

УДК 621.891

DOI 10.36910/775.24153966.2024.78.4

**Р.Є.Костюнік¹, О.О.Мікосянчик¹, О.В. Куцев¹, С.П. Шимчук², О.Г.Ковальчук¹,
В.С.Бондар¹**

¹ Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

² Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЧИЩЕННЯ АВІАЦІЙНИХ МІНІАТЮРНИХ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

В роботі наведені результати гранулометричного та фізико-хімічного складу мікрочасток забруднень вилучених з тракту кочення двох партій двох різних типорозмірів мініатюрних шарикопідшипників вибраними методами очищення. Дослідження видалених забруднень виконувались за допомогою лазерного скануючого мікроскопа ЛСДФМП та растрового електронного мікроскопа РЕМ-106И. Детальний аналіз показав, що вилучені мікрочастки мали такі типи забруднень як неметалеві частки, сталеву стружку та пил, пил мідного сплаву, органічні волокна та застарілі залишки мастильного матеріалу, розміри котрих були в межах від декількох нанометрів до 50 мкм. На основі результатів порівняльних лабораторних досліджень запропоновано новий метод комплексного очищення мініатюрних підшипників кочення під дією комбінованих імпульсних змінних магнітних, турбулентних та ультразвукових полів.

Ключові слова: зношування, імпульсно магнітно-турбулентне очищення, ультразвук, підшипники кочення, зношування

R. Kostiunik, O. Mykosianchyk, O. Kushev., S. Shymchuk, O. Kovalchuk, V. Bondar

DEVELOPMENT OF THE CLEANING METHOD OF AVIATION MINIATURE ROLLING BEARINGS

The paper presents the results of the granulometric and physico-chemical composition of microparticles of contaminants removed from the rolling path of two batches of two different sizes of miniature ball bearings by selected cleaning methods. Examination of the removed contaminants was carried out using a laser scanning microscope LSDFMP and a scanning electron microscope REM-106Y. Detailed analysis showed that the extracted microparticles had the following types of contaminants: non-metallic particles, steel shavings and dust, copper alloy dust, organic fibers and aged lubricant residues, which ranged in size from a few nanometers to 50 microns. Based on the results of comparative laboratory studies, a new method of comprehensive cleaning of miniature rolling bearings under the action of combined pulse variable magnetic, turbulent and ultrasonic fields is proposed.

Key words: wear, pulsed magnetic-turbulent cleaning, ultrasound, rolling bearings, wear

Вступ. Мікрзабруднення робочих поверхонь є одною з найпоширеніших причин передчасного виходу з ладу підшипників кочення. За результатами власних досліджень компанії SKF [1] та аналізу пошкоджень підшипників встановлено, що чистота робочих поверхонь деталей та вузлів тертя суттєво впливає на подальше зношування робочих поверхонь. Це безпосередньо пов'язано з потраплянням в зону контакту мікрочасток забруднень за наступних умов: при збиранні, неякісному обслуговуванні, недостатній якості та кількості мастильного середовища, неефективності ущільнень та ін. Навіть найменші частинки пилу, бруду або інших забруднень, що потрапляють всередину підшипників, можуть призвести до серйозних наслідків.

Підшипник кочення має відносно просту конструкцію (рис.1). Разом з тим, з точки зору трибології та з огляду на особливості конструкції – підшипник це складна трибосистема [2], що складається із значної кількості вузлів тертя. Будь-яке невиконання розробниками чи обслуговуючими працівниками ряду обов'язкових вимог до якості виготовлення деталей підшипника, монтажу та ін., можуть викликати наступні механізми ушкодження [3,4]:

- абразивне зношування: тверді частинки діють як абразив, дряпаючи поверхні доріжок кочення та тіл кочення. Це призводить до збільшення шорсткості, втрати міцності та підвищеного тертя;

- заклинювання: більші частинки можуть застрягти між елементами підшипника, блокуючи їх рух і викликаючи підвищені навантаження, що призводять до деформації та руйнування;

- втрата мастила: забруднення можуть змішуватися з мастилом, погіршуючи його властивості та знижуючи ефективність змащування. Це призводить до підвищеного тертя, перегріву та прискореного зношування;

- електрохімічна корозія: у деяких випадках, забруднення можуть сприяти виникненню електрохімічної корозії, що особливо небезпечно для підшипників, які працюють в агресивних середовищах.

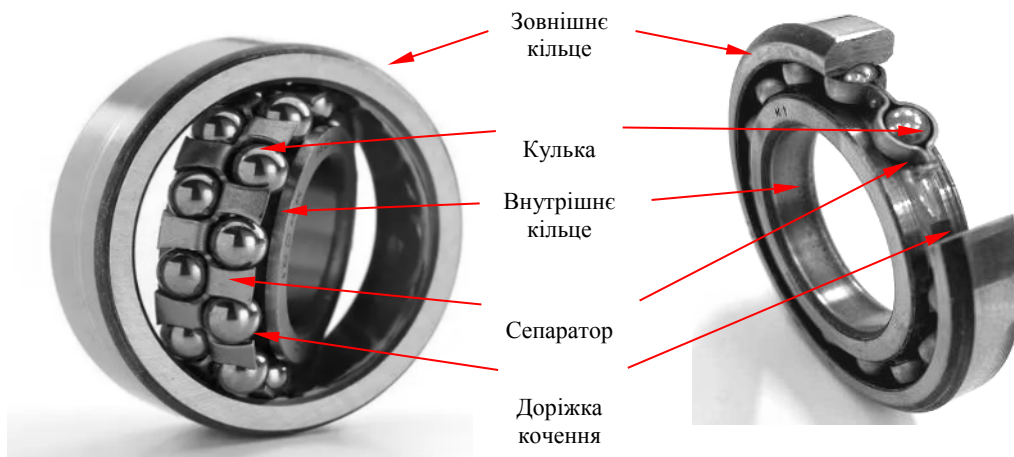


Рис. 1. Зовнішній вигляд підшипників кочення

Все це може призвести до підвищення тертя, збільшення споживаної енергії, внаслідок чого пошкоджені робочі поверхні підшипника створюють додатковий шум і вібрацію, що зменшує термін роботи, виходу з ладу та серйозних аварій. Тому для продовження терміну служби підшипників вживають заходи щодо профілактики забруднень.

