

УДК 621.2.082.18

DOI: 10.18372/0370-2197.4(101).18079

*Р. М. МАРЧУК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ**Національний авіаційний університет, Україна***АНАЛІЗ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ЗНОСУ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ
НА ОСНОВІ ТРИБОМЕТРИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Проаналізовані властивості полімерних матеріалів, пов'язані із зносостійкістю та здатністю поглинати вібрацію, які використовуються у виробництві пар ковзання. Доведено перспективу використання пар тертя полімер-метал в галузевому машинобудуванні, фармацевтиці та харчовій промисловості. Щоб керувати будь-якою механічною системою з ковзним рухом при оптимальних параметрах, індикація трибологічних характеристик для матеріалів фрикційного контакту є зручним засобом більш швидкої характеристики трибологічної поведінки, коли робочі умови є змінними. За допомогою експериментального дослідження проаналізовано фактори, що впливають на знос полімерних зразків у контакті зі металом. Матеріали, які підлягають трибологічному аналізу, є полімерними матеріалами, такими як Sustamid 66 сірий, Sustapei та SusTamid 6G OL, виробництва Röchling Group, що контактують з сталлю 30ХГСА.

Ключові слова: *трибومترічна машина, полімери, зношування, момент тертя, швидкість ковзання, вимірювання температура.*

Вступ та постановка задачі дослідження. На сьогоднішній день нові полімерні матеріали - це одні з матеріалів, що найчастіше запитуються різними галузями промисловості. Полімери мають безліч специфічних властивостей (здатність до утворення міцних плівок (або волокон), а також здатність чинити опір деформуючим навантаженням та хімічно агресивним середовищам [1, 2]), завдяки яким практичне застосування полімерних матеріалів знаходить дедалі більше нових галузей виробництва. Водночас, визначення навантажувально-швидкісного та температурного діапазонів застосування полімерів в якості триботехнічних матеріалів в вузлах тертя машин та механізмів потребує додаткових лабораторних досліджень.

Одним з важливих аспектів, який впливає на ефективність та тривалість служби полімерів, є їх інтенсивність зношування. Зношування полімерних матеріалів внаслідок тертя може значно зменшити їхню економічну доцільність використання. Тому для розуміння і покращення властивостей полімерів необхідно докладно вивчати процеси зношування, розробляти або удосконалювати існуючі методики оцінки зносостійкості, визначати механізми зношування з позицій трибохімічних процесів в контакті з наступною можливістю управління фізико-хімічними та триботехнічними властивостями полімерів певного експлуатаційного призначення.

В роботі [3] проведено прогнозу оцінку довговічності металополімерних підшипників із поліамідів PA6, PA66 та композитів на основі поліамідів PA6+30GF, PA6+30CF, PA6+MoS₂ з урахуванням їх різної зносостійкості, характеристик пружності та умов сухого тертя.

При оцінці впливу швидкості випробування та значень прикладеного тиску на тертя та зношування поліаміду 66, поліоксиметилену (ПОМ), поліетилену надвисокої молекулярної маси (UHMWPE) встановлено лінійне зменшення коефіцієнту тертя зі збільшенням тиску від 0,35 до 1,05 МПа та швидкостях ковзання 0,5–2,0 м/с [4]. Однак, за результатами цього дослідження швидкість зношування характеризується дуже низькою чутливістю до прикладеного тиску та швидкості випробувань.

На додачу до загальних аспектів дослідження зношування, важливим аспектом у дослідженні триботехнічних властивостей полімерів є оцінка впливу температури у зоні контакту на процес зношування, термічної стабільності або механо-термічної деструкції полімерів. Вимірювання та аналіз температурних параметрів стають додатковим кроком у розумінні зношування полімерних матеріалів. Наприклад, на основі аналітичної температурної моделі, яка враховує вплив як мікро-, так і макротермічної поведінки полімерів, досліджено та експериментально перевірено, що в парі тертя поліефірний ефіркетон – політетрафторетилен проявляються ознаки схоплювання, коли пікова температура перевищує температуру склування обох матеріалів через збільшення прикладеного навантаження [5].

