

УДК 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.2(95).16554

М. В. ЧЕРНЕЦЬ¹, А. О. КОРНІЄНКО¹, П. В. РУДЕНКО²¹Національний авіаційний університет, Київ²Сумський державний університет, Суми

ТРИБОЛОГІЧНА ПОВЕДІНКА ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ВУЗЛІВ СУХОГО ТЕРТЯ КОВЗАННЯ. ЧАСТ. 4. ПОЛІТЕТРАФТОРЕТИЛЕНИ (ФТОРОПЛАСТИ)

У відповідності до методики модельних трибоекспериментальних досліджень матеріалів при терті ковзання за схемою торцевого тертя визначено зносостійкість композитів на основі політетрафторетилену РТФЕ-4: РТФЕ+15С+5МоS₂, РТФЕ+10СF+15ТiС, РТФЕ+15СF, РТФЕ+15GF, РТФЕ+10С+10СF. Вони широко використовуються у металополімерних (МП) 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 композитів політетрафторетилену у трибонарі 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, композити РТФЕ: РТФЕ+15С+5МоS₂, РТФЕ+10СF+15ТiС, РТФЕ+15СF, РТФЕ+15GF, РТФЕ+10С+10СF; індикатори та характеристики їх зносостійкості, коефіцієнт тертя ковзання

Вступ. У металополімерних (МП) підшипниках ковзання обертового чи поступального руху, ущільнювачі (манжети, поршневі кільця тощо), диски зчеплення точних механізмів широко використання знаходять полімерні композиційні матеріали на основі політетрафторетилену (фторопласту, тефлону) РТФЕ. Вузли тертя вказаного виду надійно працюють при достатньо високих контактних тисках, у фізико- та хімічно активних середовищах, у глибокоосушених та надмірно вологих середовищах, вакуумі, при сухому без мащення, тощо.

Ненаповнений політетрафторетилен однак не має добрих механічних властивостей. Тому широко використовується його модифікація міцними і жорсткими частинками / волокнами різного виду і структури (дисульфід молібдену (MoS₂), графіт (С), скловолокно (GF), вуглеволокно (GF), карбід титану (TiC), бронзовий порошок та ін.) з різним об'ємним вмістом.

Наповнення виявляє позитивний вплив на підвищення його властивостей, як фізико – механічних, так і триботехнічних властивостей. Дрібнодисперстий РТФЕ також широко використовується як тверде мастило у різних видах полімерних композитах для зменшення коефіцієнта тертя та підвищення зносостійкості. Такий наповнювач, покриваючи металеву поверхню тертя, забезпечує певний час безаварійну роботу вузла тертя ковзання у випадку відсутності мащення. Властивості ненаповненого політетрафторетилену є такими: низький коефіцієнт тертя; дуже висока хімічна стійкість, порівняльна зі стійкістю благородних металів; висока термостійкість – до 300 °С і вище (робоча температура до 250 °С);

холоднотекучість; схильність до залишкової деформації та рекристалізації; недостатня механічна міцність при підвищеній температурі; високий коефіцієнт лінійного температурного розширення.

З практичної точки зору вкрай важливим є дослідження трибологічної поведінки композитів PTFE та встановлення індикаторів його зносостійкості при сухому терті і коефіцієнта тертя. Було проведено дослідження наступних композитів PTFE: PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF, PTFE+15GF, PTFE+10C+10CF. Для оцінки зносостійкості зазначених композитів використано схему торцевого тертя пальцевих полімерних зразків з контрдиском зі сталі 45 за умовами, поданими у стандарті ISO 7148-2 [1]. Тут забезпечуються постійні умови навантаження та швидкості ковзання, а отже тертя і зношування протягом усього експерименту.

