

УДК 62.233.27

DOI: 10.18372/0370-2197.3(104).18995

Р. Є. КОСТЮНІК, О. О. МІКОСЯНЧИК, О. У. СТЕЛЬМАХ, О. В. КУЩЕВ,
О. Г. КОВАЛЬЧУК

Національний авіаційний університет, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РОЗМІРУ ТА СКЛАДУ ЧАСТИНОК ЗАБРУДНЕНЬ НА ВІБРОАКУСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІНІАТЮРНИХ ШАРИКОПІДШИПНИКІВ У ЗБОРІ

Проаналізовано вплив мастильного матеріалу, мікрогеометричних характеристик поверхонь на віброакустичні показники мініатюрних підшипників кочення та наведено типи дефектів, які виникають в підшипниках при експлуатації. Наведено методику очищення робочих поверхонь авіаційних шарикопідшипників. Розроблено модернізований випробувально-вимірювальний комплекс для проведення оцінки ефективності очищення шарикопідшипників за віброакустичними параметрами. Визначено механізми очищення авіаційних шарикопідшипників імпульсним магнітно-турбулентним та ультразвуковим методами.

Ключові слова: забруднення, моніторинг, шарикопідшипники, очищення, мікроструктура, віброакустичні характеристики.

Постановка проблеми. Трибосистеми кочення, а саме нерозбірні шарикопідшипники, є невід'ємними, складними та високовартісними складовими практично всіх сучасних машин та механізмів. Основні причини виходу їх з ладу суттєво залежать від призначення та умов їх експлуатації [1, 2] в механічних системах. Значній частині дефектів, що виникають в процесі експлуатації, сприяє забруднення робочих поверхонь деталей трибосистем кочення. Поряд із цим, наявність мікро- та нанозабруднень різноманітної природи у робочому мастильному матеріалі (ММ) також обумовлює перерозподіл деформації, що призводить до появи в трибовузлах збуджуючих вібрацій сил [3]. Ці ударні сили, що виникають у шарикопідшипниках, залежать від збільшення зазорів, нерівноважності розподілу елементів, що обертаються, наявності сторонніх перешкод, у тому числі присутності мікро- та нанозабруднень на робочих поверхнях деталей та в змащувальних середовищах, і є причиною вібрації, аналіз якої на сьогодні є одним із основних методів діагностування стану підшипників кочення [4, 5].

Це особливо важливо для мініатюрних шарикопідшипників (ШП) через конструктивно менші розміри, та, як наслідок, менші зазори і необхідність витримувати в процесі виробництва вищу точність виготовлення та складання.

Разом з цим якість віброакустичних характеристик мініатюрних підшипників кочення, котрі являють собою складну прецизійну трибомеханічну систему, залежать від безлічі факторів:

- фізико-механічні властивості матеріалу кілець, сепаратора та тіл кочення (твердість, модуль пружності, термохімічна обробка та ін.);
- макрогеометричні відхилення кілець, тіл кочення, сепараторів;
- мікрогеометричні параметри посадочних та робочих поверхонь тертя;
- ступінь чистоти робочих та суміжних поверхонь тракту кочення;

- кількість змащувального матеріалу та його ступінь чистоти;
- реологічні властивості мастильного матеріалу;
- кінетика трибохімічних реакцій між компонентами мастильного матеріалу та поверхневими шарами контактних поверхонь;
- зовнішні умови роботи підшипника (температура, формування змащувальних шарів, атмосферний тиск, вологість та ін.).

В ряді випадків під час експлуатації машин та механізмів наявність мікро-, субмікро- та наночастинок забруднень ускладнює процес дефектації підшипників кочення, що разом із існуючими дефектами, котрі з часом виникають через особливості конструкції та точності виготовлення відповідальних деталей, призводять до наступних небажаних наслідків:

- прискорення виходу з ладу відповідальних деталей через абразивне зношування їх робочих поверхонь;
- втомне руйнування через перерозподіл контактних навантажень на робочих поверхнях тертя;
- повна або часткова закупорка робочих порожнин малого перерізу, що мають складні профілі;
- заклинювання деталей вузлів тертя;
- перегрів і руйнування робочих деталей;
- підвищення сил тертя, що призводить до збільшення зусилля, необхідного для початкового зрушення та розрахункового номінального переміщення рухомих елементів конструкції;
- виникнення кавітаційних явищ у робочих зонах трибовузлів механізмів та агрегатів;
- окиснення мастильного матеріалу, зниження експлуатаційних характеристик та виникнення інших небажаних та непередбачуваних явищ.

