

УДК 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.1(94).16468

М. В. ЧЕРНЕЦЬ, А. О. КОРНІЄНКО

Національний авіаційний університет, Київ

Трибологічна поведінка полімерних матеріалів для гібридних металополімерних вузлів сухого тертя ковзання. ЧАСТ. 2. ПОЛІАЦЕТАЛІ

За методикою модельних трибоекспериментальних досліджень матеріалів при терті ковзання за схемою торцевого тертя визначено зносостійкість поліацеталу POM-H та низки композитів на його основі: POM+35PTFE, POM+20PTFE, POM+60Bronze, POM+20PTFE+30Bronze; POM+10PTFE+20Bronze, POM+15PTFE+15GF, POM+10PTFE+10GF, POM+10PTFE+20Bronze+10GF, POM+10PTFE+15Bronze+5GF поліаміду PA6. 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 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, поліацеталь POM-H та композити: POM+35PTFE, POM+20PTFE, POM+60Bronze, POM+20PTFE+30Bronze; POM+10PTFE+20Bronze, POM+15PTFE +15GF, POM+10PTFE+10GF, POM+10PTFE+20Bronze+10GF, POM+10PTFE+15Bronze+5GF; 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 поліацеталь POM-H і композити на його основі. З метою оцінки зносостійкості цих матеріалів було використано схему торцевого тертя пальцевих полімерних зразків з котрдиском зі сталі 45 за умовами, поданими у стандарті ISO 7148-2 [1]. За цією силовою схемою тертя забезпечуються постійні умови навантаження та швидкості ковзання, а отже тертя і зношування протягом усього експерименту.

У літературі мало експериментальних досліджень трибологічної поведінки металополімерної пари сталь / поліацеталі з використанням триботестерів. Зокрема такі результати подано у працях [2 – 5]. У [2] досліджено тертя і зношування 18 полімерів у трибопарі зі підшипниковою сталлю AISI 52100 на повітрі та у воді. Це були шість незаповнених полімерних матеріалів: поліамід PA66, поліацеталь POM, поліетилентерфталат PETP, поліетеретеркетон PEEK, поліфеніленсульфід PPS. Також тут для їх модифікації використовувались наповнювачі як тефлон (PTFE) та скловолокно (GF). Робота [3] присвячена дослідженню впливу шорсткості поверхні сталі 40CrMnNiMo8 на тертя і зношування полімерів PTFE, POM-H, PA6+GF, PA6+CF. Трибологічна поведінка харчових полімерів, зокрема PA6, POM-C, при сухому терті по нержавіючій сталі була досліджена у [4]. Значні за обсягом дослідження двадцять одного інженерного наповненого і наповненого комерційного полімерів проведено у [5].

Оскільки зазначені дослідження проведено при одній ступені навантаження, то вони не можуть бути використані для встановлення характеристики зносостійкості, необхідних у трибокінетичних моделях кінетики зношування вказаних трибосистем [6 - 10]. Відповідно для цього слід проводити трибоекспериментальні дослідження трибопар в певному діапазоні зміни навантажень. За результатами таких досліджень можливо вирішити задачу по визначенні модельних характеристик зносостійкості, які використовуються у розроблених розрахункових методах підшипників ковзання і різного виду зубчастих передач як з металевих матеріалів [6 - 14], так металополімерних зубчастих передач і підшипників ковзання [15, 16].

У статті подано результати досліджень за методикою модельних трибоекспериментів [6, 8, 17 ч.1 статті] для встановлення показників (індикаторів) та характеристик зносостійкості поліацеталу POM-H та його наповнених композитів: односкладникових - POM+35PTFE, POM+20PTFE, POM+60Bronze; двоскладникових - POM+20PTFE+30Bronze; POM+10PTFE+20Bronze, POM+15PTFE+15GF, POM+10PTFE+10GF та трьохскладникових - POM+10PTFE+20Bronze+10GF, POM+10PTFE+15Bronze+5GF у парі зі сталлю 45.