На сьогодні проблема забезпечення чистоти робочих поверхонь підшипників вирішується безпосередньо в процесі виробництва та експлуатації спеціальними методами та засобами очищення деталей та спеціалізованою системою контролю якості й чистоти [5-7].

Ретельна очистка перед установкою всіх деталей підшипникового вузла від забруднень традиційно відбувається лужними водними розчинниками [8], різноманітними розчинами та композиціями, котрі дозволяють без розбирання механізму проводити планову заміну мастильного середовища [9]. Створюються нові технології очищення поверхонь від задирих механічним та гідравлічним методами, а також за допомогою ультразвуку [10].

Найпоширенішими та найефективнішими сучасними методами очищення є ультразвукові ванни [11-15], котрі в рідині викликають явище кавітації [16]. Поряд з цим, наш досвід роботи показав, що при очищенні мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників в певних випадках працівники стикаються з труднощами недостатньої якості видалення з трактів кочення мікро- та субмікро- забруднень. Причиною цього є одновекторний характер дії активуючих і руйнуючих забруднення полів і сил, статичність об'єкту очищення та його конструктивні особливості, що сприяють утворенню певних зон затінення робочих поверхонь елементами конструкції. Це призводить до того, що ефективно та якісно очистити всі поверхні шарикопідшипника дуже складно без детального розбирання, а нерозбірних і зовсім не можливо.

Існуючі методи та способи очищення [8, 18], з примусовим контактним обертанням чи переміщенням, знижують час дії ультразвукових коливань та миючої рідини на робочі поверхні деталей шарикопідшипника, а складний механічний привод може стати джерелом надходження додаткового забруднення.

Все це призводить до незначної ефективності таких пристроїв та методів при очищенні мініатюрних та прецизійних підшипників кочення.

Постановка завдань дослідження: полягає у детальному аналізі переваг сучасних методів очищення, шляхом порівняльної оцінки результатів досліджень, визначення відповідних закономірностей та пошук можливих шляхів підвищення ефективності, якості, надійності та ресурсу прецизійних деталей відповідальних вузлів тертя авіаційної та військової техніки.

Викладення основного матеріалу статті. Проблему вилучення мікро- та субмікро- феромагнітних часток забруднень із тракту кочення шарикопідшипників дозволяє вирішити розроблений та апробований на авіаремонтних заводах, колективом авторів даної роботи, стенд передексплуатаційної підготовки підшипників ГТД (ОПШ-01) [8, 18], в основу якого покладено ідеї збудження та видалення феромагнітних часток забруднень з поверхонь шляхом дії на них імпульсних електромагнітних полів (ІМП) [19-22]. Для експериментальних досліджень

ефективності очищення використовувались авіаційні шарикопідшипники двох типорозмірів 24×12×6 мм (серії №5-1000901Т2) та 28×12×7 мм (серії №75-70001016Т2), надані ремонтним підприємством після експлуатації. В якості миючого середовища використовувався авіаційний гас ТС-1, попередньо очищений фільтрами тонкої очистки. Зовнішні стандартні умови лабораторних випробувань відповідали: температура 23-25°C, атмосферний тиск 760±3 мм рт.ст., відносна вологість 40-60 %.

Порівняльна оцінка ефективності методу визначалась в однакових зовнішніх умовах, з використанням ультразвукового методу очищення 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 занурюваним випромінювачем максимальною потужністю 100 W, де ванною слугувала технологічна лабораторна ємність з відповідним миючим розчином.

Із урахуванням типорозмірів досліджуваних шарикопідшипників (щодо їх посадкових діаметрів внутрішніх кілець), для можливості позиціонування їх на робочих поверхнях резервуарів вищезазначених приладів та пристроїв, у більш ефективних зонах виникнення акустичних течій і кавітації, виготовлялись спеціальні ложементи (рис. 2).



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

По завершенні процесу очищення двох партій авіаційних підшипників 24×12×6 мм та 28×12×7 мм, в миючій рідині ТС-1 за розробленою узагальненою методикою очищення [23], стенду ОПШ-01 на плоскому дні першої його камери, в області максимальних напружень магнітних полів та на дні резервуарів з миючою рідиною (пристрої УЗ очищення (Рис.2)) скупчувалась значна кількість часток забруднень різного розміру і природи. Після цього видалялись мікрзабруднення шляхом зливання та фільтрації миючої рідини (ТС-1) через фільтроелемент тонкої очистки для подальшого аналізу.

Процес подальшого розмагнічування і попереднього осушування шарикопідшипників виконувався таким чином: шаблон разом з підшипниками обережно виймався з камери очищення і встановлювався в другу камеру та закривався кришкою. Після здійснювалась ліофілізація усіх робочих поверхонь шарикопідшипників мастильним середовищем, шляхом вприскування масла в тракт кочення кожного з обох сторін.

Видалені мікрочастки забруднення досліджувалися на предмет встановлення їх середнього розміру, гранулометричного, фазового та хімічного складу на лазерному скануючому мікроскопі ЛСДФМП та растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И (рис. 3).

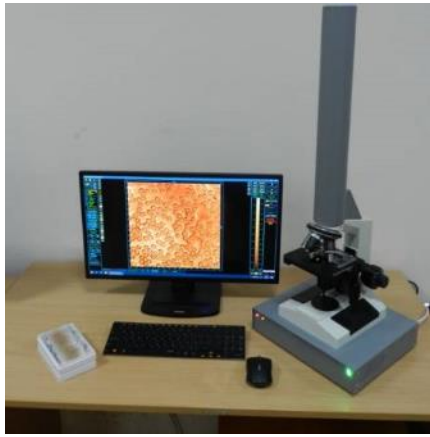
Оцінку кількості механічних домішок на одиницю об'єму проводили шляхом виведення середнього арифметичного значення, базуючись на результатах не менше трьох вимірів, що обчислюються за формулою (1):

$$X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1)$$

де X_i – результати i -того вимірювання; n – кількість проведених вимірювань.