Ці наслідки негативно впливають на технічні характеристики, функціональні можливості, надійність і ресурс роботи реальних вузлів тертя машин та механізмів у цілому [6].

Мета роботи полягала в порівнянні ефективності очищення авіаційних шарикопідшипників імпульсним магнітно-турбулентним та ультразвуковим методами за віброакустичними характеристиками та типом забруднень.

Матеріали та методики досліджень. Зовнішні умови випробувань у стандартних лабораторних умовах відповідали: температура 23-25 °С, атмосферний тиск 760 ± 3 мм рт.ст., відносна вологість 40 - 60 %.

Для дослідження використовувались авіаційні шарикопідшипники двох типорозмірів: 28×12×7 (серії №75-70001016Т2) та 24×12×6 (серії №5-1000901Т2), демонтовані з реальних вузлів та агрегатів після їх експлуатації, відібрані та надані відділом ОТК Державного підприємства «ЗМКБ «Івченко-Прогрес» (у герметичній упаковці). Сепаратори цих підшипників виконано із механічно обробленої безолов'янистої бронзи, вони мають хорошу вібростійкість, котра забезпечується ідеальним контролем положення обертових тіл кочення навіть при нерівномірних динамічних навантаженнях.

З огляду на попередньо проведений літературний аналіз шляхів покращення якості очищення мініатюрних шарикопідшипників та патентний пошук пристроїв [6-12] визначено, що найбільш ефективними є магнітно-турбулентний та ультразвуковий методи [13-19]. Тому очищення проводилось на стенді передексплуатаційної підготовки підшипників ГТД ОПШ-01 (рис. 1), на

стандартній ультразвуковій цифровій ванні (УЗВ) фірми Kaisi K-105 (Китай) із об'ємом резервуару 500 мл і максимальною потужністю 50W та приладом Ultrasonic generator (Польща) із занурювальним випромінювачем максимальною потужністю 100 W (рис. 2), де ванною може слугувати люба технологічна лабораторна ємність із відповідним миючим розчином.

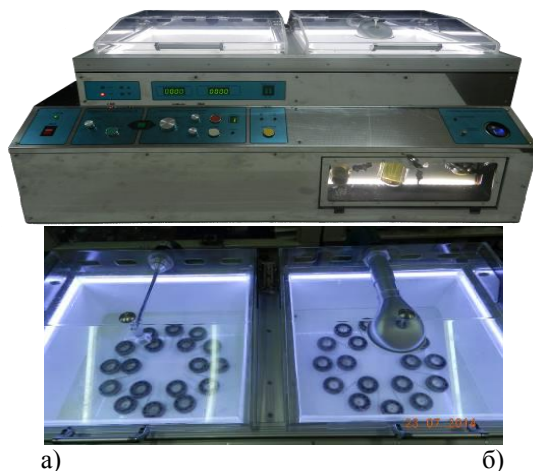


Рис. 1. Стенд передексплуатаційної підготовки підшипників ГТД: а) – зовнішній вигляд стенду; б) – камера очищення та осушування шарикопідшипників у зборі.

Із урахуванням типорозмірів та посадкового діаметру внутрішніх кілець дослідних шарикопідшипників виготовлені спеціальні ложементи для можливості позиціонування їх на робочих поверхнях резервуарів вищезазначених приладів та пристроїв у більш ефективних зонах виникнення акустичних течій і кавітації (рис. 2).