Трибоекспериментальні дослідження зносостійкості, аналіз результатів.

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. При цьому проводиться визначення експериментальних індикаторів зносостійкості Φ_i полімерних матеріалів 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 .

Результати проведених досліджень по встановленню індикаторів зносостійкості Φ_i , а з їх викорисанням характеристик B, m, τ_0 зносостійкості поліацеталів для МП підшипників ковзання при вказаних вище умовах тертя подано у табл. 1.

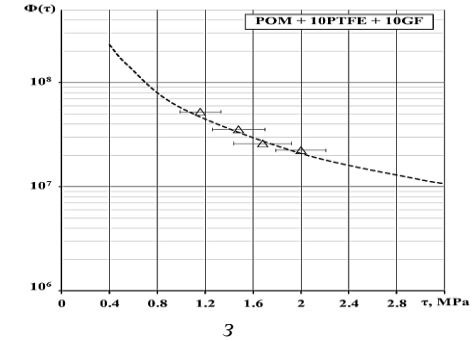
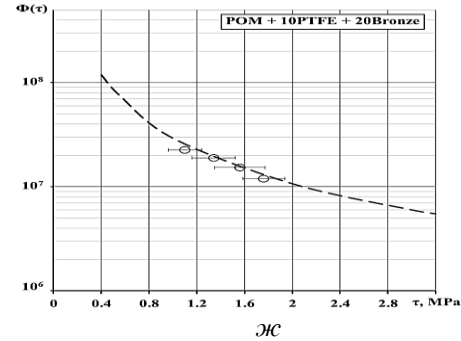
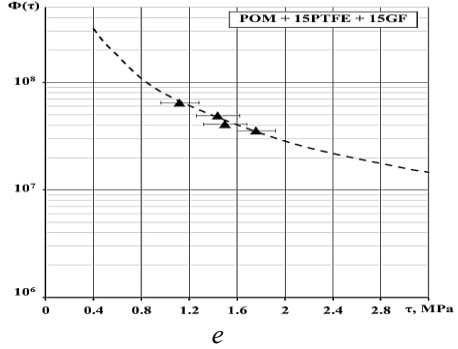
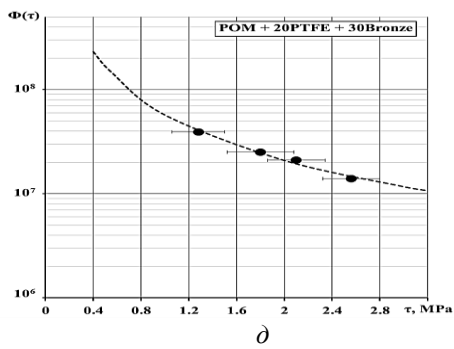
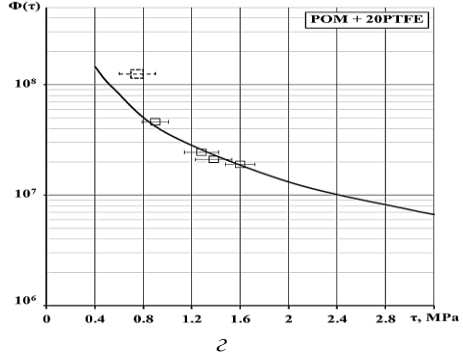
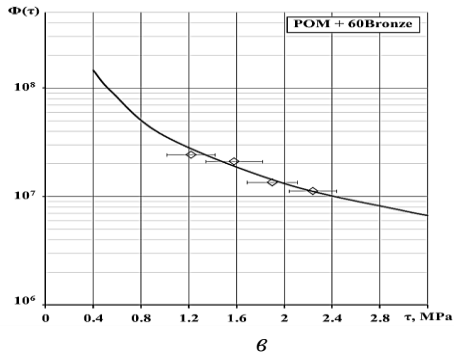
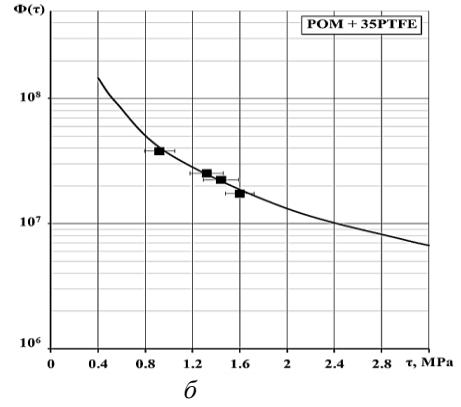
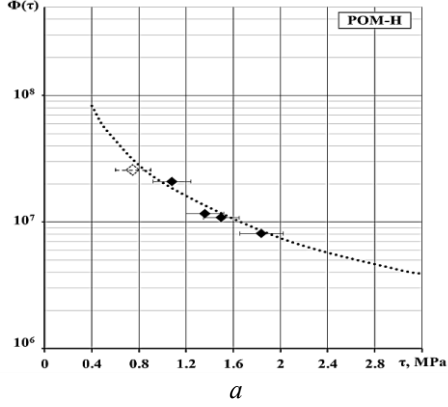
Дані про матеріали МП підшипників ковзання: вал 2 - сталь 45 нормалізована, $E_2 = 210000$ МПа, $\nu_2 = 0,3$; втулка 1 - поліацеталі.