Таким чином, актуальним напрямком дослідження полімерних матеріалів триботехнічного призначення є визначення діапазону їх працездатного стану за навантажувальними, швидкісними та температурними параметрами. Тому великого значення набуває розробка методології дослідження, включаючи вибір та підготовку полімерних зразків, процедури триботричних вимірювань та розробка методів неперервної реєстрації кінетики зміни температурних процесів у зоні контакту.

Метою роботи є дослідження зношування у ковзаючому контакті полімер-сталь та визначення кінетики зміни температури у зоні контакту залежно від тривалості напрацювання полімерів.

Основними завданнями є:

- встановлення механізмів зношування полімерних матеріалів при сталому навантаженні та швидкості ковзання;
- визначення впливу температури на інтенсивність зношування та зміну фізичних властивостей полімерних зразків;
- аналіз отриманих результатів та окреслення можливих практичних задач, направлених на поліпшення якості та довговічності полімерних матеріалів.

Матеріали та методи дослідження. Вибір полімерів, з яких виготовлені зразки для проведення досліджень, був здійснений з урахуванням їх фізико-хімічних властивостей, спрямованих на оптимальне використання у підшипниках ковзання. Кожен полімер був підібраний, враховуючи його механічні, теплофізичні та трибологічні характеристики [6-8], щоб забезпечити високу зносостійкість та ефективну роботу в змодельованих умовах тертя. В таблиці 1 наведено перелік ключових властивостей досліджуваних матеріалів, що служитиме джерелом базових даних для подальшого аналізу та порівняння.

Таблиця 1

Фізичні властивості матеріалів.

| Властивості | Метод тестування | Одиниці | Sustamid 66 сірий | Sustapei | SusTamid 6G OL |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|----------------|
| Щільність | DIN EN ISO 1183-1 | г/см ³ | 1.15 | 1.27 | 1.14 |
| Абсорбція води | DIN EN ISO 62 | % | 2.8 | 0.5 | 2.0 |
| Межа текучості | DIN EN ISO 527 | МПа | 85 | 110 | 70 |
| Модуль пружності | DIN EN ISO 527 | МПа | 3300 | 3100 | 3300 |
| Твердість за Шором | DIN EN ISO 868 | шкала D | 83 | 86 | 82 |
| Температура плавлення | ISO 11357-3 | °C | 260 | 248 | 213 |
| Теплопровідність | DIN 52612-1 | Вт/мК | 0.23 | 0.24 | 0.25 |

Використано трибометричну машину для проведення експериментів визначення зносу та метод тестування згідно ISO 7148-2:2012 «Plain bearings — Testing of the tribological behaviour of bearing materials» [9, 10]. Під час проведення дослідження для вимірювання температури використовувався пірометр. Цей метод є досить ефективним, оскільки інфрачервоні сенсори дозволяють швидко виміряти температуру в трибологічних парах не впливаючи на зону контакту. Однією з переваг цього підходу є його висока швидкість, що особливо важливо при тестуванні в умовах, коли температура динамічно змінюється. Також використання інфрачервоного дозволяє мінімізувати вплив на термодинамічну систему, сенсор може вимірювати, не взаємодіючи прямо із тілами, що досліджуються.

Контртіло виготовлено із сталі 30ХГСА (HRC = 43; Ra = 0.37 мкм). Обрані матеріали для дослідження являються аналогом трибоспряження вал-полімерна втулка, тому практична оцінка взаємодії пар ковзання обраних полімерів з металевою поверхнею відкриває широкий спектр можливостей для вивчення та оптимізації параметрів таких трибосистем.

