

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(98).17359

Р. М. МАРЧУК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ

Національний авіаційний університет, Україна

АНАЛІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ

Проведений аналіз механічних та триботехнічних характеристик полімерних матеріалів та показана можливість їх покращення додаванням армуючих речовин. До ефективних наповнювачів полімерних матеріалів можна віднести вуглецеві волокна, MoS_2 , графіт, графен, SiO_2 та ін. Проаналізовано, що додавання карбїду кремнію до полівінілхлориду обумовлює збільшення антифрикційних характеристик, термостійкості та діелектричних властивостей полімеру. Обґрунтовано, що знання механічних та триботехнічних характеристик взаємодіючих між собою трибоматеріалів є необхідним для їх вибору з точки зору безпечності та ефективності підшипників ковзання у машинобудівній галузі.

Ключові слова: полімерні матеріали, композиційний матеріал, зношування, коефіцієнт тертя, карбїд кремнію.

Вступ та постановка задач дослідження. Машинобудівна промисловість використовує різні технології та конструкційні матеріали у процесі виробництва різноманітних вузлів та деталей. До основних типів конструкційних матеріалів належать полімери, композитні матеріали, сталь, алюміній, а також титанові сплави. Полімерні матеріали та композиційні матеріали на їх основі останнім часом все частіше використовуються в експлуатаційних умовах при домінуванні абразивного зношування, що свідчить про пріоритетний напрямок застосування даних матеріалів для елементів пар ковзання. Кожен підшипник ковзання є трибосистемою, яка є термодинамічно відкритою, тобто обмінюється енергією та масою з навколишнім середовищем. На стадії проектування конструкції рівень прийнятності полімерних матеріалів для роботи в умовах абразивного зношування значною мірою залежить від швидкості зношування в широкому діапазоні навантажувально-температурних умов в процесі експлуатації, що, у свою чергу, визначається високими вимогами до безпеки та довговічності деталей машин. Тертя є важливим процесом, що визначає вибір матеріалів для підшипників ковзання, оскільки на них впливає багато змінних, наприклад, умови роботи контактних елементів, здатність створювати полімерну плівку (перенесення матеріалу) або генерувати тепло, тощо. У трибології полімерів можна знайти широкий зв'язок між явищами тертя та зношування. Факт точної характеристики параметрів тертя в контактній парі є ключовим процесом для правильного відтворення явищ зношування в контактній парі. У певних ситуаціях коефіцієнт тертя має найбільше значення, але в основному саме механічна здатність до навантаження та термін служби компонентів визначають їхню прийнятність у промисловому застосуванні в різних умовах експлуатації.

Таким чином обґрунтований пошук та коректний порівняльний аналіз композиційних матеріалів, які найчастіше використовуються у машинобудівній галузі, є важливим етапом у розробленні високоефективних підшипникових матеріалів. Це робить матеріали на основі полімерів перспективними матеріалами зі здатністю контролювати та оптимізувати свою поведінку при терті та зношуванні в трибологічних контактах.

Метою роботи є аналіз доступних на ринку полімерів, їх фізико-хімічних характеристик та можливостей диспергування добавками. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: виконання обґрунтованого порівняльного аналізу композиційних матеріалів; аналітичне опрацювання актуальних сучасних досліджень.

Порівняльний аналіз полімерів та композиційних матеріалів на їх основі. Політетрафторетилен (тефлон) – це різновид самозмащувального матеріалу, який має наднизький коефіцієнт тертя, високу стійкість до корозії, хімічну інертність і широкий діапазон робочих температур. Тефлон часто використовується як тверде мастило, наповнювач, або матриця. Політетрафторетилен в даний час знаходить все більшу популярність використання у високоефективних механічних ущільненнях завдяки своїм унікальним властивостям, таким як високий хімічний опір, низький коефіцієнт тертя та висока температурна стабільність [1]. Однак його застосування було значно обмеженим через низькі механічні властивості, високий коефіцієнт лінійного розширення, погану теплопровідність і низьку стійкість до зношування та стирання. Зносостійкість тефлону можна значно покращити шляхом додавання відповідних наповнювачів. Окрім типу, форма та розмір доданих матеріалів також впливають на трибологічні властивості.