При цьому стандартне відхилення S , що відображає величину середньої квадратичної помилки, складає (2):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{cp} - X_i)^2}{n-1}} \quad (2)$$



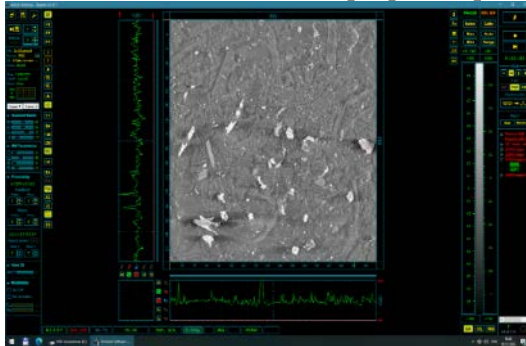
а)



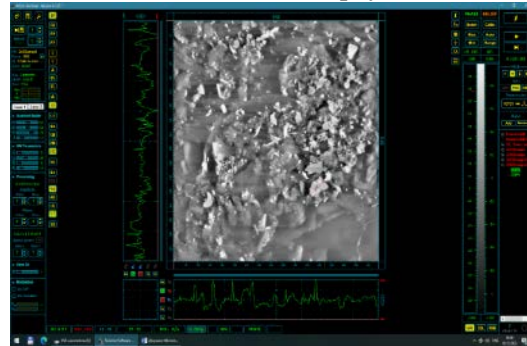
б)

Рис. 3. Зовнішній вигляд лабораторних приладів: а) лазерний скануючий мікроскоп ЛСДФМП; б) растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И

Підрахунок частинок забруднень на лазерному скануючому мікроскопі ЛСДФМП (рис.4) проводиться за допомогою штатної програми пристрою та відповідно до стандарту [23].



а)



б)

Рис.4. Зовнішній вигляд інтерфейсу програмного забезпечення ЛСДФМП в процесі визначення мікрочасток забруднення, що були видалені з підшипників: а) УЗ методом; б) ІМТ методом очищення

Одиничні відхилення окремих вимірів від середнього арифметичного (абсолютна помилка одиничного виміру) ε визначається (3):

$$\varepsilon_i = X_{cp} - X_i \quad (3)$$

Абсолютна помилка ε_a складає (4):

$$\varepsilon_a = t_a \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

де t_a – коефіцієнт Стюдента.

Максимум густини розподілу випадкової помилки буде відповідати середньому значенню X_{cp} усіх результатів вимірювань, що опишеться кривими Гауса.

Перед визначенням лінійних розмірів часток мікрозабруднень на мікроскопі РЕМ-106И виконувалась підготовка дослідних зразків випробувань. На спеціальній двосторонній струмопровідній вуглецевій стрічці, виробництва «Nisshin emco., ltd.», для растрової електронної мікроскопії, розміщувалися видалені за однаковою (за етапами та часом роботи) методикою очищення принципово різними методами із шарикопідшипників та екструдовані з миючої рідини частки забруднення, після чого досліджувалась кількість часток забруднення до груп та їх розмірів на певній встановленій площі.

Аналіз гранулометричного складу забруднень проводився з використанням методу розподілення розмірів зерен по розмірам хорд. Для цього на отриманих зображеннях частинок забруднень із однаковими збільшеннями проводився ряд січних ліній довжиною, відповідній масштабній лінійці (рис. 5).

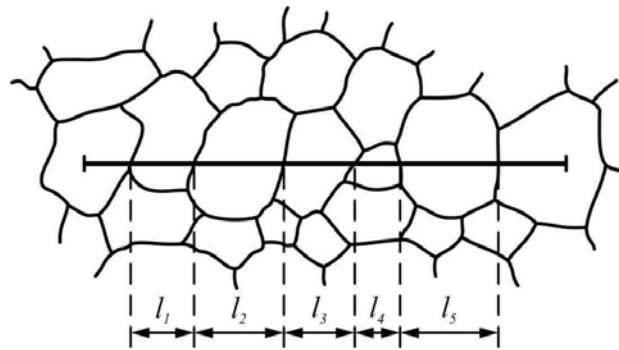


Рис.5. Метод вимірювання хорд, що утворились через перетин січною меж часток забруднень

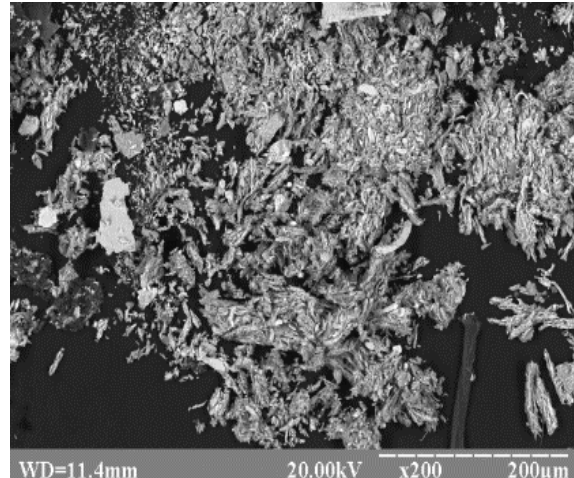
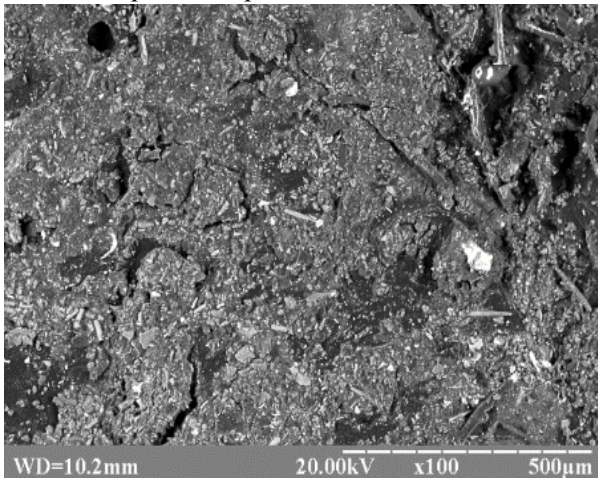
Після цього вимірювалися довжини хорд l , що утворені перетином січної з межами частинок забруднень. Хорди розбиваються на розмірні групи з кроком за формулою:

$$H=l_{max}/K, \quad (5)$$

де K – число груп розбиття.

