

УДК 539.538: 539.621

DOI: 10.18372/0370-2197.2(95).16553

М. В. ЧЕРНЕЦЬ, А. О. КОРНІЄНКО

*Національний авіаційний університет, Київ***ТРИБОЛОГІЧНА ПОВЕДІНКА ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ ВУЗЛІВ СУХОГО ТЕРТЯ КОВЗАННЯ. ЧАСТ. 3. ПОЛІЕФІРЕФІРКЕТОНІ, ТЕРЕФТАЛАНИ**

За методикою модельних трибоекспериментальних досліджень матеріалів при терті ковзання за схемою торцевого тертя визначено зносостійкість поліефірефіркетону РЕЕК та його композиту РЕЕК+30GF, терефталану етилену РЕТ та його композиту РЕТ+PTFE. Вони використовуються у метало-полімерних (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 полімерів 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, поліефірефіркетону РЕЕК та його композиту РЕЕК+30GF, терефталану етилену РЕТ та його композиту РЕТ+PTFE; індикатори та характеристики їх зносостійкості, коефіцієнт тертя ковзання

Вступ. У металополімерних (МП) підшипниках ковзання та зубчастих передачах, що працюють в умовах сухого тертя ковзання при підвищених температурах та у агресивних середовищах, достатньо поширеним є використання поліефірефіркетону РЕЕК та композитів на його основі. Натомість терефталан етилену РЕТ знаходить використання у МП трибосистемах зі значним навантаженням, що працюють як при сухому терті, так і в умовах підвищеної вологості. Він є біоінертним полімером і тому може застосовуватись у пристроях для переробки харчових продуктів. З метою оцінки зносостійкості цих матеріалів було 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 окремі результати експериментальних досліджень трибологічної поведінки металополімерної пари сталь - поліефірефіркетон РЕЕК та його композити, а тим більше сталь - терефталан етилену РЕТ. Зокрема такі результати подано у працях [2 – 5]. У [2] порівняно зношування при сухому терті РЕЕК по сталі за схемою торцевого тертя зі зношуванням декількох видів високоефективних полімерів. Зокрема це були поліетеретеркетон (РЕЕК), полібензоксимідазол (РВІ) та два сорти поліпарафенілену (PPP120, PPP150). У роботі [3] проведено порівняння трибологічної поведінки твердих мастильних матеріалів (CF, Graphite, PTFE) у поліефірефіркетонів (РЕЕК) полімерній матриці при різних контактних тисках і швидкостях ковзання в умовах сухого тертя ковзання у поступальному русі по сталі AISI 52100(100Cr6). Досліджено ненаповнений РЕЕК, РЕЕК+10CF+10Graphite, РЕЕК+10CF+ 10Graphite+10PTFE (тут

подано масові проценти, CF – короткі волокна). За схемою торцевого тертя PEEK / нержавіюча сталь 316L з різною шорсткістю, що утворюється при поліруванні, точінні та фрезеруванні, досліджено зношування трибопари у [4]. Відповідно у [5] досліджували при сухому терті за схемою ball – on – plate коефіцієнти тертя, силу тертя та температури шести полімерних композитів: литий поліамід PA6+Oil, PA6+MoS₂, POM+Aluminium, терефталат PET+ PTFE, PTFE +Bronze, PTFE+Graphite. Праця [6] присвячена дослідженню зношування модельних зубчастих передач з полімерними колесами: як з однойменних матеріалів PEEK / PEEK, так і PEEK / сталь, сталь / PEEK. Досліджено у [7] коефіцієнт тертя ковзання, зношування, енергію тертя та температуру для МП модельних підшипниках ковзання з втулкою з PEEK композиту: 30 % вуглеволокна, 30 % скловолокно, 10 % кожного, вуглеволокна, графіт, PTFE та незміцненого PEEK.

На відміну від рекомендованому у стандарті ISO 7148-2 [1] одному рівні контактних тисків при трибоекспериментальних дослідженнях полімерних матеріалів тут вони були проведені у певному діапазоні їх зміни. Це зумовлено необхідністю встановлення характеристик зносостійкості досліджуваних матеріалів, потрібних у трибокінетичних моделях кінетики зношування вказаних трибосистем [8 - 16]. За результатами таких досліджень тоді можливо вирішити задачу визначення модельних характеристик зносостійкості, які використовуються у розроблених розрахункових методах підшипників ковзання і різного виду зубчастих передач як з металевих матеріалів [8 - 16], так металополімерних зубчастих передач і підшипників ковзання [17, 18].

