

Р.Є. Костюнік¹, О.У. Стельмах¹, О.В. Кушчев^{1,2}

Державний університет «Київський Авіаційний Інститут»¹
Інститут проблем матеріалознавства НАН України ім. І.М. Францевича²

КОМПЛЕКСНЕ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ВИДАЛЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ З МИЮЧОЇ РІДИНИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРИЛАДІВ, ВИКОРИСТОВУВАНИХ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ ОЧИСТКИ ПІДШИПНИКІВ

В статті розглядається проблема очищення підшипників кочення, шляхом видалення різного роду забруднень з робочих поверхонь і трактів кочення, та забрудненої при цьому використовуваної миючої рідини. Вирішення якої пропонується шляхом дослідження та використання комбінованих систем очищення, що поєднують фізико-хімічні та механічні методи фільтрації миючої рідини, адаптовані до специфіки видалених забруднень. Запропоновано використання оригінальної конструкції пристрою очищення мініатюрних шарикопідшипників комбінованими імпульсно-магнітними та ультразвуковими полями. Пристрій оснащено складною системою фільтрації миючої рідини. За результатами дослідження проаналізовано вимиті забруднення різної фізичної природи. Запропоновано рекомендації щодо використання комбінованих операцій очищення підшипників кочення ультразвуковими та імпульсно-магнітними полями як фінішних, для підвищення їх довговічності та експлуатаційної надійності.

Ключові слова: підшипники кочення, фільтри, очищення підшипників, забруднення різної фізичної природи

R.E. Kostyunik, O.U. Stelmakh, O.V. Kushchev

COMPLEX SOLUTION OF THE PROBLEM OF REMOVING CONTAMINATION FROM THE WASHING LIQUID OF TECHNOLOGICAL DEVICES USED FOR INDUSTRIAL CLEANING OF BEARINGS

The article considers the problem of cleaning rolling bearings by removing various types of contaminants from the working surfaces and rolling paths, and the contaminated cleaning fluid used in the process. The solution of which is proposed through the research and use of combined cleaning systems combining physico-chemical and mechanical methods of filtering the washing liquid, adapted to the specifics of the removed contaminants. The use of an original design of a device for cleaning miniature ball bearings with combined pulse-magnetic and ultrasonic fields is proposed. The device is equipped with a sophisticated filtering system of the washing liquid. Based on the results of the research, the washed pollution of various physical nature was analyzed. Recommendations are proposed for the use of combined operations of cleaning rolling bearings with ultrasonic and pulse-magnetic fields as finishing ones to increase their durability and operational reliability.

Keywords: rolling bearings, filters, bearing cleaning, contamination of various physical nature

Постановка проблеми Сучасні технології відновлення підшипників кочення широко використовують спеціалізовані мийні машини з системами рециркуляції миючої рідини. У процесі очищення підшипників від мастильних матеріалів, металевого пилу та експлуатаційних забруднень, миюча рідина зазнає значного забруднення та деградації. Накопичення твердих частинок, масел, присадок та інших домішок суттєво знижує ефективність очищення, збільшує час обробки та може призвести до повторного забруднення складових підшипника. Це не тільки погіршує експлуатаційні властивості вузлів та механізмів, але й збільшує ймовірність передчасного виходу підшипників із ладу.

В лабораторії «Нанотриботехнологій» ДУ «КАІ» розроблено спосіб та пристрій безконтактного очищення поверхонь тертя мініатюрних шарикопідшипників за допомогою комбінованих змінних імпульсних магнітних та ультразвукових полів. Експлуатація пристрою очищення показала, що внаслідок комбінованого впливу змінного імпульсного магнітного та гідравлічного полів відбувається перемагнічування як часток забруднень, так і робочих поверхонь, з одночасним взаємним просторовим переміщенням деталей шарикопідшипників у гідравлічному полі мийної рідини, яка переносить частинки забруднень за межі, у зону максимальної напруженості магнітного поля та направляє їх разом із використаною мийною рідиною в систему циркуляції для подальшої механічної фільтрації.