У літературі наявні результати досліджень трибологічної поведінки PTFE та різних його композитів [2 – 9 та ін.]. Зокрема робота [2] присвячена дослідженню впливу шорсткості поверхні сталі 40CrMnNiMo8 на тертя і зношування полімерів PTFE, POM-Н, PA6+GF, PA6+CF. І масштабних разків. Дослідження тертя та зношування різних полімерів (PTFE, поліамід PA6, поліацеталь POM та інші) при сухому терті по нержавіючій сталі були вивчені у [3]. У роботі [4] вивчали вплив швидкості ковзання та навантаження на тертя та зношування базового політетрафторетилену PTFE, армованого скловолокном (GF) або Bronze і вуглецем (C). Експерименти проводилися при сухому терті умовах навколишнього середовища за схемою штифт – диск з нержавіючої сталі AISI 440C. Відповідно і у [5] досліджено подібним чином як вище тертя та зношування композиту PTFE+25Bronze. Тертя та зношування поліаміду PA66, поліфеніленсульфіду PPS та політетрафторетилену ПТФЕ у однойменних трибопарах в умовах сухого тертя та при змащуванні досліджували за допомогою трибометра pin-on-disk [6]. У дослідженні [7] проведено оцінку трибологічної поведінки підшипників на основі поліетилену PE, поліаміду PA, поліацеталю POM, політетрафторетилену PTFE та бакеліту. Результати досліджень по розробці нових композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену з метою підвищення його фізико - механічних та трибологічних характеристик проводились у [8 – 10].

Проте результати цих публікацій в силу різних обставин практично не вдається використати для встановлення характеристик зносостійкості полімерів, необхідних у моделі дослідження кінетики зношування МП підшипників ковзання [11 - 13]. Тому з цією метою було проведено трибоекспериментальні дослідження вищевказаних МП трибопар в певному діапазоні зміни навантажень. За результатами таких досліджень вирішено задачу визначення для досліджених полімерних матеріалів характеристик зносостійкості, які використовуються у методі розрахунку підшипників ковзання як з металевих матеріалів [11 - 18], так металополімерних підшипників [15 - 18].

У статті подано результати досліджень за методикою модельних трибоекспериментів [12, 13, 19] для встановлення показників (індикаторів) та характеристик зносостійкості наповнених композитів PTFE: односкладникових – PTFE+15CF, PTFE+15GF; двоскладникових – PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10C+10CF, PTFE+10CF+15TiC у парі зі сталлю 45.

Трибоекспериментальні дослідження зносостійкості, аналіз результатів. Для проведення модельних трибоекспериментальних досліджень при сухому

терті політетрафторетиленів вибрано таку 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 використанням характеристик B, m, τ_0 зносостійкості композитів політетрафторетилену для МП підшипників ковзання при вказаних вище умовах тертя подано у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики зносостійкості	Композити політетрафторетилену				
	PTFE +15C+5MoS ₂	PTFE +10C+10CF	PTFE +15CF	PTFE +15GF	PTFE +10CF+15TiC
$B_2 \cdot 10^{10}$	8,2	8,2	108	80,8	100
m_2	1,1	1,1	2,6	2,6	2,6
τ_{02} , МПа	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Примітки: Цифри вказують процентний об'ємний вміст наповнювача у композиті, MoS₂ – дисульфід молібдену, С – кокс, CF – вуглеволокно, GF – скловолокно, TiC – карбід титану

Дані про матеріали МП підшипників ковзання: вал 2 - сталь 45 нормалізована, $E_2 = 210000$ МПа, $v_2 = 0,3$; втулка 1 – композити політетрафторетилену.

Результати трибоекспериментальних досліджень подано на рис. 1 – 3. Зокрема на рис. 1 представлено діаграми зносостійкості вищевказаних політетрафторетиленів.

На рисунках подано різними маркерами дослідні індикатори зносостійкості Φ_i політетрафторетиленів 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 [12, 13, 19], визначено характеристики зносостійкості B, m, τ_0 (табл. 1).

На рис. 2 наведено об'єднані діаграми зносостійкості досліджених композитів політетрафторетилену.

Якісна зміна зносостійкості композитів на основі PTFE при зміні питомих сил тертя є суттєво відмінною. У випадку, коли одним із наповнювачів є кокс (PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10C+10CF) діаграми (суцільна лінія) мають принципово відмінний вид, ніж діаграми трьох інших композитів (PTFE+15GF, PTFE+10C+15TiC, PTFE+15CF), де одним із наповнювачів є скло- чи вуглеволокно. Відповідно композити PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10C+10CF мають суттєво нижчу зносостійкість при $\tau = 0.4 \dots 0.8$ МПа, наближену при $\tau = 1 \dots 1.4$ МПа та вищу від композитів PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF, PTFE+15GF при подальшому її зростанні. Якісні закономірності зміни зносостійкості композитів PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF, PTFE+15GF є практично однаковими. Кількісна різниця у зносостійкості при $\tau = 2$ МПа PTFE+15CF відносно PTFE+15GF складає 1.3 рази, а PTFE+10CF+15TiC – 1.4 рази. Натомість при цій величині τ зносостійкість композитів PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10C+10CF перевищує зносостійкість композитів PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF, PTFE+15GF у 4.6 рази.