У статті подано результати досліджень за методикою модельних трибоекспериментів [8, 10, 19] для встановлення показників (індикаторів) зносостійкості та характеристик зносостійкості поліефірефіркетонів - незміцненого PEEK та зміцненого скловолокном композиту PEEK+30GF, терефталанів етилену – незміцненого PET та зміцненого фторопластом композиту PET+PTFE у парі зі сталлю 45.

Трибоекспериментальні дослідження зносостійкості, аналіз результатів. Модельні трибоекспериментальні дослідження при сухому терті вказаних полімерів проведено за такою програмою: 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 Експериментальні індикатори зносостійкості Φ_i полімерних матеріалів встановлено так:

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

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 PEEK, PEEK+30GF та PET, PET+PTFE для МП підшипників ковзання при вказаних вище умовах тертя подано у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики зносостійкості	Термопластичні полімерні матеріали			
	PEEK	PEEK+30GF	PET	PET+PTFE
$B \cdot 10^{10}$	3,76	5,95	6,81	11,45
m	1,09	1,09	1,09	1,09
τ_0 , МПа	0,05	0,05	0,05	0,05

Примітки: Цифри – це процентний об’ємний вміст наповнювача у композиті, PTFE – політетрафторетилен (тефлон, фторопласт), GF – коротке скловолокно.

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

Результати досліджень подано на рис. 1 – 4. Зокрема на рис. 1, 2 наведено діаграми зносостійкості вищевказаних полімерів.

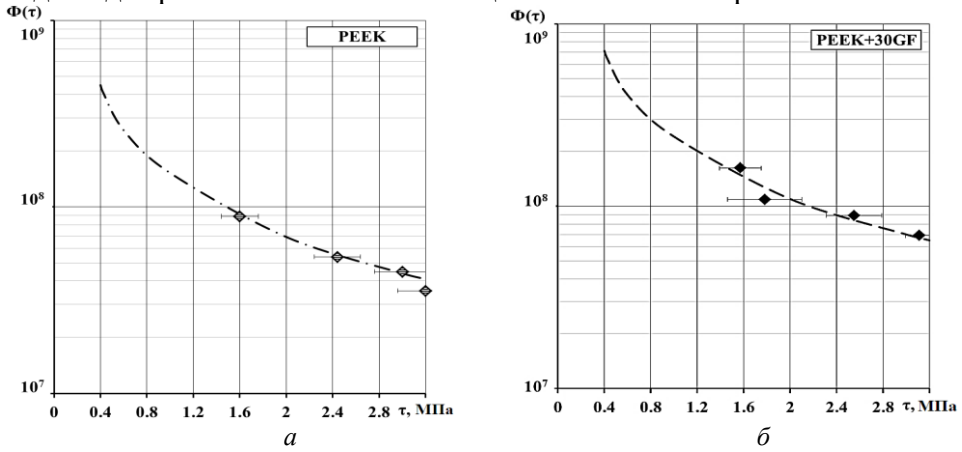


Рис. 1. Діаграми зносостійкості поліетеретеркетонів

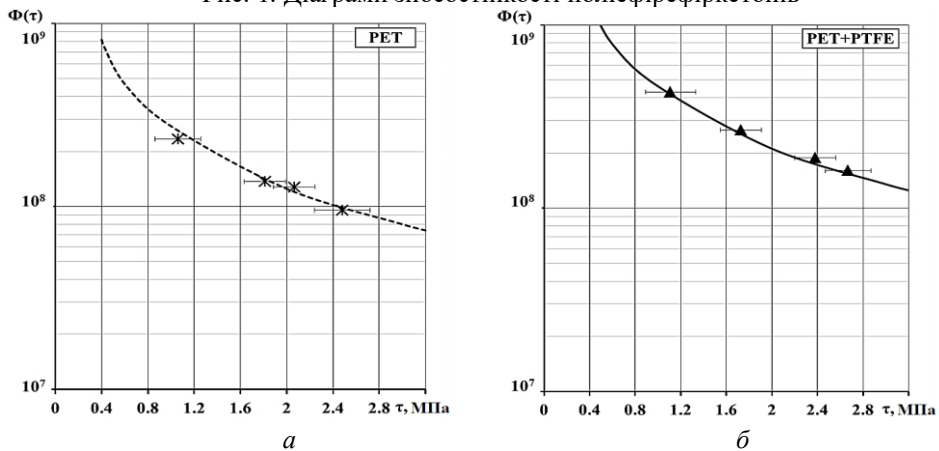


Рис. 2. Діаграми зносостійкості терефталанів етилену

На рисунках подано різними маркерами дослідні індикатори зносостійкості Φ_i полімерів 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 [8, 9, 19], визначено характеристики зносостійкості B , m , τ_0 (табл. 1).

