

М. О. Сорока; І. В. Віштак, канд. техн. наук, доц.

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ НЕРУХОМИХ З'ЄДНАНЬ ПІДШИПНИКІВ ПІД ЧАС ЇХ РОБОТИ

В роботі описано основні види зношування нерухомих з'єднань підшипників. Проаналізовано механізми виникнення кожного з цих процесів, а також їхній вплив на довговічність та працездатність вузлів. Розглянуто основні параметри, що визначають якість поверхневого шару, такі як шорсткість, залишкові напруження та мікроструктурні особливості матеріалу.

Важливим аспектом дослідження є аналіз технологічних методів обробки поверхонь підшипникових з'єднань, що впливають на їхні експлуатаційні властивості. Досліджено вплив тертя та мастильного режиму на експлуатаційні показники нерухомих з'єднань підшипників, встановлено їхню залежність від навантажень, швидкості ковзання та застосованих мастильних матеріалів.

Встановлено, що зміни умов експлуатації можуть суттєво впливати на зносостійкість підшипникових вузлів, спричиняючи деградацію механічних властивостей матеріалів і розвиток корозійно-механічного пошкодження. Аналіз сучасних методів оцінки стану контактних поверхонь підшипників включає стандартизацію параметрів шорсткості, хвилястості, структурних змін, а також використання методів неруйнівного контролю.

У процесі дослідження застосовано системний підхід, що поєднує аналітичні, експериментальні та математичні методи оцінки експлуатаційних характеристик нерухомих з'єднань підшипників. Використано дані випробувань щодо довговічності підшипникових вузлів, з урахуванням різних технологій обробки, умов експлуатації та конструктивних особливостей.

Проведене дослідження спрямоване на покращення експлуатаційної надійності нерухомих з'єднань підшипників шляхом удосконалення технологічних методів їхньої обробки, покращення мастильних режимів та контролю зовнішніх впливів. Отримані результати можуть бути використані у сфері машинобудування для розробки ефективних рішень щодо підвищення довговічності та зниження витрат на обслуговування підшипникових вузлів.

Ключові слова: експлуатаційні показники, нерухомі з'єднання, підшипники, надійність, довговічність.

Вступ

З розвитком технічного прогресу питання підвищення надійності та довговічності машин стають дедалі актуальнішими. Дослідженням причин виходу з ладу деталей у процесі експлуатації та розробленням методів підвищення їх ресурсу займаються науковці та інженери провідних промислово розвинених країн світу. Сучасні вимоги до зниження матеріало- та енергоемності виробництва, автоматизації промисловості та сільського господарства, зростання потужності й швидкохідності машин, а також необхідність їхньої роботи в різноманітних газових і рідинних середовищах за екстремальних температурних умов зумовлюють потребу у підвищенні надійності та довговічності технологічного обладнання, приладів і технічних систем.

Подовження терміну служби деталей сприяє скороченню витрат на виготовлення запасних частин і матеріалів, зменшенню трудових витрат під час експлуатації, технічного обслуговування та ремонту. Збільшення строку експлуатації машин фактично прирівнюється до нарощування їх випуску без необхідності розширення виробничих потужностей. Підвищуючи надійність і довговічність обладнання, машинобудівні підприємства водночас підвищують ефективність власного виробництва.

Постановка проблеми

Одним із важливих аспектів експлуатації машинобудівних вузлів є забезпечення високих експлуатаційних характеристик нерухомих з'єднань підшипників. В умовах експлуатації машин та обладнання зношування поверхневих шарів контактуючих елементів призводить до зниження надійності з'єднань. Довговічність технічних систем безпосередньо визначається ресурсом їхніх конструктивних елементів, серед яких підшипникові вузли відіграють ключову роль як найбільш поширені компоненти [1].

Експлуатаційні показники підшипників кочення значною мірою залежать від точності посадок у корпусах і на валах. Збільшення зазорів у з'єднаннях спричиняє нерівномірний розподіл навантаження між тілами кочення, що може викликати перевантаження центральних елементів і зменшення навантаження на периферійні, що негативно впливає на довговічність підшипникових вузлів [2 – 4].

Отже експлуатаційні характеристики нерухомих з'єднань підшипників мають прямий вплив на підвищення їхньої точності, надійності та довговічності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження якості поверхневого шару та методів його оцінки представлені в роботах таких учених, як А. Г. Суслов, Е. В. Рижев, М. М. Петров, Б. І. Костецький, І. В. Крагельський, В. С. Комбалов, Д. М. Гаркунов, Грінвуд, М. М. Хрущов, П. О. Ребиндер, Д. Д. Папшев, П. О. Киричок, О. А. Пермьков, Н. Адам, К. Вайнграбер, К. Джонсон, Е. Рабинович, Т. Хісакадо, Р. Боуер та інші. Зокрема, питання оцінювання параметрів поверхневого шару розглядаються у працях В. С. Комбалова, Грінвуда, А. Г. Суслова та інших дослідників.