Таблиця 1

Характеристики зносостійкості	Поліацеталі				
	POM-H	POM+35PTFE	POM+20PTFE	POM+60Bronze	POM+20PTFE+30Bronze
$B_1 \cdot 10^{10}$	0,126	0,223	0,223	0,223	0,352
m_1	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
τ_{01} , МПа	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	POM+10PTFE+20Bronze	POM+15PTFE+15GF	POM+10PTFE+10GF	POM+10PTFE+20Bronze+10GF	POM+10PTFE+15Bronze+5GF
$B_1 \cdot 10^{10}$	0,181	0,480	0,352	0,702	0,352
m_1	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
τ_{01} , МПа	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Примітки: Цифри вказують процентний об'ємний вміст наповнювача у композиті, PTFE – політетрафторетилен (тефлон, фторопласт), Bronze – бронзовий порошок, GF – коротке скловолокно,

Результати трибоекспериментальних досліджень подано на рис. 1 – 4. Зокрема на рис. 1 представлено діаграми зносостійкості вищевказаних поліацеталів.



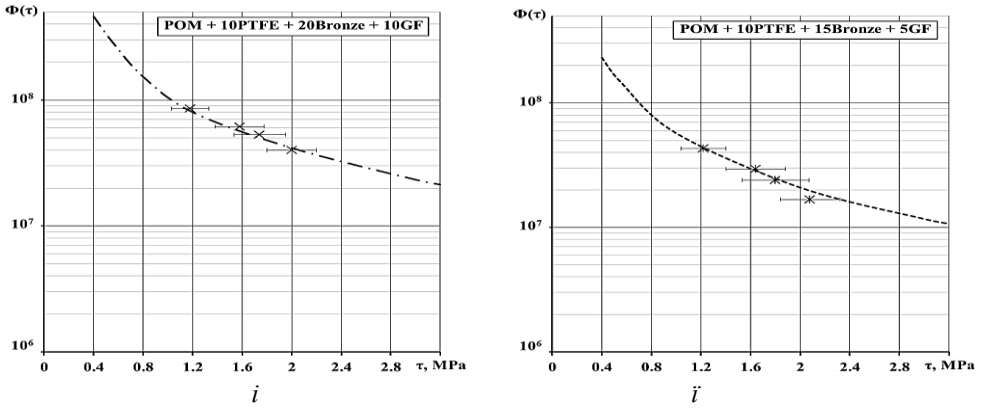


Рис. 1. Діаграми зносостійкості поліамідів

На рисунках подано різними маркерами дослідні індикатори зносостійкості Φ_i поліамідів при кожній ступені $\tau_i = fp_i$. Вони при однакових контактних тисках розташовані по осі τ по-різному. У результаті їх апроксимації функцією, поданою у [6, 17 ч.1], визначено характеристики зносостійкості B , m , τ_0 (табл. 1).