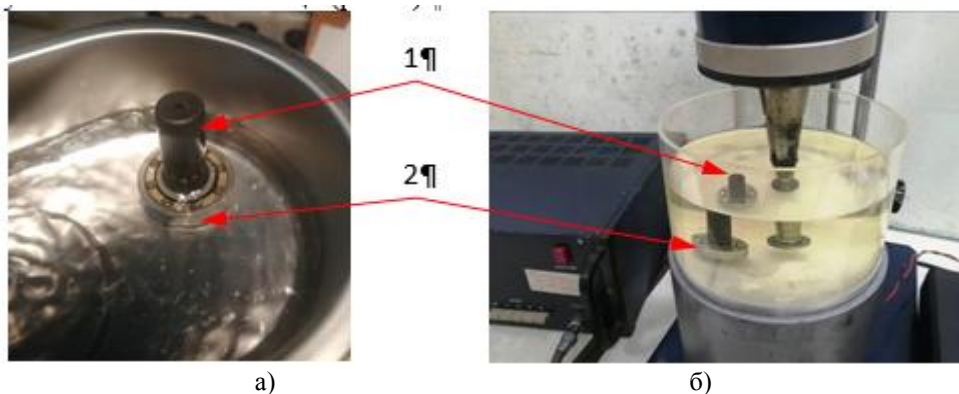


Рис. 2. Зовнішній вигляд резервуарів лабораторних пристроїв і способу позиціонування дослідних підшипників при проведенні їх очищення: а) УЗВ фірми «Kaisi»; б) приладу «Ultrasonic generator»; 1 – ложемент; 2 – дослідний авіаційний ШП.

В якості миючого середовища використовувався авіаційний гас ТС-1, попередньо очищений фільтрами тонкої очистки. Апробація стенду ОПШ-01 на підприємствах ДП «Завод 410 ЦА», ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес» та ПАТ «Мотор Січ» шляхом очищення авіаційних шарикопідшипників ГТД показала хороші результати. Очищення робочих поверхонь мініатюрних

шарикопідшипників проводилось за розробленою узагальненою методикою випробувань, що полягає в наступному:

1. Розконсервація шарикопідшипників як нових, так і після експлуатації, відбувалась шляхом їх занурення в ексикатори, заповнені авіагасом ТС-1, де вони витримувались протягом 1-2 годин. Попередньо, шляхом неодноразового обертання в різні сторони вільного кільця підшипника, досягали максимального видалення консерваційної оливи з їх робочих поверхонь.

2. Після цього дно камери очищення, запобіжна прокладка та всі поверхні шаблону з ложементами ретельно протирались спиртом і відповідним чином позиціонувались на робочій поверхні камери очищення.

3. Всі шарикопідшипники, котрі підлягали очищенню, перед встановленням на ложементи перевірялися на вільне обертання зовнішніх кілець шляхом їх легкого розкручування рукою. Якщо вільне кільце не оберталося або періодично заклинювалось, то цей підшипник повторно піддавався зануренню в середовище авіагасу ТС-1. Після встановлення всіх підшипників на ложемент камера очищення закривалась штатною кришкою.

4. Вибір кількості та тривалості циклів реверсивного обертання підшипників виконував оператор наступним чином: на панелі управління встановлювалась тривалість циклу та їх кількість (експериментально встановлено тривалість очищення 2,5 хвилин у кожному з напрямків на 1 цикл роботи). Перемикач режиму стенду ОПШ-01 встановлюється в положення «Автомат», після чого натискалась кнопка «Пуск».

5. По завершенню очищення за обраною програмою шарикопідшипники переверталися, кришка закривалась та здійснювалось очищення підшипників.

6. По завершенню процедури очищення шаблон разом з підшипниками обережно виймався з камери очищення і встановлювався в камеру розмагнічування і попереднього осушування та закривалась кришка.

7. На пульті управління натискалась кнопка «Розмагнічування», процес розмагнічування відбувається в автоматичному режимі роботи.

8. Після процедури попереднього осушування та розмагнічування здійснюється ліофілізація усіх поверхонь підшипників робочою рідиною (наприклад олива ИПМ-10) шляхом вприскування робочої рідини в тракт кочення шарикопідшипника. Після цього для проведення оцінки ефективності очищення шарикопідшипників першої партії на модернізованому випробувально-вимірювальному комплексі вхідного контролю визначалися віброакустичні параметри.

Для визначення поточних характеристик авіаційних підшипників використовувався випробувально-вимірювальний комплекс вхідного контролю шарикопідшипників (рис. 3), на якому реалізовано розгін та обертання зовнішнього кільця підшипника, навантаженого відповідним диском. Стенд призначений для вібродіагностики радіальних шарикопідшипників при розрахунковому осьовому навантаженні та частоті обертання зовнішнього кільця 1800 хв^{-1} , у відповідності до міжнародного стандарту [4]. Вимірювання рівня вібрації підшипника проводять у ручному режимі, чутливим елементом слугує один вібродатчик.