На рис. 3 наведено об'єднані діаграми зносостійкості досліджених поліетеретеркетонів, терефталанів етилену.

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 зростання зносостійкості композиту поліетеретеркетону та композиту терефталану порівняно з цими ненаповненими полімерами практично однакові. Модифікація помітно підвищує їх зносостійкість. Поліетеретеркетони мають нижчу зносостійкість, ніж терефталани у відношенні 1:3.06 рази. Найнижчу зносостійкість має поліетеретеркетон РЕЕК, а найвищу – терефталан РЕТ+РТФЕ. Інші відношення зносостійкостей досліджених полімерів

будуть наступними: для PEEK : PEEK+30GF = 1 : 1.6 рази, для PET : PET+PTFE = 1 : 1.68 рази, для PEEK : PET = 1 : 1.82 рази.

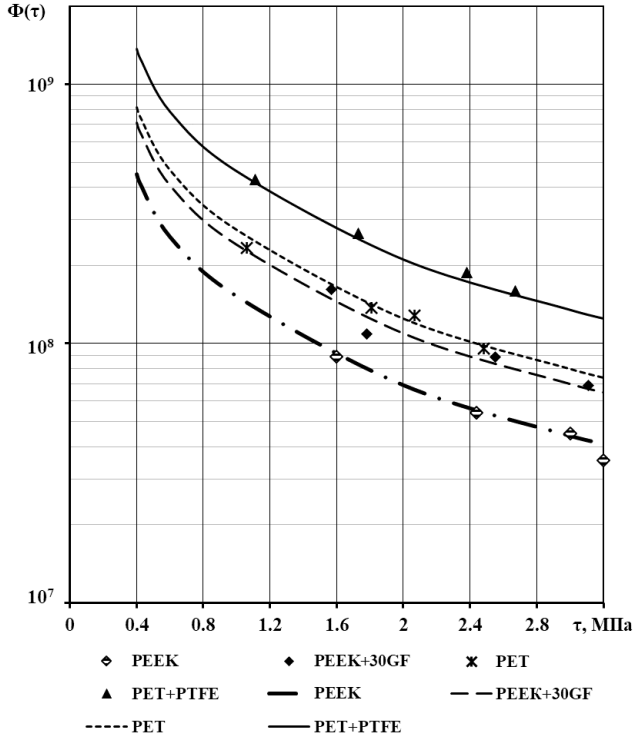


Рис. 3. Діаграми зносостійкості поліетеретеркетонів, терефталанів етилену

Результати проведених досліджень щодо встановлення характеристик C , m зносостійкості [10, 19] поліацеталів для МП зубчастих передач при вказаних умовах тертя подано у табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики зносостійкості	Термопластичні полімерні матеріали			
	PEEK	PEEK+30GF	PET	PET+PTFE
$C \cdot 10^5$	17,0	15,9	39,9	71,5
m	1,15	1,15	1,15	1,15
τ_s , МПа	50	80	40	38

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

Встановлено також експериментально залежність коефіцієнта тертя ковзання f від контактного тиску p_i у трибопарах (рис. 4).

Спостерігається для поліетеретеркетонів приблизно дворазове зниження f при зростанні контактних тисків. А для терефталанів таке зниження складає 1.75 - 1.85 рази. Якісна зміна f для обох видів композиційних матеріалів є приблизно однаковою. Проте у випадку PET, PET+PTFE f є суттєво нижчими (у 1.35... 1.55 рази), ніж у випадку PEEK, PEEK+30GF. Найбільші коефіцієнти тертя виникають у парі з PEEK+30GF, а найнижчі - у параз з PET.