Фільтрація мийного середовища в стаціонарних мийних машинах, призначених для мініатюрних шарикопідшипників, є критично важливим аспектом підтримки ефективності очищення і продовження терміну служби мийної рідини та самої машини. Основний принцип полягає в забезпеченні безперервного видалення твердих частинок (наприклад, відокремленого мастила, частинок зносу, пилу) з мийної рідини під час її циркуляції всередині пристрою за допомогою системи фільтрації. Це запобігатиме повторному осіданню забруднень на очищені підшипники та забезпечить збереження ефективності мийної рідини.

Таким чином, актуальним завданням є розробка та впровадження ефективних методів очищення миючої рідини, що дозволяють максимально продовжити термін її служби та забезпечити стабільну якість очищення підшипників.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У сучасній техніці для очищення в тому числі і технологічних рідин використовуються типи фільтрів, що відрізняються за ступенем очищення – грубим, нормальним, тонким та особливо тонким. Але найчастіше виділяють дві групи:

- грубого очищення — видаляють з рідини частинки розміром 50 мкм і більше (переважно являють собою металеві сітки з певним розміром клітин);
- тонкого очищення – видаляють з рідини частинки розміром понад 2 мкм.

За способом фільтрації можна виділити елементи з поверхневою та об'ємною адсорбцією.

У першому випадку використовуються відносно тонкі аркуші пористого матеріалу. Частинки забруднень, розміри яких перевищують розмір пор, не проходять крізь них і осідають на поверхні матеріалу. Для фільтрації часто застосовується спеціальний папір, але можливі й інші варіанти – тонка повстяна тканина, синтетичні матеріали.

У пристроях з об'ємною адсорбцією також використовується пористий матеріал, проте він товстіший і для відсіву забруднень використовується не тільки поверхня, а й внутрішні шари. Фільтруючий елемент може бути у вигляді керамічного композиту, волокон та ін.

Бар'єрні фільтри утворені зазвичай наступними фільтруючими елементами:

- сітчастою чи комірчастою структурою, через яку неспроможні пройти великі тверді частинки, що перевищують розмір 0,1 мкм. Дозволяє відсіювати великі забруднення металевої та неметалевої (у тому числі й органічної) природи;
- сіткою (металевою або з синтетичних матеріалів);
- представляють комплексну конструкцію, в яку може входити кілька шарів фільтрації – решітка з великими комірами, сітка зі стільниками середнього розміру і шар стільникової конструкції, що забезпечує відсівання найбільш дрібних частинок.

Для бар'єрних фільтрів тонкого очищення зазвичай використовують композиційні фільтруючі матеріали на основі целюлози, поліестеру та скловолокна [1 – 3]. Такі матеріали забезпечують видалення частинок розміром більше за 2 - 5 мкм [4].

Для досягнення більш високих показників фільтрації в деяких сучасних фільтрах використовується особливий матеріал, комірки якого розташовані не рівномірно, а із зменшенням розміру від поверхні у глибину. Крупніші частинки затримуються у верхніх шарах, дрібніші – у глибоких [5]. Така внутрішня структура набагато продовжує строк експлуатації фільтруючих елементів.

Крім описаних вище бар'єрних фільтрів, відомо методи очищення, в яких для видалення з рідини частинок забруднень використовують дію полів різної природи – силові типи фільтрів на кшталт гофрованих та відцентрових.

Гофровані фільтри найбільш застосовують для видалення великих частинок однорідного розміру. Такі фільтри мають вигляд відповідним чином складених аркушів полімерів для фільтрації рідини. Складки в цих фільтрах забезпечують їм більшу площу поверхні, що дозволяє фільтрувати більше частинок забруднень за раз. Сучасні фільтри такого типу дозволяють видаляти частинки в 25 мкм. Але при несталої русі рідини, що важливо для стендів очищення, на таких фільтрах можливий підйом забруднення та його потрапляння в чистий потік мийної рідини.

Відцентрові фільтри відомі в біології для поділу наночастинок у біозразках [6]. Тим не менш, останніми роками ця технологія почала використовуватися для очищення технічних рідин. Прикладом може слугувати фільтр, в якому видалення забруднення відбувається за допомогою відцентрових сил, що виникають від обертання потоку, де забруднення виштовхуються на зовнішню частину фільтра і потрапляють на сітчастий екран, який видаляє їх з рідини [7]. Такі фільтри ефективні на достатньо широкому спектрі розмірів забруднення – від 1 мкм та вище [8, 9]. Вони запропоновані для приладів, що використовуються для очищення деталей машин [10].

