

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(104).18984

*М.С. ХІМКО¹, А.М. ХІМКО², Р.Г. МНАЦАКАНОВ², О.М. МІКОСЯНЧИК²*¹ *ТОВ Авіакомпанія «НЗОПЕРЕЙШІНС», Київ*² *Національний авіаційний університет, Київ*

ВПЛИВ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛОПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

Проведено випробування металоолімерних композиційних матеріалів при температурах навколишнього середовища в 20 та 60 °С. Було визначено вплив температури на зносостійкість металоолімерних композиційних матеріалів, які можливо використовувати в авіаційних шарнірних підшипниках. Визначено, що найбільший вплив на величину інтенсивності зношування має генерація тепла, викликана як процесом тертя, так і динамічним навантаженням, в результаті реверсивного руху.

Ключові слова: шарнірний підшипник, металоолімерні композиційні матеріали, реверсивний рух, зношування, випробування, умови експлуатації, температура.

Вступ. На трибологічні та інші властивості полімерних композиційних матеріалів в більшій чи меншій мірі впливає температура. Найбільше це стосується модуля Юнга, який є одним із основних важливих факторів полімерних композиційних матеріалів, оскільки характеризує їх жорсткість. Його помітне зниження під впливом температури може мати достатньо значний вплив на контактні та триботехнічні характеристики [1].

Саме тому дослідженню впливу температури на жорсткість композиційних матеріалів присвячено багато праць [1 – 4, та ін.].

В роботі [1] автори досліджували вплив температури на модуль Юнга завдяки розробленому аналітичному методу розрахункової оцінки характеристик контактної міцності та фрикційної стійкості при терті ковзання. Було встановлено, що при підвищенні температури в полімерних підшипниках ковзання від 20 до 60 °С спостерігається лінійне зниження модулів пружності поліамідів. В залежності від типу матеріалу, зниження модулів Юнга випробовуваних матеріалів становило в 1,2-1,35 разів. Також було встановлено, що із зростанням температури оточення, яка спричиняє зменшення величини модуля Юнга поліамідних композитів PA6+30CF та PA6+30GF, відбувається зниження рівня початкових максимальних контактних тисків та підвищується несуча здатність металоолімерних підшипників ковзання до 10 % [2].

Аналізуючи вплив температури на металоолімерні композиційні матеріали, можна зробити висновок, що всі матеріали в склад яких входять полімерні матеріали змінили результат зношування в більшій чи меншій мірі. Це пояснюється тим, що будь-який полімер змінює свої характеристики міцності при підвищенні температури, і як наслідок впливає на результат тертя.

Відповідно до умов роботи підшипників на повітряних суднах, температура їх роботи знаходиться в межах -50 + 50 °С. Якщо розглядати умови роботи гелікоптерів, що працюють на африканському континенті, то діапазон температур лежать в межах від 0 до +120 °С.

Отже, вплив температури на випробування металоолімерних матеріалів є цілком цікавим фактором, що змінює зносостійкість матеріалів.

Метою дослідження було визначення впливу температури зовнішнього середовища на зносостійкість сучасних металополімерних композиційних матеріалів, які використовують для виготовлення авіаційних шарнірних підшипників.

Методика випробувань. Для випробування металополімерних композиційних матеріалів для авіаційних підшипників була вибрана установка [5, 6], яка дозволяє проводити випробування в коливальних рухах із впливом температури на зразки.

Випробуваннях композиційних матеріалів було проведено при температурах 20 та 60 °С. Нагрівання матеріалів відбувалось за допомогою звичайного фену, який впродовж 10-ти хвилин прогріває зразки перед стартом та працює протягом всього випробування.

Частота коливань в 3 Гц була визначена та враховувалась виходячи з умов роботи шарнірних підшипників в важелях зміни кута атаки лопотів несучого гвинта автомату перекосу гелікоптерів типу Мі-8/17.

Умови випробування відповідали наступним параметрам:

1. Амплітуда переміщення – 500 мкм.
2. Частота коливань – 3 Гц.
3. Питоме навантаження – 10 МПа.
4. Кількість циклів напрацювання – 10^5 циклів.

