

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.822.17

doi: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321228

© Яйчук О.О.¹, Поворотній В.В.²

КОНСТРУКЦІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА НОВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ В СУЧАСНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Стаття має оглядовий характер і присвячена аналізу сучасних матеріалів, конструкцій та технологій змащування підшипників ковзання, які є важливим елементом машинобудування та знаходять застосування в різноманітному промисловому обладнанні, такому як турбіни, насоси, генератори та компресори. Надійність і довговічність підшипників ковзання є ключовими проблемами в сучасній промисловості, оскільки їхній вихід з ладу може призвести до зупинки всього обладнання, що спричиняє значні економічні втрати. Залежно від умов експлуатації, підшипники ковзання стикаються з проблемами зносу, високих температур, вібрацій та нестабільного режиму змащування, що вимагає застосування інноваційних матеріалів, конструкцій та методів змащування. Метою даної статті є аналіз сучасних матеріалів, які застосовуються для виготовлення підшипників ковзання, конструкцій підшипників та технологій їх змащування. Особливу увагу приділено використанню полімерних матеріалів для пар тертя, а також ефективності рідин з низькою в'язкістю для змащування, що дозволяє використовувати підшипники ковзання у специфічних та високотехнологічних агрегатах. Огляд включає результати численних досліджень, у яких розглядаються різні типи підшипників, такі як гідростатичні та гідродинамічні, з використанням води та інших рідин як змащувальних середовищ. Практична значимість цього огляду полягає в можливості подальшого використання його результатів для створення оптимальних конструкцій підшипників ковзання, придатних для застосування в складних агрегатах, де висуваються критичні вимоги до точності, надійності та ефективності роботи підшипників. Основні висновки огляду свідчать про те, що поєднання інноваційних матеріалів, таких як полімери, та передових методів змащування дозволяє значно підвищити стійкість до зносу та стабільність роботи підшипників. Крім того, перспективним є впровадження нових конструкцій підшипників з покращеною ефективністю змащування та тепловідведення, що дозволить підвищити продуктивність сучасних роторних агрегатів. Дослідження в цій сфері є важливим для розвитку більш надійних та ефективних підшипникових систем у промисловості.

Ключові слова: підшипники ковзання, гідростатичні підшипники, полімерні матеріали, турбомашини, змащення підшипників ковзання, охолодження підшипників ковзання.

O.O. Yaichuk, V.V. Povornii. Constructional features and advanced technologies of journal bearings in modern industry. The article is a review and focuses on the analysis of modern materials, designs, and lubrication technologies for plain bearings, which are essential components in mechanical engineering and are used in various industrial equipment, such as turbines, pumps, generators, and compressors. The reliability and longevity of journal bearings are critical issues in modern industry, as their failure can lead to complete equipment shutdown, causing significant economic losses. Depending on operating

¹ аспірант, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: 0009-0009-4034-4266, a.yaichuk@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: 0009-0000-9128-902X, vicktorpovar@gmail.com

conditions, journal bearings face challenges related to wear, high temperatures, vibration, and unstable lubrication, necessitating the use of innovative materials, structures, and lubrication methods. This review aims to analyse contemporary materials, bearing designs, and lubrication technologies used in the manufacture of journal bearings. Special attention is given to the use of polymer materials for friction pairs and the effectiveness of low-viscosity lubricants, which enable journal bearings to be used in specialised, high-tech equipment. The review incorporates findings from numerous studies that examine various types of bearings, such as hydrostatic and hydrodynamic, using water and other fluids as lubricants. The practical significance of this review lies in its potential to inform the development of optimised journal bearing designs suited to complex applications that demand high precision, reliability, and operational efficiency. The key findings suggest that the integration of innovative materials, such as polymers, and advanced lubrication methods can significantly enhance wear resistance and operational stability. Furthermore, the implementation of new bearing designs with improved lubrication efficiency and heat dissipation offers promising improvements for the productivity of modern rotating equipment. Research in this area is crucial for advancing more reliable and efficient bearing systems in industry.

Keywords: journal bearings, hydrostatic bearings, polymer materials, turbomachinery, journal bearing lubrication, journal bearing cooling.

Постановка проблеми. Підшипники ковзання є незамінними компонентами сучасних машин, широко використовуваних в авіаційній техніці, енергетиці, транспорті, машинобудуванні та інших промислових галузях. Їхня здатність витримувати навантаження та зменшувати тертя між рухомими частинами сприяє зниженню зносу та підвищенню ефективності роботи техніки. Проблеми зносу, перегріву та нестабільного режиму змащування часто призводять до виходу з ладу підшипників, що спричиняє значні економічні втрати. Тому дослідження, спрямовані на розробку матеріалів та технологій, які підвищують довговічність та надійність підшипників ковзання, є вкрай актуальними і мають як наукове, так і практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження зосереджуються на розробці інноваційних матеріалів, таких як полімери з графітовими і карбоновими добавками, а також на впровадженні нових технологій змащування. У роботах [1-17] аналізуються різні композиційні матеріали, які забезпечують високу зносостійкість і низький коефіцієнт тертя в умовах високих навантажень. Додатково досліджується застосування рідин з низькою в'язкістю у роботах [3, 5, 9] та сегментні конструкції підшипників у роботах [4, 8], що дозволяють значно покращити їх експлуатаційні показники та стабільність обертання.

Мета дослідження – оцінити сучасні матеріали, конструкційні рішення та інноваційні методи змащування, які здатні підвищити надійність, зносостійкість та тривалість служби підшипників ковзання за умов високих навантажень, температур і нестабільного змащення.

Виклад основного матеріалу. Підшипники ковзання є невід'ємною частиною багатьох інженерних систем, які використовуються в різних галузях, таких як авіаційна техніка, ракетобудування, енергетика, транспорт, суднобудування і машинобудування. Вони використовуються для зниження тертя і зносу між рухомими частинами, забезпечуючи плавне і стабільне обертання валів або інших обертових елементів. Сучасні технології створення підшипників ковзання передбачають використання передових матеріалів і покриттів, таких як полімери, композиційні матеріали та спеціальні метали, які забезпечують підвищену стійкість до тертя і зносу [1].

Забезпечення надійності та довговічності підшипників ковзання є однією з ключових проблем сучасної інженерії. Постійні зусилля спрямовані на підвищення продуктивності підшипників шляхом оптимізації їхніх геометричних параметрів, застосування нових методів змащування, а також використання передових комп'ютерних методів для моделювання робочих характеристик підшипників [2]. Під продуктивністю підшипників розуміють їх здатність ефективно витримувати навантаження, забезпечувати точність і стабільність обертання, працювати на високих швидкостях без перегрівання, мінімізувати втрати енергії через тертя, а також мати високий термін служби та зносостійкість. Крім того, підвищення продуктивності включає зниження рівня шуму і вібрацій, що сприяє надійній та безперебійній роботі підшипників у різних умовах

експлуатації. Основними факторами, що впливають на роботу підшипників ковзання, є температурні коливання, навантаження та швидкість обертання, що впливає на тертя і знос.

Одним із сучасних напрямків досліджень є використання рідин з низькою в'язкістю для змащування і охолодження підшипників ковзання. Це рішення активно вивчається і вже застосовується у високошвидкісних турбомашинах, які використовують підшипники ковзання [3]. У той же час, конструкційні рішення, такі як сегментні підшипники ковзання, дозволяють підвищити стабільність обертання і зменшити втрати на тертя.

