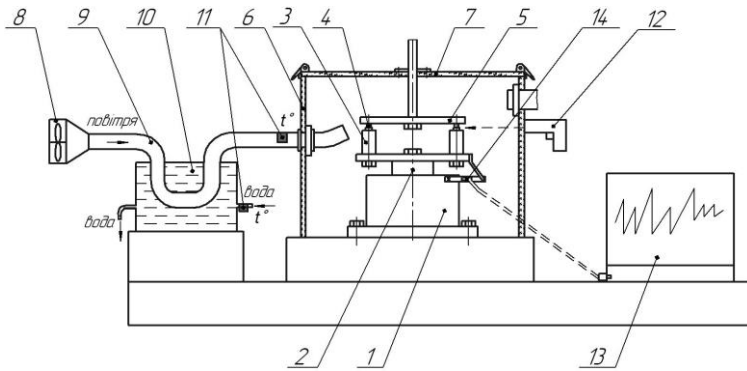


Рис. 1. Схема експериментальної установки pin-on-disk: 1 – корпус; 2 – рухома вісь зі зразкотримачами; 3 – зразкотримач; 4 – полімерні пальцеві зразки; 5 – сталевий дисковий контрзразок; 6 – бокс; 7 – знімна кришка; 8 – нагнітач повітря; 9 – повітревідвід; 10 – водяний теплообмінник; 11 – термодатчики; 12 – пірометр; 13 – комп'ютер, 14 – тензобалка для замірювання моменту тертя

Для проведення модельних трибоекспериментальних досліджень при сухому терті вказаних поліамідів вибрано наступну програму: контактний тиск  $p_i = 2, 4, 6, 8$  МПа, швидкість ковзання  $v = 0,4$  м/с, тривалість експерименту  $t = 5 \dots 10$  год, діаметр пальцевого зразка  $d = 3$  мм.

Стандарт ISO 7148-2 передбачає для цього виду полімерних матеріалів такі умови: тиск на контакт  $p = 3$  МПа, швидкість  $v = 0,4$  м/с, температура полімерного зразка поблизу стику з металевим контрдиском  $T = 23 \pm 1^\circ\text{C}$  при відносній вологості повітря  $50 \pm 5\%$  у ізолюваному боксі установки.

Експериментальні індикатори зносостійкості  $\Phi_i$  полімерних матеріалів встановлено таким чином:

$$\Phi_i = L_i/h_i, \quad (1)$$

де  $L = vt$  – шлях тертя,  $h_i$  – лінійне зношування дослідних полімерних зразків,  $i = 1, 2, 3, \dots$  ступені номінального контактного тиску  $p_i$ .

У модельних трибоекспериментальних дослідженнях параметром навантаженості трибоконтакту прийнято похідну контактного тиску, якою кулонівська питома сила тертя  $\tau = fp$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання, встановлений експериментально.

Отримані дані про індикатори зносостійкості  $\Phi_i$  та значення питомої сили тертя  $\tau_i = f_i p_i$  використано для побудови графіків у координатах  $\Phi \sim \tau$ . В наступному з метою використання цих досліджень у розрахунковому методі [15; 16] МП підшипників ковзання та зубчастих передач було визначено характеристики зносостійкості матеріалів трибокінетичної моделі дослідження зношування матеріалів при терті ковзання [7; 8; 11; 13; 17]. Відповідно було апроксимовано певного виду функцією низку дискретних дослідних індикаторів зносостійкості  $\Phi_i$  та визначено нижчевказані характеристики зносостійкості матеріалів досліджених трибопар.

Апроксимаційна функція для МП підшипників ковзання має вид [7; 8; 12]:

$$\Phi_k(\tau) = B_k \frac{\tau_{k0}^{m_k}}{(\tau - \tau_{k0})^{m_k}}, \quad (2)$$

де  $\Phi_k(\tau)$  – характеристична функція зносостійкості – базовий інтегральний параметр математичної моделі зношування,  $B_k, m_k, \tau_{k0}$  – характеристики зносостійкості матеріалів досліджуваної трибопари за даних умов,  $k = 1; 2$  – нумерація елементів трибопари.