Окремо варто відмітити про окремих клас високоєфективних фільтрів, що показали свою високу ефективність у різних сферах застосування – НЕРА фільтри (від англійської High Efficiency Particulate Air) [11 – 15]. Хоч вони і призначені для фільтрації повітря, але цікавим є, в першу чергу, принцип їх роботи. Для частинок розміром більше 0,3 мкм фільтр НЕРА діє як сітка, вони не можуть пройти через її отвори. Волокна (зазвичай поліпропілену або скловолокна) формують складні канали для руху потоку. Внаслідок цього дрібніші частинки, згідно з принципом броунівського

руху, не можуть встигати за рухом потоку і таким чином стикаються з волокнами, прилипаючи до них [16].

Стандартні НЕРА-фільтри виготовляються з волокон (зазвичай скловолокно), що мають високу проникність повітря, але не призначені для роботи з рідинами. Застосування такого методу для фільтрації рідин вкрай ускладнено через наступні причини:

- подібні НЕРА фільтри мають високий гідравлічний опір, що критично для рідини через значно більшу в'язкість;
- фільтруючий матеріал має бути стійким до компонентів миючої рідини, хімічно сумісним;
- необхідний постійний стабільний тиск потоку.

Таким чином незважаючи на високу ефективність, НЕРА-фільтри не можуть бути застосовані для рідких середовищ, але структурно подібні багаторівневі мікрофільтри (на основі полімерів, металів або кераміки) можуть бути цікавими варіантами для фільтрації миючих рідин, включаючи ті, що використовуються в машинах для очищення підшипників. Їх вибір залежить від необхідного ступеня очищення, типу забруднень та характеристик рідини.

Подібний підхід використовується в деяких існуючих фільтрах [17, 18], де в якості фільтруючого елемента використовуються спечений керамічний матеріал, або нержавіюча січена сітка, поліетилен. Зазначений склад зазвичай обраний для забезпечення матеріалу електричного заряду протилежного знака, ніж електричний заряд частинок забруднень, які необхідно видалити з вихідної рідини, причому спорідненість залежить від вихідної рН рідини. Матеріал розрахований на видалення частинок, розміром близько 5 мікрон і менше.

Також дещо подібними є так звані глибинні фільтри з волокнистою структурою, виготовлені спеціально для рідких середовищ (наприклад, поліпропіленові картриджі), які часто застосовуються в багатоступінчастих системах очищення олії, емульсій та миючих розчинів. Але всі вони також потребують достатньо високого постійного тиску для ефективного очищення.

Постановка завдань Традиційно застосовувані способи фільтрації та оновлення миючих рідин, такі як гравітаційне відстоювання, механічна фільтрація та часткова заміна, не забезпечують належного очищення в умовах інтенсивного промислового використання. Крім того, регулярна повна заміна рідини призводить до збільшення експлуатаційних витрат та обсягів відходів, що суперечить сучасним вимогам ресурсозбереження та екологічної безпеки. Тому, нами поставлено завдання дослідити комбіновані системи очищення, що поєднують фізико-хімічні та механічні методи фільтрації, адаптовані до специфіки забруднень, що виникають під час очищення підшипників.

Викладення основного матеріалу статті. Поставлене нами завдання виконаємо шляхом дослідження найбільш поширених сучасних методів та систем фільтрації у використовуваних в промисловості технологічних мийних машинах.

Розглянемо найбільш поширені сучасні методи фільтрації та їх складові.

Фільтрація в баку (попередня фільтрація). Багато машин для очищення деталей мають первинний фільтр, розташований у резервуарі, що містить мийну рідину. Це часто просте сітчасте сито або система перегородок, призначена для затримання забруднень найбільших розмірів до того, як вони потраплять у головний циркуляційний насос.

Цей етап захищає насос від пошкоджень та зменшує навантаження на етапи більш тонкої фільтрації.