Загальні втрати на зношування композитного зразка політетрафторетилену з армуючим добавками в умовах тертя без змащувального матеріалу показано на рис. 1 для нормальних навантажень 16,23 кг та 18,76 кг.

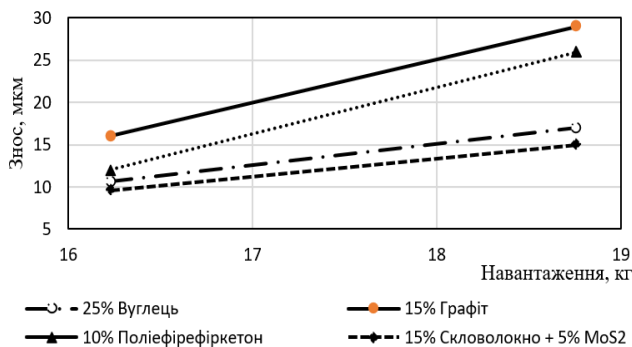


Рис.1. Показники лінійного зносу для композиційних матеріалів тефлону у поєднанні з різними наповнювачами без використання мастильного матеріалу

З представлених результатів [1] видно, що для обраного діапазону нормального навантаження загальні втрати через тертя та зношування зростають зі збільшенням навантаження. Це може бути пов'язано зі швидшим відшаровуванням плівок перенесення із збільшенням навантаження та швидкості. Зміна коефіцієнта тертя при нормальному навантаженні в умовах тертя без змащувального матеріалу показана на рис. 2 [1, 2]. З представлених результатів видно, що для вибраного діапазону нормального навантаження та швидкості ковзання коефіцієнт тертя зменшується зі збільшенням навантаження. Це може бути пов'язано зі стабільністю плівки перенесення. Таким чином, протизношувальні та антифрикційні властивості розглянутих матеріалів не корелюють між собою.

При дослідженні зазначених композиційних матеріалів на основі тефлону в умовах змащування мастильним матеріалом, їх лінійний знос зменшується на 10...20 %, залежно від армуючої добавки (рис. 3). В діапазоні нормального навантаження 16,23...18,76 кг загальні втрати на знос через тертя зростають для всіх

композиційних матеріалів зі збільшенням навантаження. Це може бути спричинене швидшим відшаруванням плівок із збільшенням навантаження та швидкості [3].

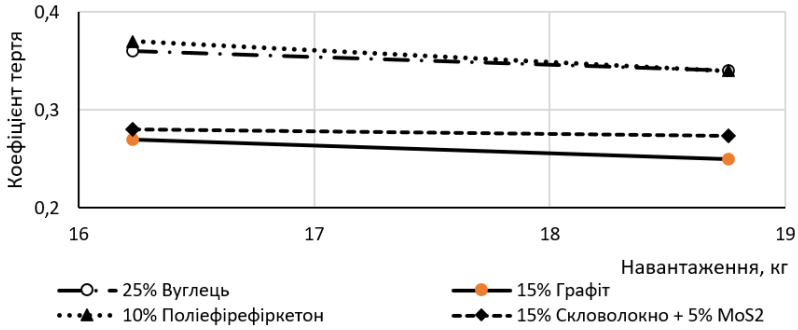


Рис. 2. Кінетика зміни коефіцієнту тертя при збільшенні навантаження для композиційних матеріалів на основі тефлону без використання мастильного матеріалу

При дослідженні зазначених композиційних матеріалів на основі тефлону в умовах змащування мастильним матеріалом, їх лінійний знос зменшується на 10...20 %, залежно від армуючої добавки (рис. 3). В діапазоні нормального навантаження 16,23...18,76 кг загальні втрати на знос через тертя зростають для всіх композиційних матеріалів зі збільшенням навантаження. Це може бути спричинене швидшим відшаруванням плівок із збільшенням навантаження та швидкості [3].