Визначалося число хорд в кожній розмірній групі P_i та щільність числа хорд: $P_{Li} = P/l$. Після цього визначалось число зерен в одиниці об'єму N_{Vi} , що відносяться до i -ої розмірної групи.

Вилучені з підшипників кочення мікрозабруднення сортувалися по методу очищення (імпульсно магнітно-турбулентний чи ультразвуковий). Після чого досліджувалися на електронному мікроскопі. Приклади фотографій вилучених забруднень на різних збільшеннях наведені на рис. 6 та рис. 7.



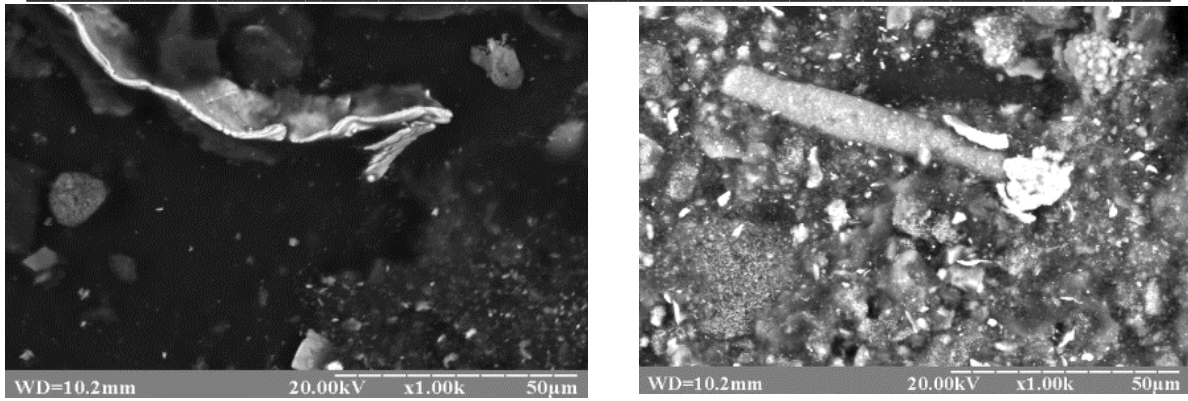


Рис.6. Зовнішній вигляд мікрозабруднень, видалених магнітно-турбулентним методом

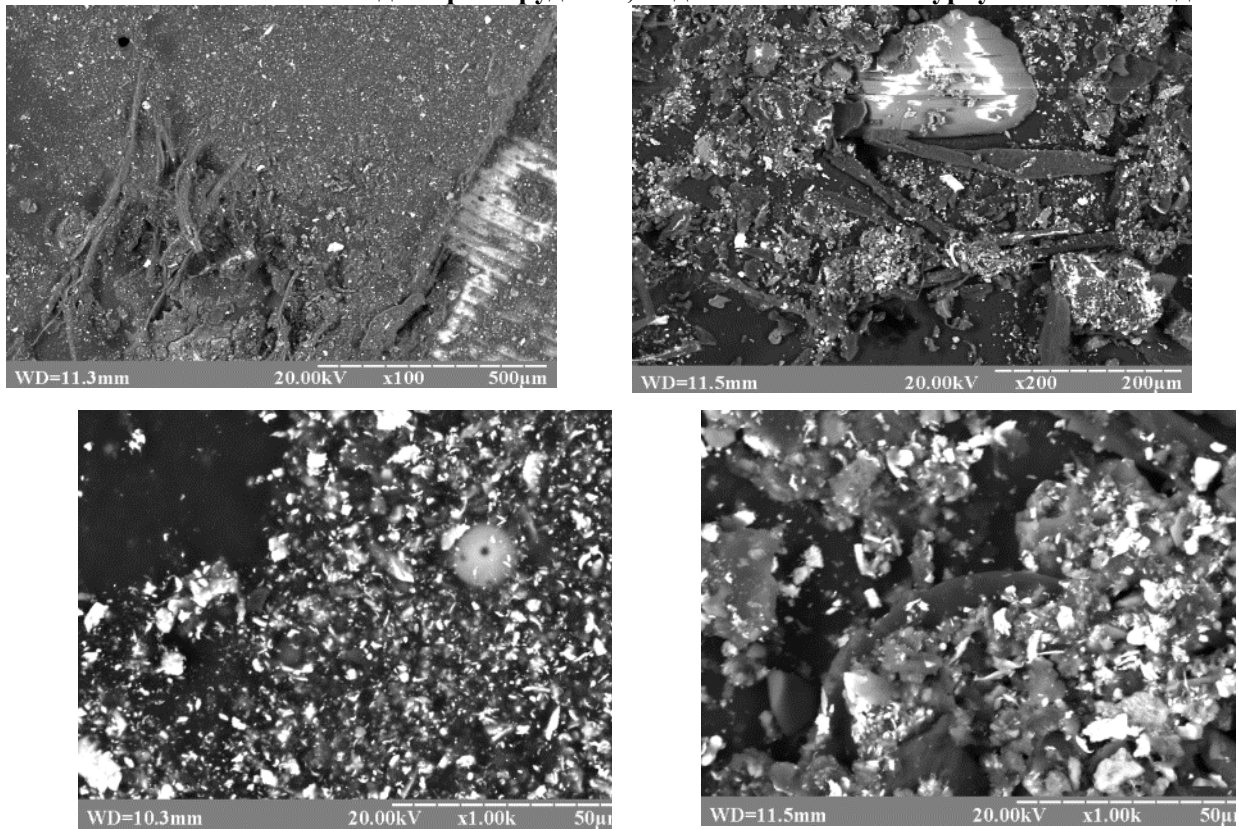
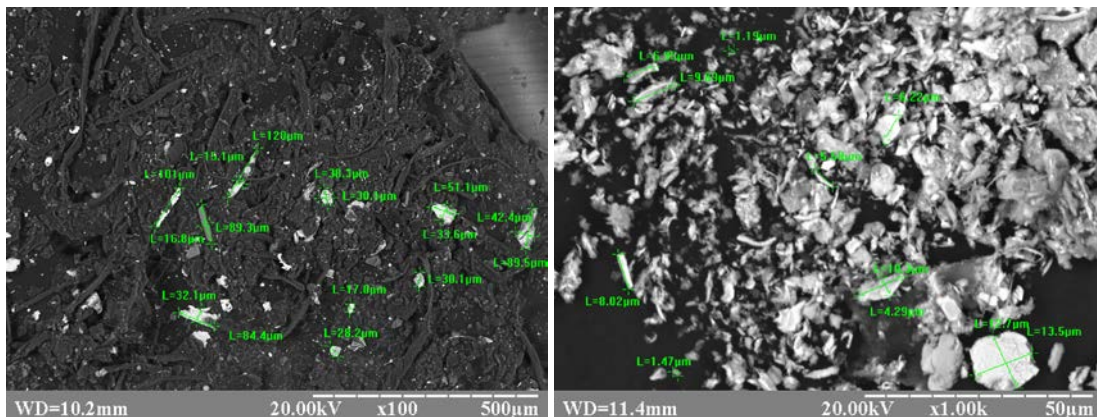