Результати досліджень та їх аналіз. В даному дослідженні вибір трьох полімерних матеріалів для аналізу та інтерпретації зносу обґрунтовується кількома ключовими факторами. По-перше, полімерні матеріали широко використовуються у різних галузях через свою високу міцність та легкість, що робить їх ефективними для застосувань, де вага відіграє важливу роль. По-друге, властивості полімерів можуть бути покращені у композитних матеріалах для досягнення оптимальних характеристик, таких як міцність, твердість і теплопровідність. Ці аспекти можуть бути важливими для визначення їх довговічності в умовах трибологічних навантажень. Нарешті, врахування параметрів, таких як температурні зміни, момент тертя та інші характеристики, дозволить розширити розуміння зносостійкості та трибологічної поведінки цих

матеріалів. У результаті такого дослідження можливо буде виявити оптимальні полімери для конкретних умов експлуатації трибологічної пари полімер-метал в умовах ковзання без змащувального матеріалу.

Під час проведення експериментальних досліджень зразки були позиціоновані у взаємодії з контртілом, розташованими напроти один одного. Ця взаємодія сприяла оптимізації та збалансуванню модельної схеми досліджень, а також допомогла знизити можливі вібрації у системі. Такий метод розташування зразків та контртіла створює оптимальні умови для точних та стабільних вимірювань трибологічних характеристик. Даний підхід дозволяє отримати більш високу точність та достовірність результатів експерименту, що є важливим для подальшого аналізу та впровадження отриманих даних в практику триботехніки.

У процесі дослідження зносу полімерів використовувався ваговий метод, який надає точні та надійні результати. Зміни в масі об'єктів дослідження були виміряні за допомогою високоточних аналітичних ваг, забезпечуючи високу чутливість і точність вимірювань. Цей метод дозволяє детально вивчати процес зношування матеріалів та отримувати об'єктивні дані про його динаміку та характеристики. Результати зносу полімерів наведені у таблиці 2. Через те, що при досліджуванні кожного матеріалу використовувалась пара зразків для балансування трибометра, вказані значення зносу для кожного зразка окремо.

Таблиця 2

Кінетика зношування матеріалів.

| Зразки 1-й та 2-й | Початкова вага m_1 (г) | Кінцева вага m_2 (г) | Ваговий знос m_{Δ} (г) | Середня швидкість ковзання \bar{v} (м/с) | Момент тертя (Н·м) |
|----------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------|
| Sustamid 66 сірий | 0.9801 | 0.9692 | 0.0109 | 2.84 | 1.54 |
| | 1.0295 | 1.0183 | 0.0112 | | |
| Sustapei | 0.9915 | 0.9778 | 0.0137 | 2.82 | 1.61 |
| | 1.001 | 0.9869 | 0.0141 | | |
| SusTamid 6G OL | 1.2999 | 1.2862 | 0.0137 | 2.87 | 1.27 |
| | 1.1557 | 1.1437 | 0.0120 | | |

Отримано залежності зміни температури трибометричних пар у процесі експерименту при терті ковзання без мастильного матеріалу (рис.1). Відображена кінетика теплових змін під час взаємодії полімерних зразків та поверхні металічного контртіла, що є ключовим елементом аналізу трибологічних властивостей матеріалів.

Експеримент був виконаний після попереднього притирання зразків і контртіла протягом 15 хвилин (три відліки, які не включено на графіках) з метою покращення прилягання геометричних поверхонь тіл перед проведенням трибологічних досліджень. Цей етап має важливе значення для забезпечення стабільних умов тертя та зношування під час експерименту. Припрацювання забезпечує належну взаємодію між поверхнями та допомагає уникнути впливу випадкових аномалій на результати дослідження.

Стійкий тренд у зростанні температури у всіх об'єктів дослідження свідчить про потенційне збільшення сили тертя в зоні контакту. Для вирішення цього питання у парах полімер/метал рекомендується розглядати можливість застосування нових технологічних підходів [11], таких як застосування спеціальних покриттів або полімерних матеріалів зі зменшеною теплопровідністю. Також важливо ретельно аналізувати та оптимізувати умови змащення і тертя, щоб забезпечити ефективну роботу пари полімер/метал при збереженні низьких значень тертя та відповідних температур.

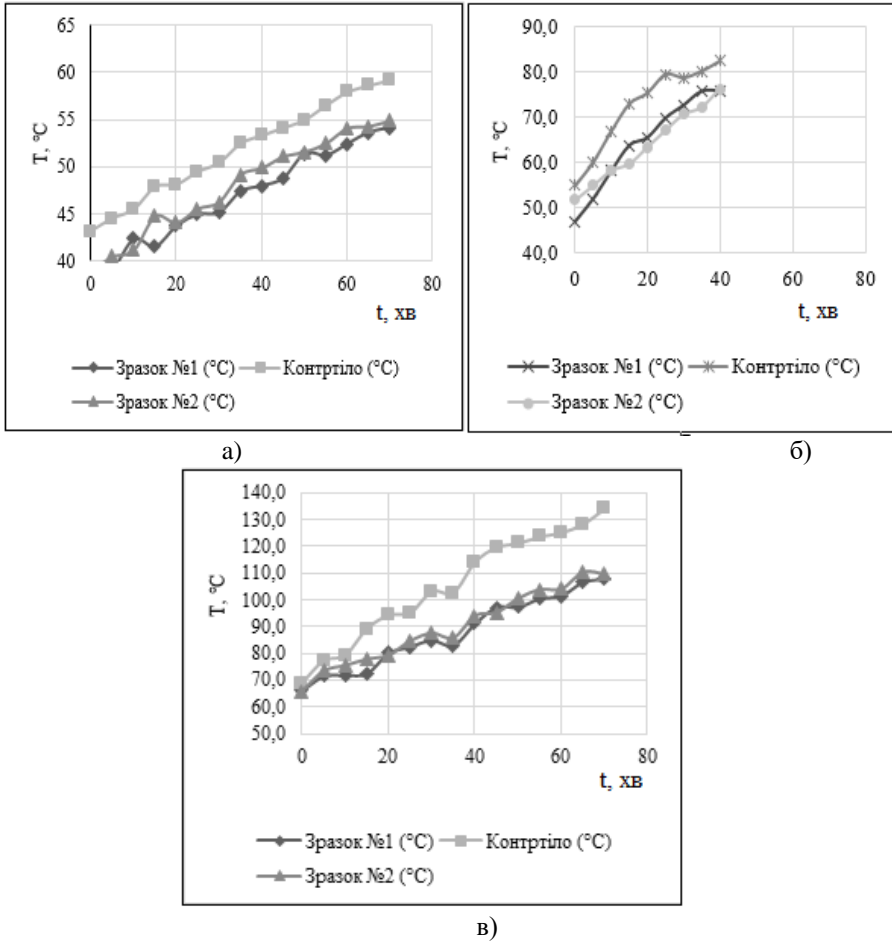


Рис. 1 Моніторинг температури об'єктів дослідження : а – Sustamid 6G OL, б – Sustamid 66, в – Sustapei.

Результати досліджень на основі оптичних методів аналізу поверхні тертя та кінетики зміни моменту тертя, дозволять глибше зрозуміти процес зношування полімерних матеріалів з урахуванням температурних вимірювань і можуть слугувати основою для подальших досліджень у цій області. Сліди зношування по полімерних матеріалах наведено на рис. 2.

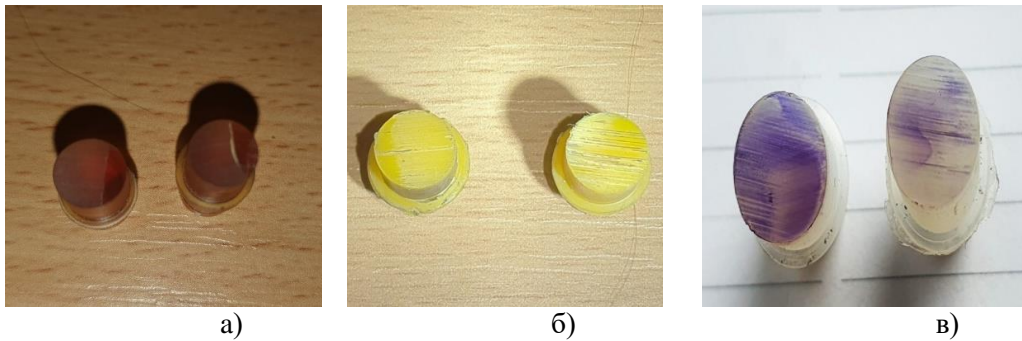


Рис.2. Зображення зразків після триботестування : *а* – Sustapei, *б* – Sustamid 6G OL, *в* – Sustamid 66.

Структурних змін матеріалу не спостерігається. На поверхні полімерів помітні подряпини та потертості, що є нормальним для даного виду тестування. Ці подряпини та потертості є не лише зовнішніми ознаками інтенсивності тертя, але й свідчать про високу зносостійкість полімерних зразків у даному експерименті – для досліджуваних полімерів не зафіксовано ознаки деструкції, зміни кольору, прозорості матеріалу.

Таким чином, результати досліджень свідчать про інтенсифікацію трибохімічних процесів при терті конструкційних полімерів, які відносяться до класу термопластичних полімеризованих поліамідів, в парі зі сталеву поверхнею, що спричинює самозмащування твердих тіл в результаті фізичних та хімічних процесів при фрикційній взаємодії полімерів з контртілом.

Висновки. У цій статті був проведений експеримент з вивчення трибологічних властивостей трьох полімерних матеріалів у парі з сталлю 30ХГСА. Під час дослідження вимірювалась температура у зоні контакту, спостерігалась динаміка зношування та аналізувалась структура матеріалів.

Результати свідчать про високу зносостійкість полімерів при взаємодії з металевою поверхнею. Виявлені подряпини та потертості на поверхні матеріалів свідчать про інтенсивність тертя, проте вони не призвели до структурних змін у внутрішній структурі полімерів, і враховуючи відсутність мастила, досягнуті результати можна вважати задовільними та позитивними. Це підкреслює високий потенціал досліджуваних полімерів для застосування в умовах трибопар без необхідності додаткового змащення.

Середнє значення вагового зносу для трьох експериментів склало 0,0126 г з середньоквадратичним відхиленням [12] (СКВ) 0,0013 г. Це свідчить про невелику втрату маси полімерних зразків під час триботестування. Щодо включення значень СКВ, важливо розглядати його у контексті конкретного досліду та його об'єму. Зазначимо, що при невеликій кількості досліджень СКВ може бути чутливим до випадкових відхилень. У подальших досліджах планується збільшувати об'єм вибірки для більш точних результатів.

Загалом, отримані результати вказують на перспективність використання досліджуваних полімерних матеріалів у трибосистемах, і подальші дослідження дозволять розширити розуміння їхньої трибологічної поведінки та покращити методику вимірювань.

Список літератури

1. Shi Y., Feng X., Wang X., Lu, X. The Effect of Surface Modification on the Friction and Wear Behavior of Carbon Nanofiber-Filled PTFE Composites, *Wear*. 2008. vol. 264, nos. 11–12. P. 934–939.
2. Krasnov A.P., Aderikha V.N., Afonicheva O.V. et al. Categorization system of nanofillers to polymer composites. *J. Frict. Wear*. 2010. 31. P. 68–80.
3. Chernets M., Świć A., Kornienko A., Yurchuk A. Evaluation of Wear Resistance of Functional Composite Polymeric Materials and Durability of Metal-Polymer Bearings. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2023. 17(2). P. 258-267.
4. Unal H., Sen U., Mimaroglu A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International*. 2004. Vol. 37, Is. 9. P. 727-732.
5. Lin Z., Qu T., Zhang K. et al. Modeling of contact temperatures and their influence on the tribological performance of PEEK and PTFE in a dual-pin-on-disk tribometer. *Friction*. 2023. 11. P. 546–566.
6. <https://www.roechling.com/uk/industrial/materials/thermoplastics/high-performance-plastics/pei/sustapei-591330> (дата звернення 21.11.2023)
7. <https://www.roechling.com/industrial/materials/thermoplastics/engineering-plastics/pa/pa-66/sustamid-66-natural-718430> (дата звернення 21.11.2023)
8. <https://www.roechling.com/uk/industrial/materialy/thermoplastics/engineering-plastics/pa/pa-6-g/sustamid-6g-ol-grey-591390> (дата звернення 21.11.2023)
9. ISO 7148-2: 2012. Plain bearings – Testing of the tribological behaviour of bearing materials. 2012. 4с.
10. Марчук Р.М., Мнацаканов Р.Г. Аналіз полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. №1(98). С. 55-62.
11. Xue, Q. J. Progress in chinese tribology research and application. *Science & Technology Review*, 2008. 5 с.
12. https://stud.com.ua/20681/statistika/serednye_kvadratichne_vidhilennya (дата звернення 24.11.2023)