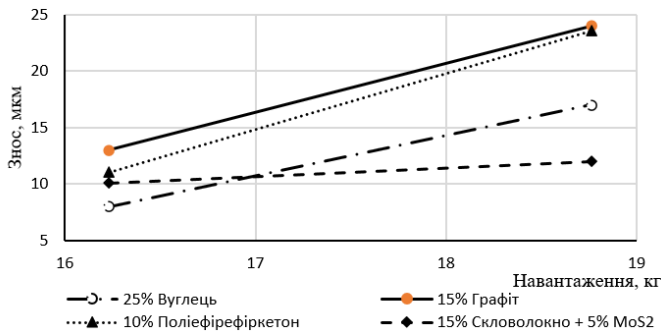


Рис. 3. Лінійний знос композиційних матеріалів на основі тефлону в умовах мащення оливою

Слід зазначити, що для композиційних матеріалів на основі тефлону в умовах мащення оливою не встановлено зміни антифрикційних властивостей, в порівнянні з умовами тертя без мастильного матеріалу, коефіцієнт тертя зменшується лише на 1-3% (рис. 4) [4].

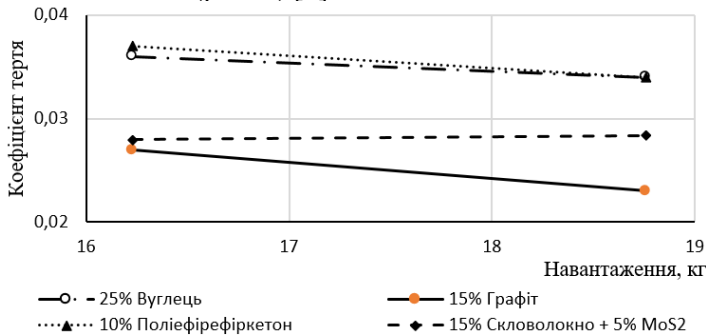


Рис. 4. Зміна коефіцієнта тертя для зразків композиційних матеріалів на основі тефлону в умовах мащення оливою

Поліфеніленсульфід – це органічний полімер, що складається з ароматичних кілець, з'єднаних сульфідами. Синтетичне волокно та тканини, отримані з цього полімеру, стійкі до хімічного та термічного впливу. При використанні даного матеріалу як елемента трибосполучення забезпечується низький коефіцієнт тертя в умовах ковзання – до 0,05.

Поліфеніленсульфід характеризується ефективними механічними показниками та термічною стабільністю відносно інших полімерів [3].

Полієфірефіркетон – це напівкристалічний термопласт із ефективними властивостями механічної та хімічної стійкості, які зберігаються при високих температурах. Умови обробки, які використовуються для формування полієфірефіркетону, можуть впливати на кристалічність і, отже, на механічні властивості. Його модуль Юнга становить 4,4...7,0 ГПа, а міцність на розрив становить від 90 до 100 МПа. Полієфірефіркетон забезпечує низький коефіцієнт тертя при низьких температурах через зменшену фактичну площу контакту, що спричинено підвищеною твердістю та модулем Юнга. Крім того, додавання вуглецевих волокон і наповнювачів MoS_2 може зменшити коефіцієнт тертя при низьких температурах у вакуумі. Однак, механізм тертя та зношування полімерних матеріалів при низьких температурах все ще залишається суперечливим, що спричинено складністю досягти низького коефіцієнта тертя ($< 0,1$). Полієфірефіркетон має температуру склування близько $143\text{ }^\circ\text{C}$ і плавиться близько $343\text{ }^\circ\text{C}$ [5]. Деякі марки даного полімеру характеризуються стійкістю при робочих температурах до $250\text{ }^\circ\text{C}$. Теплопровідність полієфірефіркетону збільшується майже лінійно. Даний матеріал стійкий до термічної деградації, а також до впливу як органічного, так і водного середовища.