Рис.7. Зовнішній вигляд мікрозабруднень, видалених ультразвуковим методом

Вимірювання лінійних розмірів видалених часток мікрозабруднень проводилося відповідно до вищезазначеної методики (рис.8).



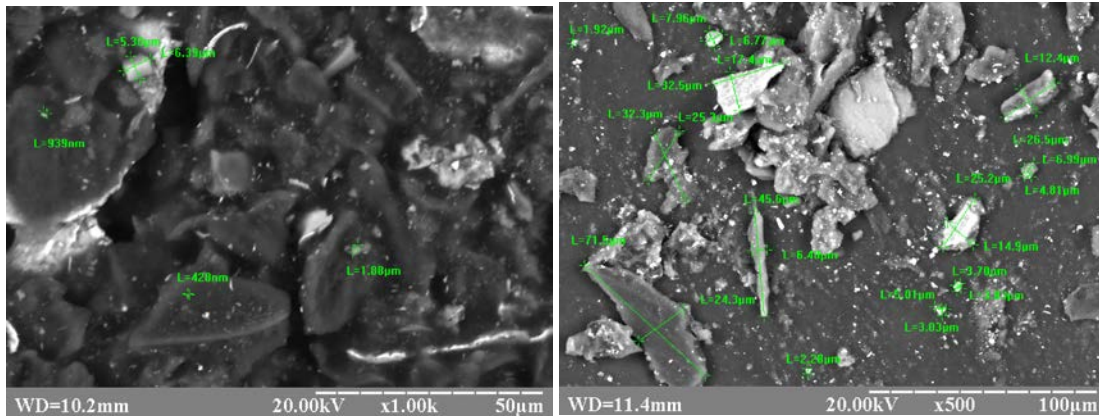


Рис.8. Вимірювання лінійних розмірів видалених мікрочастинок забруднень

Аналітична обробка отриманих результатів дозволила визначити гранулометричний склад видалених часток забруднень у залежності від використаного методу проведення очищення. Сформовано масив даних, за яким побудовано графік залежності кількості часток мікрозабруднень від їх лінійних розмірів (рис. 9.).

Графіки розподілу забруднень, в залежності від використаного методу, наведено на (рис.10) та (рис.11).

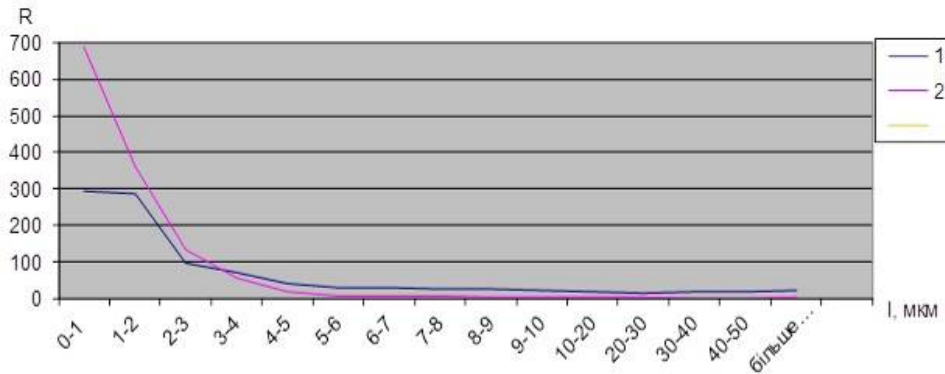


Рис.9. Графіки залежності зафіксованої відносної кількості забруднень R від їх природи та середнього лінійного розміру l : 1 – використання першою магнітно-турбулентної очистки; 2 – використання ультразвукового очищення після імпульсно магнітно-турбулентного очищення