Мийна рідина забирається з бака циркуляційним насосом і направляється через один або кілька корпусів фільтрів, які містять основні фільтрувальні елементи.

Використовуються різні типи фільтрувальних елементів залежно від розміру та природи забруднюючих речовин, які потрібно видалити. При цьому враховують вимоги до чистоти мийної рідини. Найбільш поширеними є наступні типи фільтрів.

Сітчасті фільтри. Вони виготовляються з плетеного дроту або синтетичної тканини. Ці фільтри затримують частинки, розмір яких перевищує розмір їхніх пор. Вони часто підлягають очищенню та повторному використанню. Для поетапної фільтрації можуть використовуватися сітки різного розміру, встановлені послідовно.

Мішкові фільтри. Ці фільтри складаються з пористого мішка, виготовленого з таких матеріалів, як вовна або ткане полотно. Рідина протікає через мішок, а частинки затримуються всередині. Мішкові фільтри мають більшу площу поверхні для фільтрації та підходять для видалення значної кількості твердих частинок. Зазвичай вони є одноразовими.

Картриджні фільтри. Це циліндричні фільтрувальні елементи, виготовлені з різних матеріалів, таких як намотані волокна, гофрований папір або розплавлений полімер. Вони забезпечують точне фільтрування (до дуже малих мікронних розмірів включно). Картриджні фільтри зазвичай є одноразовими.

Глибинні фільтри. Ці фільтри мають товсту пористу структуру, яка затримує частинки по всій товщині фільтрувального матеріалу, а не лише на поверхні. Вони ефективні для видалення широкого діапазону розмірів частинок і мають високу здатність до поглинання забруднень.

Магнітні сепаратори. Використовують для видалення феромагнітних, що містять залізо, частинок. Вони притягують і утримують металеві частинки, запобігаючи їх циркуляції в мийній рідині.

Після проходження через фільтрувальні елементи очищена мийна рідина повертається в мийну камеру або бак для повторної циркуляції.

Регулярне обслуговування системи фільтрації є критично важливим. Це включає очищення або заміну фільтрувальних елементів, коли вони засмічуються, для підтримки оптимальної швидкості потоку та ефективності фільтрації.

Деякі передові системи можуть включати автоматизовані цикли зворотного промивання або очищення для певних типів фільтрів.

Особливі підходи фільтрації мийної рідини використовують при очищенні мініатюрних шарикопідшипників. Їх можна класифікувати наступним чином.

1.Тонка фільтрація. Через малий розмір та високу точність мініатюрних шарикопідшипників їх очищення потребує більш тоншої фільтрації (для видалення найдрібніших частинок), що впливає на продуктивність. Цей процес може включати використання картриджних фільтрів з малими мікронними рейтингами або багатоступеневих систем фільтрації.

2.Сумісність матеріалів. Матеріали фільтрів повинні бути сумісними з використовуваними мийними рідинами, щоб запобігти їх деградації.

3.Керування швидкістю потоку. Система фільтрації повинна бути розроблена таким чином, щоб підтримувати адекватну швидкість потоку мийної рідини для забезпечення ефективного очищення без надмірного падіння тиску.

4.Компактний дизайн. Враховуючи часто невеликі габарити цих машин, система фільтрації повинна бути компактною та ефективно інтегрованою.

Наступним етапом дослідимо конструкції та принцип дії систем фільтрації мийного середовища в ультразвукових мийних машинах, використовуваних для очищення мініатюрних шарикопідшипників.

Принцип дії ультразвукових мийних машин, що використовуються для очищення мініатюрних шарикопідшипників, базується на явищі кавітації (генерується ультразвуковими хвилями). Це дозволяє ефективно видаляти забруднення, однак, щоб зберегти високу ефективність очищення та запобігти повторному забрудненню або пошкодженню делікатних підшипників, потрібно використовувати ефективну систему фільтрації. Задля підтримки необхідної чистоти робочої мийної рідини в умовах інтенсивного вивільнення частинок забруднення циркуляційна система складається з насоса для циркуляції, фільтри грубої та тонкої очистки, накопичувальні баки і опційно, системи сепарації масла. Оскільки ультразвук може емульгувати масло в розчині, його видалення є складним завданням. Проте, для підтримки ефективності розчину та запобігання повторному забрудненню, можуть використовуватися різні види фільтрів.