Апроксимаційна функція для МП зубчастих передач, має дещо інший вид [13; 15]

$$\Phi_k(\tau) = C_k \left( \frac{\tau_{sk}}{\tau} \right)^{m_k}, \quad (3)$$

де  $C_k, m_k$  – характеристики зносостійкості матеріалів досліджуваної трибопари,  $\tau_s = 0,5\sigma_B$  – границя міцності матеріалів при зрізі.

**Аналіз результатів.** Результати проведених досліджень за поданою вище методикою щодо встановлення характеристик  $B, m, \tau_0$  зносостійкості поліамідів для МП підшипників ковзання при заданих умовах тертя подано у табл. 1.

Дані про матеріали МП підшипників ковзання: вал 2 – сталь 45 нормалізована,  $E_2 = 210000$  МПа,  $\nu_2 = 0,3$ ; втулка 1 – поліаміди.

Таблиця 1

Характеристики полімерів	Поліаміди					
	РА6	РА66	РА6+ 30GF	РА6+MoS <sub>2</sub>	РА6+30CF	РА6+Oil
$B_1 \cdot 10^{10}$	2,26	3,37	4,12	5,58	6,53	7,03
$m_1$	1,09	1,09	1,09	1,1	1,1	1,1
$\tau_{10}$ , МПа	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Модуль Юнга $E_1$ , МПа	2000	2300	2700	1660	3300	1960
Коефіцієнт Пуасона $\nu_1$	0,4	0,4	0,41	0,4	0,41	0,4
Границя міцності на тиск $\sigma_B$ , МПа	80	80	100	78	80	78

Примітка: РА6+30GF – тут наповнювача (коротке скловолокно) є 30 об'ємних відсотків

Результати трибоекспериментальних досліджень подано на рис. 2 – 5. Зокрема на рис. 2 представлено діаграми зносостійкості вищевказаних поліамідів.