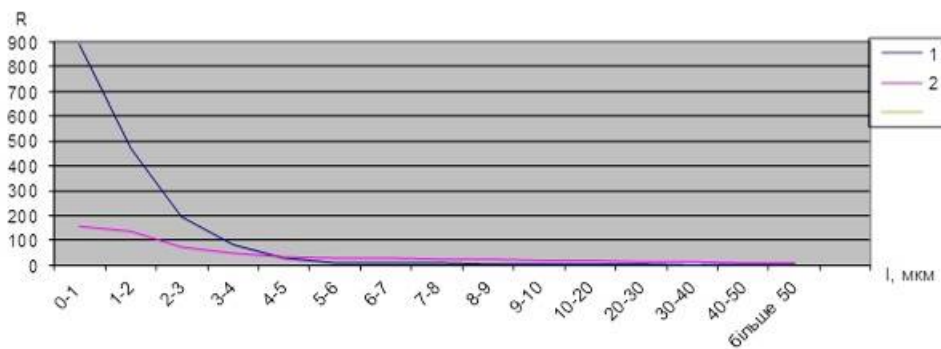


Рис.10. Графіки залежності зафіксованої кількості відносної кількості забруднень R від їх природи та середнього лінійного розміру l : 1 – перше ультразвукове очищення; 2 – імпульсно магнітно-турбулентне очищення

Дослідження розмірів та хімічного складу мікрочастинок, видалених у процесі безконтактного очищення нерозбірних шарикопідшипників на стенді ОПШ-01 показали, що із тракту кочення були вилучені мікрочастки забруднень розмірами 30...50 мкм - 8 %; 10...30 мкм - 12 %; 1...10 мкм - 50 %, решта (30 %) – мікрочастки загальним розміром ≤ 1 мкм.

Порівняльні експерименти показали, що імпульсно магнітно-турбулентний метод дозволяє більш ефективно видаляти частки мікрозабруднень, розміри яких є значно більшими від 1 мкм. Тоді як ультразвуковий метод, навпаки, показав найвищу ефективність на найдрібніших забрудненнях.

Дослідження хімічного складу виявили, що більша частина забруднень – це різноманітні металеві феромагнітні фрагменти у вигляді луски, мікростружки і т. ін. (рис. 11).

Значна кількість металічних фрагментів спостерігалась із великою відносною довжиною, що пояснюється особливостями магнітної взаємодії таких часток. Серед цієї групи мають місце такі, чий склад співпадає зі складом матеріалів, із яких безпосередньо виготовлені елементи конструкції (сталь ШХ15 – тіла кочення та обойми, бронза або латунь – сепаратори), і такі, що не пов'язані безпосередньо з конструкцією досліджуваних трибосистем кочення.

Неферомагнітні частки, в основному, представлені абразивними матеріалами, зокрема такими як карбід та оксид кремнію. Значна частина неметалічних забруднень складена фрагментами полімеризованих пально-мастильних матеріалів, котрі є залишками консерваційного матеріалу.

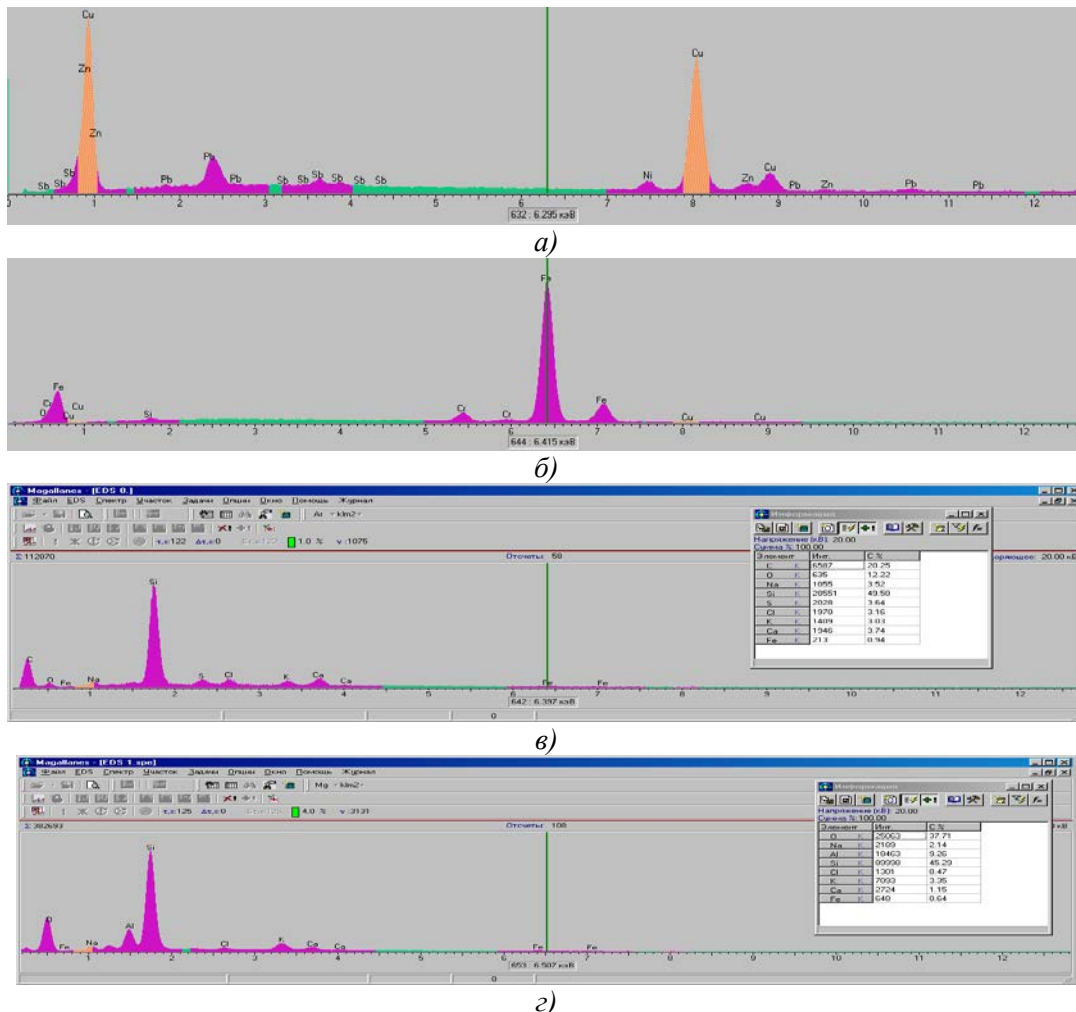


Рис.11. Спектри хімічного складу забруднень: а) – мідний сплав; б) – сталева стружка; в), з) – неметалеві забруднення