На рис. 2 наведено об'єднані діаграми зносостійкості досліджених поліацеталів і їх композитів.

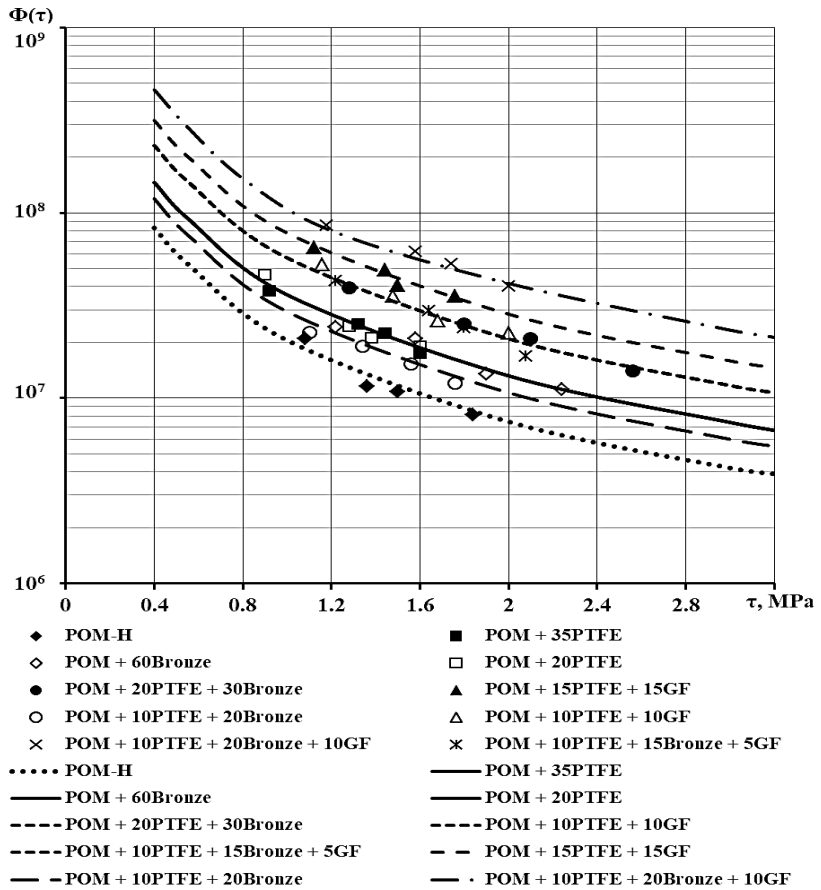


Рис. 2. Діаграми зносостійкості поліацеталів

Подані діаграми зносостійкості матеріалів, як їх графічні індикатори, дозволяють порівняти зносостійкість досліджених поліацеталів при різних рівнях питомих сил тертя. Залежність зносостійкості від питомої сили тертя є нелінійною. Якісні закономірності зміни зносостійкості композитів поліацеталу з різними одно-, дво- та трискладниковими наповнювачами у порівнянні з ненаповненим поліацеталом POM-H є практично однаковими. Однак його модифікація значно підвищує зносостійкість досліджених композитів. Найнижчу зносостійкість має ненаповнений поліацеталь POM-H, а найвищу – POM+10PTFE+15Bronze+10GF.

Встановлено, що у односкладникових композитів POM+20PTFE, POM+35PTFE, POM+60Bronze) зносостійкість зростає практично на однакову величину у порівнянні з POM-H, тобто у 1.77 рази. Щодо інших дво- і трискладникових композитів, то вони мають ще вищу зносостійкість у 2.8, 3.81, 5.58 рази, окрім композиту POM+10PTFE+20Bronze (1.43 рази). Тут скловолокно, як наповнювач, підвищує зносостійкість композитів POM+10PTFE+10GF, POM+10PTFE+5Bronze+5GF, POM+15PTFE+15GF, POM+10PTFE+20Bronze+10GF. У композитах POM+10PTFE+20Bronze та POM+20PTFE+30Bronze різниця у зносостійкості у порівнянні з POM-H є досить різною, тобто у 1.77 і 2.8 разів. Тобто збільшення вмісту порошку бронзи та політетрафторетилену у базовому полімері (POM-H) спричиняє збільшення зносостійкості. Відносне підвищення зносостійкості між обома вказаними композитами складає 2.8 : 1.43, тобто 1.96 рази.

Результати проведених досліджень щодо встановлення характеристик C , m зносостійкості [6, 17 ч.1] поліацеталів для МП зубчастих передач при вказаних 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 - поліацеталі .

Таблиця 2

Характеристики зносостійкості	Термопластичні полімерні матеріали				
	POM-H	POM +35PTFE	POM +20PTFE	POM +60Bronze	POM +20PTFE +30Bronze
$C_2 \cdot 10^5$	1,12	2,27	2,27	1,80	2,85
m_2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
τ_{S2} , МПа	33	30	30	35	35
	POM +10PTFE +20Bronze	POM +15PTFE+15GF	POM +10PTFE +10GF	POM +10PTFE +20Bronze +10GF	POM +10PTFE +15Bronze +5GF
$C_2 \cdot 10^5$	1,46	4,24	3,12	6,2	3,12
m_2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
τ_{S2} , МПа	35	33	33	33	33

Встановлено також експериментально залежність коефіцієнта тертя ковзання f від контактного тиску p_i у трибопарах сухого тертя (рис. 3).

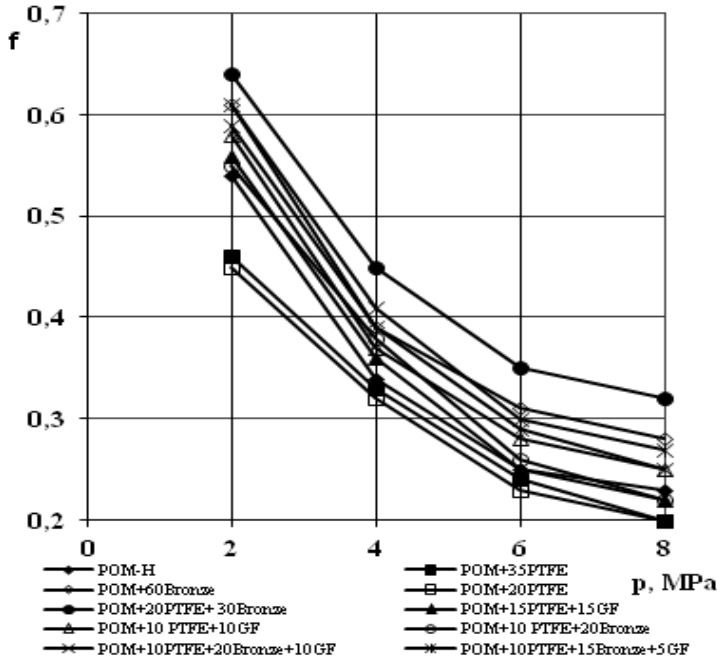


Рис. 3. Залежність середнього коефіцієнта тертя ковзання від тиску у трибопарах поліацеталі – сталь

Спостерігається значне зниження f при зростанні контактного тиску у трибопарі. Якісна зміна f є приблизно однаковою. Натомість кількісні зміни є різними для кожної металополімерної пари. Найбільші коефіцієнти тертя виникають у парі з POM+20PTFE+30Bronze, а найнижчі у парі з POM+20PTFE, POM+35PTFE.

Висновки:

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

1. Різного виду наповнювачі поліаміду POM-H (PTFE, Bronze, GF) з різним процентним вмістом та кількістю компонентів впливають на зносостійкість його композитів, підвищуючи її. Встановлено кількісні і якісні закономірності впливу наповнювачів на зносостійкість композитів порівняно з базовим поліацеталем. Найнижчу носостійкість має ненаповнений поліацеталь POM-H, а найвищу – POM+10PTFE+15Bronze+10GF.

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 POM+20PTFE – сталь 45, а найвищим – у парі POM+20PTFE+30Bronze – сталь 45.

3. Побудовано діаграми зносостійкості поламідів, 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. Mens J.W.M., de Gee A.W.J., (1991), Friction and wear behaviour of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water, *Wear* 149, pp.255-268.
3. Zsidai L, De Baets P, Samyn P, Kalacska G, Van Peteghem AP, Van Parys F. The tribological behaviour of engineering plastics during siliding friction investigated with small scale specimens. *Wear* 2002;253:673–88.
4. Seabra CL, Babtista MA. Tribological behaviour of food grade polymers against stainless steel in dry sliding and with sugar. *Wear*. 2002;253:394–402.
5. Kalácska G. An engineering approach to dry friction behaviour of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties. *eXPRESS Polymer Letters*. 2013. Vol.7 (2). P. 199–210.
6. 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.
7. Чернець М., Пашечко М., Невчас А. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання. В 3-х томах. Т.2. Поверхнєве зміцнення конструкційних матеріалів трибосистем ковзання. - Дрогобич: КОЛО. - 2001. – 512 с.
8. Чернець М., Келбінські Ю., Скварок Ю. Оцінка довговічності, зношування та контактної міцності зубчастих передач / Під заг. ред. М.В.Чернеця. – Дрогобич: Вимір, 2002. – 128 с.
9. Чернець М.В. Трибоконтатні задачі для циліндричних з'єднань з технологічною некруглістю. – Люблін: Вид. Люблінської політехніки, 2013. – 274 с.
10. Чернец М. В., Келбиньски Ю. Расчетная оценка износа и ресурса косозубых эвольвентных цилиндрических передач // Проблемы трибологии. – 2004. - № 3. – С. 61 – 70.
11. Чернець М., Келбінські Ю. Вплив нахилу зубів косозубих циліндричних передач на трибомеханічні, силові на кінематичні характеристики // Проблемы трибологии. – 2006. - №4. – С. 3 – 7.
12. Чернець М.В., Ярема Р.Я. Прогнозування довговічності черв'ячних передач з архімедовим та евольвентним черв'яком // Проблемы трибологии. – 2011. – №2. – С. 21 – 25.
13. Chernets M., Chernets Ju. Generalized method for calculating the durability of sliding bearings with technological out-of-roundness of details // Proc. JMachE. Part J: Journal of Engineering Tribology . -2015. – Vol. 229, №2. – pp. 216 – 226.
14. 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. JMachE. Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017; Vol. 231, No 1, p.57 – 62.
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. Чернець М.В., Корнієнко А.О. Трибологічна поведінка полімерних матеріалів для гібридних металополімерних вузлів сухого тертя ковзання. Част. 1. Поліаміди. Проблеми тертя і зношування. 2022, №1 (94) – С. 17-26.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2022.