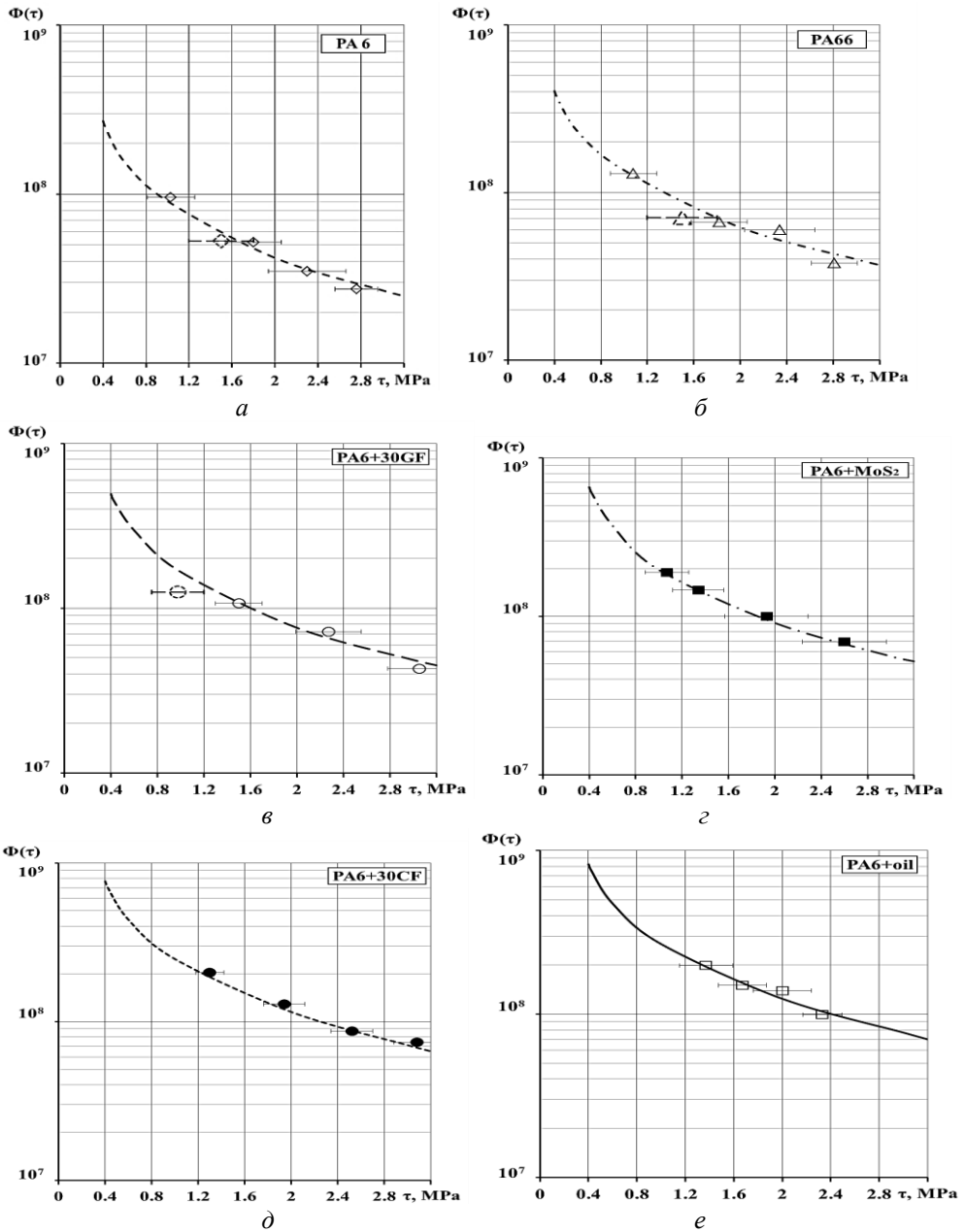


Рис. 2. Діаграми зносостійкості поліамідів

Маркерами зображено дослідні індикатори зносостійкості  $\Phi_i$  поліамідів при кожній ступені  $\tau_i = f p_i$ . Вони при однакових тисках на контакті розташовані по осі  $\tau$  по-різному. У результаті їх апроксимації функцією (2) визначено характеристики зносостійкості  $B, m, \tau_0$  (табл. 1) досліджених поліамідів, за якими побудовано їх діаграми зносостійкості (графіки). Залежність зносостійкості від питомої сили тертя є нелінійною. Якісний характер зміни зносостійкості різних поліамідів є практично однаковим.

На рис. 3 наведено об'єднані діаграми зносостійкості досліджених поліамідів і їх композитів.