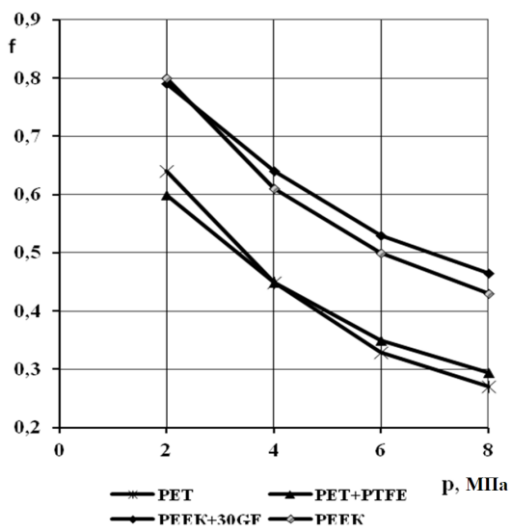


Рис. 4. Залежність середнього коефіцієнта тертя ковзання від тиску у трибопарах полімери – сталь

Висновки

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

1. Наповнення поліефірефіркетону РЕЕК скловолоком суттєво підвищує зносостійкість композиту РЕЕК+30GF. Натомість коефіцієнт тертя змінюється незначно.

2. Наповнення терефталану етилену РЕЕК фторопластом РТФЕ теж суттєво підвищує зносостійкість цього композиту РЕЕК+РТФЕ.

3. Значне зниження коефіцієнту тертя у терефталанах у порівнянні з поліефірефіркетонами призводить до суттєво вищої зносостійкості терефталанів. Найнижчу зносостійкість має поліефірефіркетон РЕЕК, а найвищу – терефталан РЕЕК+РТФЕ.

4. Коефіцієнт сухого тертя ковзання нелінійно залежить від контактного тиску у експериментальних трибопарах. Відповідно встановлено якісні і кількісні закономірності цих залежностей для кожного з досліджених полімерів. Вищим коефіцієнт тертя був у парах поліефірефіркетони – сталь 45, а біля 1.5 разів нижчим - у парах терефталани етилену – сталь 45.

5. Побудовано діаграми зносостійкості поліефірефіркетону, які відображають якісні і кількісні взаємозалежності їх 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. X.Q. Pei, K. Friedrich. Sliding wear properties of PEEK, PBI and PPP. *Wear*, 274 (2012), pp. 452-455.
3. V. Rodriguez, J. Sukumaran, A.K. Schlarb, P. De Baets, Influence of solid lubricants on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK), *Tribol. Int.* 103 (2016) 45–57.

4. Sandip Panda, Mihir Sarangi, S. K. Roy Chowdhury. An Analytical Model of Mechanistic Wear of Polymers. *Journal of Tribology*, 2018, Vol. 140 / 011609-1.

5. J. Jozwik, K. Dzedzic, M. Barszcz and M. Pashechko. Analysis and Comparative Assessment of Basic Tribological Properties of Selected Polymer Composites. *Materials* 2020, 13, 75, 1-24.

6. W. Li, A. K. Wood, R. Weidig and K. Mao, 'An Investigation on the Wear Behaviour of Dissimilar Polymer Gear Engagements', *Wear*, Vol. 271, pp. 2176-2183, 2011

7. Juanjuan Zhu, Fang Xie, and R S Dwyer-Joyce PEEK Composites as Self-Lubricating Bush Materials for Articulating Revolute Pin Joints. *Polymers*. 2020; 12(3): 665.

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

9. Чернець М., Пашечко М., Невчас А. Методи прогнозування та підвищення зносостійкості триботехнічних систем ковзання. В 3-х томах. Т.1. Дослідження та розрахунки трибосистем ковзання, методи підвищення довговічності і зносостійкості. - Дрогобич: КОЛО, 2001.– 492 с.

10. 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.

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

12. Чернець М., Келбінські Ю. Вплив нахилу зубів косозубих циліндричних передач на трибомеханічні, силові на кінематичні характеристики // *Проблеми трибології*. – 2006. - №4. – С. 3 – 7.

13. Чернець М.В., Ярема Р.Я. Прогнозування довговічності черв'ячних передач з архімедовим та свольвентним черв'яком // *Проблеми трибології*. – 2011. – №2. – С. 21 – 25.

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

15. 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. JMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2017; Vol. 231, No 1, p.57 – 62.

16. Chernets M. A Method for predicting Contact Strength and Life of Archimedes and Involute Worm Gears, Considering the Effect of Wear and Teeth Correction // *Tribology in Industry*. -2019. –№1. – P. 134 - 141.