Згідно з сучасними уявленнями, якість поверхневого шару є багатофакторним показником, що включає сукупність його геометричних параметрів та фізико-хімічних властивостей, які формуються під впливом технологічних процесів. На якість цього шару впливають численні фактори (рис. 1).

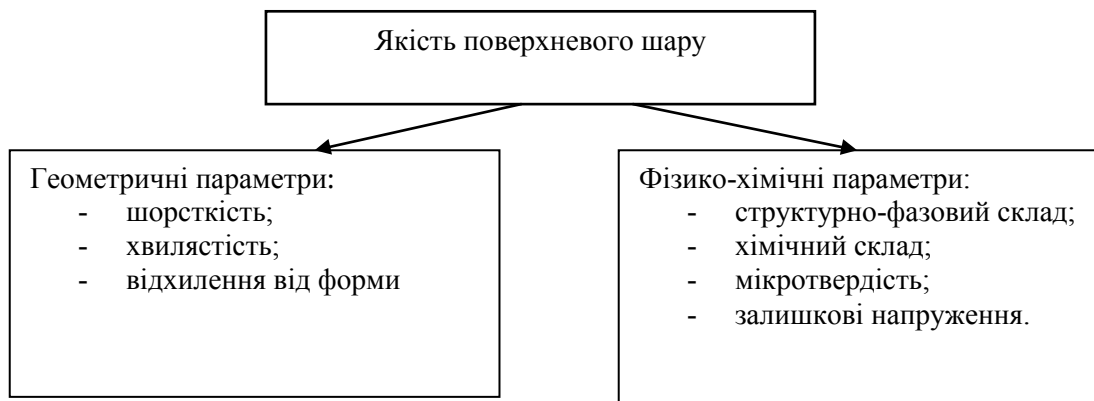


Рис. 1 Фактори впливу на якість поверхневого шару

Сучасні тенденції у сфері виробництва та експлуатації машин і механізмів орієнтовані на суттєве покращення їхніх експлуатаційних характеристик, зокрема шляхом підвищення якості оброблених поверхонь деталей. Взаємозв'язок між параметрами поверхневого шару та експлуатаційними характеристиками деталей свідчить, що для забезпечення оптимальних властивостей поверхня має бути достатньо твердою, містити стискаючі залишкові напруження, мати дрібнодисперсну структуру, а також згладжені мікронерівності з максимальною площею опорної поверхні.

Науковці постійно працюють над покращенням експлуатаційних характеристик деталей підшипникових вузлів, зокрема нерухомих з'єднань. Вони можуть зазнавати різних типів зношування, які визначають їхню довговічність і надійність, а основними є:

1. Абразивне зношування, яке виникає внаслідок механічного впливу твердих частинок, що ріжуть або дряпають поверхню тертя, призводячи до її руйнування. Цей вид зношування особливо поширений у вузлах тертя ковзання сільськогосподарських, дорожніх, будівельних і транспортних машин [5, 6].

2. Корозійно-механічне зношування є наслідком тертя матеріалів, схильних до хімічної взаємодії з агресивним середовищем, наприклад, в нафтохімічній, харчовій, металургійній та мікробіологічній промисловості [7].

3. Адгезійне зношування спричинене молекулярним зчепленням між контактуючими поверхнями, що веде до утворення міцних адгезійних зв'язків та пошкоджень поверхонь [8].

4. Втомлювальне зношування відбувається через циклічне навантаження мікрооб'ємів матеріалу, що викликає появу тріщин і поступове відділення частинок [9].

5. Фретинг-зношування виникає під впливом малих коливальних або циклічних рухів з мінімальними амплітудами, що характерно для болтових, шпонкових, шарнірних та пресових з'єднань, а також механізмів, що працюють у вібраційних умовах [10].

6. Ерозійне зношування спричинене впливом потоків рідин, газів чи твердих частинок на поверхню матеріалу, що поступово призводить до її руйнування [11,12].

7. Кавітаційне зношування виникає під час взаємодії твердої поверхні з рідиною у зонах кавітації, що може спричинити ерозію матеріалу [13, 14].

8. Зношування через заїдання (адгезійне зношування) розвивається при схоплюванні та глибокому вириванні частинок матеріалу з поверхонь тертя, що може супроводжуватися перенесенням матеріалу з однієї поверхні на іншу [15].