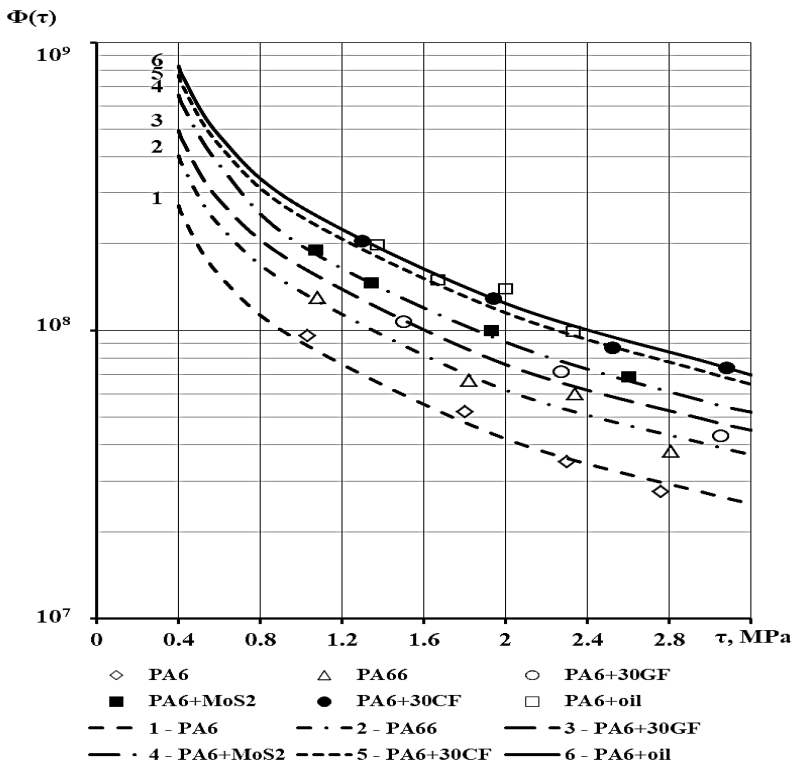


Рис. 3. Діаграми зносостійкості поліамідів для МП підшипників ковзання

Подані діаграми зносостійкості матеріалів, як їх графічні індикатори, дозволяють порівняти зносостійкість кількох досліджених поліамідів при різних рівнях питомих сил тертя. Найнижчою зносостійкістю буде у ненаповненого поліаміду PA6, а найвищою – у PA6+Oil.

Результати проведених досліджень за поданою вище методикою щодо встановлення характеристик  $C$ ,  $m$  зносостійкості поліамідів для МП зубчастих передач при заданих умовах тертя подано у табл. 2.

Дані про матеріали МП зубчастих передач: шестерня 1 – сталь 45 нормалізована,  $E_1 = 210000$  МПа,  $\nu_1 = 0,3$ ; зубчасте колесо 2 – поліаміди.

Таблиця 2

Характеристики зносостійкості	Поліаміди					
	PA6	PA66	PA6+30GF	PA6+MoS <sub>2</sub>	PA6+30CF	PA6+ Oil
$C_2 \cdot 10^6$	1,34	1,98	1,88	3,08	3,67	4,20
$m_2$	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
$\tau_{S2}$ , МПа	40	40	50	38	40	38

Рис. 4 представляє діаграми зносостійкості поданих поліамідів при 5-и рівнях контактних тисків  $p_i = 2, 4, 6, 8, 12$  МПа та більшому діапазоні питомих сил тертя (до 6 МПа), характерному для МП зубчастих передач.

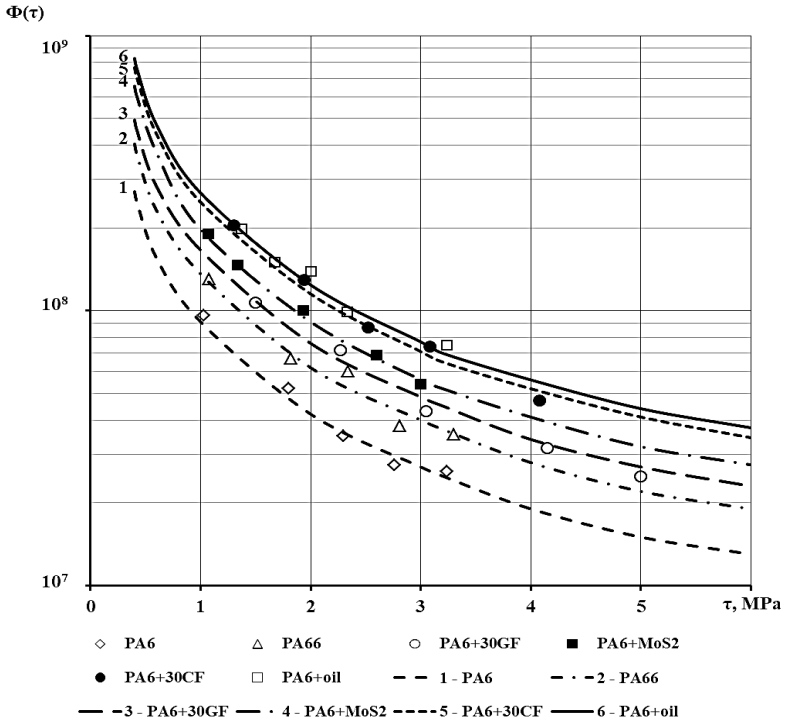


Рис. 4. Діаграми зносостійкості поліамідів для МП зубчастих передач

Встановлено також експериментально залежність коефіцієнта тертя ковзання  $f$  від контактного тиску  $p_i$  у трибопарах сухого тертя (рис. 5).