Матеріали для проведення випробувань були визначені як сучасні композиційні металополімерні матеріали [7, 8], які застосовуються в машинобудуванні передовими компаніями в світі, а саме: Zedex ZX-324VMT, Iglidur TX1, Fluroglide та металополімерна стрічка (МПС) Ф-4К15М5.

Вплив температури на зносостійкість металополімерних композиційних матеріалів.

На рис.1 представлено зміна зносостійкості композиційних металополімерних матеріалів при температурах 20 та 60 °С.

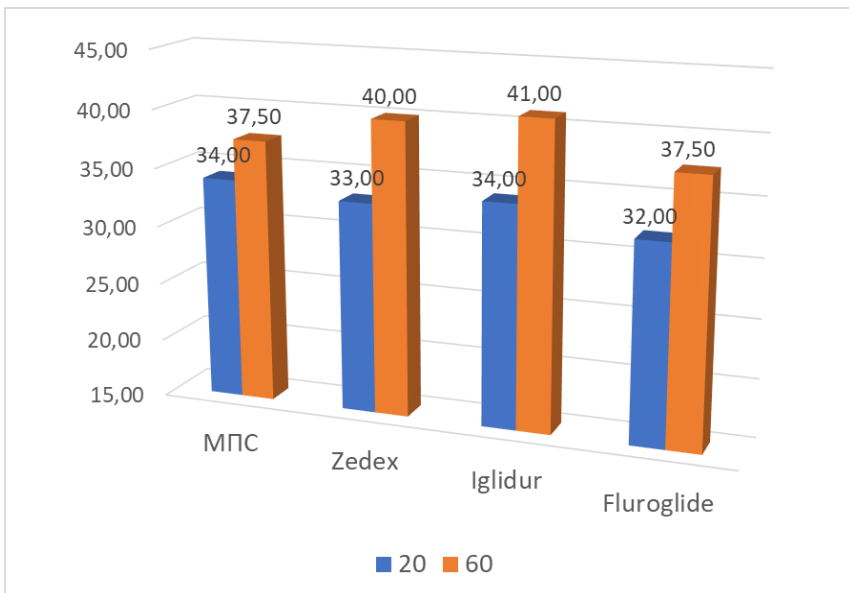


Рис. 1 – Зносостійкість антифрикційних металополімерних композиційних матеріалів при температурах в 20 та 60°С.

Збільшення температури від 20 до 60°C не суттєво впливає на випробувані композиційні матеріали від 8 до 15 %. Оскільки підібрані для випробувань антифрикційні металополімерні композиційні матеріали є складною будовою більш ніж п'яти матеріалів із різною структурою та характеристиками. Робочий діапазон температур майже всіх матеріалів коливається в межах від -50 до +120°C.

На металополімерну стрічку температура впливає найменше - в межах 8%. Різниця в зносі в 3,5 мкм при випробуванні може бути навіть похибкою при дослідженнях. Незначний вплив температури на композиційний матеріал пояснюється тим, що шар матеріалу PTFE+15%C+5%MoS² на бабіті знаходяться на металевій стрічці, яка відводить та розподіляє тепло. Нанесений полімер, на який температура має найбільший вплив, виступає в ролі матеріалу для припрацювання. Всі інші матеріали, які входять до складу цього композиційного матеріалу не так змінюють свої характеристики (жорсткість, модуль Юнга, твердість та ін.), як полімер PTFE.

На матеріал Fluroglide температура впливає в більшій мірі, чим на металополімерну стрічку і складає біля 10 %. Цей матеріал створений на основі армованих тканин із полімерними матеріалами і температурний вплив збільшує просадження матеріалу під дією навантаження. Але каркас композиційного матеріалу та волокна, які входять в склад тримають напруження і тому вплив є більшим, ніж у металополімерній стрічці і менший, ніж у інших матеріалів серед тих, що проходили випробування та, які відрізняються за своїм складом.

Матеріали ZX-324VMT та Iglidur показали найбільший приріст показника зносу від температури, що становить близько 15-20 %. Матеріал ZX-324VMT створений на основі РЕЕК із додаванням інших полімерів та наповнювачів. Тобто основу конструкції цього матеріалу несе полімер армований вуглецевими волокнами. І, як наслідок, температура впливає на цей композиційний матеріал майже так само, як і на полімерні матеріали. Дещо змінюють параметри впливу температури на полімер армування та присутність наповнювачів із іншою природою походження. Майже такий самий вплив відбувається і на матеріал Iglidur. Різниця в показниках зношування пояснюється різними функціональними наповнювачами, які присутні в цих матеріалах та різними розмірами армуючих волокон. За структурою ці матеріали дуже схожі з різницею лише в матеріалах та їх кількості (рис. 2).

При терті тепло, яке генерується в зоні контакту розсіюється в довкілля і температура трибосистеми завжди знаходиться в динамічній рівновазі при постійних режимах роботи, та коливається від точки рівноваги в залежності від умов роботи шарнірних підшипників. Особливістю металополімерних композиційних матеріалів в шарнірних підшипників ковзання є велика площа фактичного контакту та низька теплопровідність, яка значно менша, ніж у контакт метал-метал. Як наслідок, утворення більшої інтенсивності виникнення тепла, що виникає під дією високих навантажень (статичних, динамічних) роботи підшипників, внаслідок меншому відводу тепла із зони контакту.

Для шарнірних підшипників ковзання із металополімерними композиційними матеріалами одним із найважливіших критеріїв визначення меж застосування матеріалів є величина напружень, що руйнує металополімерний матеріал. За даними робіт [9, 10] вона пов'язана із температурою з лінійним законом. Крім того, автори робіт визначили, що із

підвищенням температури, руйнуючи напруження стискання зменшуються і їх величина залежить від температури більш інтенсивніше, чим деформація металополімерного матеріалу.



Рис. 2 – Фотографія поверхні (а) та структура (б) матеріалів ZX-324VMT та Iglidur.

В металополімерних шарнірних підшипників це пояснюється складною конструкцією композиційних матеріалів (PTFE та вуглецеві армовані волокна із додаванням твердих мастильних матеріалів в матриці із іншого полімеру або бабіту). При навантаженні в умовах нормальної температури покриття деформується, як в'язко-пружний матеріал, оскільки жорсткість полімерної матриці та вуглецевих волокон у поперечному напрямку приблизно однакові. В цьому випадку міцність покриття є відносно високою. Зі зростанням температури досить різко знижуються параметри жорсткості та міцності полімерної аморфної матриці (настає її розм'якшення), у той час як орієнтовані і набагато термічно витривалі вуглецеві волокна практично не змінюють своїх властивостей. При цьому PTFE із функціональними добавками видавлюється між волокон і деформація руйнування металополімерного матеріалу визначається переважно жорсткістю його армуючого каркаса, ніж матриці. Така сама картина відбувається і при роботі металополімерної стрічки, але волокнами, що армують в даному випадку є бабітовий матеріал (наприклад B-83).

В роботах [11, 12] визначено, що при експлуатації полімерних композиційних пар тертя полімери можуть знаходитись в умовно крихкому та вимушеному високо еластичному стані. Перехід від одного стану в інший зумовлено комплексними діями температури та навантаження. Також зазначається, що працездатність матеріалу характеризується не когезійними властивостями композиційного матеріалу, а і адгезійними властивостями, на межі матеріал-основа. Таким чином, межу ймовірного практичного використання металополімерних матеріалів, що досліджувались, окрім межі міцності, в значній мірі визначає і межа вимушеної високоеластичності. Аналіз графіка 3 показує, що криві питомої роботи деформування при всіх температурах в залежності від значення приросту питомої роботи деформування можна розділити на дві ділянки [9, 11].

Перша ділянка кривої (<100 МПа), відповідає умовно крихкому стану полімерного матеріалу, характеризується невеликими деформаціями і практично рівномірним приростом питомої роботи деформування. Друга ділянка (>100 МПа) відповідає більшому приросту роботи деформування, що відповідає високо еластичному стану матриці. Таким чином, криві на рис. 3 дають

інформацію параметрах меж вимушеного високо еластичного стану та температурі, при якій відбуваються кінетичний перехід в цей стан. Перехід в новий агрегатний стан принципово змінює характер процесів тертя та зношування, як правило погіршує зносостійкість трибопари.

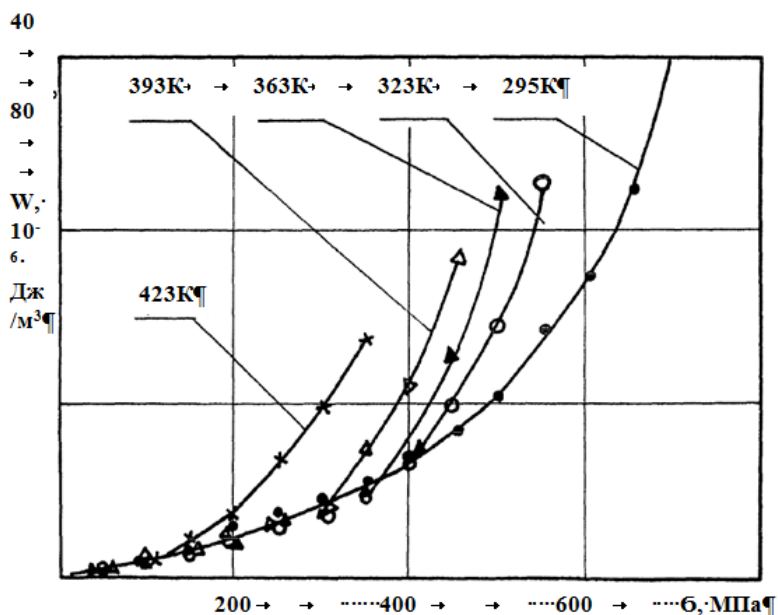


Рис. 3 – Вплив напружень і температур на питому роботу деформування при стисканні полімерних матеріалів [9].

Іншим важливим наслідком низьких теплофізичних властивостей полімерних матеріалів є можливість виникнення в матеріалі значних градієнтів температур. небезпека нерівномірного нагріву полягає у різному термічному розширенні як всього матеріалу так і окремих компонентів які входять в склад матеріалу. Чим менше сумарна відмінність у властивостях компонентів полімерних композиційних матеріалів, тим менші подібні складові чутливі до теплової дії, включаючи імпульсне чи динамічне навантаження. Слід зазначити, що не дивлячись на різницю у властивостях, руйнування конструкції полімерних матеріалів настане лише при досягненні найменш міцним компонентом деформацій, які перевищують гранично допустимі.

В роботах [10, 13] автори встановили, що якщо полімерний матеріал зберігає свій твердий агрегатний стан без переходу у межу вимушеної високоеластичності, то підвищення температури в значному ступеню впливає на коефіцієнт тертя. Генерація та накопичення тепла є наслідком процесів тертя та діями знакозмінного динамічного навантаження шарнірних підшипників.

На рис. 4 представлено вплив навантажень, швидкості ковзання та коефіцієнту динамічності (при знакозмінних навантаженнях) на підвищення температури в металополімерному матеріалі [13]. Де коефіцієнт динамічності Kd показує приріст навантаження від амплітуди коливань:

$$Kd = \frac{\sigma_0 + \sigma_a}{\sigma_0}$$

де σ_0 – середнє значення напружень в циклі коливань;

σ_a – амплітудне значення напружень.

Аналіз кривих дозволяє зробити висновки, що найбільший вплив на нагрів металополімерних матеріалів спричиняють контактні напруження, потім коефіцієнт динамічності, потім швидкість ковзання. Причому проявляється майже лінійний вплив коефіцієнта динамічності на температуру покриттів. Слід зазначити, що матеріали досліджувались при високих контактних навантаженнях та відносно низьких швидкостях ковзання які відповідали реальним умовам роботи шарнірних підшипників ковзання із металополімерними матеріалами [14, 15].