Сучасні дослідження також фокусуються на впровадженні полімерних матеріалів з високими трибологічними властивостями, таких як РЕЕК (поліетіленфторкетон) з графітовими або карбоновими добавками, які використовуються для створення підшипникових елементів. Ці матеріали характеризуються підвищеною стійкістю до тертя, а також забезпечують кращі робочі показники в умовах роботи в середовищах з низькою в'язкістю [4].

У статті буде розглянуто застосування різних полімерних матеріалів, їхній вплив на робочі характеристики підшипників, а також проаналізовані конструкційні рішення, такі як сегментні підшипники ковзання.

Для дослідження підшипників ковзання були використані різні методи, що базуються на теоретичних, числових та експериментальних підходах. Основним завданням досліджень було встановлення впливу матеріалів та змащувальних рідин на продуктивність підшипників ковзання. Використані методи включали числове моделювання (CFD), лабораторні тести з вимірюванням тертя і зносу, а також аналіз поведінки змащувальної рідини.

Одним із основних методів було числове моделювання, зокрема CFD-моделювання процесів теплообміну і гідродинаміки, що використовується для моделювання поведінки змащувальних рідин під час роботи підшипників. У роботах, таких як [1], моделювання дозволяє враховувати термодинамічні ефекти та взаємодію рідини з поверхнею підшипника. Зокрема, важливим фактором у таких дослідженнях є моделювання різних умов змащування, що дозволяє забезпечити точну оцінку роботи підшипника.

Експериментальні дослідження є важливим компонентом аналізу. Лабораторні установки використовуються для імітації реальних умов експлуатації підшипників ковзання. Наприклад, у дослідженнях [4] експериментально досліджувалися підшипники ковзання, спроектовані для роботи на високих швидкостях, де використовувалася полімерна поверхня підшипника та рідини з низькою в'язкістю для змащення та охолодження. Такі дослідження дозволяють оцінити, як саме змащувальна рідина впливає на експлуатаційні характеристики підшипника, такі як тертя, знос, а також температурні режими.

На рис. 1 показано температурні коливання, виміряні в підшипниках під час поступового збільшення швидкості обертання спочатку до 9277 об/хв, а потім до 12700 об/хв. Чорною лінією (Rotation speed) показано зміну швидкості обертання. Червоною лінією показано температуру в передньому радіальному підшипнику (Front_B-temp), яка досягає максимуму 47°C наприкінці тесту при максимальній швидкості. Рожевою лінією відображено температуру на лівій стороні переднього підшипника (A_B_front/left-temp), де вона також збільшується зі швидкістю, але трохи нижча, ніж загальна температура переднього підшипника. Зеленою лінією показано температуру у задньому радіальному підшипнику (Rear_B-temp), де вона залишається дещо нижчою, досягаючи приблизно 45°C. Жовтою лінією показано температуру на правій стороні переднього підшипника (A_B_front/right-temp), яка також зростає до приблизно 43-45°C. Синьою лінією відображено температуру в нижній частині переднього підшипника (A_B_front/bottom-temp), яка досягає максимуму близько 58°C. Коричневою лінією показано температуру в нижній частині заднього підшипника (A_B_rear/bottom-temp), де вона зростає до 45°C. Блакитною лінією показано температуру у верхній частині переднього підшипника (A_B_front/top-temp), яка піднімається до 50°C. Помаранчевою лінією показано температуру у верхній частині заднього підшипника (A_B_rear/top-temp), де температура залишалася на рівні близько 45°C [4]. Загалом, температурні коливання в передньому підшипнику вищі, ніж у задньому, а максимальні температури спостерігаються в нижніх частинах обох підшипників.

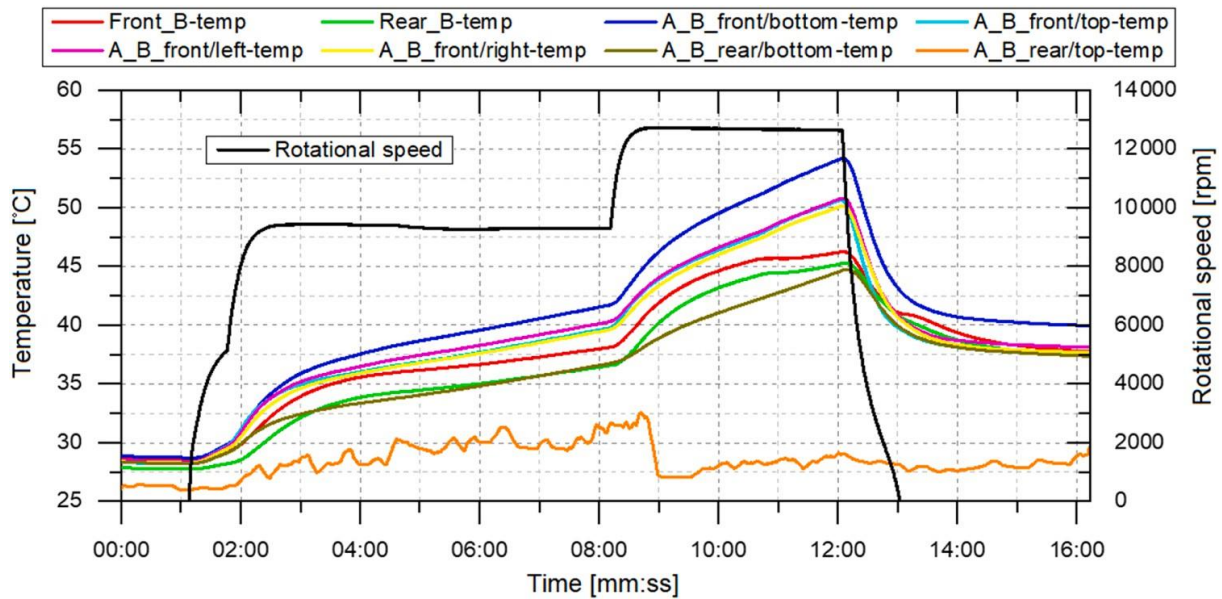


Рис. 1 – Температурний розподіл у підшипнику під час експерименту [4]

Важливим аспектом експериментальних тестів є також оцінка стабільності роботи ротора, що обертається на таких підшипниках.

В представленій на рис. 2 установці застосовуються такий набір датчиків, який дозволяє вимірювати всі найважливіші параметри, на підставі яких можна оцінити справність як підшипників, так і самої експериментальної установки.