Рис. 3. Зовнішній вигляд випробувально-вимірювального комплексу вхідного контролю шарикопідшипників

Для вимірювання віброшвидкості та віброприскорення випробовуваних шарикопідшипників після їх розконсервації та очищення різними методами використовувався віброметр ВВМ-201 (паспорт 5Ф2.781.103 ПС) зі штатним датчиком п'єзоелектричного типу ДН-3-М1 (паспорт 5Ф2.781.102 ПС), що входить до складу випробувально-вимірювального комплексу вхідного контролю. Також був задіяний додатковий переносний пристрій віброметра GM63A, виносний датчик якого був встановлений у нижній частині навантажувального диску на зовнішній вільній поверхні ложементу позиціонування. Поряд із датчиком на спеціально виготовленому кронштейні встановлено виносний мікрофон переносного шумовимірювального пристрою класу точності GM1356, що дозволило в ході випробувань визначати поточні показники загального рівня шуму (30 – 130 дБ) кожного шарикопідшипника у діапазоні частот (31,5 Гц - 8 кГц). Це дало змогу розширити частотний діапазон вимірювання віброхарактеристик шарикопідшипників та дозволило провести попередню порівняльну оцінку поточних акустичних характеристик до та після їх очищення.

Дослідження розмірів та хімічного складу забруднення проводилося на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Результати досліджень та їх аналіз. У процесі проведення очищення авіаційних шарикопідшипників на дні камери стенду ОПШ та резервуарів лабораторних ультразвукових пристроїв спостерігалось накопичування забруднень різноманітної природи (металеві частинки різних розмірів, ворс та ін.), котрі мали характерний блиск.

По завершенню кожної процедури очищення миюча рідина підлягала фільтрації через фільтроелемент тонкої очистки, також видалялося забруднення, що залишалося на дні камер. Видалені мікрочастинки забруднень підлягали комплексному дослідженню на РЕМ-106И на предмет їх природи та розміру.

Варто відмітити, що при дослідженні видалених частинок забруднень після проведення очищення шарикопідшипників магнітно-турбулентним методом спостерігалися переважно наступні типи забруднень (рис. 4): залишки старого змащення; неметалеві частки (абразив, пісок і та ін.); сталеві частки та стружка; частки та стружка з мідного сплаву; продукти окислення та органічні волокна.

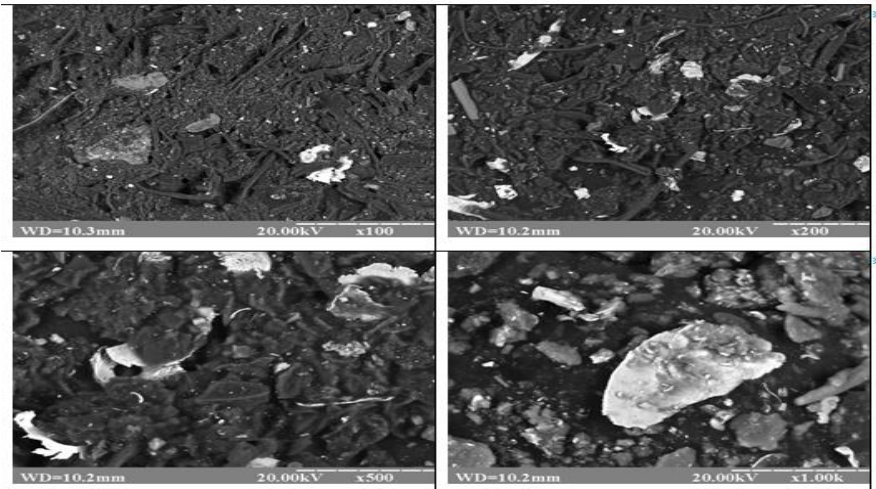


Рис. 4. Зовнішній вигляд забруднень на різних збільшеннях, що були видалені з підшипників імпульсним магнітно-турбулентним методом

Очищення за технологією із використанням спеціального ультразвукового лабораторного обладнання засновано на використанні кавітаційних процесів [20], котрі виникають під дією ультразвукових хвиль у рідинах. Вони дозволяють порушити суцільність та адгезію у найбільш складних зонах та міцних плівок забруднення. Наразі даний спосіб очищення довів свою ефективність та широко використовується у машинобудівній промисловості, на прецизійному виробництві, приладобудуванні, радіоелектроніці та медицині.