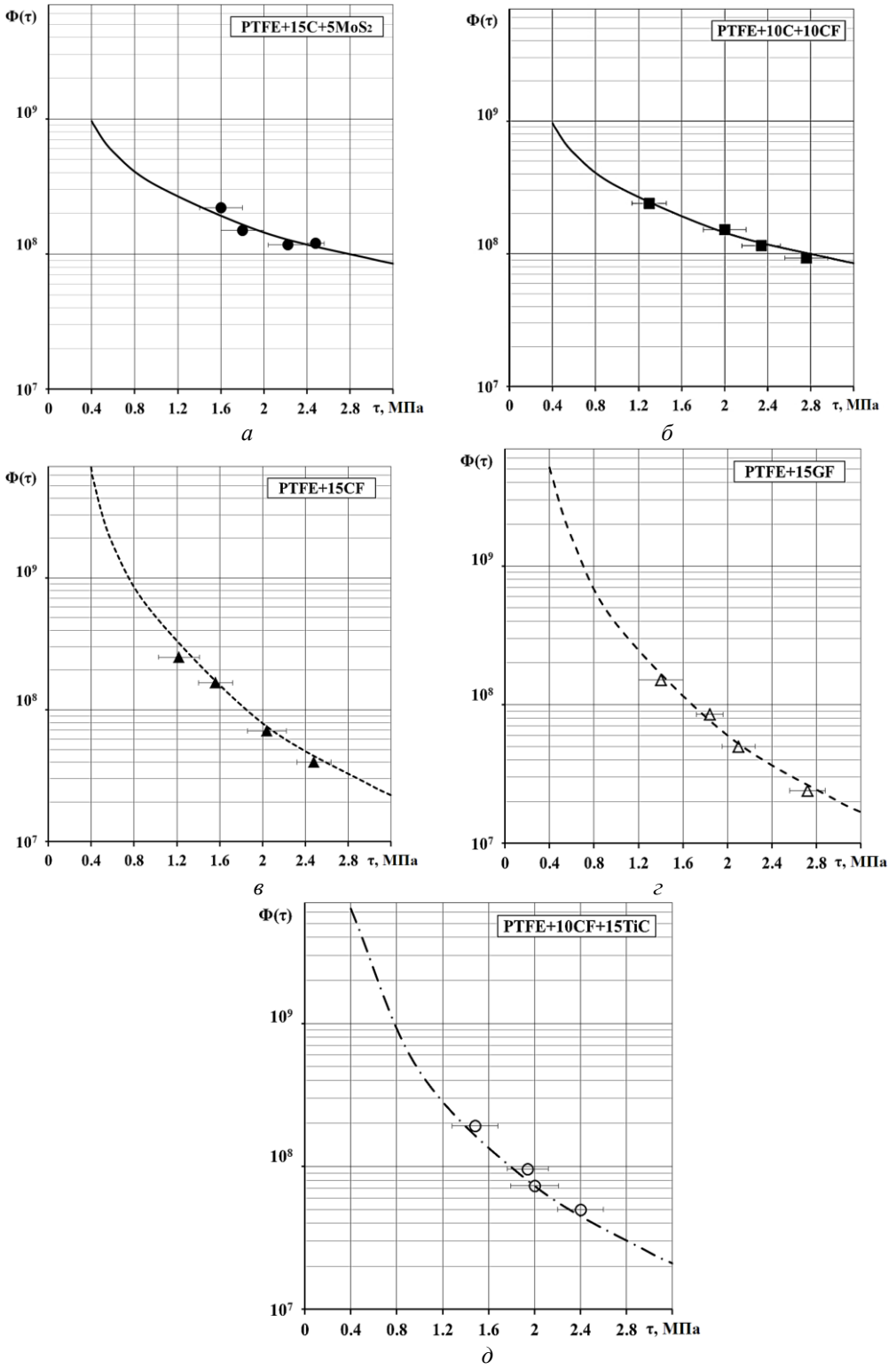


Рис. 1. Діаграми зносостійкості політетрафторетиленів

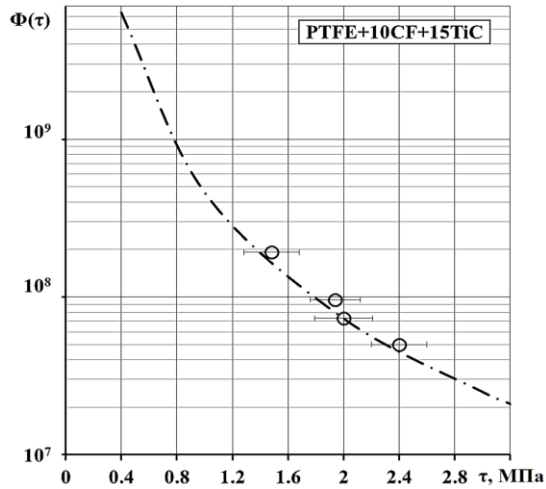


Рис. 2. Діаграми зносостійкості композитів політетрафторетилену

У експериментальних дослідженнях політетрафторетиленів становлено зміну коефіцієнта тертя ковзання f від контактного тиску p_i у трибопарах (рис. 3).

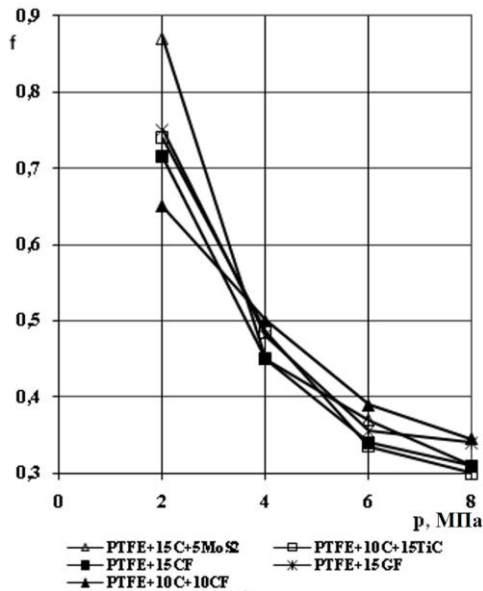


Рис. 3. Залежність середнього коефіцієнта тертя ковзання від тиску у трибопарах політетрафторетилену – сталь

Спостерігається значне зниження середнього коефіцієнта тертя ковзання f при зростанні контактних тисків у трибопарі. Якісна зміна та кількісна зміна f є дещо відмінною у різних трибопарах. Вищі коефіцієнти тертя в області тисків $p = 4, 6, 8$ МПа виникають у парі з PTFE+10C+10CF, а відносно нижчі у парах з PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF.

Висновки

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

1. Різного виду наповнювачі політетрафторетилену PTFE (MoS_2 , C, CF, GF, TiC) з різним процентним вмістом та кількістю компонентів впливають на зносостійкість його композитів, підвищуючи її. Встановлено кількісні і якісні закономірності впливу наповнювачів на зносостійкість композитів. На якісна зміну зносостійкості композитів на основі PTFE суттєво впливають питомі сили тертя. За цією ознакою вони поділяються на дві групи – з більшим зниженням зносостійкості зі збільшенням питомих сил тертя (PTFE+15GF, PTFE+10C+15TiC, PTFE+15CF) та з меншим зниженням (PTFE+15C+5MoS₂, PTFE+10C+10CF).

2. Коефіцієнт сухого тертя ковзання нелінійно залежить від контактної тиску у експериментальних трибопарах. Відповідно представлено якісні і кількісні закономірності цих залежностей для кожного з досліджених полімерів. Найнижчим був коефіцієнт тертя у парах PTFE+10CF+15TiC, PTFE+15CF – сталь 45, а вищим - у парі PTFE+10C+10CF – сталь 45.