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

TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF POLYMERIC MATERIALS FOR HYBRID METALPOLYMER UNITS OF DRY SLIDING FRICTION. PART. 2. POLYACETALS

According to the method of model triboexperimental studies of materials in sliding friction according to the scheme of end friction determined wear resistance of polyacetals POM-H and a number of composites based on it: POM + 35PTFE, POM + 20PTFE, POM + 60Bronze, POM + 20PTFE + 30Bronze; POM + 10PTFE + 20Bronze, POM + 15PTFE + 15GF, POM + 10PTFE + 10GF, POM + 10PTFE + 20Bronze + 10GF, POM + 10PTFE + 15Bronze + 5GF, polyamide PA6. They are widely used in metal-polymer (MP) 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 tribocouple 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, polyacetal POM-H and composites: POM + 35PTFE, POM + 20PTFE, POM + 60Bronze, POM + 20PTFE + 30Bronze; POM + 10PTFE + 20Bronze, POM + 15PTFE + 15GF, POM + 10PTFE + 10GF, POM + 10PTFE + 20Bronze + 10GF, POM + 10PTFE + 15Bronze + 5GF; 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. Mens J.W.M., de Gee A.W.J., (1991), Friction and wear behaviour of 18 polymers in contact with steel in environments of air and water, *Wear* 149, pp.255-268.
3. Zsidai L, De Baets P, Samyn P, Kalacska G, Van Peteghem AP, Van Parrys F. The tribological behaviour of engineering plastics during siliding friction investigated with small scale specimens. *Wear* 2002;253:673–88.
4. Seabra CL, Babtista MA. Tribological behaviour of food grade polymers against stainless steel in dry sliding and with sugar. *Wear*. 2002;253:394–402.
5. Kalácska G. An engineering approach to dry friction behaviour of numerous engineering plastics with respect to the mechanical properties. *eXPRESS Polymer Letters*. 2013. Vol.7 (2), P. 199–210.
6. Chernets M., Pashechko M., Nevchas A. Metody prohnozuvannya ta pidvyshchennia znosostiikosti trybotekhnichnykh system kovzannia. V 3-kh tomakh. T.1. Doslidzhennia ta rozrakhunok trybosy-stem kovzannia, metody pidvyshchennia dovhovichnosti i znosostiikosti. - Drohobych: KOLO, 2001.– 492 s.
7. Chernets M., Pashechko M., Nevchas A. Metody prohnozuvannya ta pidvyshchennia znoso-stiikosti trybotekhnichnykh system kovzannia. V 3-kh tomakh. T.2. Poverkhneve zmitsnennia kons-truktsiinykh materialiv trybosystem kovzannia. - Drohobych: KOLO. - 2001. – 512 s.
8. Chernets M., Kelbinski Yu., Skvarok Yu. Otsinka dovhovichnosti, znoshuvannia ta kontaktnoi mitsnosti zubchastykh peredach / Pid zah. red. M.V.Chernetsia. – Drohobych: Vymir, 2002. – 128 s.
9. Chernets M.V. Trybokontaktni zadachi dlia tsylindrychnykh ziednan z tekhnolohichnoiu nekruhlistiu. – Liublin: Vyd. Liublinskoi politekhniki, 2013. – 274 s.
10. Chernets M. V., Kelbinsky Yu. Raschetnaia otsenka yznosa y resursa kosozubnykh evolventnykh tsylindrycheskykh peredach // Problemy trybolohii. – 2004. - № 3. – S. 61 – 70.
11. Chernets M., Kelbinski Yu. Vplyv nakhyly zubiv kosozubykh tsylindrychnykh peredach na trybomekhanichni, sylovi na kinematychni kharakterystyky // Problemy trybolohii. – 2006. - №4. – S. 3 – 7.

12. Chernets M.V., Yarema R.Ia. Prohnozuvannia dovhovichnosti cherviachnykh peredach z arkhimedovym ta evolventnym cherviakom // Problemy trybolohii. – 2011. – №2. – S. 21 – 25.

13. 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.

14. 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.

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. Chernets M.V., Korniienko A.O. Trybolohichna povedinka polimernykh materialiv dlia hibry-dnykh metalopolimernykh vuzliv sukhoho tertia kovzannia. Chast. 1. Poliamidy. Problemy ter-tia i znoshuvannia. 2022, №1 (94) – p. 17-26.

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

Корнієнко Анатолій Олександрович – канд. техн. наук, доцент, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, anatoliy_k@ukr.net