В якості антифрикційних матеріалів перспективним напрямком є створення гібридних композитів. Наприклад, гібридні композиційні матеріали на основі полієфірефіркетону / політетрафторетилену, наповнені вуглецевим волокном, MoS_2 , графітом, графеном і SiO_2 , характеризуються ефективними антифрикційними показниками з коефіцієнтом тертя в межах $0,02\dots 0,1$ при навантаженні до 10 Н як у навколишній атмосфері при кімнатній температурі, так і у вакуумі при температурах від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $-100\text{ }^\circ\text{C}$ [6].

Полівінілхлорид (ПВХ) - складається приблизно з 57% хлору (Cl). Решта ПВХ, вуглеводневий (водневий і вуглецевий) компонент, отримують з етилену, отриманого з нафти або природного газу [7]. Етилен і хлор поєднуються для отримання етилендихлориду, який потім перетворюється на мономер вінілхлориду. Коли багато з цих одиничних вінілхлоридних одиниць (мономерів) поєднуються при полімеризації, отримується полівінілхлорид або ПВХ [8,9].

Основні механо-фізико-хімічні властивості розглянутих полімерних матеріалів представлені в таблиці 1.

Антифрикційні матеріали на основі полівінілхлориду мають відносно низький коефіцієнт тертя, але його можна покращити, якщо на поверхню полімера диспергувати карбід кремнію (SiC) як зображено на рис. 5. Карбід кремнію – неорганічний матеріал, який характеризується термохімічною стабільністю, низьким коефіцієнтом теплового розширення, тому додавання карбиду кремнію збільшує термостійкість полімерної матриці при терті [10].

Диспергування карбідом кремнію призводить до збільшення шорсткості, однак коефіцієнт тертя в ПВХ може досягати дуже низьких значень 0,16. Слід зазначити, що наявність подряпин та нерівностей при диспергуванні карбідом кремнію може перешкоджати утворенню плівки в фрикційному контакті.

Таблиця 1

Механо-фізико-хімічні показники антифрикційних полімерів

Властивості	Од. вим	Політетрафторетилен	Поліфеніленсульфід	Полієфірефіркетон	Полівінілхлорид
Щільність	г/см ³	2,12-2,20	1.61 - 1.80	1,31-1,41	1,18-1,30
Водопоглинання: за 24 год	не більше, %	0.01	0,01...0,09	0,06	0,1
Температура плавлення	°C	334	280	340	150-220
К-т лінійного розширення при температурах 23-100 °C	°C ⁻¹	(8...25)·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁵	(2,5...5)·10 ⁻⁵	(5...8)·10 ⁻⁵
Діапазон робочих температур	°C	-269...+260	-20...+220	-50...+250	-10...+80
Межа міцності при розтягуванні	МПа	35...50	33...90	75...90	40...50
Модуль пружності при розтягуванні	МПа	980 ... 1580	3700	4400...7000	2600...4000
Твердість по Бринелю	МПа	60...80	165	215...230	110...160
Коефіцієнт тертя по сталі		0,04	0,25-0,5	0,15-0,45	0,2-0,5

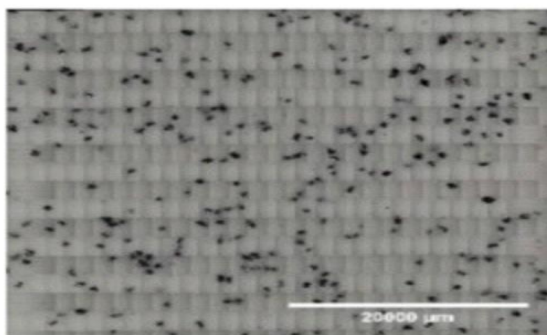


Рис. 5. Поверхневі вкраплення SiC у полівінілхлоридну матрицю

Диспергування карбідом кремнію призводить до збільшення шорсткості, однак коефіцієнт тертя в ПВХ може досягати дуже низьких значень 0,16. Слід зазначити, що наявність подряпин та нерівностей при диспергуванні карбідом кремнію може перешкоджати утворенню плівки в фрикційному контакті.

Аналіз втрати ваги композиційного матеріалу на основі ПВХ з вмістом SiC 2%, 4%, 8%, 12% при підвищенні температури представлено на рис. 6. На відміну від металів, які при підвищенні температури набирають масу внаслідок окислення, полімери зазвичай втрачають масу через процес випаровування та деградацію матриці. Оптимальним вмістом карбиду кремнію є 8%, що призводить до покращення властивостей композиту [12].