Ці процеси є ключовими чинниками втрати працездатності машинних вузлів, що зумовлює необхідність розробки ефективних методів їхнього прогнозування та запобігання.

Для нерухомих з'єднань підшипників важливим аспектом є зменшення початкового зносу та скорочення періоду припрацювання. Величина зношування під час цього етапу може становити від 20 – 30 % до 70 % від гранично допустимих значень [16].

Контактні переміщення (a) в підшипникових з'єднаннях залежать від навантаження (q) та описуються степеневою залежністю:

$$a = c \cdot q^t$$

де коефіцієнти c і t визначають характеристики матеріалу та геометрії з'єднання відповідно.

Допустимі величини контактних деформацій при первинних і повторних навантаженнях можуть бути використані для оцінки стійкості поверхневих шарів деталей до механічної дії, що спричиняє їх деформацію.

Стійкість до корозії нерухомих з'єднань підшипників оцінюється за показниками корозійних втрат, а їхня довговічність визначається граничною витривалістю матеріалу. Втомна міцність при циклічних навантаженнях оцінюється за кількістю циклів навантаження, які спричиняють руйнування поверхонь деталей підшипникових вузлів.

Експлуатаційні характеристики нерухомих з'єднань підшипників значною мірою залежать від низки факторів, які визначають їхню довговічність та надійність:

- механічні навантаження та кінематичні параметри, зокрема рівень контактного тиску, величина силових впливів та особливості деформаційних процесів у місці з'єднання;
- між поверхнями деталей, включаючи різновиди тертя (статичне, ковзне, змішане чи пружне деформування);
- спосіб мащення, який може включати граничне, гідродинамічне або газодинамічне змащення залежно від умов експлуатації;
- фізико-механічні властивості матеріалів, що формують нерухомі з'єднання, зокрема їхня твердість, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона та здатність протидіяти пластичним деформаціям;
- якість поверхневого шару, яка визначається параметрами шорсткості, хвилястості,

- зміцненням та внутрішнім напруженим станом матеріалу;
- зовнішні фактори експлуатації, такі як температура, вологість, агресивне середовище чи вакуум, що можуть впливати на стабільність з'єднання [17].

Досягнення високої довговічності нерухомих з'єднань підшипників можливе шляхом оптимального підбору матеріалів з відповідними механічними характеристиками, правильного вибору технології зміцнення контактних поверхонь та забезпечення відповідної жорсткості конструкції. Важливим є також урахування складної взаємодії між деталями з різномірних матеріалів, що потребує глибших досліджень і детального аналізу впливу всіх факторів на експлуатаційні властивості підшипникових вузлів.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є дослідження експлуатаційних характеристик нерухомих з'єднань підшипників та фактори які впливають на їх роботу.

Методи і матеріали

У дослідженні використовувалася комплексна методологія застосування загальнонаукових методів аналізу та синтезу, порівняльний метод, а також метод структурування. На першому етапі дослідження було проведено аналіз літературних джерел, що розглядають вплив методів обробки поверхонь на експлуатаційні характеристики нерухомих з'єднань підшипників. Особлива увага приділялася таким технологіям, як шліфування, суперфінішування, електроерозійне шліфування та комплексне іонне азотування. Дослідження дозволило визначити ключові аспекти кожного методу, включаючи їхній вплив на точність посадки, рівень шорсткості, стійкість до зношування, теплові деформації та придатність для різних матеріалів.

Для систематизації отриманих даних було використано порівняльний аналіз, на основі якого складено таблицю з основними параметрами, що впливають на експлуатаційну надійність з'єднань підшипників. Подальше структурування матеріалів дозволило простежити взаємозв'язок між технологічними особливостями обробки та довговічністю нерухомих з'єднань у реальних умовах експлуатації.

Матеріалом для аналізу слугували наукові публікації, що досліджують методи підвищення зносостійкості в зонах контакту підшипників. Дослідження показало, що комбіноване використання різних технологій обробки дозволяє досягти оптимальних характеристик нерухомих з'єднань, що сприяє підвищенню їхньої надійності та тривалості експлуатації.