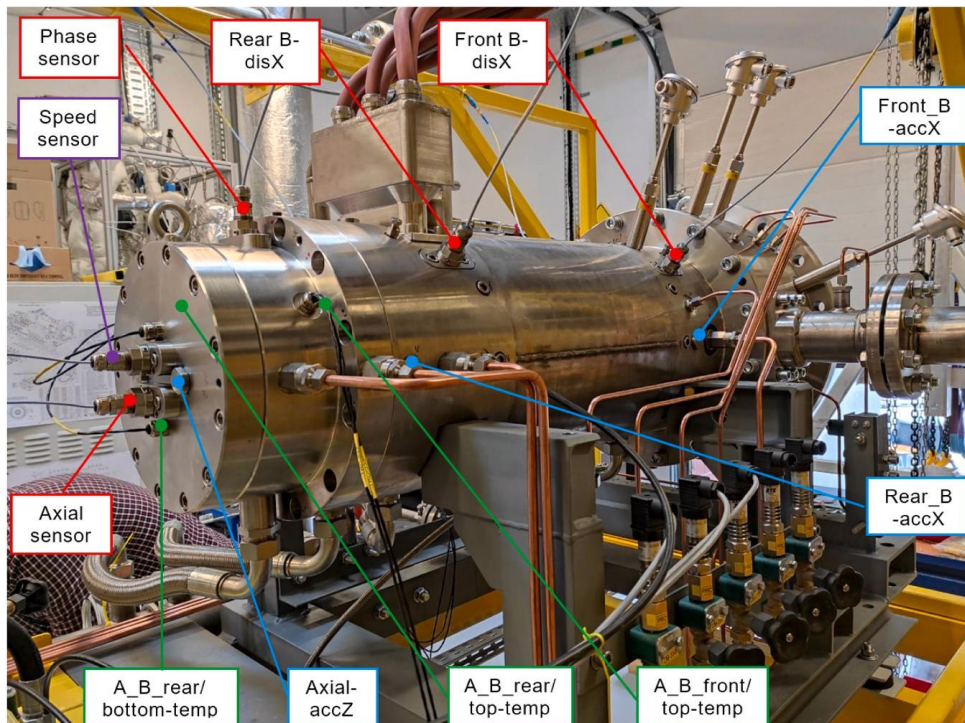


Рис. 2 – Фото експериментальної установки, на якій проводились дослідження [4]

Для розробки нових конструкцій підшипників використовувався також метод скінчених елементів, що дозволяє аналізувати деформацію підшипників під впливом зовнішніх навантажень і змін температур. Це особливо важливо для підшипників, що використовуються в умовах

високих швидкостей і навантажень, де точність розрахунків є критично важливою для забезпечення надійності системи.

Крім того, важливою частиною методів дослідження є аналіз змащувальних рідин. У статті [5] було проведено дослідження використання води як основного змащувального середовища, а також використання невеликої кількості допоміжних змащувальних рідин для покращення характеристик підшипників. Такий підхід дозволяє зменшити тертя та підвищити надійність підшипників в умовах нестабільного змащення.

Експериментальні тести підшипників ковзання були проведені на спеціальних стендах (рис. 3 та рис. 4), де можна імітувати різні режими роботи підшипників, включаючи високі навантаження та оберти. В дослідженні [6] розглядався процес розподілу навантаження в підшипнику під час його роботи в різних режимах. Особлива увага приділялася питанням стабільності роботи системи при використанні води як змащувальної рідини.

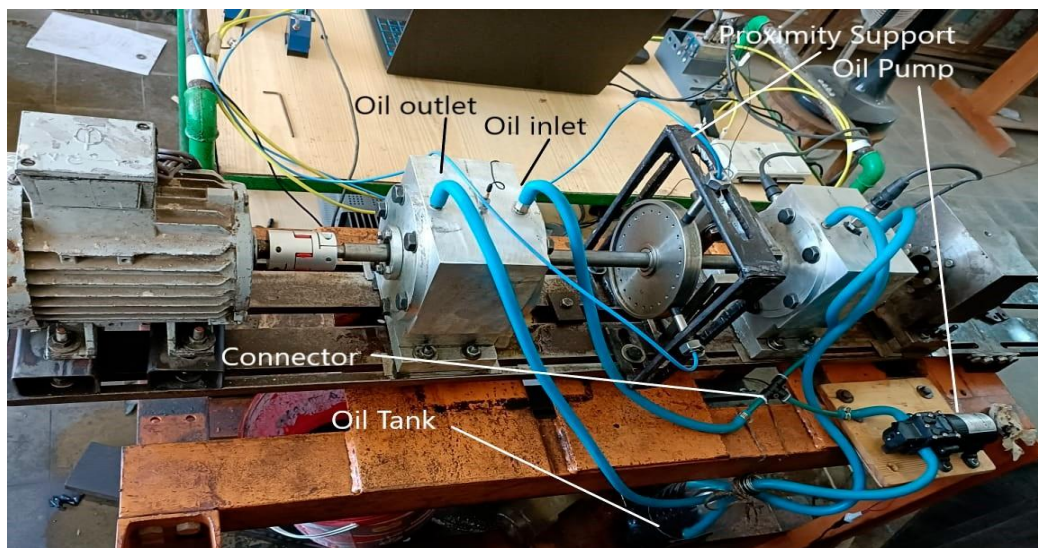


Рис. 3 – Фотографія випробувального стенду [6]

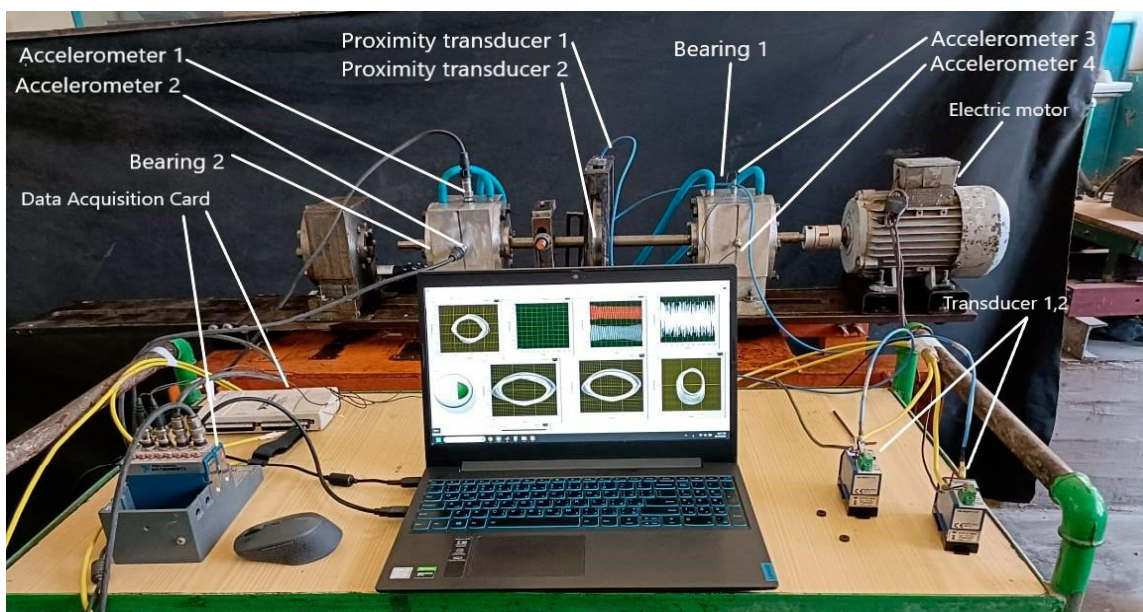


Рис. 4 – Фотографія ключових елементів експериментального стенду [6]

Інший важливий аспект експериментальних тестів включає моніторинг температури в підшипнику, оскільки саме перегрів може стати критичним чинником для відмови підшипника. У дослідженні [7] розглядали, як полімерні поверхні підшипника взаємодіють із рідиною під час тертя і які температурні режими виникають у результаті цього процесу.

Детальні експериментальні дослідження включали також моніторинг динаміки роботи ротора. Це дозволило визначити, як саме впливає навантаження на роботу підшипників ковзання та їхню стабільність під час різних швидкостей роботи.

Числове моделювання є важливою частиною дослідження підшипників ковзання, що допомагає зрозуміти поведінку системи без необхідності проведення багатократних експериментальних досліджень. Моделювання підшипників ковзання, зокрема з використанням гідродинамічних моделей, дозволяє прогнозувати робочі параметри таких систем у широкому діапазоні умов. У статті [8] детально розглядається числове моделювання змащувального шару в підшипниках. Використання таких моделей дозволяє точно оцінювати товщину змащувального шару та його динаміку в різних режимах роботи.

Також слід відзначити, що моделювання змащувальних рідин дозволяє дослідити питання кавітації. У статті [9] було проведено числовий аналіз кавітації у вузьких каналах змащувальної рідини (рис. 5 та рис. 6), що дозволяє передбачити виникнення бульбашок та їхній вплив на роботу підшипника.

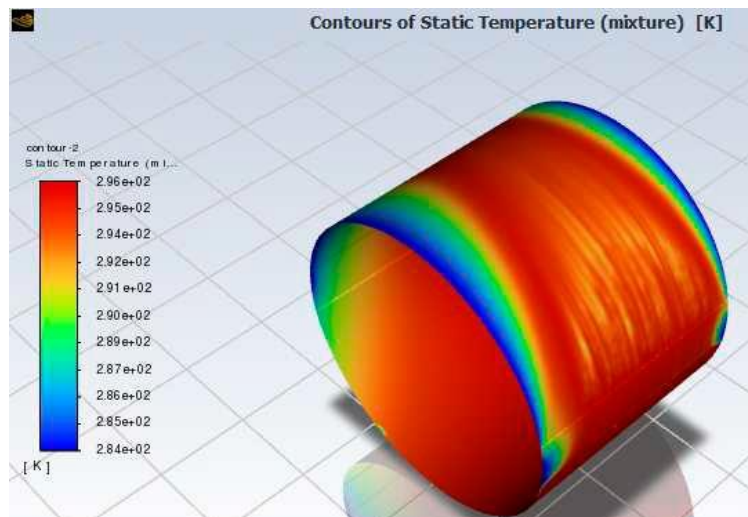


Рис. 5 – Розподіл температури підшипника ковзання з водяним змащенням в аналізі FSI [9]

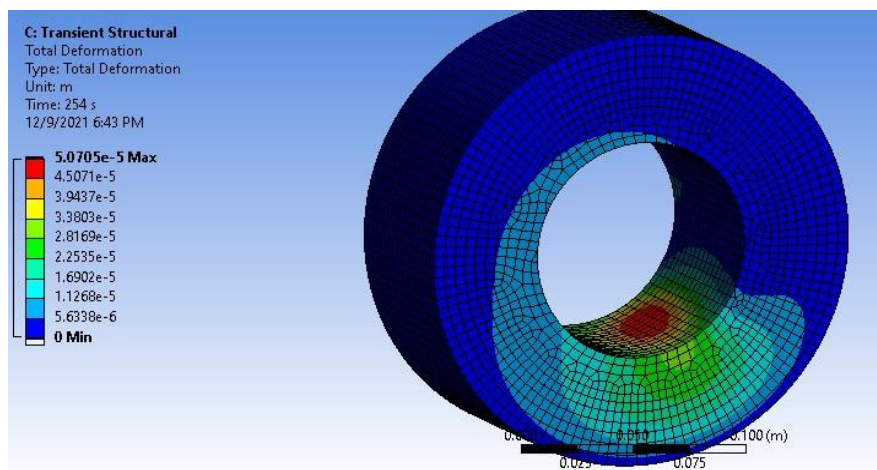


Рис. 6 – Розподіл деформації у втулці, змащеній водою, в аналізі FSI [9]

Це є важливим аспектом, оскільки кавітація може суттєво погіршити роботу підшипника і навіть призвести до його руйнування.

Моделювання підшипників ковзання з працюючих в середовищі низькою в'язкістю має важливе значення для визначення їхніх характеристик у реальних умовах експлуатації. Наприклад, у роботах [2] аналізуються гідродинамічні властивості води як змащувальної рідини, що дає змогу зробити висновки щодо її ефективності за різних умов. Результати таких досліджень, що відображені на рис. 7, рис. 8 та рис. 9, є корисними для визначення оптимальних параметрів підшипників ковзання, що працюють у системах з водним охолодженням.

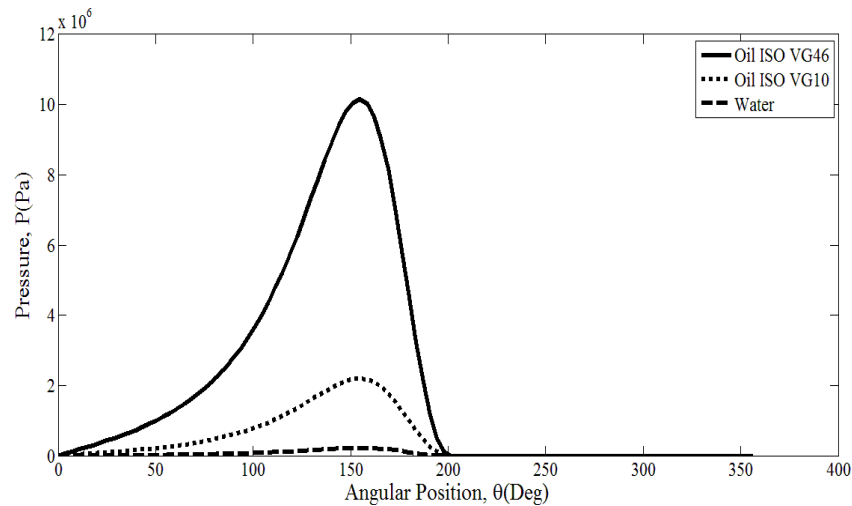


Рис. 7 – Розподіл тиску оливи та води ($\epsilon=0,7$) [2]

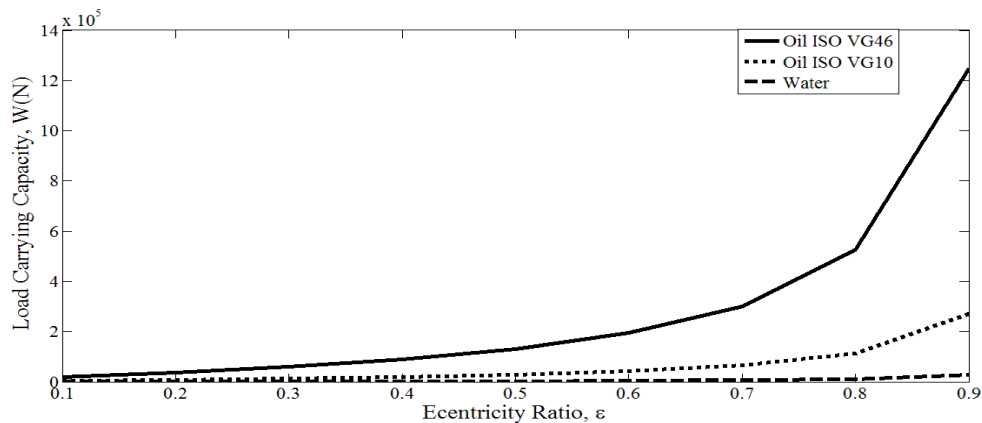


Рис. 8 – Оливо та водо вантажопідйомність [2]

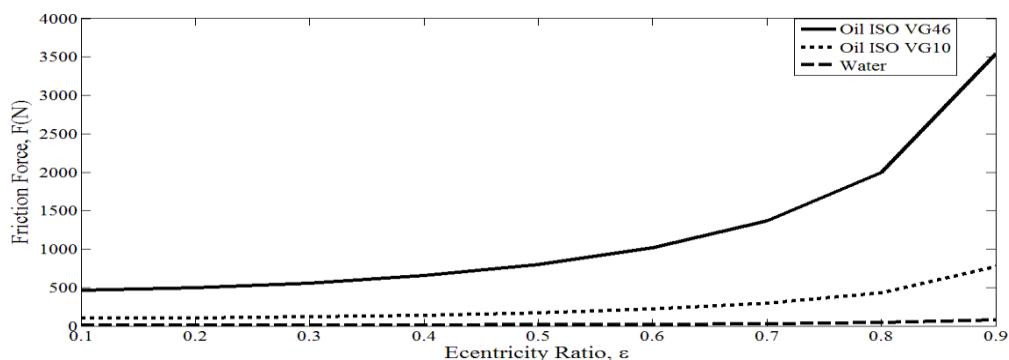


Рис. 9 – Сила тертя в оливі та в воді [2]

Матеріали, що використовуються для підшипників ковзання, відіграють вирішальну роль у забезпеченні їх довговічності та надійності. Останнім часом особливу увагу привертають полімерні матеріали, які відрізняються високими антифрикційними властивостями та стійкістю до зносу. Проводяться експериментальні дослідження композиційних антифрикційних полімерів. Важливим питанням є огляд сучасних антифрикційних полімерних композиційних матеріалів, які використовуються для виготовлення та ремонту пар тертя ковзання. В одному з таких досліджень автори описують розробку лабораторного трибометра, призначеного для перевірки триботехнічних властивостей цих матеріалів. Основною метою дослідження є визначення коефіцієнта тертя та зношувальних властивостей різних композиційних матеріалів [10]. Полімерні матеріали, такі як РЕЕК (поліетіленфторкетон), демонструють високу стійкість до високих температур і тертя, що робить їх придатними для використання у високошвидкісних турбомашинах. У роботі [4] використання полімерних матеріалів було досліджено в умовах високих навантажень, де було продемонстровано, що вони ефективно знижують тертя та забезпечують надійне змащення (рис. 10).

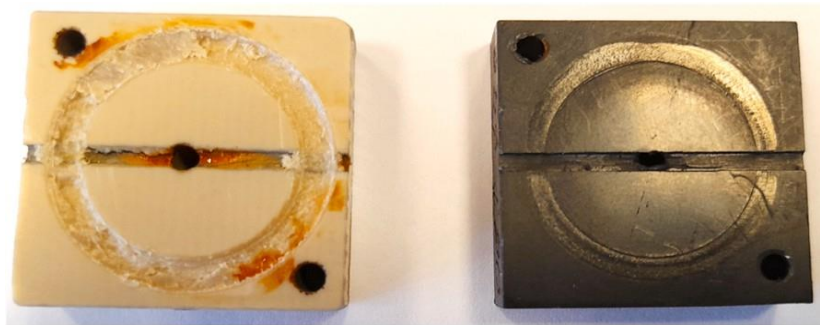


Рис. 10 – Зовнішній вигляд зразків після випробувань – РЕЕК без добавок (бежевий) та РЕЕК CF30 з добавками (чорний) після аналогічних випробувань трибометром [4]

Використанню полімерних матеріалів у підшипниках ковзання присвячено багато досліджень, аналізуються різні типи полімерів та їхні властивості, зокрема здатність зменшувати тертя і підвищувати стійкість до зносу. Було проведено дослідження, які доводять переваг полімерних підшипників у порівнянні з традиційними металевими, а також доведена їх ефективність в умовах різних навантажень та температур [11].

Значна увага приділяється розробці нових антифрикційних та зносостійких покриттів, як приклад, на рис. 11 зображено прототип підшипника з таким покриттям. Такі покриття можуть витримувати високі навантаження та екстремальні температури, що робить їх ідеальними для застосування в ракетобудуванні, авіаційній та автомобільній промисловостях.



Рис. 11 – Прототип підшипника ковзання з поверхнями ковзання з полімерного матеріалу (ліворуч – повний підшипник, праворуч – сегмент з полімерним матеріалом) [4]

У статті [12] розглядається порівняльний аналіз таких матеріалів, де зазначено, що додавання функціональних наповнювачів може подолати обмеження однополімерного покриття та подовжити термін служби покриття завдяки низькому тертю, високій зносостійкості, високій навантажувальній здатності, стійкості до високих температур і високій адгезії, як показано на рис. 12 [13, 14].

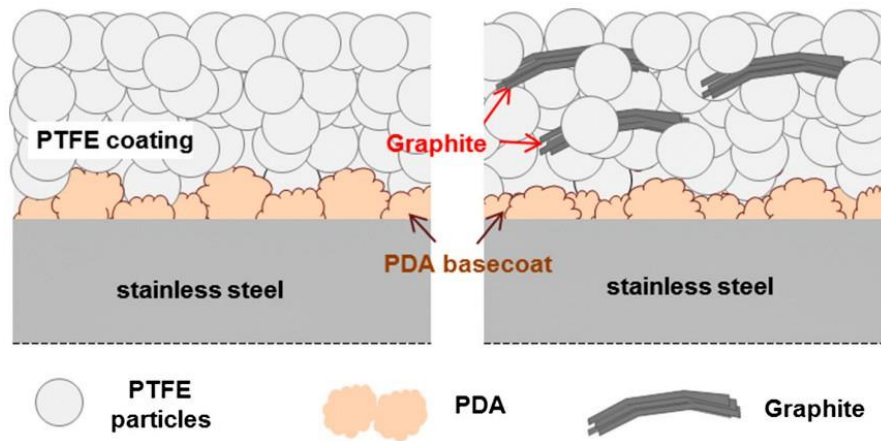


Рис. 12 – Схема PDA/PTFE та PDA/PTFE + графіт [13]

Тефлон (PTFE) є одним із найбільш поширених матеріалів, який демонструє надзвичайно низький коефіцієнт тертя. У статті [15] було проаналізовано ефективність використання підшипників із тефлоновим покриттям у складних умовах експлуатації. Результати досліджень показали, що такі підшипники мають значно нижчий рівень зносу та стабільніше працюють при високих швидкостях.

Інший підхід до зниження тертя — це застосування графітових покриттів, які використовуються для підшипників, що працюють у важких умовах. У роботі [16] досліджувалися графітові підшипники, імпрегновані полімером, що забезпечують високу стійкість до вібрацій і тертя при підвищених температурах (рис. 13). Це важливо для застосувань, де підшипники піддаються постійному навантаженню та впливу високих температур, наприклад, у двигунах внутрішнього згорання.

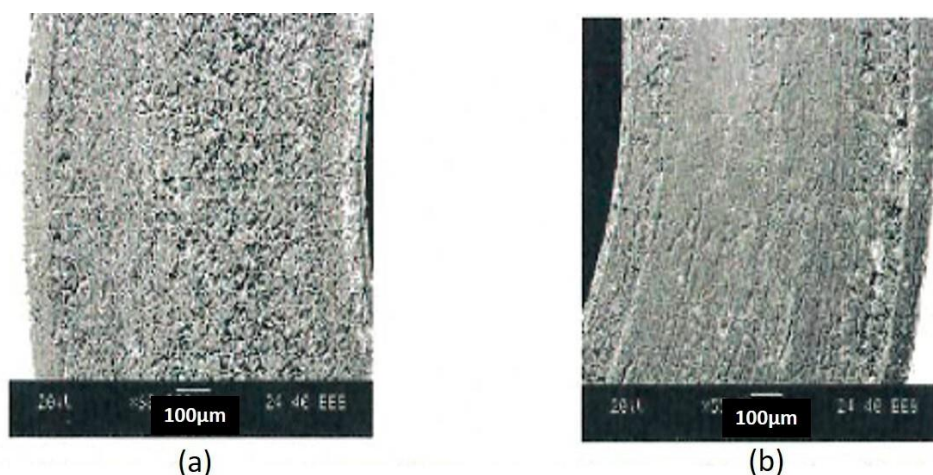


Рис. 13 – Поверхні зносу: (а) зображення зношеної чистої графітової поверхні, (б) РЕМ-зображення зношеної упорної поверхні з імпрегнованого графіту [16]

Змащування є ключовим фактором у забезпеченні надійної роботи підшипників ковзання. Вибір змащувальної рідини впливає на тертя, знос та ефективність роботи всієї системи. У роботі

[6] порівнюються дві основні групи змащувальних рідин: вода та олива. Вода має перевагу у вигляді екологічності та нижчих витрат на обслуговування, тоді як олива забезпечує кращу стабільність роботи при високих швидкостях.