З метою визначення переваг найефективніших на сьогодні методів – ультразвукового (УЗ) та імпульсно-турбулентного були проведені лабораторні дослідження таких показників ефективності, як гранулометричний, фракційний та фізико-хімічний склад видалених частинок забруднень.

Проведені дослідження свідчать, що запропонований спосіб безконтактного очищення поверхонь тертя мініатюрних шарикопідшипників за допомогою комбінованих змінних імпульсних магнітно-турбулентних та ультразвукових полів забезпечує значне підвищення ефективності очищення підшипників від мікро-, субмікро- та наночастинок різноманітної природи, що дає змогу суттєво зменшити шуми і вібрацію та підвищити надійність і ресурс.

На основі результатів дослідження розроблено та втілено в життя новий спосіб безконтактного очищення поверхонь тертя мініатюрних шарикопідшипників за допомогою комбінованих полів: змінного імпульсного магнітного поля, ультразвукового поля та турбулентного поля, створеного обертним рухом вільних кілець досліджуваних шарикопідшипників (рис. 12).

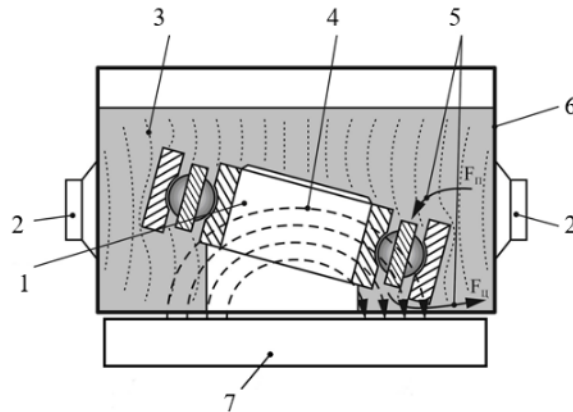


Рис. 12. Новий спосіб безконтактного очищення поверхонь тертя мініатюрних шарикопідшипників

Пі дією джерела змінного імпульсного магнітного поля 7 відбувається перемагнічування як часток забруднень, так і робочих поверхонь деталей, з одночасним взаємним просторовим обертанням вільних кілець мініатюрного шарикопідшипника 1 у гідравлічному полі миючої рідини 3, яка переносить частки мікрзабруднень у зону максимальної напруженості змінного магнітного поля 4 за межі шарикопідшипників та направляє їх разом із миючою рідиною в систему циркуляції для подальшої механічної фільтрації.

Разом з тим використання ультразвукових хвиль 3, що забезпечують випромінювачі 2, дозволить подолати адгезію та ефективно зруйнувати навіть найміцніші та найскладніші плівки забруднень, тоді як магнітна складова імпульсного магнітно-турбулентного методу ефективно виведе з тракту кочення мініатюрного шарикопідшипника металеві складові мікрзабруднень, подолавши коерцитивні сили утримання. Примусове обертання з турбулізацією потоків миючої рідини забезпечить максимальний доступ до робочих поверхонь та ефективне видалення з об'єкту очищення мікрзабруднень.

При випромінюванні потужного ультразвуку в рідину, в останній виникають кавітація та акустичні течії, що відіграють велику роль при очищенні. Вони виникають внаслідок поглинання ультразвукової хвилі середовищем. При цьому імпульс коливань окремих частинок в хвилі, що поширюється, переходить в імпульс спрямованого руху струменя потоку як єдиного цілого. При такій ультразвуковій очистці, акустичні течії сприяють виносу частинок забруднення з області, що очищається, інтенсифікують хімічну взаємодію миючого середовища з поверхнею за рахунок посилення циркуляції в приграничній області. Крім того, вони доставляють активні кавітаційні бульбашки до ділянок поверхні, що очищається.

Висновки.

1. Аналітична обробка отриманих результатів дозволила визначити гранулометричний склад видалених часток забруднень. Дослідження розмірів та хімічного складу мікрочастинок, видалених у процесі безконтактного очищення нерозбірних шарикопідшипників на стенді показали, що із тракту кочення були вилучені мікрочастинки розмірами 30...50 мкм – 8 %; 10...30 мкм – 12 %; 1...10 мкм – 50 %, решта (30 %) – частинки розміром до 1 мкм. Дослідження гранулометричного складу виявили, що більша частина забруднень – це різноманітні металеві феромагнітні фрагменти у вигляді луски, мікростружки і т. ін.

2. Порівняльна оцінка методів очищення шарикопідшипників показала, що магнітно-турбулентний метод дозволяє більш ефективно видаляти частки забруднення, розмір яких значно більше 1-2 мкм. Тоді як ультразвуковий метод, навпаки, показав найвищу ефективність при наявності забруднень до 1 мкм.

3. Значна кількість металевих фрагментів при магнітно-турбулентному методі очищення спостерігалась із великою відносною довжиною, що пояснюється особливостями магнітної взаємодії таких часток. Серед цієї групи наявні феромагнітні частки забруднення, чий склад співпадає зі складом матеріалів, із яких безпосередньо виготовлені елементи конструкції – сталь ШХ15, з якої виготовлено тіла кочення та обойми. Однак, хімічний склад забруднених часток виявив наявність міді, цинку та інших діамагнітних матеріалів. Наявність таких часток забруднень

також безпосередньо обумовлена застосуванням бронзи та латуні в сепараторах підшипників кочення.