Результати досліджень

Експлуатаційні властивості нерухомих з'єднань підшипників значною мірою визначаються комплексом факторів, що впливають на їхню довговічність і надійність. Серед ключових параметрів варто виділити:

1. Механічні навантаження та кінематичні особливості з'єднання, які включають рівень контактного тиску, силові впливи та характер деформаційних процесів у точці контакту (ISO 16282:2018).
2. Тип взаємодії поверхонь, що охоплює різні види тертя, такі як статичне, ковзне, змішане або пружне деформування (DIN 50320:2003).
3. Фізико-механічні характеристики матеріалів, серед яких твердість, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, а також стійкість до пластичних деформацій (ASTM E1876-15).
4. Якість поверхневого шару, що залежить від шорсткості, хвилястості, залишкових напружень та зміцнення, які суттєво впливають на експлуатаційний ресурс з'єднання (ДСТУ 2789-94, ISO 4287:1997).
5. Вплив навколишнього середовища, включаючи температурні перепади, вологість, корозійні процеси та агресивні рідини, що можуть суттєво впливати на довговічність конструкції (ISO 9227:2022).

Серед характеристик якості поверхонь деталей стандартизованими є відхилення від форми (ДСТУ 24642-94, ДСТУ 24643-94) та параметри шорсткості (ДСТУ 2789-94, ДСТУ 25142-90). Шорсткість поверхні є одним із найбільш досліджених параметрів, що пояснюється як простотою метрологічного забезпечення порівняно з іншими показниками, так і тим, що вона є ефективним критерієм оцінки технологічного процесу механічної обробки. Будь-які зміни в умовах обробки або експлуатації безпосередньо відображаються на характеристиках шорсткості (ISO 25178-2:2012).

Сучасні дослідження визначають понад 40 параметрів шорсткості, які використовуються для комплексної оцінки стану поверхонь та їх експлуатаційних властивостей (ISO 4287:1997, DIN EN ISO 13565-2:1998).

Сучасні дослідження в галузі трибології продовжують розвивати теоретичні моделі контактної взаємодії поверхонь, зокрема адгезійно-деформаційну теорію тертя, започатковану І. В. Крагельським. Одним із таких досліджень є робота П. Є. Коновалова у якій запропоновано модель опорної поверхні контактної плями, яка враховує наявність граничних шарів мастила на поверхнях тертя [18]. Ця модель дозволяє визначити залежність між товщиною граничного мастильного шару та площею адгезійного контакту тіл тертя. Особливістю дослідження є врахування характеристик граничних шарів мастила, їх несучої здатності та впливу на процеси, що відбуваються в трибовузлах під час граничного тертя.

Дослідження І. В. Шепеленка, присвячене науковим основам технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування. У цій роботі розроблено експериментальну модель контактної взаємодії одиничної мікронерівності з інструментом при фінішній антифрикційній безабразивній обробці (ФАБО), що дозволило встановити основні закономірності процесу та забезпечити ефективне протікання мікрорізання [19, 20].

Ці дослідження демонструють сучасні підходи до вивчення контактної взаємодії поверхонь та розвитку теорії тертя, спрямовані на підвищення ефективності та надійності трибосистем.

Однією з головних причин виходу з ладу нерухомих з'єднань підшипників є зношування посадочних місць у корпусних деталях і на валах. Внаслідок цього відбувається збільшення зазорів між кільцями підшипників та сполучуваними поверхнями, що призводить до зміщення осей валів, зростання вібраційних і динамічних навантажень. Як наслідок, знижується експлуатаційна довговічність підшипникових вузлів, а також пов'язаних з ними елементів, таких як вали, зубчасті передачі та інші деталі.

Фактичний ресурс підшипникових вузлів, зокрема у сільськогосподарських машинах, як нових, так і після ремонту, часто не відповідає розрахунковим значенням. Тому актуальною задачею є розробка методів підвищення довговічності нерухомих з'єднань підшипників, зокрема для тракторної техніки.

Процеси зношування посадочних місць підшипників є складними та багатофакторними. Основними механізмами руйнування є механічне зрізання мікронерівностей поверхонь під час запресовування, пластична деформація мікровиступів у зонах контакту на початкових етапах експлуатації, а також зміна розмірів посадочних місць внаслідок релаксації внутрішніх напружень корпусних деталей.

Однак ключовими причинами деградації нерухомих з'єднань підшипників є фретинг-корозія та повертання кілець у процесі експлуатації. Саме ці явища призводять до втрати геометричної точності посадочних місць та суттєвого зниження надійності підшипникових вузлів.

Висновки

Аналіз літературних джерел свідчить, що довговічність нерухомих з'єднань підшипників у нових та відремонтованих машинах не завжди відповідає експлуатаційним вимогам. Значні витрати на ремонт тракторів, автомобілів і сільськогосподарської техніки зумовлюють

необхідність удосконалення методів відновлення посадочних місць підшипників.

Дослідження показують, що ресурс підшипникових вузлів значною мірою залежить від точності посадок кілець у корпусних деталях і на валах. У процесі експлуатації можливе збільшення зазорів у з'єднаннях, що призводить до втрати жорсткості та зниження довговічності підшипників. Основними причинами цього явища є зношування посадочних місць внаслідок фретинг-корозії та провертання кілець під навантаженням.