Тому модуль фільтрації 2 в розробленому та створеному пристрої безконтактного очищення мініатюрних шарикопідшипників (рис. 1) виконана багатоступінчастою та включає наступні елементи:

- циркуляційний насос, що забезпечує постійну циркуляцію мийного розчину між мийною ванною та системою фільтрації;
- фільтр грубої очистки (сітчастий фільтр), розташований безпосередньо на виході з мийної ванни. Він затримує відносно великі частинки, що відшарувалися (стружку, масляні грудки, пил), захищаючи наступні, більш тонкі фільтри. Розмір пор становить від 50 до 200 мкм.
- Фільтри тонкої очистки (картриджні або мішкові фільтри) – це основний етап фільтрації, призначений для видалення дрібних забруднень (частки пилу, оксидів, мікроскопічних абразивних частинок). Для мініатюрних підшипників часто використовуються фільтри з розміром пор від 1 до 10 мкм, а іноді й менше (до 0.45 мкм для високоточних застосувань). Матеріали можуть бути різні: поліпропілен, целюлоза, скловолокно.

- Накопичувальний бак для чистого та забрудненого розчину, що дозволяє проводити постійну фільтрацію.

Безпечне ефективне та надійне очищення мийної рідини з метою її повторного використання у пристрої застосовується циркуляційна система, при цьому відпрацьована (брудна) рідина з робочої ванни через зливний патрубок та трубопровід 8, самотливом надходить до розбірного контрольованого фільтру грубої очистки з прозорим резервуаром-відстійником (для заміни одноразового фільтруючого елемента) для попереднього очищення від механічних домішок (наприклад - мікростружки) та подавання в накопичувальний бак. Після чого рідина повторно фільтрується фільтром попереднього очищення та подається насосом під тиском через фільтр фінішного очищення та трубопровід 8 до робочої ванни, як очищена мийна рідина.