Аналіз мікрочастинок забруднень (рис. 5), видалених із тракту кочення шарикопідшипників ультразвуковим методом, на електронному мікроскопі РЕМ-106И показав такі їх типи: неметалеві частки (абразив, пісок та ін.); сталева стружка і пил; частки стружки, пил мідного сплаву, органічні волокна та залишки змащування.

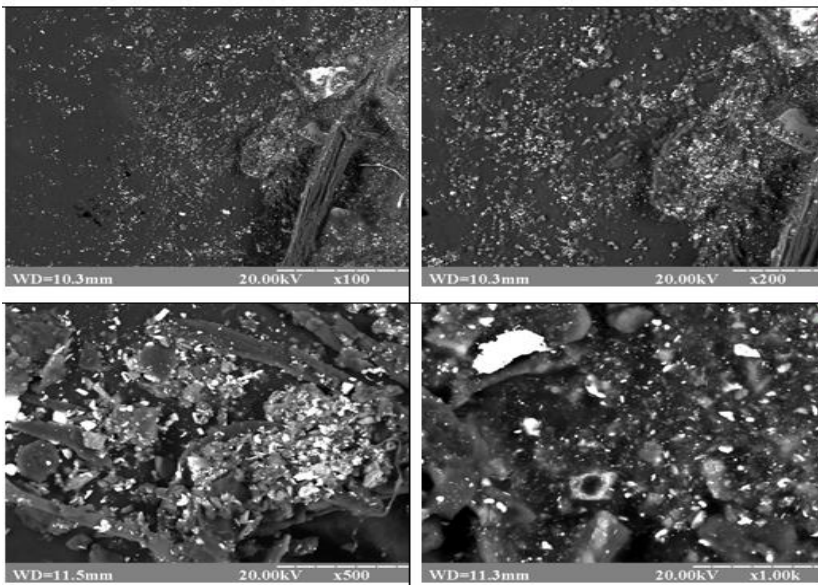


Рис. 5. Зовнішній вигляд забруднень, видалених із підшипників ультразвуковим методом, при різних збільшеннях

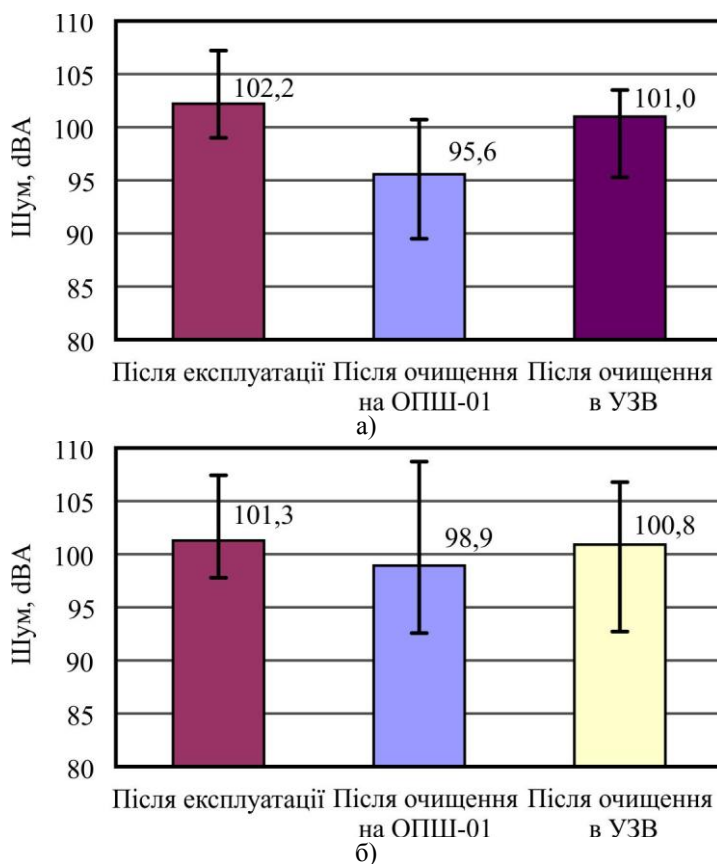


Рис. 6. Вплив методів очищення на середнє значення загального рівня шуму ШП двох типорозмірів із заміною ММ: а) серії №5-1000901Т2, б) серії №75-70001016Т2.

