

Стельмах О.У.,^{1,2} Костюнік Р.Є.,¹ Шимчук С.П.,³ Кущев О.В.¹¹ Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна² Пекінський технологічний інститут, м. Пекін, Китай³ Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ АВІАЦІЙНИХ ШАРИКОПІДШИПНИКІВ ЗА ЇХ ВІБРОАКУСТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В статті приведено детальний аналіз впливу мікрозабруднень поверхонь підшипників кочення на віброакустичні показники. Досліджувались мініатюрні підшипники кочення як найбільш складні для очищення трибосистеми. В ході досліджень виявлено та висвітлено основні види дефектів, що виникають при експлуатації підшипників, які зумовлені саме мікрозабрудненнями різного роду. Детально зосереджено увагу та доведено, що форма, природа та розміри забруднень впливають на віброшвидкість та віброприскорення. Виконання теоретичних досліджень, розробка та апробація лабораторного обладнання сприяли розробці методики очищення робочих поверхонь досліджуваних шарикопідшипників. Як практичний результат роботи модернізовано лабораторний комплекс для оцінки ефективності очищення підшипників за віброакустичними параметрами та розроблено узагальнену методику очищення мініатюрних шарикопідшипників. Подальший розвиток отримали методи очищення авіаційних шарикопідшипників із застосуванням імпульсного магнітно-турбулентного та ультразвукового підходів як комплексний високопродуктивний метод очищення різного роду підшипників від забруднень металічної та неметалічної природи. Детально досліджено природу забруднень. Встановлено закономірності між розмірами забруднень та акустичними параметрами шарикопідшипників. Запропоновану систему моніторингу кулькових підшипників за віброакустичними показниками в перспективі планується впровадити на підприємствах, що виготовляють підшипники та ремонтних підприємствах як вхідний контроль та експрес-метод оцінювання їх працездатності.

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

ВСТУП

Трибосистеми кочення, зокрема нерозбірні шарикопідшипники, є ключовими та високовартісними компонентами більшості сучасних машин та механізмів. Недостатньо висока довговічність яких, згідно класифікації ISO 15243 [1], у більшості випадків обумовлена причинами втомного характеру. Від призначення та умов експлуатації залежить основна причина їхнього виходу з ладу [2,3]. Забруднення робочих поверхонь деталей і компонентів вузлів тертя та їх наявність у мастильному середовищі зумовлює перерозподіл контактних навантажень, що породжує сили вібрації в трибовузлах, котрі зазвичай супроводжується появою сторонніх шумів [4]. Це особливо актуально для прецизійних та мініатюрних шарикопідшипників, наявність в тракці кочення котрих мікро- субмікро- і навіть наночасток забруднення, через їхні малі розміри (зовнішнім діаметром менше 30 мм), здатні призвести до серйозних проблем у забезпеченні високої швидкодії і плавності руху, точності позиціонування і надійності, значного підвищення тертя, що може призвести до передчасного виходу їх з ладу.

Віброакустичні характеристики мініатюрних підшипників залежать від багатьох факторів: матеріалу, мікро- та макрогеометричних параметрів, чистоти поверхонь, кількості мастила та його властивостей, зовнішніх умов, тощо [5,6].

Під час експлуатації, забруднення у вигляді мікро-, субмікро- та наночасток значно ускладнює діагностику підшипників. Разом із вже існуючими дефектами це призводить до таких наслідків, як прискорене зношення, закупорка порожнин, заклинювання та перегрів деталей, підвищення сил тертя, кавітаційні явища, окиснення мастильного матеріалу та зниження його експлуатаційних властивостей. Ці фактори негативно впливають на технічні характеристики та надійність роботи вузлів тертя в реальних машинах і механізмах [7,8].

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Накопичений багаторічний досвід колективу авторів та інноваційний підхід до проведення експериментальних досліджень на підставі проведеного детального аналізу отриманих результатів професійної вібродіагностики і моніторингу (дефектів та різного типу пошкоджень, причин їх виникнення, характеру, часу зародження та подальшого розвитку) [7-11], дозволив визначити, що існуючі сучасні способи та нові вимірювальні системи мають на наш погляд певні недоліки, такі як:

-застосування електромеханічного приводу примусового обертання вільного кільця підшипника, що підлягає дослідженню, вносить похибку, що не дає уявлення про точність визначення присутності в тркті кочення підшипників мікрочасток забруднення та суттєво впливає на ступінь достовірності одержаних результатів;

-недостатня чутливість та неоднозначність аналізу результатів визначення присутності, розміру та кількості мікрочасток забруднень в дослідних підшипниках кочення штатними запрограмованими методиками діагностування та якісного контролю їх віброакустичних характеристик;

-відбракування підшипників на етапі вхідного контролю зазвичай проводиться при сталих швидкостях обертання (наприклад 1800 об/хв);

-відсутність методу та методики визначення критерію ступеню забруднення підшипників.

Тому основна проблема, на вирішення якої націлене дослідження, є встановлення відповідних закономірностей визначених в лабораторних умовах (в ході проведення експериментальної оцінки, детального аналізу та порівнянь отриманих результатів очищення мініатюрних підшипників кочення від забруднень) найбільш ефективними сучасними методами.

В умовах післяремонтної експлуатації високоточних трибосистем несвоєчасне та неефективне обслуговування високо відповідальних прецизійних трибосистем приведе до подальшого підвищення кількості забруднень на доріжках кочення навіть з розмірами у мікро-, субмікро- та нанометровому діапазоні внаслідок циклічних навантажень – це може спонукати появи та розвитку поверхневих мікротріщин, що в подальшому призводить до підвищення сил тертя, скорочення ресурсу та незапланованому виходу з ладу високовартісних мініатюрних швидкісних шарикопідшипників.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі лабораторних досліджень провести порівняльну оцінку ефективності очищення авіаційних підшипників за віброакустичними характеристиками із використанням імпульсного магнітно-турбулентного та ультразвукового методів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Випробування проводилися у стандартних лабораторних умовах з температурою 23-25°C, атмосферним тиском 760 ± 3 мм. рт. ст. та відносною вологістю 40-60%. Для досліджень використовувалися авіаційні підшипники двох типорозмірів, надані ДП "ЗМКБ "Івченко-Прогрес".

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 [13-20].

Очищення здійснювалося на розробленому та створеному, колективом авторів даної роботи, стенді ОПШ-01 та стандартному ультразвуковому обладнанні (рис.1) з використанням авіаційного гасу ТС-1 як мийного середовища, що попередньо очищався фільтрами тонкої очистки.

Апробація стенду ОПШ-01 на таких підприємствах, як ДП «Завод 410 ЦА», ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес» та ПАТ «Мотор Січ» шляхом очищення авіаційних шарикопідшипників ГТД показала хороші результати.

Процес очищення передбачав розконсервацію підшипників, їх розміщення в камері очищення, очищення з обертанням, розмагнічування та ліофілізацію.

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.

Розроблена узагальнена методика очищення мініатюрних шарикопідшипників:

1. Розконсервація шарикопідшипників як нових, так і тих, що були у використанні, відбувалась шляхом їх занурення в ексикатори, заповнені авіагасом ТС-1, де витримувались протягом 1-2 годин. Попереднє максимальне видалення консерваційного масла з їх робочих поверхонь шарикопідшипників виконувалось при неодноразового обертання його вільного кільця в різні сторони;

2. Пласке дно камери очищення, запобіжна прокладка та всі поверхні шаблону ретельно протирались спиртом та позиціонувались на відповідних ложементах розташованих на шаблоні, що встановлювався по центру робочої поверхні дна камери очищення;

3. Усі дослідні шарикопідшипники перед позиціонуванням перевірялися на вільне обертання зовнішніх кілець легким, без надмірних зусиль розкручуванням рукою. При не обертанні чи

заклинюванні виконується повторне занурення в мийоче середовище авіагасу. Після розташування усіх підшипників на шаблоні по центру дна камери закривалась штатна прозора кришка.

4. Після цього на лицевій панелі пристрою, шляхом встановлення відповідних вимикачів, проводиться вибір кількості і тривалості циклів, прямого та реверсивного режимів роботи:

- попередньо експериментально визначена тривалість очищення, що складала 2,5 хвилин у кожному з напрямків на 1 цикл роботи програми;

- перемикач режиму роботи стенду ОПШ-01 встановлювався в положення «Автомат», після чого натискалась кнопка «Пуск» та відбувався в автоматичному режимі процес очищення;

5. По завершенню програми очищення стенд автоматично вимикався та всі шарикопідшипники підлягали зніманню, перевертанню та встановленню на колишні посадкові місця, після чого кришка закривалась та здійснювалось повторне очищування підшипників за попередньо встановленою програмою.

6. Завершення процедури очищення свідчило автоматичне виключення роботи програми та відповідної індикації пристрою. Для подальшого розмагнічування і попереднього осушування шарикопідшипників шаблон разом з підшипниками обережно виймався з камери очищення і другу камеру та закривалась кришка.

7. На лицевій панелі пристрою натискалась кнопка «Розмагнічування», та в автоматичному режимі проводився процес розмагнічування всіх розташованих на шаблоні шарикопідшипників.

8. Після процедури попереднього осушування та розмагнічування здійснюється ліофілізація усіх робочих поверхонь шарикопідшипників мастильним середовищем, наприклад масло ПМ-10, шляхом вприскування масла в тракт кочення кожного з обох сторін.

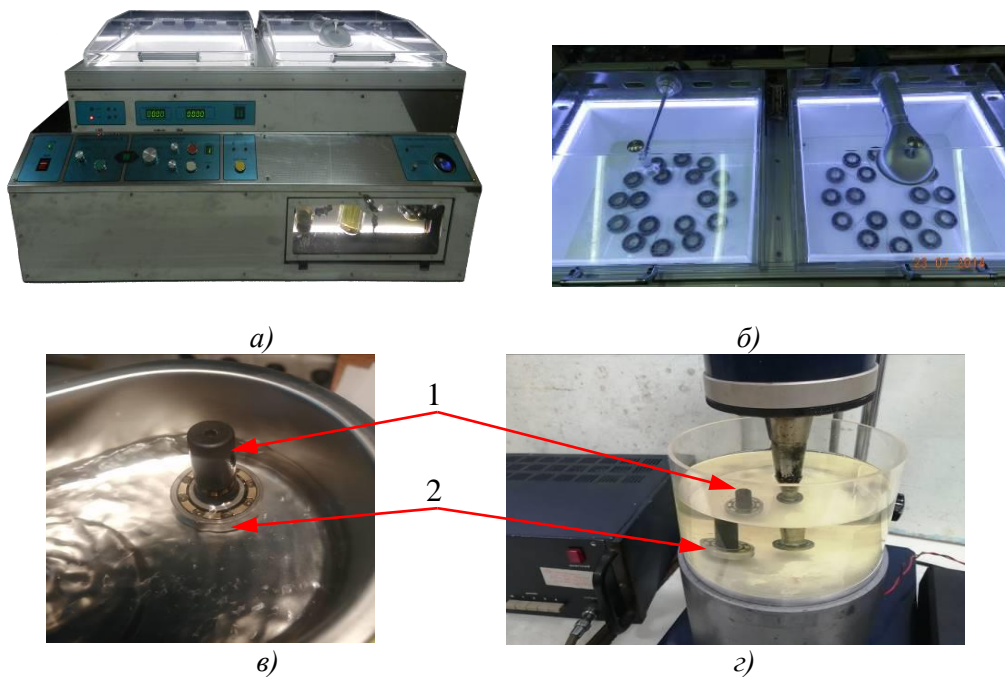


Рисунок 1. Зовнішній вигляд стенду та лабораторних пристроїв очищення шарикопідшипників:
а) – стенд передексплуатаційної підготовки підшипників ОПШ-01; б) – камера очищення та осушування; в) ультразвукова ванна фірми «Kaisi» (Китай); г) прилад «Ultrasonic generator» (Польща);
1 – ложемент; 2 – дослідний авіаційний шарикопідшипник

Для оцінки віброакустичних характеристик використовувався випробувально-вимірвальний комплекс для вібродіагностики, віброметр та шумомір (рис.2).



Рисунок 2. Зовнішній вигляд комплексу вхідного контролю шарикопідшипників

Визначення таких параметрів, як віброшвидкість та віброприскорення мініатюрних підшипників кочення виконувалось після їх розконсервації та очищення запропонованими методами за допомогою віброметра 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. Для підвищення чутливості та інформативності вимірювального модуль комплексу був модернізований додатковим переносним пристроєм віброметра GM63A, виносний датчик котрого встановлений у нижній частині ложементу позиціонування таким чином, що його чуттєва сторона направлена безпосередньо на зону поверхонь сепаратора та кульок. 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 кожного шарикопідшипника від 30 дБ до 130 дБ у діапазоні частот (31,5 Гц - 8 кГц). Це дало змогу розширити частотний діапазон вимірювання вібро- і акустичних характеристик шарикопідшипників та дало змогу робити попередню порівняльну оцінку поточних акустичних характеристик до та після їх очищення.

У ході очищення шарикопідшипників на дні камер стенду резервуарів лабораторних ультразвукових пристроїв накопичувалися різноманітні частки забруднення (металеві частинки різних розмірів, ворс, абразив, пісок та ін.). Після кожного циклу очищення мийна рідина фільтрувалася, а зібрані частинки аналізувалися за допомогою растрового електронного мікроскопу РЕМ-106И.

Після очищення магнітно-турбулентним методом на фільтрувальному елементі спостерігалися переважно такі типи забруднень, як: залишки старого змащення, неметалеві частки (абразив, пісок і та ін.), сталеві частки та стружка; частки та стружка з мідного сплаву та продукти окислення і органічні волокна (рис.3).

При використанні очищення поверхонь ультразвуковим методом, що відбувається в наслідок кавітаційних процесів [19] котрі виникають у рідинах під дією ультразвукових хвиль. Це дозволяє руйнувати міцні плівки забруднення, їх суцільність та адгезію у найбільш складних та затінених зонах підшипників. Такий спосіб очищення широко використовується у машинобудівній промисловості на прецизійному виробництві та приладобудуванні, також він довів свою ефективність як в радіоелектроніці так і в медицині.

На (рис.4) приведені мікрофотографії мікрочасток забруднень вилучених з тракту кочення партії мініатюрних шарикопідшипників ультразвуковим методом очищення. Переважну більшість видалених забруднень складала неметалеві частки (абразив, пісок та ін.), сталева стружка і пил, частки стружки, пил мідного сплаву, органічні волокна та залишки застарілого змащування.

Оцінка ефективності методів очищення мініатюрних шарикопідшипників визначалась за результатами досліджень їх віброакустичних характеристик на модернізованому вібродіагностичному випробувально-вимірювальному комплексі.

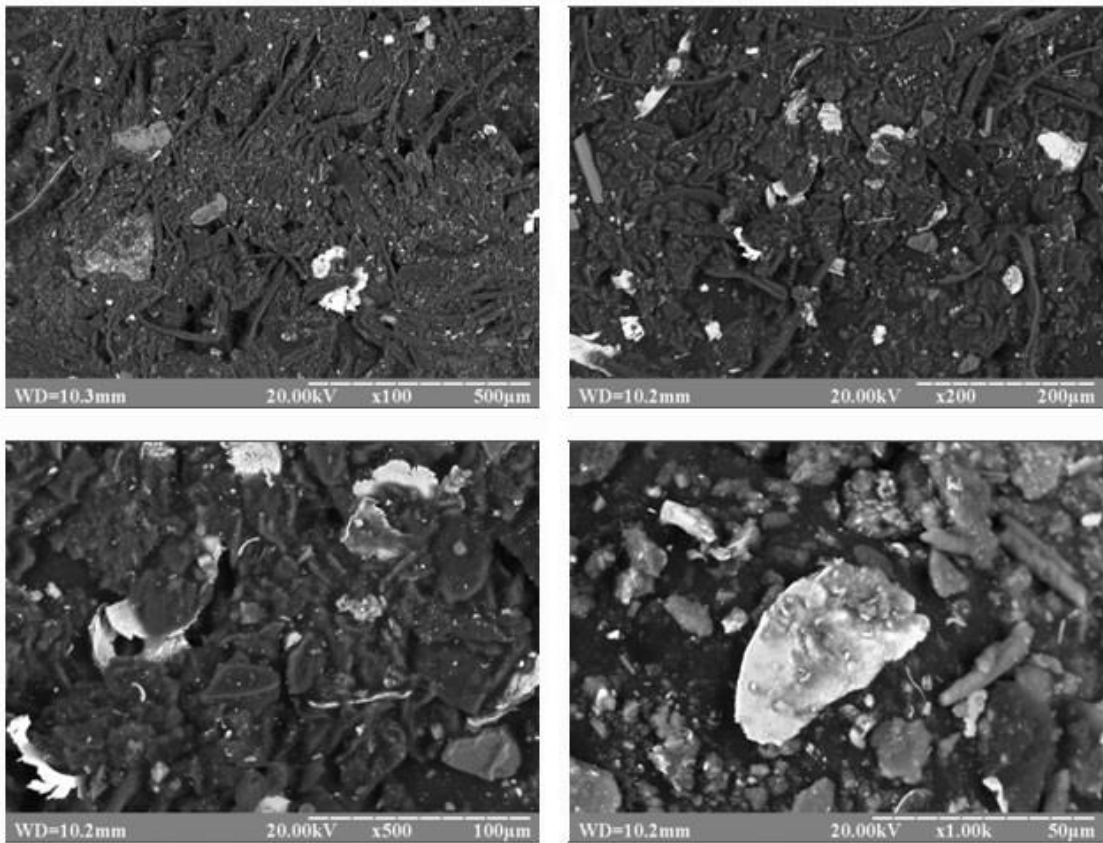


Рисунок 3. Мікрофотографії часток забруднень, видалених з трактів кочення імпульсним магнітно-турбулентним методом

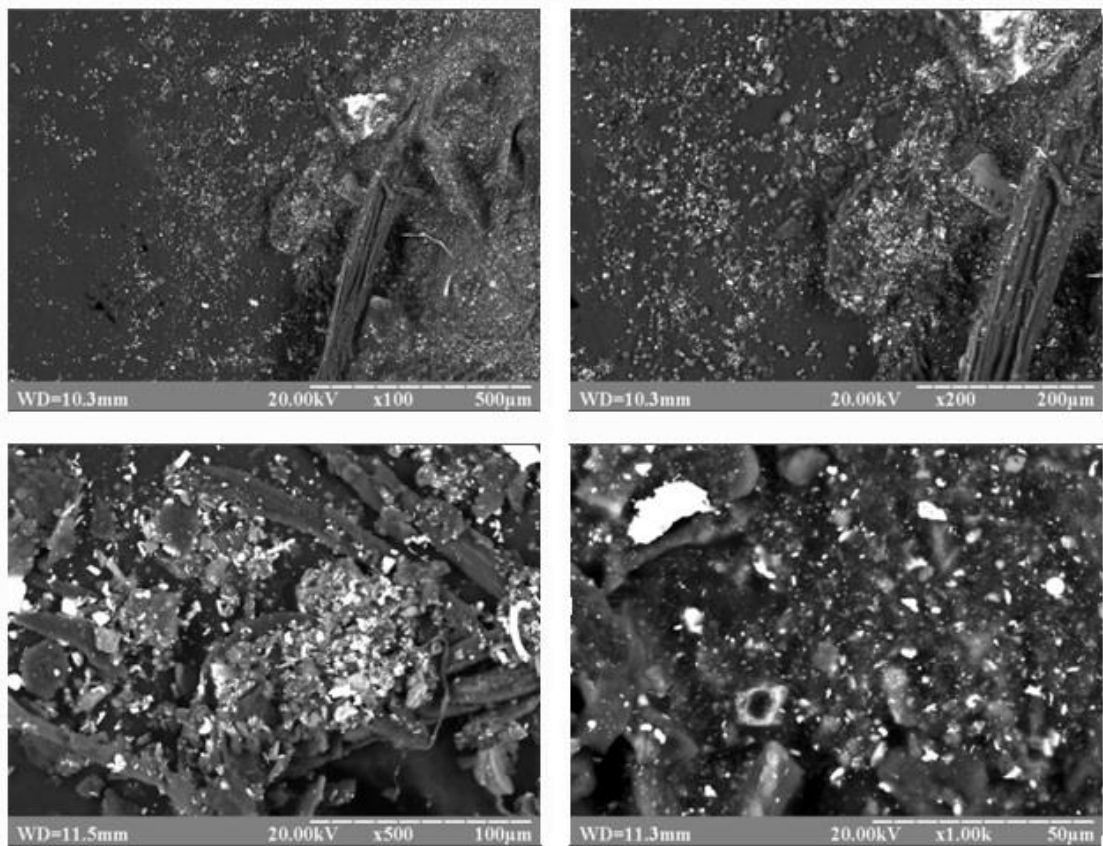


Рисунок 4. Мікрофотографії часток забруднень, видалених з трактів кочення ультразвуковим методом

За результатами досліджень будувались графічні залежності, у вигляді гістограм, для визначення впливу розміру та складу видалених різними методами очищення частинок забруднень. У процесі виконання порівняльної оцінки підшипників, у стані поставки ремонтним заводом та після кожного циклу очищення із попередньою заміною мастильного матеріалу, визначався загальний рівень шуму у діапазоні вимірювання 30-130 дБ (рис. 5), віброшвидкість (0,01-1 кГц) (рис. 6) та віброприскорення у двох частотних діапазонах (0,01-1 кГц (низькі частоти (НЧ)) та 1-15 кГц (високі частоти (ВЧ)) відповідно (рис. 7) та (рис. 8).

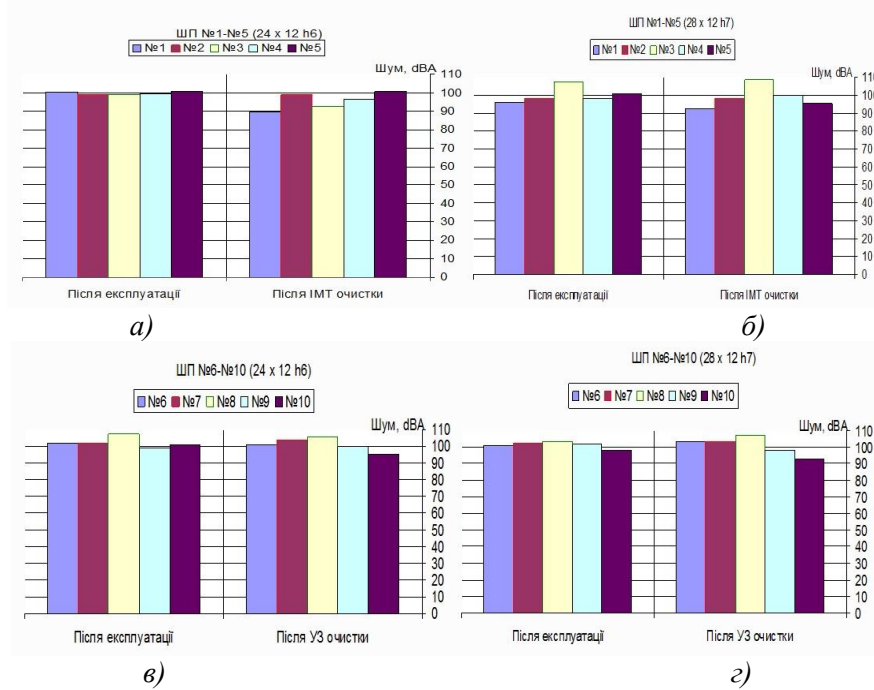


Рисунок 6. Вплив очищення на середнє значення загального рівня шуму:
 - магнітно-турбулентний метод *а)* серії №5-1000901Т2, *б)* серії №75-70001016Т2;
 - ультразвуковий метод *в)* серії №5-1000901Т2, *г)* серії №75-70001016Т2

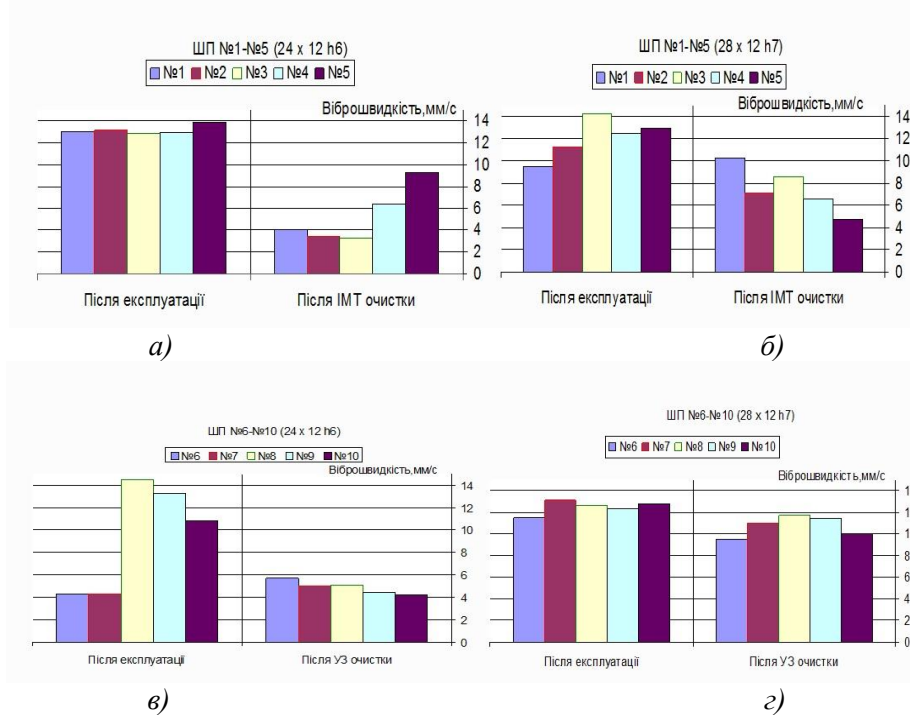


Рисунок 7. Вплив очищення мініатюрних шарикопідшипників на показники вимірювання віброшвидкості (НЧ):

- магнітно-турбулентний метод: *а)* серії №5-1000901Т2, *б)* серії №75-70001016Т2;
 - ультразвуковий метод: *в)* серії №5-1000901Т2, *г)* серії №75-70001016Т2

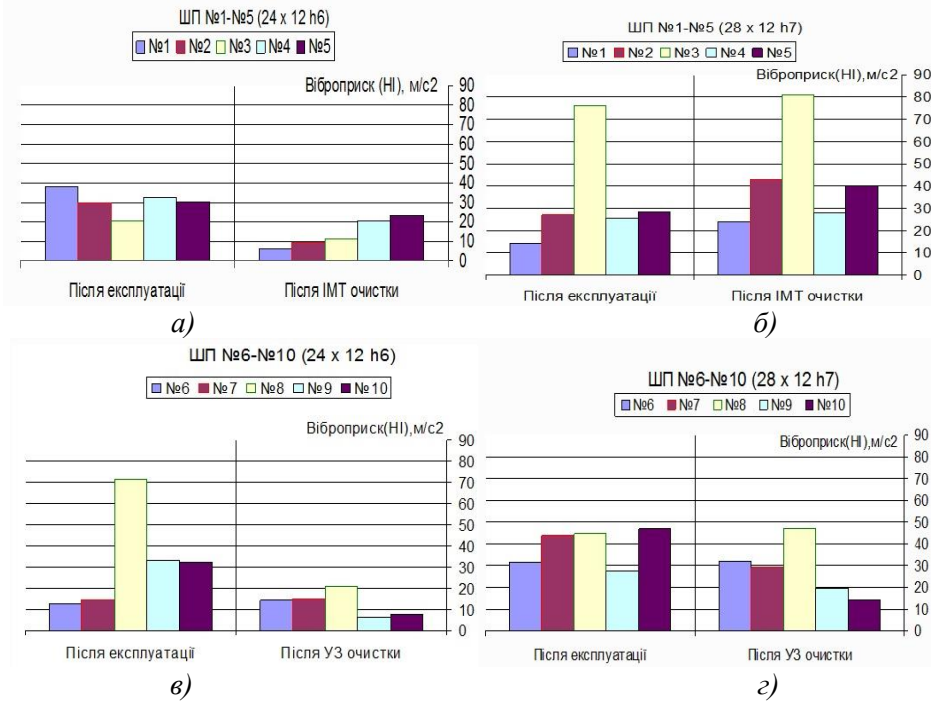


Рисунок 8. Вплив очищення шарикопідшипників на середнє значення віброприскорення (НЧ):
 - магнітно-турбулентний метод – а) серії №5-1000901Т2, б) серії №75-70001016Т2;
 - ультразвуковий метод – в) серії №5-1000901Т2, г) серії №75-70001016Т2

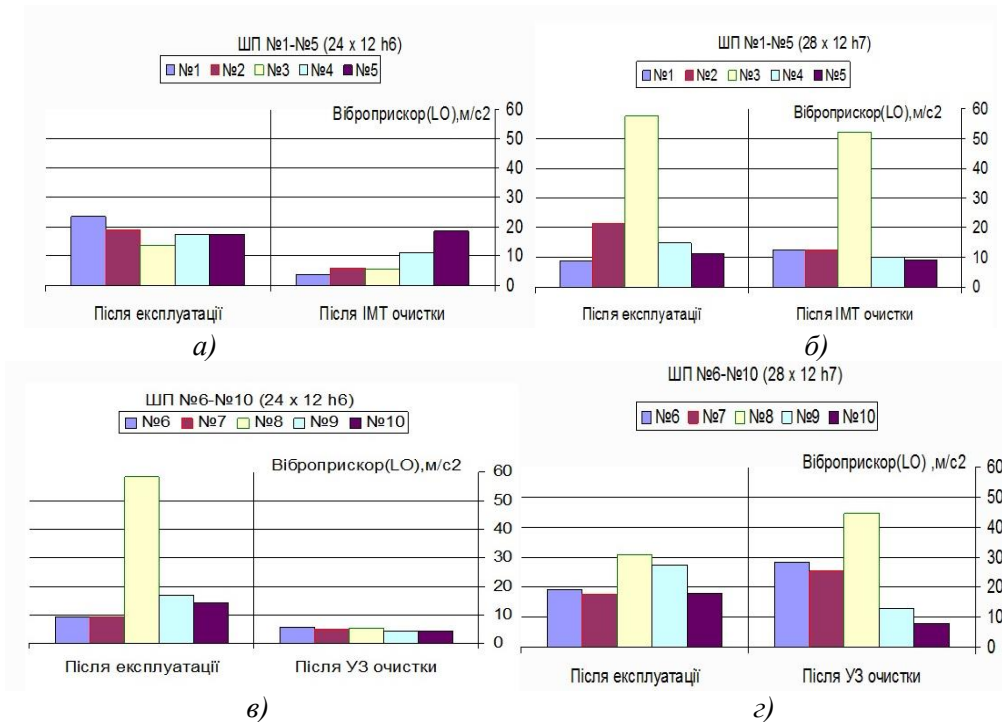


Рисунок 9. Вплив очищення шарикопідшипників на середнє значення віброприскорення (ВЧ):
 - магнітно-турбулентним методом – а) серії №5-1000901Т2, б) серії №75-70001016Т2;
 - ультразвуковим методом – в) серії №5-1000901Т2, г) серії №75-70001016Т2

Порівняльні експерименти показали, що магнітно-турбулентний метод виявився ефективнішим для видалення частинок розміром понад 1 мкм, знижуючи загальний рівень шуму підшипників серії №5-1000901Т2 зменшився на 4 дБ, а серії №75-70001016Т2 – зменшився на 1,2 дБ, тоді як

ультразвуковий метод краще видаляв мікрочастинки менше 1 мкм, зменшуючи рівень шуму на 0,49 - 0,67 дБ.

Із вищенаведених графіків можна припустити, що наявність мікрочастинок забруднень у значнішій кількості розміром меншим за 1 мкм більш впливає на показники віброприскорення у високочастотному діапазоні вимірювання, а саме – їх підвищення. Так, після проведення очищення шарикопідшипників 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 %.

ВИСНОВКИ

1. Мікрзабруднення є серйозною проблемою, яка може призвести до передчасного виходу з ладу підшипників кочення. Для продовження терміну служби підшипників необхідно вживати заходів щодо профілактики забруднення. Регулярний огляд і технічне обслуговування підшипників дозволять виявити проблеми на ранній стадії та уникнути серйозних наслідків.

2. Присутність у тракту кочення мініатюрних шарикопідшипників мікрочастинок забруднень розміром значно більшим 1 мкм, призводить до підвищення показників віброприскорення у низькочастотному діапазоні вимірювання. При цьому, як показали результати, що очищення імпульсно-магнітно-турбулентним методом є найбільш ефективним методом при видаленні крупних забруднень, що дозволяє зменшити загальний рівень шуму на 1,2...4 дБ.

3. Наявність у більшій кількості мікрочастинок забруднень розміром набагато меншим за 1 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, при цьому загальний рівень шуму знижується на 0,49...0,67 дБ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Міжнародний стандарт ISO 15243:2017, «Підшипники кочення. Ушкодження та відмови. Терміни, характеристики та причини».
2. 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*. Х., ХАІ. 2003. Вип. 1. С. 108-116.
3. 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.
4. Довідник SKF з технічного обслуговування підшипників, PUB SR/P7 10001/1 RU. 2018. 452с.
5. ДСТУ ISO 15242-1:2016 Підшипники кочення. Методи вимірювання вібрації. Частина 1. Основні положення (ISO 15242-1:2015, IDT).
6. ДСТУ ГОСТ 520:2014. Подшипники качения. Общие технические условия (ГОСТ 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ).
7. О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, О.В. Кушев, С.П. Шимчук. Аналіз шляхів покращення якості очищення мініатюрних підшипників кочення для прецизійних та авіакосмічних систем на ремонтному виробництві. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2024, №77. С 56-60. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2024.77>
8. Стельмах О.У., Костюнік Р.Є., Шимчук С.П., Кушев О.В. Реновація віброхарактеристик мініатюрних шарикопідшипників прецизійних механічних систем авіакосмічної і військової техніки. Науковий журнал №1 (22). «Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті» Луцьк, 2024. С 314-320.
9. Centrifuge For Cleaning a Liquid, Patent № US7959547B2, Baumann, Dieter (Greven, DE), Meinig, Uwe (Walsrode, DE), United States, 14.06.2011.
10. Purification of renewable oils, Patent № US10961466B2, Doyle, Michael P. (Carmel, CA, US), Richards, Glenn (Bakersfield, CA, US), United States, 30.03.2021.
11. Smith. G. H. Escape to aqueous cleaning. (Cleaning with alkaline aqueous solutions). *Metall Finish*. 1991. № 9. P. 9 –11.
12. 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.
13. 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>
14. Bearing cleaning machine, Application filed by Jiangsu Kunzhou Precision Electromechanical Co ltd, Patent Publication of № CN113714198A, China, 30.11.2021.

15. An ultrasonic cleaning method of bearing balls and device, Application PCT/SK1998/000002 events, Inventor French Jozef SLOVÁK, Patent Publication of № WO1998031478A1, France, 23.07.1998.
16. 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)
17. Fuchs F.J. Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application. NASA. *Marshall Space Flight Center, Aerospace Environmental Technology Conference*, 1995. P.369-378.
18. 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> ISSN 03702197 *Problems of friction and wear*, 2024, 3 (104) 109
19. 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>
20. Vetrimurugan, 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. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2013.V4.288>