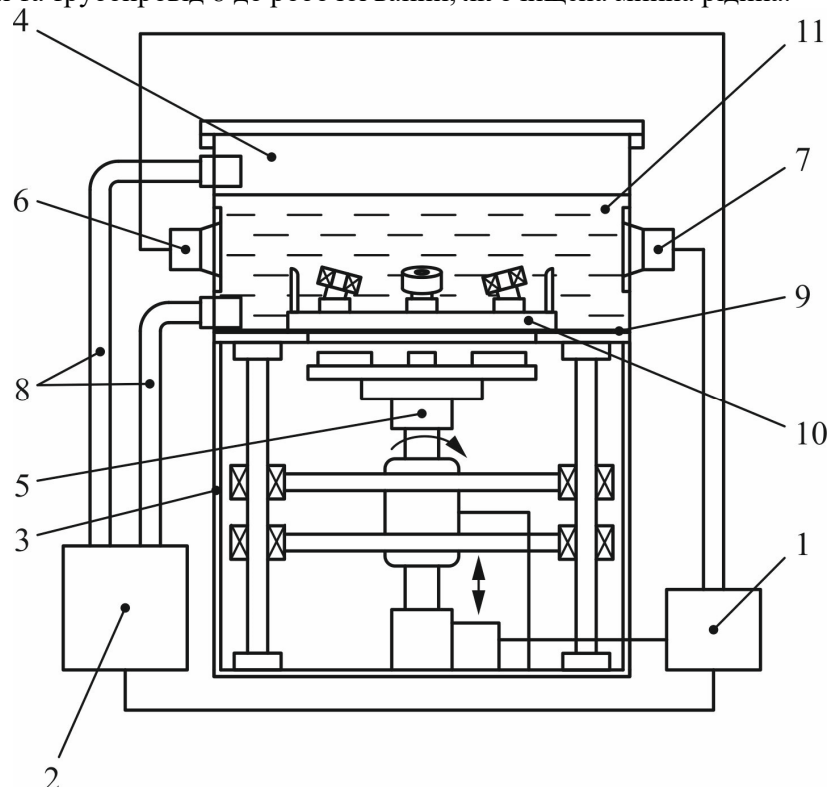


Рис. 1. Схема пристрою безконтактного очищення мініатюрних шарикопідшипників

На рис.1 цифрами позначені модуль електроживлення та керування 1, модуль зливу та фільтрації мийної рідини зі змінними механічними фільтрами 2, корпус приладу у вигляді рами 3, робоча ванна 4, система подачі та контролю величини імпульсного магнітного поля 5, ультразвукові випромінювачі 6 та 7, трубопроводи циркуляції мийної рідини 8, пластина 9 із немагнітнопроникного матеріалу (наприклад – із листового склопластика), ложементи 10 з мініатюрними шарикопідшипниками, що піддаються очищенню (виконуються під типорозмір шарикопідшипників, що очищуються), мийна рідина 11.

Використання комбінованого джерела імпульсного змінного магнітного та ультразвукового поля дозволяє ефективно видаляти забруднення з робочих поверхонь мініатюрних шарикопідшипників, що призводить до швидшого забруднення фільтруючих елементів у порівнянні з іншими типами мийних машин та пристроїв. Тому в циркуляційній системі очищення і фільтрації розробленого та створеного пристрою з урахуванням вищенаведеного аналізу до фільтрувальних елементів поставлено високі вимоги до чистоти, сумісності та стійкості до хімічного складу мийного розчину та робочої температури.

Повторні експериментальні дослідження видалених з відповідних фільтроелементів забруднення, виконано їх детальний аналіз середнього розміру, гранулометрію та визначено фазовий і хімічний склад. Для дослідження використано лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр ЛСДФМП та растровий електронний мікроскоп з системою мікроаналізу хімічних елементів РЕМ-106И (рис. 1.2).

Дослідження розмірів та хімічного складу мікрочастинок забруднення, видалених шляхом фільтрації мийної рідини на створеній циркуляційній системі пристрою 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.

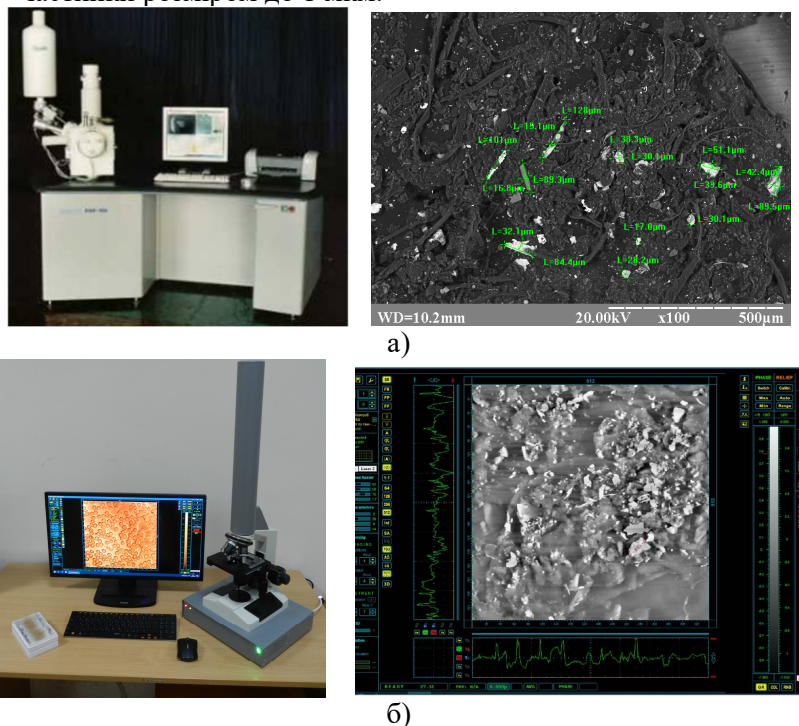


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд лабораторних приладів та інтерфейсу програмного забезпечення з елементами дослідження вибраних забруднень:

а) електронний мікроскоп РЕМ-106 ІІ;

б) лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр ЛСДФМП

Конструкція та схема управління пристрою дозволила, шляхом повторних експериментів порівняти ефективність методів очищення та визначити, що магнітно-турбулентний метод дозволяє більш ефективно видаляти мікрочастинки забруднення, розмір яких значно більше 1-2 мкм. Тоді як ультразвуковий метод навпаки показав найвищу ефективність на найдрібніших забрудненнях (субмікро та наночастинки).