Подальші напрями дослідження будуть направлені на підвищення надійності та довговічності нерухомих з'єднань підшипників, одним з яких є усунення зазорів між кільцями та посадочними місцями, запобігаючи їх переміщенню. Ефективним методом відновлення посадочних місць є використання полімерних матеріалів. Такий підхід сприяє компенсації мікронерівностей, рівномірному розподілу навантажень та зменшенню інтенсивності зношування під час експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хімічна корозія та захист металів: Навчальний посібник / за ред. П. І. Стоєва. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.
2. Ali M., Smith J. D. Advanced Tribological Coatings for Machine Components. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022. Vol. 303. P. 117530. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117530>.
3. Mohan S., Verma R. Nanostructured Polymers for Enhancing Mechanical Properties of Engineering Materials. *Materials Today: Proceedings*. 2023. №71. P. 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.345>.
4. Денисенко М. І., Зазимко О. В., Лабунець В. Ф. Дослідження поверхонь тертя робочих органів ґрунтообробних сільськогосподарських машин. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. журнал*. 2016. № 1 (70). С. 150–153.
5. Hawk J. A. Abrasive wear faibres. *ASM Handbook. Materials Park, CH, ASM International*. 2002. №11. С. 906–921.
6. Nuchtungs I. M. Abrasion in wear and manufacturing processes. *Metal. Ital*. 2002. (94). № 2. С. 17–21.
7. Корозійно-механічне зношування азотованих сталей у кислих середовищах / М. С. Стечишин та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2022. Т. 58, № 2. С. 121–126. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2022_58_2_20.
8. Внуков Ю. М., Залога В. О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : Навчальний посібник. 2-ге вид., стер. Суми : Сумський державний університет, 2024. 273 с. ISBN 978-966-657-148-2.
9. Вплив мастильних матеріалів на втомне зношування і якість поверхонь тертя зубчастих передач / В. Б. Мельник та ін. *Problems of friction and wear*. 2018. №4 (81). DOI:[10.18372/0370-2197.4\(81\).13326](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(81).13326).
10. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Розвиток основ еволюційної моделі фретинг-корозії з позицій фізичної хімії та хімії твердого тіла із урахуванням факторів зовнішнього впливу. *Вісник Хмельницького нац. університету. Техн. науки*. 2018. №2. С. 20–28.
11. Doroshenko Ya. V., Marko T. I., Doroshenko Yu. I. The study of erosive wear of the shaped elements of compressor station manifold of a gas pipeline. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2017. № 3. С. 65–78.
12. Singh V., Kumar S., Mohapatra S. Modeling of erosion wear of sand water slurry flow through pipe bend using CFD. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2019. №12, 3. P. 679687.
13. Themistoklis M., Soren S., Tom J. C. van Terwisga. Cavitation erosion risk assessment for a marine propeller behind a Ro–Ro container vessel. *Physics of Fluids*. 2023. Vol. 35, Issue 1, January 2023. P. 013342.
14. Sph modelling of a cavitation bubble collapse near an elasto-visco-plastic material / S. Joshi et al. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2019. Vol. 125, April 2019. P. 420–439.
15. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.
16. Попов С. М., Антонюк Д. А., Нетребко В. В. Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні. Запоріжжя. ВАТ «Мотор Січ», 2010. 368 с. ISBN 966-2906-18-5.
17. Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттям / В. М. Посувайло та ін. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. С. 83–97. DOI:[10.24025/2306-4412.4.2021.253298](https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298).
18. Коновалов П. Є. Фізична модель взаємодії металевих поверхонь при граничному терті. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту: Підйомно-транспортні, будівельні і вантажно-розвантажувальні машини*. 2014. Том 1, № 148. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.148.2014.72806>.
19. Mechanics of Micro-cutting Using FANT / I. Shepelenko et al. *Advanced Manufacturing Processes II. Inter Partner 2020. Lecture Notes in Mechanical 18 Engineering*. Springer, Cham. 2021. P. 619–628.
20. Peculiarities of Interaction of Micro-roughnesses of Contacting Surfaces at FANT / I. Shepelenko et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham. 2020. P. 452–461.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2025.

Стаття пройшла рецензування 22.04.2025.

Сорока Максим Олександрович – аспірант 1-го року навчання кафедри технологій автоматизації машинобудування, e-mail: maksim.soroka69@gmail.com.

Віштак Інна Вікторівна – канд. техн. наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: innavish322@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет.