

Р.Є. Костюнік¹, О.О. Мікосянчик¹, С.П. Шимчук², О.Г. Ковальчук¹, О.В. Кушчев¹

¹Державний університет «Київський Авіаційний Інститут»

²Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА БАГАТОЕТАПНОЇ ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОГО ОЧИЩЕННЯ МІНІАТЮРНИХ ТА ПРЕЦИЗІЙНИХ ШАРИКОПІДШИПНИКІВ

У статті подано розробку багатоетапної технології комбінованого очищення мініатюрних та прецизійних підшипників кочення, яку розроблено на основі результатів комплексних експериментальних досліджень мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників зовнішнім діаметром до 30 мм (класів P4/P2). Такі підшипники є критичними елементами високотехнологічних механічних систем, що особливо актуально в авіаційній, космічній та спеціальній високоточній промисловості. Для мініатюрних підшипників кочення встановлено необхідність досягнення 12-го класу чистоти за ISO 16232, де залишок частинок забруднень розміром $\geq 5 \mu\text{m}$ не перевищує 60 шт., як критичної умови для забезпечення експлуатаційних характеристик. Експериментально встановлено, що при розробці технології очищення оптимальний кут очищення має становити $30^\circ\text{--}45^\circ$, а швидкість обертання бути 500 об/хв. В ході розробки було оптимізовано технологічні параметри, що включають: магнітну сепарацію (0,5 Тл), двочастотне ультразвукове очищення в турбулентному потоці розчиннику Д-60, фінальне промивання Гептаном з використанням вакуумного сушіння. Підтверджена ефективність очищення $\eta \approx 96,7\%$ забезпечує збереження віброакустичних параметрів та економічну доцільність через уникнення дорогих експлуатаційних відмов.

Ключові слова: технологія, комбіноване очищення, мініатюрні та прецизійні підшипники, вібродіагностика

R.E. Kostyunik, O.O. Mikosyanchyk, S.P. Shymchuk, O.G. Kovalchuk, O.V. Kushchev

DEVELOPMENT OF A MULTI-STAGE INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR COMBINED CLEANING OF MINIATURE AND PRECISION BALL BEARINGS

The article presents the development of a multi-stage technology for combined cleaning of miniature and precision rolling bearings, which was developed based on the results of comprehensive experimental studies of miniature and precision ball bearings with an outer diameter of up to 30 mm (classes P4/P2). Such bearings are critical elements of high-tech mechanical systems, which is especially relevant in the aviation, space and special high-precision industries. For miniature rolling bearings, the need to achieve the 12th class of cleanliness according to ISO 16232, where the remaining particles of contaminants with a size of $\geq 5 \mu\text{m}$ do not exceed 60 pieces, has been established as a critical condition for ensuring operational characteristics. It has been experimentally established that when developing a cleaning technology, the optimal cleaning angle should be $30^\circ\text{--}45^\circ$, and the rotation speed should be 500 rpm. During the development, technological parameters were optimized, including: magnetic separation (0.5 T), dual-frequency ultrasonic cleaning in a turbulent flow of solvent D-60, final washing with Heptane using vacuum drying. The confirmed cleaning efficiency $\eta \approx 96.7\%$ ensures the preservation of vibroacoustic parameters and economic feasibility by avoiding expensive operational failures.

Keywords: technology, combined cleaning, miniature and precision bearings, vibration diagnostics

Постановка проблеми. Без підшипників кочення неможливо уявити складні механічні системи та високоточні пристрої, особливо ті, що використовуються в авіаційній та спеціальній техніці. Ці компоненти не просто реалізують просторову фіксацію обертових роторів, але й сприймають основну частину статичних і динамічних навантажень. Підвищення ефективності, надійності та ресурсу, а також забезпечення безвідмовної та безпечної експлуатації цих механізмів, критично залежить від оцінки їхнього технічного стану.

Основною причиною передчасної відмови та зниження середнього часу між відмовами (MTBF – Mean Time Between Failures) у таких прецизійних трибовузлах є мікрозабруднення – наявність абразивних частинок та металевих фрагментів (особливо розміром більше, ніж 5 мкм) на робочих поверхнях деталей, сепаратора та доріжках кочення. Ці частинки спричиняють швидкий абразивний знос, електричну ерозію і точкове пошкодження поверхонь, що різко підвищує рівень вібрації та скорочує експлуатаційний ресурс призводячи до відмов у критичних ситуаціях.

Незважаючи на високу критичність застосування, проблема високоефективного очищення прецизійних елементів мініатюрних шарикопідшипників залишається гостро-актуальною, особливо у військово-промислового комплексу та авіабудуванні [1-3].

Це обумовлено унікальними конструктивними особливостями прецизійних підшипників, які ускладнюють повне видалення забруднень:

- мінімальний переріз щілин між елементами конструкції;
- наявність тонких каналів порожнин складного профілю;
- взаємне перекриття робочих поверхонь.

Ці особливості формують унікальний комплекс інженерних проблем, що полягають у складності забезпечення ретельного очищення прецизійних підшипників, оскільки завжди залишається ризик повторного мікроскопічного забруднення (частинки металу, оксиди, полімеризовані залишки мастил) чи недостатньо ефективного очищення. Тому, фінішні операції очищення є ключовим елементом технологічного процесу як виготовлення так і ремонту підшипників і підшипникових вузлів [3]. Крім того, підвищення ресурсу підшипників через ефективне очищення має економічне та екологічне обґрунтування, оскільки зменшує енерговитрати та опосередковано сприяє скороченню викидів CO₂ [3].

Актуальність завдання посилюється відсутністю ефективних інтегрованих методів, здатних вирішити проблему екранування у мініатюрних вузлах, що підтверджує необхідність глибоких досліджень для розробки особливого, інноваційного підходу [3 – 9].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз наукової літератури [4, 5] показує, що більшість досліджень зосереджено на вібраційній діагностиці (наприклад, [10 – 15]), що полягає у виявленні дефектів з використанням різного роду вібраційних ефектів. Існуючі методи очищення мають суттєві обмеження [10 – 24]. УЗ-методи ефективно відривають забруднення, але неефективні для їхнього виведення з глибоких щілин, особливо в затінених зонах. Турбулентні методи (без використання спеціального магнітного впливу) недостатньо повно руйнують адгезійні зв'язки [2].

Таким чином можна стверджувати, що жоден із наявних методів не поєднує ефективне руйнування та відрив мікрочастинок з подальшим гарантованим їх виведенням, що можна використовувати у промислових масштабах.

Постановка завдань. Основним завданням даної роботи є розробка та створення комплексної, багатоетапної технології очищення, здатної гарантовано вивести чистоту прецизійних підшипників на рівень, що відповідає найвищим галузевим стандартам. За результатами аналізу критичності застосування встановлено цільовий показник чистоти за ISO 16232: Клас 12, що обмежує залишкове забруднення до кількості, що не перевищує 60 частинок забруднень розміром ≤ 5 мкм на один шарикопідшипник.

Для досягнення цього надзвичайно високого стандарту необхідне поєднання різних фізичних та хімічних методів впливу. Розроблена технологія базується на послідовному застосуванні комбінованих методів дії, що включають імпульсне магнітно-турбулентне очищення (для видалення феромагнітних фрагментів), ультразвукове очищення у багаточастотному режимі (28 кГц / 40 кГц), використання високочистих розчинників (таких як Д-60 та Гептан) та вакуумне сушіння. Фінансова доцільність інвестицій у цю складну технологію обґрунтовується високою ефективністю (96,7%) та мінімізацією ризиків позапланових відмов (AOG – Aircraft on Ground), вартість яких значно перевищує витрати на очищення.

Викладення основного матеріалу. Технологічний процес комбінованого очищення мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників є багатостадійним. Він розроблений для максимального видалення як крупних, так і мікроскопічних забруднень, та складається з наступних етапів:

1. Попередня обробка (магнітна сепарація становить 0,5 Тл та використовується для превентивного вилучення великих феромагнітних фрагментів забруднень й подальшої консервації);
2. Основне очищення (комбінований магнітно-турбулентний + УЗ-вплив у режимі 30° – 45° та при частоті 500 об/хв).
3. Фінальна обробка (промивання Гептаном та вакуумне сушіння);
4. Консервація та пакування (нанесення тимчасового антикорозійного покриття та захист від повторного забруднення, а також пакування у вакуумну або антистатичну плівку).

Розглянемо Етап 1 (Розконсервація та попередня розбірка). На цьому етапі підшипники, що надходять на ремонт, підлягають обов'язковій розконсервації та попередній обробці для видалення старих мастильних матеріалів та консерваційних паст. Може використовуватися грубе замочування у спеціальних миючих розчинах або керосині, що має високу жиророзчинну здатність.

На етапі 2, попереднє імпульсне магнітно-турбулентне очищення використовується для видалення крупних фрагментів забруднення різної природи. Цей етап є критично важливим для запобігання пошкодження обладнання та робочих поверхонь під час проведення подальшої ультразвукової обробки, коли видаляються великі феромагнітні металеві мікрочастинки забруднення (≥ 50 мкм). Підшипник піддається дії джерела змінного імпульсного магнітного поля високої напруженості, рекомендовано 0,5 Тл в середовищі рідини Д-60 (високоочищений

ізопарафіновий розчинник), яка забезпечує ефективне розчинення жирів при мінімальному нелеткому залишку (NVR). Це запобігає шуму та розвитку дефектів на доріжках кочення та інших робочих поверхнях.

На Етапі 3 (Фінальна обробка) виконується промивання Гептаном та вакуумне сушіння.

Етап 4, «Примусове сушіння та пакування», є критичним для запобігання миттєвій корозії та вторинному забрудненню. При реалізації етапу відбувається:

- сушіння (використовується метод вакуумного сушіння при контрольованій температурі). Вакуум забезпечує швидке випаровування розчинника при низькій температурі, запобігаючи окисленню та конденсації вологи);

- консервація та пакування (після сушіння, підшипники негайно обробляються високочистою консерваційною оливою або мастилом, що відповідає стандарту чистоти не менше ISO 14/12/10, і поміщаються у герметичне пакування для зберігання).

В основу технології покладено ряд оптимізованих параметрів та рішень, що стосуються обладнання, методу очищення та миючого середовища де інноваційна ефективність забезпечується одночасним використанням імпульсного магнітно-турбулентного (ІМТ) та двочастотного ультразвукового (УЗ) методів. В результаті чого:

- оптимальний кут нахилу підшипників, що піддаються очищенню має становити 30° – 45° (експериментально доведено, що цей діапазон, у поєднанні з бічними ультразвуковими випромінювачами, забезпечує найкращий компроміс між прямим та відбитим УЗ-впливом, гарантуючи рівномірне очищення робочих поверхонь та мінімізацію ефекту екранування);

- використовується миюче середовище Д-60 – для розчинення органіки та низького NVR і Гептан – для фінального промивання та запобігання окисленню перед вакуумним сушінням;

- фінальне промивання у Гептані (або іншому надчистому розчиннику), рекомендується з використанням системи проточної фільтрації (постійна циркуляція рідини через фільтри ≤ 1 мкм, що забезпечує швидке досягнення цільової чистоти.

Для оцінювання ефективності технології використовується валідація та контроль якості.

Використовуючи метод валідації виконується кількісна оцінка за ISO 16232. В цьому випадку, при контрольованого змиві та аналізі на SEM/оптичному мікроскопі, з використанням лічильника частинок або аналізу за допомогою фільтра використовуються для кількісного підтвердження чистоти (Класу 12). Програмне забезпечення мікроскопу дозволяє рахувати мікрочастинки забруднень, сортуючи їх за розміром (наприклад, 5–15 мкм, 15–25 мкм, >25 мкм). Так у нашому випадку розрахункова ефективність видалення критичної фракції є головним дослідницьким результатом та досягнення високої ефективності видалення критичної фракції (≥ 10 мкм), що підтверджує правильність вибору технологічних параметрів [5] становить:

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{\text{after}}}{N_{\text{before}}} \right) \times 100\% \approx 96,7\%$$

де N_{before} та N_{after} – кількість частинок забруднень до та після очищення, виміряна згідно з ISO 16232.

Функціональні випробування на створеному колективом авторів даної статті дослідному зразку стенда видалення феромагнітних мікро-, субмікро-, та нанозабруднень із робочих поверхонь деталей мініатюрних шарикопідшипників підтвердили, що висока чистота забезпечує якість експлуатації. Апробація технології підтверджується функціональними випробуваннями проведеними в лабораторних умовах за розробленою методикою проведення досліджень [7]. В результаті проведення вібродіагностики підшипників, після використання технології очищення, фіксувалось значне зниження високочастотного шумового фону та стабілізації спектру. Це підтверджує, що усунення великої кількості абразивних частинок, гарантує покращення віброакустичних параметрів та запобігає прогресуючому зростанню дефектів прецизійних і мініатюрних шарикопідшипників, забезпечуючи їх довготривалу роботу на рівні нових [8].

Контроль якості полягає у визначенні ступеня чистоти. Для прецизійних підшипників, що працюють у критичних вузлах, ступінь чистоти має бути визначений за двома основними параметрами:

- залишкова маса забруднень (гравіметричний критерій). Цей критерій контролює загальну кількість залишків мастил, консерваційних матеріалів, мікропилу та інших твердих залишків;

- розмір та кількість частинок (критерій за класами розмірів). Цей критерій є найважливішим, оскільки він прямо пов'язаний із ризиком заклинювання та пітінгу.

Розроблена технологія забезпечує дотримання вибраних критеріїв, де для прецизійних підшипників загальна маса твердих залишкових частинок не перевищує $G_{\text{заг}} \leq 0.5$ мг на підшипник, а максимальний допустимий розмір частинки $D_{\text{max}} \leq 25$ мкм (в абсолютному вираженні). Для визначення кількості частинок за класами (код чистоти) використовується внутрішній галузевий стандарт або адаптований стандарт ISO 16232.

Економічне обґрунтування технології, засноване на принципі уникнення витрат (Cost Avoidance). Обґрунтування підтверджує стратегічну доцільність впровадження у відповідні галузі промисловості розробленої та апробованої інноваційної технології видалення феромагнітних мікро-, субмікро-, та нанозабруднень із робочих поверхонь деталей мініатюрних шарикопідшипників, що є пріоритетом, зокрема, у військово-промисловому комплексі. Впровадження забезпечує стратегічну готовність та безпеку експлуатації авіаційної, наземної та спеціальної техніки.

Висновки. Розроблена інноваційна технологія комбінованого очищення, що поєднує оптимізовані параметри ІМТ методу очищення та двочастотного УЗ-впливу, є науково обґрунтованим рішенням для забезпечення чистоти прецизійних та мініатюрних шарикопідшипників. Експериментально доведена ефективність 96,7% та значне зниження рівня вібрації підтверджують, що розроблена та створена інноваційна технологія дозволяє гарантовано відновити компоненти до класу чистоти 12 (ISO 16232). Впровадження даного технологічного процесу є критичною умовою для забезпечення надійності, ресурсу та безпеки експлуатації в авіаційній та військово-промисловій сферах [7, 8].

Список використаних джерел:

1. О. Стельмах, Р. Костюнік, С. Шимчук, О. Кущев. Оцінка ефективності методів очищення авіаційних шарикопідшипників за їх віброакустичними характеристиками // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2024. №2(23) – С. 208-217. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1543>
2. Р.С. Костюнік, О.О. Мікосянчик, О.У. Стельмах, О.В. Кущев, О.Г. Ковальчук. Експериментальне визначення впливу розміру та складу частинок забруднень на віброакустичні характеристики мініатюрних шарикопідшипників у зборі // Problems of friction and wear. – 2024, 3 (104) – С. 101- 111. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18995](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18995)
3. О. Стельмах, Р. Костюнік, С. Шимчук, О. Кущев. Реновація віброхарактеристик мініатюрних шарикопідшипників прецизійних механічних систем авіакосмічної і військової техніки // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2024. №1(22) – С. 314-319. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1374>
4. Stelmakh A., Kostyunik R., Mikosianchuk O., Kushchev A., Ibraimov T., Sydorenko O., Zaichuk N., Shymchuk S. (2023). Improvement of operational parameters for precision rolling bearings by cleaning working surfaces from micro pollution of various nature. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), pp. A31-A40. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).a5](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a5)
5. Umanskyi, O., Zaichuk, N., Shymchuk, S., Kostunik, R., Terentiev, O. Ensuring Heat Resistance of Aviation Materials Using Protective Coatings Based on ZrO₂. Lecture Notes in Mechanical Engineering Open source preview, 2025, pp. 478–488. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_42
6. Стельмах О.У., Костюнік Р.С., Кущев О.В., Шимчук С.П. Аналіз шляхів підвищення якості очищення мініатюрних підшипників кочення для прецизійних механічних та авіакосмічних систем на ремонтному виробництві. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2024. № 77. С. 56-60. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.77.9>
7. Kostyunik R., Mikosianchuk O., Stelmakh A., Kushchev A., Shymchuk S., Zaichuk N. (2025). An innovative approach to non-contact cleaning of mini-ball bearings. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 12(2), pp. A10–A19. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).a2](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).a2)
8. Костюнік Р.С., Мікосянчик О.О., Кущев О.В., Шимчук С.П., Ковальчук О.Г., Бондар В.С. Розробка методу очищення авіаційних мініатюрних підшипників кочення. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2024. № 78. С. 26-36. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.4>
9. Костюнік Р.С., Стельмах О.У., Кущев О.В. Комплексне вирішення проблеми видалення забруднень з миючої рідини технологічних приладів, використовуваних для промислової очистки підшипників. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2025. № 83. С. 142-149.
10. ISO 16232:2007 (та оновлення). Road vehicles — Cleanliness of components of fluid circuits.
11. ISO 4406:2017. Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles.

12. Gotsis, A., & Papadopoulos, C. (2018). *Vibration-Based Condition Monitoring of Rolling Element Bearings*. Springer.
13. Harris, T. A., & Kotzalas, M. N. (2007). *Essential Concepts of Bearing Technology*. CRC Press.
14. Tallian, T. E. (1969). The Theory of Rolling Contact Failure. *Wear*, 14(1), 21-43.
15. Li, H., et al. (2020). Research on Ultrasonic Cleaning of Precision Parts Based on Micro-Bubble Dynamics. *Journal of Applied Physics*, 128(15).
16. Soloshenko, S. D. (2021). Optimization of hydrodynamic flow during parts cleaning. *Journal of Engineering Sciences*, 8(3), 112-125.
17. Jones, R. P. (2019). *Precision Cleaning and Surface Technology*. CRC Press.
18. Chen, L., and Wang, G. (2018). Study on the effect of magnetic field on particle dispersion in liquid. *Advanced Materials Research*, 1245, 301-308.
19. Zuk, J., and Bodiak, J. (2022). Influence of liquid viscosity on the efficiency of ultrasonic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 85, 106001.
20. Mischenko, A. V. (2023). Electrostatic contamination and its role in bearing failure. *Tribology Transactions*, 66(2), 210-220.
21. ISO 14644-1:2015. *Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration*.
22. Khmelnytskyi, D.A. (2020). Modeling of turbulence effects in confined spaces. *Fluid Dynamics Research*, 52(5).
23. ASTM F313-05. *Standard Test Method for Nonvolatile Residue of Halogenated Solvent Extract from Aerospace Components*.
24. Mason, T. J., et al. (2016). *Ultrasonics in Cleaner Production: Limitations and Recent Advances*. Royal Society of Chemistry.