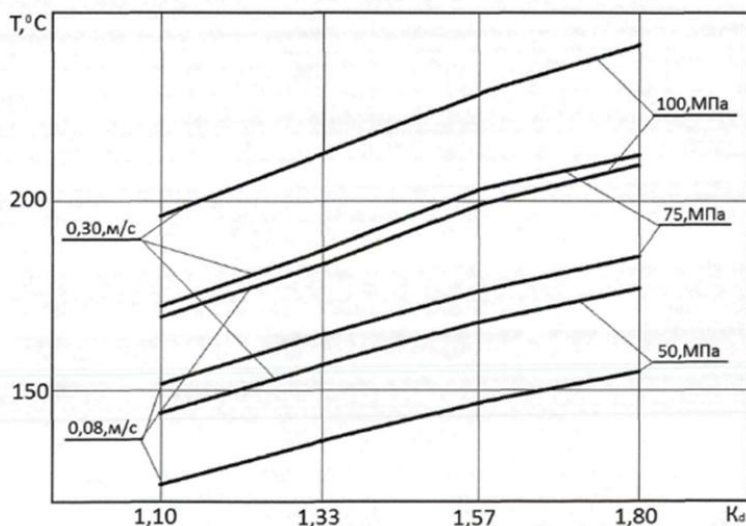


Рис. 4 – Вплив параметрів навантаження, швидкості ковзання та коефіцієнта динамічності на температуру металополімерного композиційного покриття [13].

Таким чином, високі критичні навантаження як статичні, так і динамічні значно знижують зносостійкість металополімерних композиційних матеріалів. Найбільший вплив на величину інтенсивності зношування має генерація тепла, викликана як процесом тертя, так і динамічним навантаженням в результаті реверсивного руху. Слід зазначити, що збільшення статичного навантаження при терті навіть до 200 МПа [11] не викликає такого нагріву як від динамічного навантаження. Наслідком цього є можливий перехід металополімерного матеріалу в стан вимушеної високоеластичності і як наслідок руйнування матеріалу.

Висновки. Підвищення температури випробувань із 20 до 60°C впливає на полімерні композиційні матеріали в більшій мірі, ніж на металополімерну стрічку. На цьому етапі значну роль в зносостійкості відіграє здатність матеріалу розсіювати тепло, яке виникає в зоні контакту від реверсивного ковзання. Також встановлено, що вуглецева тканина матеріалу Fluroglide здатна витримати більшу температуру, ніж бабіт у металополімерній стрічці. Ключову роль у довговічності шарнірних підшипників, які працюють в не стандартних температурах будуть відігравати саме підбір конструкції композиційних матеріалів та самих полімерних матеріалів для конкретних умов роботи.

Список літератури

1. Чернець М.В., Романенко Є.О., Корнієнко А.О., Чернець Ю.М. Методологічні основи розрахунку металевих і металополімерних підшипників ковзання: Контактна міцність, зношування, довговічність. – К.: НАУ, 2022. – 283 с.
2. Чернець М.В., Романенко Є.О., Корнієнко А.О., Чернець Ю.М. Методологічні основи розрахунку металевих і металополімерних підшипників ковзання: Контактна міцність, зношування, довговічність. Том 3. Металополімерні передачі. – К.: НАУ, 2022. – 250 с.
3. Марчук Р.М., Мнацаканов Р.Г. Аналіз полімерних композиційних матеріалів для підшипників ковзання. Проблеми тертя та зношування. 2023. №1(98). С. 55-62.
4. Марчук Р.М., Мнацаканов Р.Г. Аналіз та інтерпретація зносу полімерних матеріалів на основі трибомеханічних досліджень. Проблеми тертя та зношування. 2023. №4(101). С. 52-59.
5. Хімко М.С., Якобчук О.Є., Хімко А.М., Науменко Н.О. Методика випробувань шарнірних підшипників на зносостійкість. Проблеми тертя та зношування. 2017. № 1 (74). С. 118-122.
6. Khimko M.S. Development and modernization of a complex of installations for wear testing of metal-polymer composite materials for spherical sliding bearings. *Problems of friction and wear*. 2024. № 1 (102). P. 73-83.
7. Аналіз композиційних полімерних матеріалів для авіаційних шарнірних підшипників / Хімко М.С., Кліпаченко В.В., Філоненко О.Є. // XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ПРТК-2024), 21-22 травня 2024 р. Київ: НАУ, 2024. – С. 121-123.
8. Розробка структурної схеми досліджень шарнірних підшипників та формування принципів вибору металополімерних трибопар / Хімко М.С., Мнацаканов Р.Г., Хімко А.М. // XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ПРТК-2024), 21-22 травня 2024 р. Київ: НАУ, 2024. – С. 118-120.
9. Kokhanovsky V. A., Glazunov D. V. A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel–Rail System. *Journal of Friction and Wear*. 2020. Vol. 41, no. 6. P. 531–537. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366620060100>
10. Gogoleva O. V., Okhlopkova A. A., Petrova P. N. Development of self-lubricating antifriction materials based on polytetrafluoroethylene and modified zeolites. *Journal of Friction and Wear*. 2014. Vol. 35, no. 5. P. 383–388. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366614050055>
11. He, Peiyu, Yun Wang, Hong Liu, Erkuo Guo, and Hua Wang. "Influence of the elastic and elastic-plastic material parameters on the mechanical properties of slewing bearings." *Advances in Mechanical Engineering* 13, no. 1 (January 2021): 168781402199215. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814021992151>.
12. Mashkov Y. K. Nanostructural self-organization and dynamic adaptation of metal–polymer tribosystems. *Technical Physics*. 2017. Vol. 62, no. 2. P. 282–286. URL: <https://doi.org/10.1134/s1063784217020190>.
13. Mashkov Y. K. Physicochemical processes in metal–polymer tribosystems. *Journal of Friction and Wear*. 2012. Vol. 33, no. 5. P. 354–358. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366612050078>.

14. Хімко М.С., Хімко А.М., Мнацаканов Р.Г., Кліпаченко В.В., Макаренко Р.О. Зносостійкість полімерних композиційних матеріалів для шарнірних підшипників. Проблеми тертя та зношування. 2024. № 2 (103). С.29-42.

15. Resource testing of modified plain bearings for the aviation industry / M. Khimko, A. Khimko, P. Mnatsakanov, O. Mikosyanchuk // Problems of tribology. –V.29, № 2/112-2024, P.16-22.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2024.

Хімко Маргарита Сергіївна – заступник директора з безпеки польотів Авіакомпанії ТОВ «НЗОПЕРЕЙШНС», вул. Староноводницька, 66, м. Київ, Україна, 01015, тел/факс: +38 0934415942, E-mail: margarytakhimko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-4364-5444>

Хімко Андрій Миколайович - канд. техн. наук, доцент кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380444067658, E-mail: andrii.khimko@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0009-8059-880X>

Мнацаканов Рудольф Георгійович – докт. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380444067770, E-mail: rudolf.mnatsakanov@npp.nau.edu.ua <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

M.S. KHIMKO, A.M. KHIMKO, R. G. MNATSAKANOV, O.O. MIKOSIANCHYK

INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE METAL OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS ON WEAR RESISTANCE

Metal-polymer composite materials were tested at ambient temperatures of 20 and 60 °C. The most modern composite wear-resistant materials used in mechanisms as sliding bearings were used. The relevance of the tests is determined by the application of worldwide trends to mechanisms without maintenance for the entire life cycle.

The influence of temperature on the wear resistance of metal-polymer composite materials that can be used in aviation spherical plane bearings is determined. It was determined that heat generation caused by both the friction process and dynamic load as a result of reverse motion has the greatest influence on the wear intensity. Increasing the test temperature affects polymer composite materials to a greater extent than metal-polymer tape. At this stage, a significant role in wear resistance is played with the ability of the material to dissipate heat, which occurs in the contact zone from reversible sliding. It has also been established that the carbon fabric of the Fluroglide material can withstand higher temperatures than the babbitt of the metal-polymer tape. A key role in the durability of spherical plane bearings that work in non-standard temperatures will be played by the composite materials design selection and the polymer materials themselves for specific operating conditions.

Keywords: spherical plane bearings, metal-polymer composite materials, reversible movement, wearing, testing, operating conditions, temperature.

References

1. Chernets M.V., Romanenko Y.O., Kornienko A.O., Chernets Yu.M. Methodological bases for the calculation of metal and metal-polymer sliding bearings: Contact strength, wear, durability. – K.: NAU, 2022. – 283 p.
2. Chernets M.V., Romanenko Y.O., Kornienko A.O., Chernets Yu.M. Methodological bases of calculation of metal and metal-polymer sliding bearings: Contact strength, wear, durability. Part. 3. Metal-polymer transfers. – K.: NAU, 2022. – 250 p.
3. Marchyk R.M., Mnatsakanov R.H. Analysis of polymer composite materials for sliding bearings. *Friction and wear problems*. 2023. №1(98). P. 55-62.
4. Marchyk R.M., Mnatsakanov R.H. Analysis and interpretation of wear of polymeric materials based on tribomechanical studies. *Friction and wear problems*. 2023. №4(101). P. 52-59.
5. Khimko M.S., Yakobchuk O.Y., Khimko A.M., Naumenko N.O. Methods of spherical plane bearings testing for wear resistance. *Friction and wear problems*. 2017. № 1 (74). P. 118-122.
6. Khimko M.S. Development and modernization of a complex of installations for wear testing of metal-polymer composite materials for spherical sliding bearings. *Problems of friction and wear*. 2024. № 1 (102). P. 73-83.
7. Analysis of composite polymer materials for aviation articulated bearings / Khimko M.S., Klipachenko V.V., Filonenko O.Y. // XVII International scientific and practical conference "Integrated intelligent robotic and technical complexes» (IIPTK-2024), May 21st - 22^d of May 2024 Kyiv: NAU, 2024. – P. 121-123.
8. Development of a structural scheme for the research of spherical plane bearings and the formation of principles for the selection of metal-polymer tribopairs / Khimko M.S., Mnatsakanov R.H., Khimko A.M. // XVIII International Scientific and Practical Conference "Integrated Intelligent Robotic Complexes" (IIPTK-2024), May 21st -22^d of May 2024 Kyiv: NAU, 2024. – P. 118-120.
9. Kokhanovsky V. A., Glazunov D. V. A Lubricant for Rotaprint Lubrication of the Wheel–Rail System. *Journal of Friction and Wear*. 2020. Vol. 41, no. 6. P. 531–537. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366620060100>

10. Gogoleva O. V., Okhlopkova A. A., Petrova P. N. Development of self-lubricating antifriction materials based on polytetrafluoroethylene and modified zeolites. *Journal of Friction and Wear*. 2014. Vol. 35, no. 5. P. 383–388. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366614050055>

11. He, Peiyu, Yun Wang, Hong Liu, Erkuo Guo, and Hua Wang. "Influence of the elastic and elastic-plastic material parameters on the mechanical properties of slewing bearings." *Advances in Mechanical Engineering* 13, no. 1 (January 2021): 168781402199215. <http://dx.doi.org/10.1177/1687814021992151>.

12. Mashkov Y. K. Nanostructural self-organization and dynamic adaptation of metal-polymer tribosystems. *Technical Physics*. 2017. Vol. 62, no. 2. P. 282–286. URL: <https://doi.org/10.1134/s1063784217020190>.

13. Mashkov Y. K. Physicochemical processes in metal-polymer tribosystems. *Journal of Friction and Wear*. 2012. Vol. 33, no. 5. P. 354–358. URL: <https://doi.org/10.3103/s1068366612050078>.

14. Khimko M.S., Khimko A.M., Mnatsakanov R.H., Klipachenko V.V., Makarenko R.O. Wear resistance of polymer composite materials for articulated bearings. *Friction and wear problems*. 2024. № 2 (103). С.29-42.

15. Resource testing of modified plain bearings for the aviation industry / M. Khimko, A. Khimko, P. Mnatsakanov, O. Mikosyanchyk // *Problems of tribology*. –V/29, № 2/112-2024, P.16-22.

Khimko Marharyta – deputy director on flight safety of Air Company LLC “H3Operations”, Staronavodnytska Str., 66, Kyiv city, Ukraine, 01015, tel/fax: +38 0934415942, E-mail: margarytakhimko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-4364-5444>

Khimko Andrii – Candidate. technical of Sciences, associate professor, associate professor of Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: andreykhimko@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0009-8059-880X>

Mnatsakanov Rudolf – 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>.

Mikosianchyk Oksana – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>.