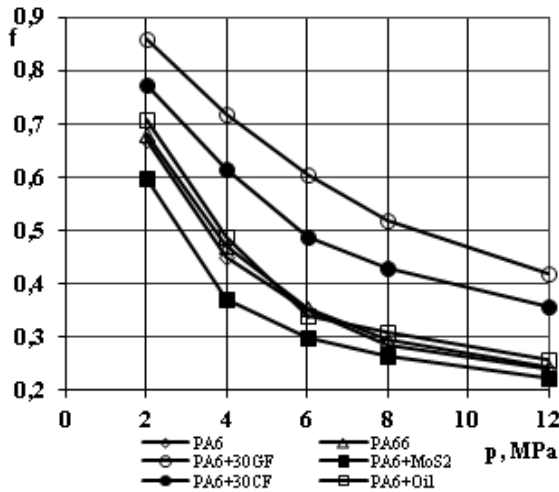


Рис. 5. Залежність середнього коефіцієнта тертя ковзання від тиску у трибопарах поліаміди – сталь

Збільшення контактного тиску у експериментальних трибопарах призводить до значного зниження коефіцієнта сухого тертя - у 2,05...2,7 рази у залежності від виду трибопар. Найвищим був коефіцієнт тертя у парі PA6+30GF - сталь, дещо нижчим – у парі PA6+30CF – сталь, а найнижчим - у парі PA6+MoS<sub>2</sub> – сталь. Наповнення поліаміду PA6 скло- чи вуглеволокном призводить до достатньо

суттєвого збільшення коефіцієнта тертя. Натомість введення MoS<sub>2</sub> у PA6 його знижує. У випадку литого з мастилом композиту PA6+Oil коефіцієнт тертя є близьким як у PA6, PA66 – сталь.

### **Висновки.**

У результаті проведених досліджень поліамідів для МП підшипників ковзання та зубчастих передач встановлено, що:

1. Різного виду наповнювачі поліаміду PA6 (GF, CF, MoS<sub>2</sub>, Oil) значно впливають на зносостійкість його композитів, підвищуючи її. Встановлено кількісні і якісні закономірності впливу наповнювачів на зносостійкість композитів порівняно з базовими поліамідами. Найнижчу зносостійкість має ненаповнений поліамід PA6, а найвищу – його композит PA6+Oil.

2. Коефіцієнт сухого тертя ковзання нелінійно залежить від контактного тиску у експериментальних трибопарах. Відповідно представлено якісні і кількісні закономірності цих залежностей для кожного з досліджених полімерів. Найнижчим був коефіцієнт тертя у парі PA6+MoS<sub>2</sub> – сталь 45, а найвищим - у парі PA6+30GF – сталь 45.

3. Побудовано діаграми зносостійкості поліамідів, які відображають якісні і кількісні взаємозалежності зносостійкості від питомої сили тертя. Вони забезпечують порівняння зносостійкостей досліджених матеріалів у значному діапазоні питомих сил тертя.

### **Список літератури**

1. International Standard ISO 7148-2. Plain bearings – testing of the tribological behaviour of bearings materials. Part 2. Testing of polymer – based bearing materials. 10.01.2012.

2. Palabiyik, M., Bahadur S. Tribological studies of polyamide 6 and high-density polyethylene blends filled with PTFE and copper oxide and reinforced with short glass fibers. *Wear*. 2002. V. 253. P. 369–376.

3. Kalácska G. An engineering approach to dry friction behaviour of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties. *eXPRESS Polymer Letters*. 2013. V.7 (2). P. 199–210.

4. Mithun V., Kulkarni K., Elagovan K., Nemachandra R., Basappa S. J. Tribological behaviours of ABS and PA6 polymer metal sliding combinations under dry friction, waterabsorbed and elektroplated conditions. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2016. V. 11. No.1.