Досліджувались особливості тертя в підшипниках ковзання, що використовуються в металургійному обладнанні. Розглядалася ситуація, коли підшипники працюють у режимі сухого тертя через відсутність змащування. Основна увага приділяється застосуванню самозмащувальних наповнювачів, які виділяють мастильний матеріал під час роботи, знижуючи коефіцієнт тертя і запобігаючи зношуванню. Також у роботі [17] пропонуються математичні моделі для визначення коефіцієнта тертя залежно від геометричних параметрів вставок самозмащувального матеріалу.

Окрім традиційних змащувальних рідин, останнім часом досліджуються також нові складні рідин з низькою в'язкістю, що забезпечують стабільність роботи підшипників у складних умовах. Наприклад, у роботі [5] було показано, що введення додаткової змащувальної рідини дозволяє підвищити надійність підшипників які працюють на воді та зменшити їхнє зношування.

Ще одним важливим аспектом досліджень є вибір і вдосконалення змащувальних рідин. Залежно від умов експлуатації, підшипники можуть використовувати різні типи рідин. Традиційно олива використовувалася через свої високі змащувальні властивості, однак в деяких агрегатах (наприклад, в турбонасосах рідинних ракетних двигунів) використання компонентів з низькою в'язкістю обумовлено технологічними вимогами. Якщо підшипники не адаптовані до таких умов, це може не тільки знизити загальну ефективність обладнання через підвищення тертя та механічні втрати, а й призвести до руйнування всього агрегату. Дослідження дозволяють розробляти підшипники, які зберігають низький коефіцієнт тертя та стабільність навіть при роботі в середовищах з низькою в'язкістю. Як зазначено в роботі [7], рідини з низькою в'язкістю можуть забезпечувати адекватне змащування.

Одним із важливих напрямів розвитку підшипників ковзання є вдосконалення їхніх конструкцій. Традиційні підшипники мають обмеження щодо навантажувальної здатності та ефективності при високих швидкостях. Однак, конструкції, такі як сегментні підшипники ковзання, зображені на рис. 14, можуть суттєво покращити робочі характеристики. Ці конструкції забезпечують кращу підтримку ротора і дозволяють зменшити вібрації навіть при високих обертах. У дослідженні [18] розглянуто особливості таких підшипників, де показано, що вони забезпечують стабільну роботу при високих навантаженнях і мінімальний рівень вібрацій.

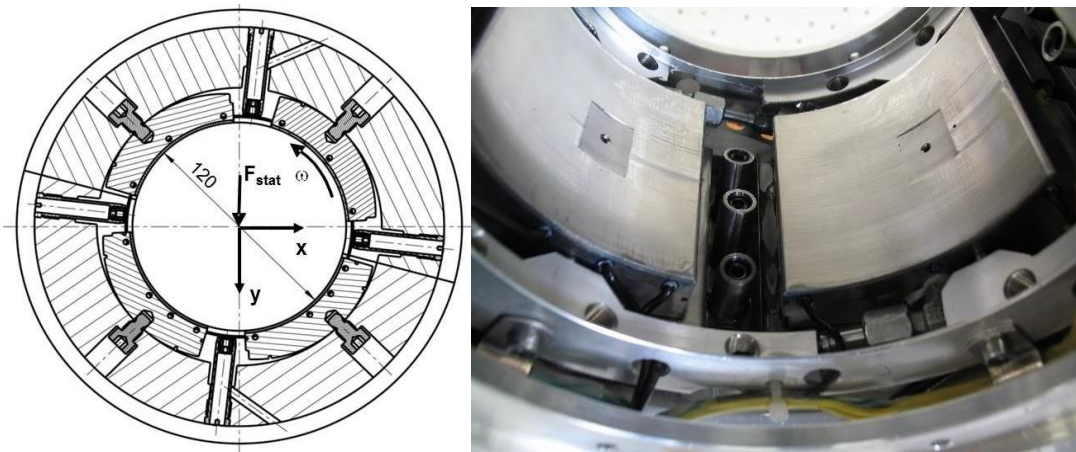


Рис. 14 – Конструкція підшипника ковзання з поворотними сегментами [18]

Дослідження також показують, що підшипники ковзання доводять свою ефективність при різних умовах експлуатації. В статті [19] проводиться детальний аналіз поведінки ротора та підшипника, зображеного на рис. 15, з використанням CFD-моделювання. Це дослідження демонструє порівняння експериментального методу дослідження підшипників ковзання та методу дослідження за допомогою моделювання.



Рис. 15 – Досліджуваний підшипник ковзання [19]

Таблиця 1

Параметри досліджуваного підшипника [19]

Внутрішній діаметр D, мм	Ширина підшипника L, мм	Зазор e, мкм	Швидкість, рад/с
4	13	10	328-3000
Густина мастила (15 °С), кг/м ³	В'язкість мастила (40°С), м ² /с		В'язкість мастила (100°С), м ² /с
1060	220·10 ⁻⁶		40·10 ⁻⁶

Іншим важливим аспектом є те, що нові конструкції підшипників, наприклад, з використанням додаткових систем для змащування (наприклад, системи подачі олії під високим тиском), суттєво покращують робочі характеристики. Як описано в статті [2], такі системи знижують ризик зносу підшипників, що є особливо важливим для агрегатів, які працюють на високих швидкостях.

Проаналізувавши інформацію з наявних джерел, було вирішено провести власний експеримент по випробуванню показників зношування підшипників ковзання. Було виготовлено зразки зі сталі 12X18H10 та додатково покриті тефлоном, випробування проводилися згідно з ГОСТ 11012-74, на випробувальній установці (рис. 16). Зразки пройшли кондиціонування і потім випробувалися при стандартній атмосфері, визначеної за ГОСТ 12423-66.

Як контртіло для випробувань застосовувалася втулка діаметром Ø27,6×30 мм із сталі 45 (понад тонке шліфування наждачним папером Р1500, твердість – 40HRC). Кількість обертів контртіла – 3550 об/хв. Нормальне навантаження на зразок – 4,5 кг. Час випробування одного зразка – 30-240 с. Випробування для кожного зразків матеріалу проводилося по одному сліду.

Деякі результати випробувань представлені у вигляді фотографій поверхонь зносу в таблиці 2. Стан поверхні досліджувався за допомогою мікроскопа (рис. 17).

Таблиця 2

		Результати випробувань				
№	Ra	Час випробування				
		30 с	60 с	90 с	120 с	240 с
1.	1.6					
2.	1.6					
3.*	0.8					
4.*	0.8					

* випробування зразків з подачею води в зону тертя.



Рис. 16 – Дослідний зразок закріплений в установці для випробувань



Рис. 17 – Дослідження стану поверхні після випробувань

Висновки

Літературний огляд показав, що підшипники ковзання залишаються важливим елементом багатьох промислових систем, зокрема в металургії, турбомашинах та авіаційній промисловості. Використання інноваційних матеріалів, таких як тефлонові покриття, дозволяє значно підвищити ефективність та надійність цих систем, знижуючи знос і покращуючи експлуатаційні характеристики. Сучасні дослідження у сфері підшипників ковзання демонструють суттєвий прогрес у розробці нових матеріалів та конструкцій, що дозволяють підвищити їхню ефективність та надійність. Полімерні матеріали виявляються надзвичайно ефективними у підшипниках, які працюють у важких умовах експлуатації, забезпечуючи зниження тертя та високі антифрикційні властивості, їх високу стійкість до зношування та можливість працювати при високих навантаженнях.

Дослідження, які проводились авторами, підтверджують ефективність використання полімерних матеріалів в конструкції підшипників ковзання. На деяких зразках присутні напливи тефлонового покриття в районі входу/виходу і пляма зношення починалась саме на них. Площа плями зношування збільшується із збільшенням часу проведення випробування для всіх зразків. Площа плями зношування залежить від наявності мікронерівностей на поверхні тертя, за наявності мікро виступів на поверхні, зношування йде по їх вершинах (площа зношування знижується). Подача води до зони тертя суттєво зменшує знос. Товщина тефлонового покриття – 30-40 мкм.

Окрім матеріалів, важливим є розвиток нових конструкцій підшипників ковзання, таких як сегментні підшипники ковзання, які забезпечують кращу стабільність роботи ротора. Такі конструкції значно покращують характеристики підшипників і дозволяють знизити вібрації та зношування, що робить їх перспективними для використання в високошвидкісних турбомашинах та інших галузях.

Змащувальні рідини також залишаються важливим аспектом розвитку технологій підшипників ковзання.

Загалом, можна зробити висновок, що подальші дослідження в області матеріалів та конструкцій підшипників ковзання відкривають нові можливості для підвищення їх ефективності та надійності. У майбутньому можна очікувати подальший розвиток цієї галузі, зокрема за рахунок вдосконалення методів моделювання та нових матеріалів, що дасть змогу використовувати підшипники ковзання в ще складніших і вимогливіших умовах експлуатації.

Перелік використаних джерел:

1. An Advanced Microturbine System with Water-Lubricated Bearings / Nakano S., Kishibe T., Inoue T., Shiraiwa H. *International Journal of Rotating Machinery*. 2009. Vol. 2009. № 1. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1155/2009/718107>.
2. Elsayed E. K., Alaa M. A. El-Buchth. A study on hydrodynamic water lubricated journal bearing. *Engineering Research Journal*. 2017. Vol. 153. Pp. M1-M15.
3. Comparison of the lubrication performances of water-lubricated and oil-lubricated plain journal bearings / Zhang X. L., Yin Zh. W., Jiang D., Gao G. Yu. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 711. Pp. 27-30. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.711.27>.
4. Theoretical analysis and experimental tests of tilting pad journal bearings with shoes made of polymer material and low-boiling liquid lubrication / G. Żywica et al. *Tribology International*. 2023. Vol. 189. Pp. 108991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108991>.
5. Analysis of Water-Lubricated Journal Bearings Assisted by a Small Quantity of Secondary Lubricating Medium with Navier-Stokes Equation and VOF Model / X. Zhang et al. *Lubricants*. 2024. Vol. 12. № 1. Pp. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12010016>.
6. Ahmed O., El-Sayed T. A., Sayed H. A Comparative Study of Theoretical and Experimental Analysis on Balanced and Unbalanced Rotors Supported by Oil-and Water-Lubricated Journal Bearings. *Machines*. 2024. Vol. 12. № 10. Pp. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12100675>.
7. Static load characteristics of hydrostatic journal bearings: Measurements and predictions / Yi H., Jung H., Kim K., Ryu K. *Sensors*. 2022. Vol. 22. № 19. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197466>.
8. Gu C., Cui Y., Zhang D. Research on the Optimal Design Approach of the Surface Texture for Journal Bearings. *Lubricants*. 2024. Vol. 12. № 4. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12040111>.
9. Charamis D., Nikolakopoulos P. G. Investigation of Cavitated Flow in Water-Lubricated Bearings Considering Surface Roughness, Thermal, and Elastic Effects. *Lubricants*. 2024. Vol. 12. № 4. Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants12040107>.
10. Экспериментальные исследования композитных антифрикционных полимеров / Ищенко А. А., Радионенко А. В., Киндрачук М. В., Тисов О. В. *Problems of Friction and Wear*. 2019. № 4(85). С. 37-43. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(85\).13870](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(85).13870).
11. Применение полимерных материалов в подшипниках скольжения / А. А. Ищенко, А. В. Радионенко, А. В. Антоненко, А. А. Родак. *Металлургические процессы и оборудование*. 2008. № 4. С. 22-25.
12. Overview of friction and wear performance of sliding bearings / F. Du et al. *Coatings*. 2022. Vol. 12. № 9. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12091303>.
13. The effects of graphite filler on the tribological properties of polydopamine/PTFE coatings / Beckford S., Cai J., Fleming R. A., Zou M. *Tribology Letters*. 2016. Vol. 64. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-016-0777-5>.
14. The role of surface topography in the evolving microstructure and functionality of tribofilms of an epoxy-based nanocomposite / G. Zhang et al. *Wear*. 2016. Vol. 364. Pp. 48-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.012>.
15. Experimental and numerical analysis on the seizure of a carbon-filled PTFE central groove journal bearing during start-up period / B. Pap et al. *Lubricants*. 2018. Vol. 6. № 1. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants6010014>.
16. Friction Evolution of Graphite Bearing Impregnated with Polymer Subjected to Vibration Fretting at High Temperature / H. Zaïdi et al. *Coatings*. 2024. Vol. 14. № 2. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14020207>.
17. Ищенко А. А., Радионенко А. В., Антоненко А. В. Особенности процесса трения в подшипниках скольжения с самосмазывающим наполнителем. *Металлургические процессы и оборудование*. 2011. № 3. С. 24-28.
18. Hagemann T., Pfeiffer P., Schwarze H. Measured and predicted operating characteristics of a tilting-pad journal bearing with jacking-oil device at hydrostatic, hybrid, and hydrodynamic operation. *Lubricants*. 2018. Vol. 6. № 3. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants6030081>.

19. Concli F. Journal bearing: An integrated CFD-analytical approach for the estimation of the trajectory and equilibrium position. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. № 23. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10238573>.

References:

1. S. Nakano, T. Kishibe, T. Inoue, and H. Shiraiwa, «An Advanced Microturbine System with Water-Lubricated Bearings», *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2009, № 1, pp. 1-12, 2009. doi: **10.1155/2009/718107**.
2. E.K. Elsayed, and M.A. El-Buch Alaa, «A study on hydrodynamic water lubricated journal bearing», *Engineering Research Journal*, vol. 153, pp. M1-M15, 2017.
3. X.L. Zhang, Zh.W. Yin, D. Jiang, and G.Yu Gao, «Comparison of the lubrication performances of water-lubricated and oil-lubricated plain journal bearings», *Applied Mechanics and Materials*, vol. 711, pp. 27-30, 2015. doi: **10.4028/www.scientific.net/AMM.711.27**.
4. G. Żywica, A. Olszewski, P. Bagiński, A. Andrearczyk, T. Żochowski, and P. Klonowicz, «Theoretical analysis and experimental tests of tilting pad journal bearings with shoes made of polymer material and low-boiling liquid lubrication», *Tribology International*, vol. 189, pp. 108991, 2023. doi: **10.1016/j.triboint.2023.108991**.
5. X. Zhang et al., «Analysis of Water-Lubricated Journal Bearings Assisted by a Small Quantity of Secondary Lubricating Medium with Navier–Stokes Equation and VOF Model», *Lubricants*, vol. 12, № 1, pp. 1-21, 2024. doi: **10.3390/lubricants12010016**.
6. O. Ahmed, T.A. El-Sayed, and H. Sayed, «A Comparative Study of Theoretical and Experimental Analysis on Balanced and Unbalanced Rotors Supported by Oil-and Water-Lubricated Journal Bearings», *Machines*, vol. 12, № 10, pp. 1-27, 2024. doi: **10.3390/machines12100675**.
7. H. Yi, H. Jung, K. Kim, and K. Ryu, «Static load characteristics of hydrostatic journal bearings: Measurements and predictions», *Sensors*, vol. 22, № 19, pp. 1-20, 2022. doi: **10.3390/s22197466**.
8. C. Gu, Y. Cui, and D. Zhang, «Research on the Optimal Design Approach of the Surface Texture for Journal Bearings», *Lubricants*, vol. 12, № 4, pp. 1-20, 2024. doi: **10.3390/lubricants12040111**.
9. D. Charamis, and P.G. Nikolakopoulos, «Investigation of Cavitated Flow in Water-Lubricated Bearings Considering Surface Roughness, Thermal, and Elastic Effects», *Lubricants*, vol. 12, № 4, pp. 1-18, 2024. doi: **10.3390/lubricants12040107**.
10. A.A. Ishchenko, A.V. Radionenko, M.V. Kindrachuk, and O.V. Tisov, «Eksperymentalnie yssledovanyia kompozytnykh antyfraktsionnykh polymerov» [«Experimental studies of composite antifric-tion polymers»], *Problems of Friction and Wear*, № 4(85), pp. 37-43, 2019. doi: **10.18372/0370-2197.4(85).13870**. (Rus.)
11. A.A. Ishchenko, A.V. Radionenko, A.V. Antonenko, and A.A. Rodak, «Prymenenye polymernykh materyalov v podshypanykh skolzheniya» [«Application of polymeric materials in plain bear-ings»], *Metallurgicheskiye protsessy y oborudovanye – Metallurgical processes and equipment*, № 4, pp. 22-25, 2008. (Rus.)
12. F. Du et al., «Overview of friction and wear performance of sliding bearings», *Coatings*, vol. 12, № 9, pp. 1-15, 2022. doi: **10.3390/coatings12091303**.
13. S. Beckford, J. Cai, R.A. Fleming, and M. Zou, «The effects of graphite filler on the tribological properties of polydopamine/PTFE coatings», *Tribology Letters*, vol. 64, pp. 1-10, 2016. doi: **10.1007/s11249-016-0777-5**.
14. G. Zhang, W. Österle, B. Jim, I. Häusler, R. Hesse, and B. Wetzel, «The role of surface topography in the evolving microstructure and functionality of tribofilms of an epoxy-based nanocomposite», *Wear*, vol. 364, pp. 48-56, 2016. doi: **10.1016/j.wear.2016.06.012**.
15. B. Pap et al., «Experimental and numerical analysis on the seizure of a carbon-filled PTFE central groove journal bearing during start-up period», *Lubricants*, vol. 6, № 1, pp. 1-24, 2018. doi: **10.3390/lubricants6010014**.
16. H. Zaïdi, S. Tournis, L. Deville, C. Richard, M. Aissa, and K. Bouguerra, «Friction Evolution of Graphite Bearing Impregnated with Polymer Subjected to Vibration Fretting at High Temperature», *Coatings*, vol. 14, № 2, pp. 1-15, 2024. doi: **10.3390/coatings14020207**.
17. A.A. Ishchenko, A.V. Radionenko, and A.V. Antonenko, «Osobennosti protsessa treniya v podshypanykh skolzheniya s samosmazivaiushchym napolnytelem» [«Features of the friction process

- in plain bearings with self-lubricating filler»], *Metallurhicheskiye protsessi y oborudovanye – Metallurgical processes and equipment*, № 3, pp. 24-28, 2011. (Rus.)
18. T. Hagemann, P. Pfeiffer, and H. Schwarze, «Measured and predicted operating characteristics of a tilting-pad journal bearing with jacking-oil device at hydrostatic, hybrid, and hydrodynamic operation», *Lubricants*, vol. 6, № 3, pp. 1-15, 2018. doi: [10.3390/lubricants6030081](https://doi.org/10.3390/lubricants6030081).
19. F. Concli, «Journal bearing: An integrated CFD-analytical approach for the estimation of the trajectory and equilibrium position», *Applied Sciences*, vol. 10, № 23, pp. 1-15, 2020. doi: [10.3390/app10238573](https://doi.org/10.3390/app10238573).

Стаття надійшла 07.11.2024

Стаття прийнята 02.12.2024

УДК 621.7-4

doi: [10.31498/2225-6733.49.1.2024.321231](https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.1.2024.321231)

© Іщенко А.О.¹, Рассохін Д.О.², Носовська О.В.³,
Кравченко В.М.⁴, Бем Р.⁵

ВИВЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕМОНТІВ ПОЛІМЕРНИМИ КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

У статті розглядається вплив зовнішніх факторів на ефективність ремонтів полімерними композитними матеріалами. У сучасній важкій промисловості та машинобудуванні застосування композитів набуває дедалі більшої популярності завдяки їхнім численним перевагам, таким як швидке відновлення працездатності обладнання та можливість проведення ремонтних робіт безпосередньо на місці експлуатації. Проте виконання ремонтів у складних умовах, наприклад, при низьких температурах і високій вологості, ставить перед інженерами нові виклики. У статті аналізуються останні дослідження, які показують, що для забезпечення надійності металополімерного з'єднання необхідно дотримуватися певних умов відносної вологості та температури. Встановлено, що найкращі результати адгезійної міцності досягаються після обробки зразків шліфувальним кругом та знежирення поверхні спеціальними очисниками. Дослідження проводилися на зразках композитного матеріалу «мультиметал-сталь 1018», виготовленого фірмою Diamant Metal Plastics GmbH (Germany). Випробування виконувалися на розривній машині PM20 в лабораторії кафедри МОЗЧМ ДВНЗ «ПДТУ». Основні результати показали, що довговічність обладнання, відремонтованого за допомогою композитів, значною мірою залежить від умов нанесення матеріалу на металеву поверхню. При високій вологості та низькій температурі на поверхневих шарах металу конденсується волога, що призводить до корозійних процесів і зниження адгезійної міцності з'єднання «метал-композит». Для підвищення адгезійної міцності рекомендується використовувати рідкотекучий мультиметал як перший адгезійний шар або підігрівати

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6189-7830, ischenko50@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: 0000-0002-3479-9485, dmytro.rassokhin@htwk-leipzig.de

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1313-4767, nosovska_o_v@pstu.edu

⁴ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0006-5318-6277, kvm1249@gmail.com

⁵ д-р техн. наук, професор, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, м. Лейпциг, ORCID: 0000-0001-7768-4592, robert.boehm.1@htwk-leipzig.de