Порівняльні експерименти показали, що магнітно-турбулентний метод дозволяє більш ефективно видаляти частки забруднень, розмір яких значно більше 1-2 мкм, при цьому середнє значення загального рівня шуму підшипників серії №5-1000901Т2 зменшився на 4 дБ, а серії №75-70001016Т2 – зменшився на 1,2 дБ, у той час як застосування ультразвукового методу дозволило зменшити загальний рівень шуму відповідно на 0,67 дБ, та 0,49 дБ. Однак, ультразвуковий метод очищення показав найвищу ефективність для найдрібніших забруднень.

Відповідно до одержаних результатів, можна припустити, що наявність у значній кількості мікрочастинок забруднень розміром 1-2 мкм більше впливає на показники віброприскорення у високочастотному діапазоні вимірювання, а саме - їх підвищення. Так, після проведення очищення шарикоідшипників ультразвуковим методом у переважній більшості видалялися частинки забруднень менше 1 мкм (неметалеві частки у вигляді абразиву та піску, сталеві мікростружки та пилю), що при подальшому їх оцінюванні супроводжувалось підвищенням показників віброакустичних характеристик у високочастотному діапазоні від 2,5 % до 30 %.

Імпульсний магнітно-турбулентний метод, навпроти, показав кращу ефективність у низькочастотному діапазоні.

Висновки

Встановлено, що наявність мікрочасток, розмір котрих значно більший 1-2 мкм, призводить до підвищення показників віброприскорення у низькочастотному діапазоні вимірювання. Як показали проведені дослідження, очищення мікропідшипників на стенді ОПШ-01 є найбільш ефективним методом видалення об'ємних забруднень, що дозволяє зменшити загальний рівень шуму на 1,2...4 дБ.

Наявність у більшій кількості мікрочастинок забруднень розміром 1-2 мкм призводить до підвищення показників віброприскорення на 2,5...30 % у високочастотному діапазоні вимірювань. Для видалення такого типу часток найвища ефективність досягалась ультразвуковим методом, очищення котрим дозволяє знизити загальний рівень шуму на 0,49...0,67 дБ.

Список літератури

1. Лосев А.В., Жданов А.А., Сломинская Е.Н. Сравнительный анализ существующих методов и выбор очистки поверхностей деталей авиационных агрегатов. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. X., ХАІ. 2003. Вип.. 1. С. 108-116.
2. Simmons C. H., Maguire D. E., Phelps N.. *Manual of Engineering Drawing: British and International Standards, Fifth Edition, chronicles ISO and British Standards*. Elsevier, 2020. 640p.
3. Довідник SKF з технічного обслуговування підшипників, PUB SR/P7 10001/1 RU. 2018. 452с.
4. ДСТУ ISO 15242-1:2016 Підшипники кочення. Методи вимірювання вібрації. Частина 1. Основні положення (ISO 15242-1:2015, IDT).
5. ДСТУ ГОСТ 520:2014. Підшипники качення. Общие технические условия (ГОСТ 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ).
6. Centrifuge For Cleaning a Liquid, Patent № US7959547B2, Baumann, Dieter (Greven, DE), Meinig, Uwe (Walsrode, DE), United States, 14.06.2011.
7. Purification of renewable oils, Patent № US10961466B2, Doyle, Michael P. (Carmel, CA, US), Richards, Glenn (Bakersfield, CA, US), United States, 30.03.2021.
8. Smith. G. H. Escape to aqueous cleaning. (Cleaning with alkaline aqueous solutions). *Metall Finish*. 1991. № 9. P. 9 –11.
9. Bearing Flushing Compositions and Methods, Patent№US11021671B2, Eggen, Mark (Lake Worth, FL, US), Wooton, David L. (Bumpass, VA, US), Erdek, Paul J. (Lake Worth, FL, US), United states, 01.06.2021.
10. Kumarab A. S., Debbc S., Paulab S.. Ultrasonic-assisted abrasive micro-deburring of micromachined metallic alloys. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 66. P. 595-607. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.019>
11. Bearing cleaning machine, Application filed by Jiangsu Kunzhou Precision Electromechanical Co ltd, Patent Publication of № CN113714198A, China, 30.11.2021.
12. An ultrasonic cleaning method of bearing balls and device, Application PCT/SK1998/000002 events, InventorFrench Jozef SLOVÁK, Patent Publication of № WO1998031478A1, France, 23.07.1998.
13. Weller R.N., Brady J.M., Bernier W.E. Efficacy of ultrasonic cleaning / // *Journal of Endodontic*. 1980. 6(9). PP. 740-743. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(80\)80185-3](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(80)80185-3)
14. Fuchs F.J. Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application. *NASA. Marshall Space Flight Center, Aerospace Environmental Technology Conference*, 1995. P.369-378.
15. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. 29. P. 519–523. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004>

16. Стельмах О., Костюнік Р., Шимчук С., Куцев О. 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>
17. Awad S.B., Nagarajan R. Chapter 6 - Ultrasonic Cleaning. *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Particle Deposition, Control and Removal*. 2010. P. 225-280. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7830-4.10006-4>
18. Vetrinmurugan, Goodson M., Lim T. et al. Experimental Investigation of Ultrasonic and Megasonic Frequency on Cleaning of Various Disk Drive Components. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2013. 4(4). P. 174-177. DOI: 10.7763/IJCEA.2013.V4.288
19. Stelmakh A., Kostyunik R., Mikosianchyk O. et al. Improvement of operational parameters for precision rolling bearings by cleaning working surfaces from micro pollution of various nature. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10(1). P. A31-A40, doi: [10.21272/jes.2023.10\(1\).a5](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a5)
20. Verhaagen B., Rivas D.F. Measuring cavitation and its cleaning effect. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. 29. P. 619-628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.009>

Стаття надійшла до редакції 09.09.2024.

Костюнік Руслан Євгенович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: kostyunik_rus@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0232-9208>

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>

Стельмах Олександр Устимович – докт. техн. наук, старший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій, запрошений професор Пекінського технологічного інституту, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: stelmah@nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9132-6334>

Куцев Олексій Вікторович – науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: stelmah@nau.edu.ua

Ковальчук Олена Георгіївна – науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: elena_kovalchuk@bigmir.net

R. KOSTYUNIK, O. MIKOSIANCHYK, O. STELMAKH, O. KUSCHEV, O. KOVALCHUK

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF THE SIZE AND COMPOSITION OF CONTAMINANT PARTICLES ON THE VIBROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF MINIATURE BALL BEARINGS ASSEMBLIES

The influence of lubricant and microgeometric characteristics of surfaces on the vibroacoustic characteristics of miniature rolling bearings is analyzed, and the types of defects that occur in bearings during operation are presented. The method of cleaning the working surfaces of aircraft ball bearings is described. A modernized test and measurement complex has been developed to evaluate the effectiveness of ball bearing cleaning by vibroacoustic parameters. The mechanisms of cleaning aircraft ball bearings by pulsed magnetic-turbulent and ultrasonic methods are determined. It has been established that the magnetic-turbulent method allows more efficient removal of contaminant particles whose size is larger than 1-2 microns, while the average value of the total noise level of bearings of series No. 5-1000901T2 - decreased by 4 dB, and of series No. 75-70001016T2 - decreased by 1.2 dB, while the use of the ultrasonic method allowed to reduce the total noise level by 0.67 dB and 0.49 dB, respectively. However, the ultrasonic cleaning method showed the highest efficiency for the smallest contaminants. It has been established that the presence of microparticles whose size is much larger than 1-2 microns leads to an increase in vibration acceleration in the low-frequency measurement range. As shown by the study, cleaning of microbearings on the OPSH-01 stand is the most effective method of removing bulk contaminants, which reduces the overall noise level by 1.2...4 dB. The presence of a more significant number of microparticles of contaminants with a size of 1-2 microns leads to an increase in vibration acceleration by 2.5...30 % in the high-frequency measurement range. For the removal of this type of particles, the highest efficiency has been achieved by the ultrasonic method, the cleaning of which reduces the overall noise level by 0.49...0.67 dB.

Keywords: contamination, monitoring, ball bearings, cleaning, vibroacoustic characteristics, microstructure.

References

1. Losev A.V., Zhdanov A.A., Slominskaja E.N. Sravnitel'nyj analiz sushhestvujushhih metodov i vybor ochistki poverhnostej detalej aviacionnyh agregatov. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija*. H., HAI. 2003. Vip.. 1. C. 108-116.
2. Simmons C. H., Maguire D. E., Phelps N.. Manual of Engineering Drawing: British and International Standards, Fifth Edition, chronicles ISO and British Standards. Elsevier, 2020. 640p.
3. Dovidnik SKF z tehničnogo obslugovuvannja pidshipnikiv, PUB SR/P7 10001/1 RU. 2018. 452c.
4. ДСТУ ISO 15242-1:2016 Pidshipniki kochennja. Metodi vimirjuvannja vibracij. Chastina 1. Osnovni polozhennja (ISO 15242-1:2015, IDT).
5. ДСТУ ГОСТ 520:2014. Podshipniki kachenija. Obshhie tehničeskie uslovija (GOST 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ).
6. Centrifuge For Cleaning a Liquid, Patent № US7959547B2, Baumann, Dieter (Greven, DE), Meinig, Uwe (Walsrode, DE), United States, 14.06.2011.
7. Purification of renewable oils, Patent № US10961466B2, Doyle, Michael P. (Carmel, CA, US), Richards, Glenn (Bakersfield, CA, US), United States, 30.03.2021.
8. Smith. G. H. Escape to aqueous cleaning. (Cleaning with alkaline aqueous solutions). *Metal Finish*. 1991. № 9. P. 9 –11.
9. Bearing Flushing Compositions and Methods, Patent № US11021671B2, Eggen, Mark (Lake Worth, FL, US), Wooton, David L. (Bumpass, VA, US), Erdek, Paul J. (Lake Worth, FL, US), United states, 01.06.2021.

10. Kumarab A. S., Debbc S., Paulab S.. Ultrasonic-assisted abrasive micro-deburring of micromachined metallic alloys. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 66. P. 595-607. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.04.019>
11. Bearing cleaning machine, Application filed by Jiangsu Kunzhou Precision Electromechanical Co ltd, Patent Publication of № CN113714198A, China, 30.11.2021.
12. An ultrasonic cleaning method of bearing balls and device, Application PCT/SK1998/000002 events, InventorFrench Jozef SLOVÁK, Patent Publication of № WO1998031478A1, France, 23.07.1998.
13. Weller R.N., Brady J.M., Bernier W.E. Efficacy of ultrasonic cleaning // *Journal of Endodontic*. 1980. 6(9). PP. 740-743. [https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(80\)80185-3](https://doi.org/10.1016/S0099-2399(80)80185-3)
14. Fuchs F.J. Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application. *NASA. Marshall Space Flight Center, Aerospace Environmental Technology Conference*, 1995. P.369-378.
15. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. 29. P. 519–523. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004>
16. Stelmakh O.U., Kostyunik R.E., Shymchuk S.P., Kushchev O.V. Renovation of vibration characteristics of miniature ball bearings of precision mechanical systems of aerospace and military equipment. *Advances in mechanical engineering and transport*. 2024. 1(22). C. 314-319. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1374>
17. Awad S.B., Nagarajan R. Chapter 6 - Ultrasonic Cleaning. *Developments in Surface Contamination and Cleaning: Particle Deposition, Control and Removal*. 2010. P. 225-280. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7830-4.10006-4>
18. Vetrinurugan, Goodson M., Lim T. et al. Experimental Investigation of Ultrasonic and Megasonic Frequency on Cleaning of Various Disk Drive Components. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2013. 4(4). P. 174-177. DOI: 10.7763/IJCEA.2013.V4.288
19. Stelmakh A., Kostyunik R., Mikosianchyk O. et al. Improvement of operational parameters for precision rolling bearings by cleaning working surfaces from micro pollution of various nature. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10(1). P. A31-A40, doi: [10.21272/jes.2023.10\(1\).a5](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a5)
20. Verhaagen B., Rivas D.F. Measuring cavitation and its cleaning effect. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. 29. P. 619-628. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.03.009>

Ruslan Kostyunik – Candidate of Technical Sciences, senior researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: kostyunik_rus@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0232-9208>

Oksana Mikosianchyk - 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>

Oleksandr Stelmakh – Doctor of Technical Sciences, senior researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies of the National Aviation University, visiting professor of the Beijing Institute of Technology, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: stelmah@nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9132-6334>

Oleksiy Kushev – researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: stelmah@nau.edu.ua

Olena Kovalchuk – researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: elena_kovalchuk@bigmir.net