Режим очищення відбувався в два етапи: перший етап – імпульсно-магнітно-турбулентне очищення підшипників з двох сторін, другий етап – ультразвукове очищення, також з двох сторін.

На рис. 1.3 приведено результати досліджень спектрального аналізу хімічного складу забруднень.

Значна кількість металічних фрагментів спостерігалась із великою відносною довжиною, що пояснюється особливостями магнітної взаємодії таких частинок. 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 прецизійних трибосистем кочення.

Неферромагнітні 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.

Аналітична обробка отриманих результатів дала змогу визначити гранулометричний склад видалених часток забруднень, що дозволяє зробити висновок про необхідність використання комплексних багатоступінчастих методів очищення мийочної рідини для проведення гарантованого та ефективного очищення мініатюрних шарикопідшипників і прецизійних деталей вузлів тертя ультразвуковими та імпульсно-магнітними полями як фінішної передексплуатаційної обробки.

Висновки

1. На основі проведеного аналізу сучасних систем фільтрації та використовуваних фільтрувальних елементів виконано їх класифікацію за областю використання та ступенем ефективності.

2. Для забезпечення ефективності процесу очищення підшипників кочення запропоновано використання комбінованих технологічних приладів для видалення різного роду забруднень з

робочих поверхонь та трактів кочення підшипників, оснащених багатоступеневими системами фільтрації миючої рідини.

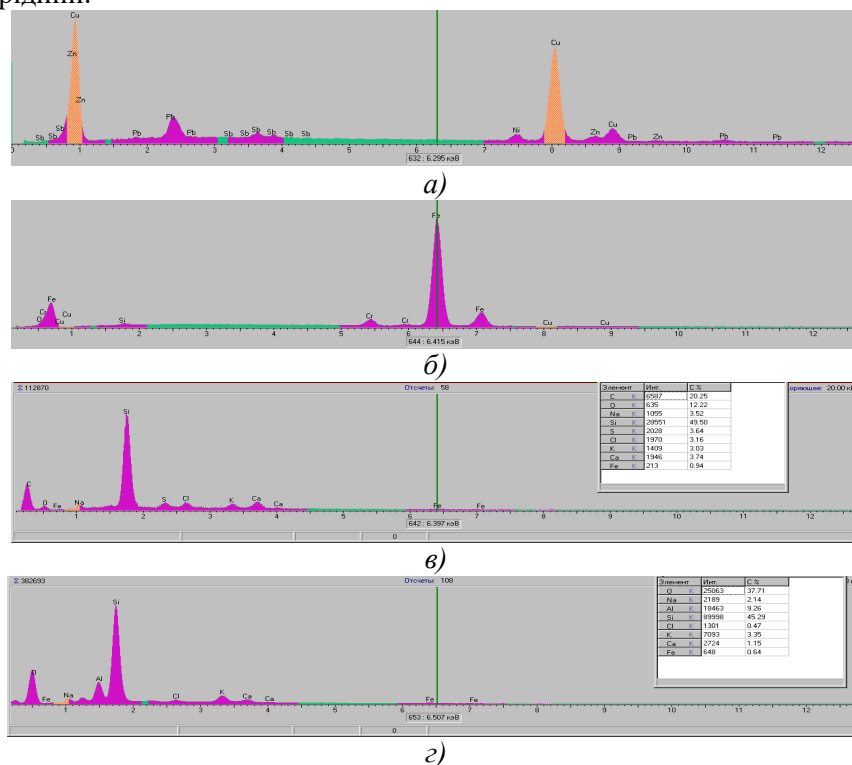


Рис. 1.3. Спектральний аналіз хімічного складу забруднень: а) мідний сплав; б) сталевий стружка; в), г) неметалеві забруднення

3. Досліджено хімічний та фазовий склад відфільтрованих забруднень. На основі цього запропоновано використовувати комбіновані операції очищення ультразвуковими та імпульсно-магнітними полями як фінішні операції передексплуатаційної обробки підшипників, з метою підвищення їх надійності та ресурсу.