REFERENCES

1. Mizhnarodnyi standart ISO 15243:2017, «Pidshypnyky kochennia. Ushkodzhennia ta vidmovy. Terminy, kharakterystyky ta prychny».
2. Losev A.V., Zhdanov A.A., Slomynskaia E.N. Sravnytelnyi analiz sushchestvuiushchykh metodov y vybor ochystky poverkhnosti detalei avyatsyonnykh ahrehatov. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia. Kh., KhAI*. 2003. Vyp.. 1. S. 108-116.
3. 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.
4. Dovidnyk SKF z tekhnichnoho obsluhovuvannia pidshypnykiv, PUB SR/P7 10001/1 RU. 2018. 452s.
5. DSTU ISO 15242-1:2016 Pidshypnyky kochennia. Metody vymiriuvannia vibratsii. Chastyna 1. Osnovni polozhennia (ISO 15242-1:2015, IDT).
6. DSTU HOST 520:2014. Podshypnyky kachenia. Obshchye tekhnicheskyye uslovia (HOST 520-2011, IDT; ISO 492:2002, NEQ; ISO 199:2005, NEQ).
7. O.U. Stelmakh, R.Ie. Kostyunik, O.V. Kushchev, S.P. Shymchuk. Analiz shliakhiv pokrashchennia yakosti ochyshchennia miniatiurnykh pidshypnykiv kochennia dlia pretsyziinykh ta aviakosmichnykh system na remontnomu vyrobnytstvi. *Mizhvuzivskyi zbirnyk «Naukovi notatky»*. Lutsk, 2024, №77. S 56-60. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2024.77>
8. Stelmakh O.U., Kostyunik R.Ie., Shymchuk S.P., Kushchev O.V. Renovatsiia vibrokharakterystyk miniatiurnykh sharykopidshypnykiv pretsyziinykh mekhanichnykh system aviakosmichnoi i viiskovoi tekhniky. *Naukovyi zhurnal №1 (22). «Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti»* Lutsk, 2024. S 314-320.
9. Centrifuge For Cleaning a Liquid, Patent № US7959547B2, Baumann, Dieter (Greven, DE), Meinig, Uwe (Walsrode, DE), United States, 14.06.2011.
10. Purification of renewable oils, Patent № US10961466B2, Doyle, Michael P. (Carmel, CA, US), Richards, Glenn (Bakersfield, CA, US), United States, 30.03.2021.
11. Smith. G. H. Escape to aqueous cleaning. (Cleaning with alkaline aqueous solutions). *Metall Finish*. 1991. № 9. P. 9–11.
12. 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.
13. Kumarab A.S., Debb 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>
14. Bearing cleaning machine, Application filed by Jiangsu Kunzhou Precision Electromechanical Co Ltd, Patent Publication of № CN113714198A, China, 30.11.2021.
15. An ultrasonic cleaning method of bearing balls and device, Application PCT/SK1998/000002 events, Inventor French Jozef SLOVÁK, Patent Publication of № WO1998031478A1, France, 23.07.1998.
16. 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)
17. Fuchs F.J. Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application. NASA. *Marshall Space Flight Center, Aerospace Environmental Technology Conference*, 1995. P.369-378.
18. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. 29. P. 519–523. *Problems of friction and wear*, 2024, 3 (104) 109 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.004>

19. 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>

20. 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. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2013.V4.288>

Stelmakh O.U., Kostyunik R.E., Shymchuk S.P., Kushchev O.V. Assessment of the efficiency of the cleaning methods of aviation ball bearings according to their vibroacoustic characteristics

The article presents a detailed analysis of the influence of micropollution of rolling bearing surfaces on vibroacoustic indicators. Miniature rolling bearings were studied as the most difficult to clean the tribosystem. In the course of research, the main types of defects that occur during the operation of bearings, which are caused by micropollution of various kinds, were identified and highlighted. The attention was focused in detail and it was proved that the shape, nature and size of impurities affect the vibration speed and vibration acceleration. Carrying out theoretical research, development and testing of laboratory equipment contributed to the development of a method for cleaning the working surfaces of the investigated ball bearings. As a practical result of the work, the laboratory complex for evaluating the efficiency of cleaning bearings by vibroacoustic parameters was modernized and a generalized method of cleaning miniature ball bearings was developed. The methods of cleaning aircraft ball bearings with the use of pulsed magnetic-turbulent and ultrasonic approaches were further developed as a comprehensive high-performance method of cleaning various types of bearings from metallic and non-metallic contamination. The nature of pollution was investigated in detail. Regularities between the sizes of contamination and the acoustic parameters of ball bearings have been established. The proposed system for monitoring ball bearings by vibroacoustic indicators is planned to be implemented in the future at enterprises that manufacture bearings and repair enterprises as an input control and an express method of assessing their performance.

Key words: contamination, monitoring, vibration diagnostics, miniature ball bearings, cleaning, microstructure, vibroacoustic characteristics.

СТЕЛЬМАХ Олександр Устимович, старший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій Національного авіаційного університету, запрошений професор Пекінського технологічного інституту, e-mail: stelmah@nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9132-6334>

КОСТЮНИК Руслан Євгенович, старший науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій Національного авіаційного університету, e-mail: kostynik_rus@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0232-9208>

ШИМЧУК Сергій Петрович, доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету, e-mail: s.shimchuk@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1293-560X>

КУШЕВ Олексій Вікторович, науковий співробітник лабораторії Нанотриботехнологій Національного авіаційного університету, e-mail: stelmah@nau.edu.ua

Oleksandr STELMAKH, senior researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies of the National Aviation University, visiting professor of the Beijing Institute of Technology, e-mail: stelmah@nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9132-6334>

Ruslan KOSTYUNIK, senior researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies of the National Aviation University, e-mail: kostynik_rus@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0232-9208>

Serhii SHYMCHUK, associate professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering of the Lutsk National Technical University, e-mail: s.shimchuk@lntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1293-560X>

Oleksiy KUSCHEV, researcher of the Laboratory of Nanotribotechnologies of the National Aviation University, e-mail: stelmah@nau.edu.ua

DOI 10.36910/automash.v2i23.1543