17. 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.

18. 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.

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.

M. V. CHERNETS, A. O. KORNIENKO

TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF POLYMERIC MATERIALS FOR HYBRID METALLOPOLYMER UNITS OF DRY SLIDING FRICTION. PART. 3. POLYETHERETHERKETONS, TERETHHALANES

According to the method of model triboexperimental studies of materials during sliding friction according to the scheme of end friction, the wear resistance of polyester PEEK and its composite PEEK + 30GF, terephthalene ethylene PET and its composite PET + PTFE was determined. They are used in metal-polymer (MP) gears and plain bearings operating in conditions of dry sliding friction. Their wear resistance indicators are established, based on 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 these polymers in tribocouples with steel 45 are established. The results of influence of loading on change of coefficients of sliding friction are resulted.

Keywords: method of determining experimental indicators of wear resistance, dry sliding friction, metal-polymer friction pair, polyester PEET and its composite PEEK + 30GF, terephthalene ethylene PET and its composite PET + PTFE; indicators and characteristics of wear resistance, coefficient of sliding friction

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. X.Q. Pei, K. Friedrich. Sliding wear properties of PEEK, PBI and PPP. *Wear*, 274 (2012), pp. 452-455.
3. V. Rodriguez, J. Sukumaran, A.K. Schlarb, P. De Baets, Influence of solid lubricants on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK), *Tribol. Int.* 103 (2016) 45–57.
4. Sandip Panda, Mihir Sarangi, S. K. Roy Chowdhury. An Analytical Model of Mechanistic Wear of Polymers. *Journal of Tribology*, 2018, Vol. 140 / 011609-1.
5. J. Jozwik, K. Dziedzic, M. Barszcz and M. Pashechko. Analysis and Comparative Assessment of Basic Tribological Properties of Selected Polymer Composites. *Materials* 2020, 13, 75, 1-24.
6. W. Li, A. K. Wood, R. Weidig and K. Mao, 'An Investigation on the Wear Behaviour of Dissimilar Polymer Gear Engagements', *Wear*, Vol. 271, pp. 2176-2183, 2011
7. Juanjuan Zhu, Fang Xie, and R S Dwyer-Joyce PEEK Composites as Self-Lubricating Bush Materials for Articulating Revolute Pin Joints. *Polymers*. 2020; 12(3): 665.
8. Chernets M.V. K voprosu ob otsenke dolgovechnosti tsilindricheskikh tribosistem skolzheniya s granitsami, blizkimi k krugovym. *Treniye i iznos*, 17 (3), 340-344.
9. Chernets M., Pashechko M., Nevchas A. Metody prohnouzuvannya ta pidvyshchennya znosostiykosti trybotekhnichnykh system kovzannya. V 3-kh tomakh. T.1. Doslidzhennya ta rozrakhunok trybosystem kovzannya, metody pidvyshchennya dovhovichnosti i znosostiykosti. - Drohobych: KOLO, 2001.– 492 s.
10. Chernets M., Kelbinski YU., Skvarok YU. Otsinka dovhovichnosti, znoshuvannya ta ko-ntaktnoyi mitsnosti zubchastykh peredach / Pid zah. red. M.V.Chernetsya. – Drohobych: Vymir, 2002. – 128 s.
11. Chernets M.V. Trybokontaktni zadachi dlya tsylindrychnykh zyednan z tekhnolohich-noyu nekrulistyuu. – Lyublin: Vyd. Lyublins'koyi politekhniky, 2013. – 274 s.
12. Chernets M., Kelbinski YU. Vplyv nakhylu zubiv kosozubykh tsylindrychnykh peredach na trybomekhanichni, sylovi na kinematychni kharakterystyky // *Problemy trybolohiyi*. – 2006. - №4. – S. 3 – 7.
13. Chernets M.V., Yarema R.YA. Prohnouzuvannya dovhovichnosti chervyachnykh peredach z arkhimedovym ta evolventnym cherv'yakom // *Problemy trybolohiyi*. – 2011. – №2. – S. 21 – 25.

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

15. 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. JMechE. Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017; Vol. 231, No 1, p.57 – 62.

16. Chernets M. A Method for predicting Contact Strength and Life of Archimedes and Involute Worm Gears, Considering the Effect of Wear and Teeth Correction // Tribology in Industry. -2019. –№1. – P. 134 - 141.

17. 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.

18. 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.

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