3. Побудовано діаграми зносостійкості композитів політетрафторетилену, які відображають якісні і кількісні взаємозалежності їх зносостійкості від питомої сили тертя. Вони забезпечують порівняння зносостійкості 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. 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.

3. Seabra CL, Babtista MA. Tribological behaviour of food grade polymers against stainless steel in dry sliding and with sugar. *Wear*. 2002;253:394–402.

4. H. Unal , A. Mimaroglu , U. Kadyoglu , H. Ekiz. Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions. *Materials and Design*, 2004, 25 (3), 239-245.

5. H. Unal, U.Sen, A Mimaroglu, 2006, An approach to friction and wear properties of polytetrafluoroethylene compositell, *Materials and Design* 27 (2006) 694–699.

6. Bin-Bin Jia, Tong-Sheng Li, Xu-Jun Liu, Pei-Hong Cong; Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions; *Wear* 262 (2007) 1353–1359

7. B. S. Ünlü, E. Atik, and S. Köksal, Tribological properties of polymer-based journal bearings, *Mater. Design.*, vol. 30, no. 7, pp. 2618–2622, 2009.

8. Influence of mechanical activation polytetrafluoroethylene matrix of tribotechnical composites at its structural and phase transformations and properties / O. A. Budnik, A. F. Budnik, P.V. Rudenko, V. A. Sviderskiy, K. V. Berladir // *Functional Materials*. – 2015. – 22, No.4. – P. 499–506.

9. Будник О. А., Свидерский В. А., Будник А. Ф., Берладир К. В., Руденко П. В. Композитный материал для узлов трения химического и нефтегазового оборудования / *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2016. – № 1. – С. 40–43.

10. Берладир К. В. Антифрикционные политетрафторэтиленовые композиты нового поколения / К. В. Берладир, П. В. Руденко, К. А. Дядюра, М. С. Устименко // *Материалы конференции «Композиты и стеклопластики – вектор развития»*, 25-26 мая 2016 г. – Запорожье, 2016. – С. 19–20.

11. Чернец М.В. К вопросу об оценке долговечности цилиндрических трибосистем скольжения с границами, близкими к круговым. *Трение и износ*, 1996, 17 (3), 340-344.

12 Чернец 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.

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

14. 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.

15. Чернец М.В. Прогнозирование долговечности подшипников скольжения по кумулятивной модели изнашивания с учетом огранки контуров их деталей // Трение и износ – 2015. -№2.– С.213 – 221.

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. Чернец М.В., Корниенко А.А., Пашечко М.И., Чернец Ю.М., Духота А.И. К вопросу расчета контактных давлений в металлополимерных подшипниках скольжения при изнашивании // Трение и износ. - 2021. — Т. 42, № 5. — С. 552—561.

18. Chernets M., Pashechko M., Kornienko A., Buketov A. Study of the Influence of Temperature on Contact Pressures and Resource of Metal-Polymer Plain Bearings with Filled Polyamide PA6 Bushing. Lubricants, 2022, Vol. 10 (1), p.16.

19. 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. – С. 17-26.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2022.

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.

Руденко Павло Володимирович – Сумський державний університет, асистент, Суми, Україна

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

TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF POLYMERIC MATERIALS FOR HYBRID METALLOPOLYMER UNITS OF DRY SLIDING FRICTION. PART. 4. POLYTETRAFLUOROETHYLENE (FLUOROPLASTS)

In accordance with the method of model triboexperimental studies of materials during sliding friction according to the scheme of end friction, the wear resistance of composites based on polytetrafluoroethylene PTFE-4: PTFE + 15C + 5MoS₂, PTFE + 10CF + 15TiC, PTFE + 15CF, PTFE + 15CF was investigated. They are widely used in metal-polymer (MP) plain bearings operating in conditions of dry sliding friction. Their wear resistance indicators are established, based on which their wear resistance characteristics are determined, as used in computational research methods of these hybrid tribomechanical systems. Quantitative regularities of tribological behavior of the specified composites of polytetrafluoroethylene in tribocouples with steel 45 are established. The results of loading influence on change of sliding friction coefficients are resulted.