5. Pogačnik, A., Kupec A., Kalin M. Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*. 2017. V. 378–379. P. 17–26.

6. De Almeida Rosa A.G., Moreto J.A., Manfrinato M.D., Rossino L.S.. Study on friction and wear behavior of SAE 1045 steel, reinforced nylon 6.6 and NBR rubber used in clutch disks. *Mat. Res.*. 2014. V.17. No.6. P. 1397 – 1403.

7. 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.

8. Чернець М.В. Трибоконтактні задачі для циліндричних з'єднань з технологічною некруглістю. – Люблін: Вид. Люблінської політехніки, 2013. – 274 с.

9. Чернець М. В., Келбінські Ю. Расчетная оценка износа и ресурса косозубых эвольвентных цилиндрических передач // Проблемы трибологии. – 2004. - № 3. – С. 61 – 70.

10. Чернець М., Келбінські Ю. Вплив нахилу зубів косозубих циліндричних передач на трибомеханічні, силові на кінематичні характеристики // Проблемы трибологии. – 2006. - №4. – С. 3 – 7.

11. Чернець М.В., Ярема Р.Я. Прогнозування довговічності черв'ячних передач з архімедовим та евольвентним черв'яком // Проблемы трибологии. – 2011. – №2. – С. 21 – 25.

12. Chernets M., Chernets Ju. Generalized method for calculating the durability of sliding bearings with technological out-of-roundness of details // Proc. IMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology . -2015. – Vol. 229, №2. – pp. 216 – 226.

13. Chernets M., Chernets Ju. The simulation of influence of engagement conditions and technological teeth correction on contact strength, wear and durability of cylindrical spur gear of electric locomotive // Proc. IMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017; Vol. 231, No 1, p.57 – 62.

14. Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P. Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarciowo. - Lublin: Wyd. IZT . - 2000.– 236 s.

15. Czerniec M., Kornienko A. Prediction of the Service Life of Metal-Polymer Gears Made of Glass and Carbon Fibre-Reinforced Polyamide, Considering the Impact of Height Correction // Advances in Science and Technology Research Journal. - 2020, Vol. 14, Issue 3. - pages 15–21.

16. Chernets M., Chernets J., Kindrachuk M., Kornienko A. Methodology of calculation of metal-polymer sliding bearings for contact strength, durability and wear // Tribology in Industry. – 2020, Vol. 42, No. 4. - pages 572-581.

17. Андрейкив А.Е., Панасюк В.В., Чернец М.В. К теории износа материалов при сухом трении // ФХММ. - 1981. - № 2. – с. 51-57.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2022.

**Чернець Мирон Васильович** – докт. техн. наук, професор, Національний авіаційний університет, Київ, Україна; [myron.czerniec@gmail.com](mailto:myron.czerniec@gmail.com)

**Корнієнко Анатолій Олександрович** – канд. техн. наук, доцент, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, [anatoliy\\_k@ukr.net](mailto:anatoliy_k@ukr.net)



*M. V. CHERNETS, A. O. KORNIENKO*

**TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF POLYMERIC MATERIALS FOR HYBRID METALLOPOLYMER UNITS OF DRY SLIDING FRICTION.  
PART. 1. POLYAMIDES**

The wear resistance of polyamides PA6, PA66 and PA6 based composites: PA6 + 30GF, PA6 + 30CF, PA6 + MoS<sub>2</sub>, PA6 + Oil was determined according to the method of model tribo-experimental studies of materials during sliding friction. They are widely used in metal-polymer gears and plain bearings operating in conditions of dry sliding friction. Their wear resistance indicators are established, on the basis of which the characteristics of their wear resistance are determined, as used in the calculation methods of these hybrid tribomechanical systems. Quantitative regularities of tribological behavior of the specified polyamides in tribocouples with steel 45 are established. The results of influence of loading on change of coefficients of sliding friction are given.