4. Експериментально визначено, що застосування в процесі очищення імпульсних магнітних полів дозволяє ефективно видаляти феромагнітні забруднення мікро-, субмікророзмірів, утримуваних на поверхні деталей у тому числі і полями на кордонах доменів. Оскільки очищення проводиться в середовищі полярної або неполярної рідини, потік якої в робочій зоні має турбулентний характер перебігу, даний процес сприяє видаленню і діамагнітних частинок забруднень. В процесі очищення забезпечується безконтактне обертання зовнішньої обойми підшипника, при цьому дія імпульсного магнітного поля та турбулентний вплив рідини сприяють відриву і видаленню в потік миючої рідини забруднень.

5. Неферомагнітні частки, в основному, представлені абразивними матеріалами, зокрема такими як карбід та оксид кремнію (Si – до 49,5%, C – до 20,25%, O – до 12,2%). Значна частина неметалевих забруднень складена фрагментами полімеризованих компонентів мастильних матеріалів, котрі в процесі експлуатації шарикопідшипників утворюють граничні змащувальні шари на поверхнях тертя, полімеризуються, окислюються або є залишками консерваційної оливи.

6. На основі результатів порівняльних лабораторних досліджень запропоновано новий метод комплексного очищення мініатюрних підшипників кочення під дією комбінованих імпульсних змінних магнітних, турбулентних та ультразвукових полів.

Список використаних джерел:

1. Міжнародний стандарт ISO 15243:2017, «Підшипники кочення. Ушкодження та відмови. Терміни, характеристики та причини»
2. Термінологічний словник-довідник з трибології (український, російський, англійський): Навчальний посібник / [Богуслаєв В. О., Івченко Л. Й., Кубіч В. І., Фролов М. В.]; за заг. ред. Л. Й. Івченка – Запоріжжя : ПАТ «Мотор Січ», 2018. – 218 с.
3. Брошура SKF 14219, «Ушкодження підшипника та аналіз пошкоджень»
4. Стаття SKF Evolution, The future of bearing failure analysis is here («Майбутнє аналізу пошкоджень підшипників вже тут»), 2022.
5. Павлице В.Т. Підшипники кочення: основні параметри конструкції опор змащування, ущільнення та розрахунку ресурсу. Довідник/ В.Т. Павлице. - 2 вид. доп. -Л [б.в.], 2001. - 145 с.
6. Каплун П.В. Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників кочення: дис. канд.техн. наук. 05.02.01/Каплун П.В.; Хмельницький держ. ун-т (м. Хмельницький). – К., 2004. – 184 арк
7. Марчук В.І. Технологічні основи забезпечення якості робочих поверхонь кілець підшипників: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.02.08/Марчук Віктор Іванович; Одеський національний політехнічний ун-т. – О., 2004 – 36с.
8. Аксьонов О. Ф., Костюнік Р. Є., Кущев О. В. Підвищення функціональної якості підшипників кочення шляхом електромагнітного очищення.//Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2008. – Вип.49. – Т. 1. С.9 – 13.
9. Белянин П. Н., Данилов В. М. Промышленная чистота машин. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с./Коваленко В. П. Загрязнение и очистка нефтяных масел. М.: Химия, 1978. 302 с.
10. Никитин Г. А., Чирков С. В. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1969. 183 с
11. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective / T.J. Mason // Ultrasonics Sonochemistry. — 2016. — 29. — p. 519-523.
12. Fuchs F.J. Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application / F.J. Fuchs. - 1995.
13. Зілінський Андрій Іванович Автореферат «Ультразвуковий кавітаційний фільтр з ефектом самоочищення для рідких середовищ» Спеціальність 05.02.02 – машинознавство, Київ – 2021.
14. Weller R.N. Efficacy of ultrasonic cleaning / R.N. Weller, J.M. Brady, W.E. Bernier // Journal of Endodontic. — 2013. — 6(9). — p. 740-743.
15. Vetrinurugan M.G. Experimental Investigation of Ultrasonic and Megasonic Frequency on Cleaning of Various Disk Drive Components / M.G. Vetrinurugan, S. Terry Lim, J.S. Nagarajan // International Journal of Chemical Engineering and Applications. — 2013. — 4(4). — p. 174-177
16. Verhaagen B. Measuring cavitation and its cleaning effect / B. Verhaagen, D.F. Rivas // Ultrasonics Sonochemistry. — 2016. — 29. — p. 619-628.

-
17. Образцов И.Ф., Лурье С.А., Белов П.А., Волков-Богородский Д.Б., Яновский Ю.Г., Кочемасова Е.И., Дудченко А.А., Потупчик Е.М., Шумова Н.П. «Основы теории межфазного слоя», «Механика композиционных материалов и конструкций», 2004, том 10, №4
 18. Аксьонов О. Ф., Стельмах О.У., Костюнік Р. Є., Куцев О. В Електромагнітна складова утворення феромагнітних забруднень.//Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2006. – Вип.46. – С. 91 – 102.
 19. Непійко, С. А. Физические свойства малых кристаллических частиц. / С. А. Непійко // Киев: Наук, думка, 1985. 246 с.
 20. Иванов, В. К. Электронные свойства металлических кластеров. / В. К. Иванов // Соросовский образовательный журнал (Физика). 1999. -№ 8.-С. 97-102.
 21. Kittel С, Gait J. К, Ferromagnetic domains. Solid state physics, vol. 3, N. Y., 1956, p. 437.; Киттель. Чарльз Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель ; пер. с англ.:А. А. Гусев, А.В. Пахнев; под общ. ред.:А. А. Гусев. – М. : Наука, 1978 . – 791 с.
 22. Барьяхтар В. Г., Иванов Б. А., В мире магнитных доменов. К., 1986.
 23. ISO 4407-2002 «Hydraulic fluid power — Fluid contamination — Determination of particulate contamination by the counting method using an optical microscope»