Стаття надійшла до редакції 27.11.2023.

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>.

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>

R.M. MARCHUK, R. G. MNATSAKANOV

ANALYSIS AND INTERPRETATION OF WEAR IN POLYMER MATERIALS BASED ON TRIBOLOGICAL INVESTIGATIONS

The analyzed properties of polymer materials related to wear resistance and vibration absorption capabilities, utilized in the production of sliding pairs, have been explored. The perspective of employing polymer-metal friction pairs in industrial machinery, pharmaceuticals, and the food industry has been substantiated. To effectively control any mechanical system with sliding motion under optimal parameters, indicating tribological characteristics for materials in frictional contact is a convenient means for swiftly characterizing tribological behavior when operating conditions are variable. Through experimental investigation, factors influencing the wear of polymer specimens in contact with metal have been analyzed. The materials subjected to tribological analysis are polymer materials such as Sustamid 66 gray, Sustapei, and SusTamid 6G OL, manufactured by the Röchling Group, in contact with steel 30KhGSA. All selected polymer materials are designed for use in pairs with sliding contact.

Keywords: tribometer, polymers, wear, frictional torque, sliding velocity, temperature measurement

Referenses

1. Shi Y., Feng X., Wang X., Lu, X. The Effect of Surface Modification on the Friction and Wear Behavior of Carbon Nanofiber-Filled PTFE Composites, *Wear*. 2008. vol. 264, nos. 11–12. P. 934–939.
2. Krasnov A.P., Aderikha V.N., Afonicheva O.V. et al. Categorization system of nanofillers to polymer composites. *J. Frict. Wear*. 2010. 31. P. 68–80.
3. Chernets M., Świć A., Kornienko A., Yurchuk A. Evaluation of Wear Resistance of Functional Composite Polymeric Materials and Durability of Metal-Polymer Bearings. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2023. 17(2). P. 258-267.
4. Unal H., Sen U., Mimaroglu A. Dry sliding wear characteristics of some industrial polymers against steel counterface. *Tribology International*. 2004. Vol. 37, Is. 9. P. 727-732.
5. Lin Z., Qu T., Zhang K. et al. Modeling of contact temperatures and their influence on the tribological performance of PEEK and PTFE in a dual-pin-on-disk tribometer. *Friction*. 2023. 11. P. 546–566.
6. <https://www.roechling.com/uk/industrial/materials/thermoplastics/high-performance-plastics/pei/sustapei-591330> (Date of access 21.11.2023)
7. <https://www.roechling.com/industrial/materials/thermoplastics/engineering-plastics/pa/pa-66/sustamid-66-natural-718430> (Date of access 21.11.2023)
8. <https://www.roechling.com/uk/industrial/materials/thermoplastics/engineering-plastics/pa/pa-6-g/sustamid-6g-ol-grey-591390> (Date of access 21.11.2023)
9. ISO 7148-2: 2012. Plain bearings – Testing of the tribological behaviour of bearing materials. 2012. 4c.
10. Marchuk R.M., Mnatsakanov R.H. Analiz polimernykh kompozytsiynykh materialiv dlia pidshyynykiv kovzannia. *Problemy tertia ta znoshuvannia*. 2023. №1(98). C. 55-62.
11. Xue, Q. J. Progress in chinese tribology research and application. *Science & Technology Review*, 2008. 5 c.
12. https://stud.com.ua/20681/statistika/serednye_kvadratichne_vidhileniya (Date of access 24.11.2023)