Key words: method of determination of experimental indicators of wear resistance, dry sliding friction, metal-polymer friction pair, PTFE composites: PTFE + 15C + 5MoS₂, PTFE + 10CF + 15TiC, PTFE + 15CF, PTFE + 15GF, PTFE + 10C + 10C; indicators and characteristics of wear resistance, sliding friction coefficient

References

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. 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.
3. Seabra CL, Babtista MA. Tribological behaviour of food grade polymers against stainless steel in dry sliding and with sugar. *Wear*. 2002;253:394–402.
4. H. Unal , A. Mimaroglu , U. Kadýoglu , H. Ekiz. Sliding friction and wear behaviour of polytetrafluoroethylene and its composites under dry conditions. *Materials and Design*, 2004, 25 (3), 239-245..
5. H. Unal, U.Sen, A Mimaroglu, 2006, An approach to friction and wear properties of polytetraflouroethylene compositel, *Materials and Design* 27 (2006) 694–699.
6. Bin-Bin Jia, Tong-Sheng Li, Xu-Jun Liu, Pei-Hong Cong; Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions; *Wear* 262 (2007) 1353–1359
7. B. S. Ünlü, E. Atik, and S. Köksal, Tribological properties of polymer-based journal bearings, *Mater. Design.*, vol. 30, no. 7, pp. 2618–2622, 2009.
8. Influence of mechanical activation polytetrafluoroethylene matrix of tribotechnical composites at its structural and phase transformations and properties / O. A. Budnik, A. F. Budnik, P.V. Rudenko, V. A. Sviderskiy, K. V. Berladir // *Functional Materials*. – 2015. – 22, No.4. – P. 499–506.
9. Budnik O. A., Sviderskiy V. A., Budnik A. F., Berladir K. V., Rudenko P. V. Kompozitnyy material dlya uzlov treniya khimicheskogo i neftegazovogo oborudo-vaniya // *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye*. – 2016. – № 1. – S. 40–43.
10. Berladir K. V. Antifriktsionnyye politetraftoretilenovyye kompozity novogo pokoleniya / K. V. Berladir, P. V. Rudenko, K. A. Dyadyura, M. S. Ustimenko // *Materialy konferentsiya «Kompozity i stekloplastiki – vektor razvitiya»*, 25-26 maya 2016 g. – Za-porozh'ye, 2016. – S. 19–20.
11. Chernets M.V. K voprosu ob otsenke dolgovechnosti tsilindricheskikh tribosistem skol'zheniya s granitsami, blizkimi k krugovym. *Treniye i iznos*, 1996, 17 (3), 340-344.

12. Chernets' M., Pashechko M., Nevchas A. Metodi prognozuvannya ta pídvischennya zno-sostíykostí tribotekhníchnikh sistem kovzannya. V 3-kh tomakh. T.1. Doslídzhennya ta rozraku-nok tribosistem kovzannya, metodi pídvischennya dovgóvíchností í znosostíykostí. - Drogoich: KOLO, 2001.– 492 s.

13. Chernets' M.V. Tribokontaktní zadachí dlya tsilíndrichnikh z'édnan' z tekhnologíchnoyu nekruglístyu. – Lyublín: Vid. Lyublíns'koí polítekhnikí, 2013. – 274 s.

14. 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.

15. Chernets M.V. Prognozirovaniye dolgovechnosti podshipnikov skol'zheniya po kumulyativnoy modeli iznashivaniya s uchetom ogranki konturov ikh detaley // Treniye i iznos – 2015. -№2.– S.213 – 221.

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., Korniyenko A.A., Pashechko M.I., Chernets YU.M., Dukhota A.I. K voprosu rascheta kontaktnykh davleniy v metalopolimernykh podshipnikakh skol'zheniya pri iznashivanií // Treniye i iznos. - 2021. — T. 42, № 5. — S. 552—561.

18. Chernets M., Pashechko M., Kornienko A., Buketov A. Study of the Influence of Temperature on Contact Pressures and Resource of Metal-Polymer Plain Bearings with Filled Polyamide PA6 Bushing. Lubricants, 2022, Vol. 10 (1), p.16.

19. Chernets' M.V., Korniyenko A.O. Trybolohichna povedinka polimernykh materialiv dlya hibry-dnykh metalopolimernykh vuzliv sukhoho tertya kovzannya. Chast. 1. Poliamidy. Problemy ter-tya i znoshuvannya. 2022, №1. – S. 17-26.