Оскільки термостійкість ПВХ дуже низька, додавання термостабілізатора у вигляді карбиду кремнію є необхідним для забезпечення ефективних властивостей композиційного матеріалу. ПВХ має максимальну робочу температуру близько 60 °C [13], а додавання карбиду кремнію до 8% забезпечує підвищення робочої температури композиту на 20-30 °C.

На основі проведеного аналізу встановлено, що антифрикційні властивості полімерів пояснюються двома основними механізмами - тертя та адгезії. Було виявлено, що трибологія полімерних матеріалів, які є в більшості випадків композитами з наповнювачами та добавками, такими як барвники, антипірени та

інші добавки, що забезпечують широкий спектр функцій, сильно залежить від хімічного складу кінцевого полімерного композиту. Сили тертя полімерних композиційних матеріалів, як і металів і кераміки, пояснюються з теорії контактних нерівностей та їх пластичної деформації під час тертя. Багато досліджень були зосереджені на моделях одиночної нерівності для розуміння площі контакту та напружень між протилежною поверхнею та полімером. Проте доведено, що проблема механізму тертя включає численні контактні нерівності, які пружно та пластично деформуються [11].

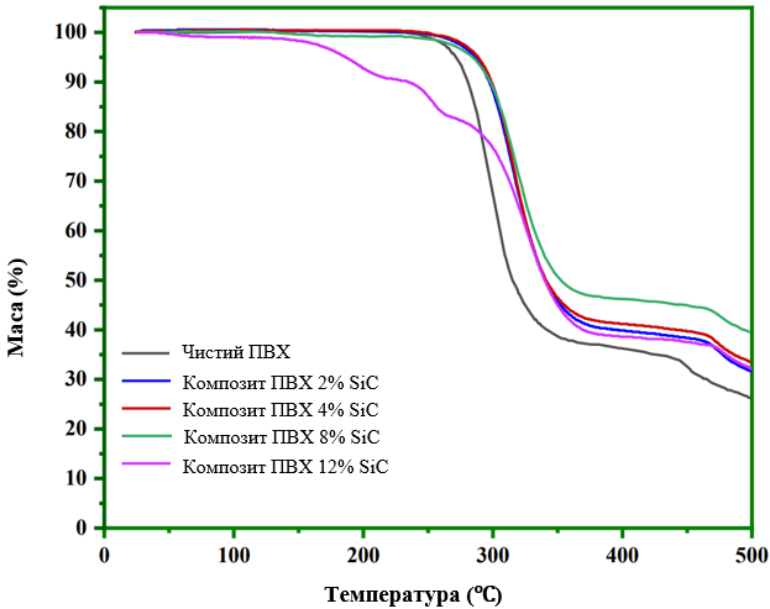


Рис.6. Зміна маси під впливом температури у композитах ПВХ із різним відсотковим вмістом карбиду кремнію

Висновки.

1. У проведеному аналізі полімерів визначено найбільш перспективні матеріали для подальших досліджень з огляду на їх фізико-хімічні властивості а також можливі комбінації різними наповнювачами. Особливої уваги заслуговує розвиток досліджень диспергування полівінілхлориду карбідом кремнію. Головним фактором покращення ефективності підшипників ковзання є вдосконалення триботехнічних параметрів композиційних матеріалів.

2. Створення композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену з вуглецевим волокном, MoS_2 , графітом, графеном і SiO_2 , забезпечує підвищення їх антифрикційних показників з коефіцієнтом тертя нижче 0,1 при навантаженні 10 Н.

3. Фізичні властивості полівінілхлориду дозволяють використовувати його у вузькому діапазоні тиску і температур, що обмежує його використання, але такі недоліки можна компенсувати шляхом диспергування різними оксидами та карбідами металів. Додавання 8% карбиду кремнію покращує фізичні характеристики полімеру та забезпечує підвищення його термічної стійкості.