**Key words:** method of determination of experimental indicators of wear resistance, dry sliding friction, metal-polymer friction pair, polyamides PA6, PA66 and composites PA6 + 30GF, PA6 + 30CF, PA6 + MoS<sub>2</sub>, PA6 + Oil; indicators and characteristics of their wear resistance, sliding friction coefficient

**Referenses**

1. International Standard ISO 7148-2. Plain bearings – testing of the tribological behaviour of bearings materials. Part 2. Testing of polymer – based bearing materials. 10.01.2012.
2. Palabiyik, M., Bahadur S. Tribological studies of polyamide 6 and high-density polyethylene blends filled with PTFE and copper oxide and reinforced with short glass fibers. *Wear*. 2002. V. 253. P. 369–376.
3. Kalácska G. An engineering approach to dry friction behaviour of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties. *eXPRESS Polymer Letters*. 2013. V.7 (2). P. 199–210.
4. Mithun V., Kulkarni K., Elagovan K., Hemachandra R., Basappa S. J. Tribological behaviours of ABS and PA6 polymer metal sliding combinations under dry friction, waterabsorbed and electroplated conditions. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2016. V. 11. No.1.
5. Pogačnik, A., Kupec A., Kalin M. Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*. 2017. V. 378–379. P. 17–26.
6. De Almeida Rosa A.G., Moreto J.A., Manfrinato M.D., Rossino L.S.. Study on friction and wear behavior of SAE 1045 steel, reinforced nylon 6.6 and NBR rubber used in clutch disks. *Mat. Res.*. 2014. V.17. No.6. P. 1397 – 1403.
7. 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.
8. Chernets M.V. Trybokontaktni zadachi dlia tsylindrychnykh ziednan z tekhnolohichnoiu nekruhlistiu. – Lublin: Vyd. Liublinskoï politekhniky, 2013. – 274 s.
9. Chernets M. V., Kelbinsky Yu. Raschetnaia otsenka yznosa y resursa kosozubnykh evolventnykh tsylindrycheskykh peredach // *Problemy trybolohii*. – 2004. - № 3. – S. 61 – 70.
10. Chernets M., Kelbinski Yu. Vplyv nakhylu zubiv kosozubnykh tsylindrychnykh peredach na trybomekhanichni, sylovi na kinematychni kharakterystyky // *Problemy trybolohii*. – 2006. - №4. – S. 3 – 7.
11. Chernets M.V., Yarema R.Ia. Prohnozuvannia dovhovichnosti cherviachnykh peredach z arkhimedovym ta evolventnym cherviakom // *Problemy trybolohii*. – 2011. – №2. – S. 21 – 25.

---

12. Chernets M., Chernets Ju. Generalized method for calculating the durability of sliding bearings with technological out-of-roundness of details // Proc. IMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology . -2015. – Vol. 229, №2. – pp. 216 – 226.

13. Chernets M., Chernets Ju. The simulation of influence of engagement conditions and technological teeth correction on contact strength, wear and durability of cylindrical spur gear of electric locomotive // Proc. IMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017; Vol. 231, No 1, p.57 – 62.

14. Niewczas A., Czerniec M., Ignaciuk P. Badania trwałości elementów maszyn współpracujących tarcioowo. - Lublin: Wyd. IZT . - 2000.– 236 s.

15. Czerniec M., Kornienko A. Prediction of the Service Life of Metal-Polymer Gears Made of Glass and Carbon Fibre-Reinforced Polyamide, Considering the Impact of Height Correction // Advances in Science and Technology Research Journal. - 2020, Vol. 14, Issue 3. - pages 15–21.

16. Chernets M., Chernets J., Kindrachuk M., Kornienko A. Methodology of calculation of metal-polymer sliding bearings for contact strength, durability and wear // Tribology in Industry. – 2020, Vol. 42, No. 4. - pages 572-581.

17. Andreikiv A.E., Panasiuk V.V., Chernets M.V. К теорії зноса матеріалів при сухом трінні // FKhMM. - 1981. - № 2. – s. 51-57.