Список літератури

1. Wear of hydraulic system components assessment based on the analysis of hydraulic oil degradation degree / Kopcanova S, Sejkorova M, Kucera M, Hnilicova M // Przem Chem. – 2020. – 99(9). – P. 399–403.

2. Analysis of possibilities to improve environmental operating parameters of modern compression – ignition engines / Osipowicz T, Abramek KF, Barta D, Drożdziel P, Lisowski M // *Adv Sci Technol Res J.* – 2018. - 12(2). - P.206.
3. Cameron A. Basic Lubrication Theory / A. Cameron // Wiley Eastern Publications Limited, Third Edition. - P 215-221.
4. X. Cheng, Y. Xue, C. Xie. Tribological investigation of PTFE composite filled with lead and rare earths-modified glass fiber / X. Cheng, Y. Xue, C. Xie // *Materials Letters.* – 2003. – 57. - P. 2553–2557.
5. Golchin A. Break-away friction of PTFE materials in lubricated conditions / A. Golchin, G.F. Simmons, S.B. Glavatskih // *Tribol Int.*, -2012. – 48. – P. 54-62.
6. Golchin A. Tribological behaviour of polymeric materials in water-lubricated contacts / A. Golchin, G.F. Simmons, S. Glavatskih, B. Prakash // *Proc Inst Mech Eng Part J J Eng Tribol.* – 2013. - 227 (8). - P. 811-825.
7. Liu H. Effect of SiO₂ nanoparticles-decorated SCF on mechanical and tribological properties of cenosphere/SCF/PEEK composites / H. Liu, X. Su, J. Tao, R. Fu, C. You, X. Chen // *J Appl Polym Sci.*, – 2020. - 137 (22). - P. 48749.
8. Z. Sun, Z. Zhao, Y. Zhang, Y. Li, Y. Fu, B. Sun, et al. Mechanical, tribological and thermal properties of injection molded short carbon fiber/expanded graphite/polyetherimide composites. *Compos Sci Technol.* – 2021. – 201. Article 108498.
9. Bhaduri D. On design and tribological behaviour of laser textured surfaces / D. Bhaduri, A. Batal, S.S. Dimov, Z. Zhang, H. Dong, M. Fallqvist, et al. // *Procedia CIRP.* – 2017. – 60. - P. 20-25.
10. P. Chen, X. Li, J. Ma, R. Zhang, F. Qin, J. Wang, et al. Bioinspired photodetachable dry self-cleaning surface. *Langmuir.* – 2019. - 35. - P. 6379-6386.
10. Chen P. Bioinspired photodetachable dry self-cleaning surface / P. Chen, X. Li, J. Ma, R. Zhang, F. Qin, J. Wang, et al. // *Langmuir.* – 2019. – 35. - P. 6379-6386.
11. Miller J. “Slippery” work surfaces: towards a performance definition and quantitative coefficient of friction criteria / Miller J, Dong H. // *Saf Res.* – 1983. – 14. - P.145-158.
12. Weber B. Molecular probes reveal deviations from Amontons' law in multi-asperity frictional contacts / Weber B, Suhina T, Junge T, Pastewka L, A.M. Brouwer, D. Bonn // *Nat Commun.* – 2018. – 9. - P. 888.
13. Bahadur S. The wear of filled polytetrafluoroethylene / Bahadur S., Tabor D. // *Wear.* – 1984. – 98. - P. 1-13.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2023.

Марчук Роман Миколайович – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 068 832 39 56 E-mail: 4629663@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>.

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, Email: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>.

R. M. MARCHUK, R. G. MNATSAKANOV

ANALYSIS OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR SLIDING BEARINGS

The mechanical and tribotechnical characteristics of polymer materials are analyzed and the possibility of their improvement by adding reinforcing substances is shown. For Teflon-based composite materials, no change in antifriction properties has been established under lubrication conditions, compared to friction conditions without lubrication, the friction coefficient is reduced by only 1-3%. Effective fillers of polymer materials include carbon fibers, MoS₂, graphite, graphene, SiO₂, etc. It was analyzed that the addition of silicon carbide to polyvinyl chloride increases the anti-friction characteristics, heat resistance and dielectric properties of the polymer. Antifriction materials based on polyvinyl chloride have a relatively low coefficient of friction, but it can be improved if silicon carbide is dispersed on the surface of the polymer. It is substantiated that knowledge of the mechanical and tribotechnical characteristics of interacting tribomaterials is necessary for their selection from the point of view of the safety and efficiency of sliding bearings in the machine-building industry.

Key words polymer materials, composite material, wear, coefficient of friction, silicon carbide.

Referenses

1. Wear of hydraulic system components assessment based on the analysis of hydraulic oil degradation degree / Kopcanova S, Sejkorova M, Kucera M, Hnilicova M // *Przem Chem.* – 2020. - 99(9). - P. 399–403.
2. Analysis of possibilities to improve environmental operating parameters of modern compression – ignition engines / Osipowicz T, Abramek KF, Barta D, Drozdziel P, Lisowski M // *Adv Sci Technol Res J.* – 2018. - 12(2). - P.206.
3. Cameron A. Basic Lubrication Theory / A. Cameron // Wiley Eastern Publications Limited, Third Edition. - P 215-221.
4. X. Cheng, Y. Xue, C. Xie. Tribological investigation of PTFE composite filled with lead and rare earths-modified glass fiber / X. Cheng, Y. Xue, C. Xie // *Materials Letters.* – 2003. – 57. - P. 2553–2557.
5. Golchin A. Break-away friction of PTFE materials in lubricated conditions / A. Golchin, G.F. Simmons, S.B. Glavatskih // *Tribol Int.*, -2012. – 48. – P. 54-62.
6. Golchin A. Tribological behaviour of polymeric materials in water-lubricated contacts / A. Golchin, G.F. Simmons, S. Glavatskih, B. Prakash // *Proc Inst Mech Eng Part J J Eng Tribol.* – 2013. - 227 (8). - P. 811-825.
7. Liu H. Effect of SiO₂ nanoparticles-decorated SCF on mechanical and tribological properties of cenosphere/SCF/PEEK composites / H. Liu, X. Su, J. Tao, R. Fu, C. You, X. Chen // *J Appl Polym Sci.*, – 2020. - 137 (22). - P. 48749.
8. Z. Sun, Z. Zhao, Y. Zhang, Y. Li, Y. Fu, B. Sun, et al. Mechanical, tribological and thermal properties of injection molded short carbon fiber/expanded graphite/polyetherimide composites. *Compos Sci Technol.* – 2021. – 201. Article 108498.
9. Bhaduri D. On design and tribological behaviour of laser textured surfaces / D. Bhaduri, A. Batal, S.S. Dimov, Z. Zhang, H. Dong, M. Fallqvist, et al. // *Procedia CIRP.* – 2017. – 60. - P. 20-25.
10. P. Chen, X. Li, J. Ma, R. Zhang, F. Qin, J. Wang, et al. Bioinspired photodetachable dry self-cleaning surface. *Langmuir.* – 2019. - 35. - P. 6379-6386.
10. Chen P. Bioinspired photodetachable dry self-cleaning surface / P. Chen, X. Li, J. Ma, R. Zhang, F. Qin, J. Wang, et al. // *Langmuir.* – 2019. – 35. - P. 6379-6386.
11. Miller J. “Slippery” work surfaces: towards a performance definition and quantitative coefficient of friction criteria / Miller J, Dong H. // *Saf Res.* – 1983. – 14. - P.145-158.
12. Weber B. Molecular probes reveal deviations from Amontons' law in multi-asperity frictional contacts / Weber B, Suhina T, Junge T, Pastewka L, A.M. Brouwer, D. Bonn // *Nat Commun.* – 2018. – 9. - P. 888.
13. Bahadur S. The wear of filled polytetrafluoroethylene / Bahadur S., Tabor D. // *Wear.* – 1984. – 98. - P. 1-13.

Marchuk Roman Mykolayovych – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 4629663@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>.

Mnatsakanov Rudolf Georgievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>.