Список використаних джерел

- Xu, Study of the ptfe multi-tube high efficiency air filter for indoor air purification, Process Saf Environ, № 151, с. 28 DOI: [10.1016/j.psep.2021.05.007](https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.05.007).
- Long, Dust loading performance of a novel submicron-fiber composite filter medium for engine, Materials (Basel), № 11, с. 2038 DOI: [10.3390/ma11102038](https://doi.org/10.3390/ma11102038).
- Dziubak, Material properties analysis with addition of nanofibres for air intake filtration in internal combustion engines, Int. J. Automo Mech. E, № 18, с. 8621 DOI: [10.15282/ijame.18.1.2021.21.0656](https://doi.org/10.15282/ijame.18.1.2021.21.0656).
- Yifan Wang, Tianyi Zhang, Lei Chen, Wenquan Tao Multi-objective optimization of laser perforated fuel filter parameters based on artificial neural network and genetic algorithm Particuology Volume 96, January 2025, Pages 57-70 <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.10.016>.
- Chengwei Xu, Zhenyan Lu, Yan Yu, Lirong Li A coalescing filter with hybrid structure of oleophilic/oleophobic media by centrifugal spinning. Separation and Purification Technology Volume 359, Part 1, 22 June 2025, 130512 <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.130512>.
- Elin Johnsen, Ole Kristian Brandtzaeg, Tore Vehus, Hanne Roberg-Larsen, Vanya Bogoeva, Ornella Ademi, Jon Hildahl, Elsa Lundanes, Steven Ray Wilson A critical evaluation of Amicon Ultra centrifugal filters for separating proteins, drugs and nanoparticles in biosamples Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis Volume 120, 20 February 2016, Pages 106-111 <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2015.12.010>.
- Damla Serper, Kevin J. Hanley, Pekka Oinas Computationally efficient DEM simulation of a basket-type centrifugal filter using a novel switchable contact model Powder Technology Volume 452, 28 February 2025, 120467 <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120467>.
- Maksym Loginov, Franco Samper, Geneviève Gésan-Guiziou, Titus Sobisch, Dietmar Lerche, Eugene Vorobiev Centrifugal ultrafiltration for determination of filter cake properties of colloids. Journal

of Membrane Science, Volume 536, 15 August 2017, Pages 59-75
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.04.064>.

9. Vítor Geraldes, Patrícia Henriques, Maria Diná Afonso, Ana Maria Alves, Rita F. Pires, Mónica Faria, Bart Van der Bruggen, Miguel Rodrigues Designing Centrifugal Membrane Filters with uniform-pressure for UF/NF/RO separations Journal of Membrane Science Volume 702, May 2024, 122752
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.122752>.

10. Патент US8037892B2 Parts washing apparatus with centrifugal filter, 2007
<https://patents.google.com/patent/US8037892B2/en>.

11. Henry C. Burrige, Sen Liu, Sara Mohamed, Samuel G.A. Wood, Cath J. Noakes Coupled indoor air quality and dynamic thermal modelling to assess the potential impacts of standalone HEPA filter units in classrooms, Indoor Environments, Volume 1, Issue 3, October 2024, 100034
<https://doi.org/10.1016/j.indenv.2024.100034>.

12. Sopanat Sawatdee, Atcharaporn Botalo, Tanissara Noinonmueng, Pattaraporn Posoknistakul, Panich Intra, Pisut Pongchaikul, Boonya Charnnok, Narong Chanlek, Navadol Laosiripojana, Kevin C.W. Wu, Chularat Sakdaronnarong Fabrication of multilayer cellulose filters isolated from natural biomass for highly efficient air filtration for replacement of synthetic HEPA filters, Process Safety and Environmental Protection Volume 194, February 2025, Pages 216-230
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.12.007>.

13. Hee Kwon Ku, Min-Ho Lee, Hyunjin Boo, Geun-Dong Song, Deokhee Lee, Kaphyun Yoo, Byung Gi Park Performance assessment of HEPA filter to reduce internal dose against radioactive aerosol in nuclear decommissioning Nuclear Engineering and Technology Volume 55, Issue 5, May 2023, Pages 1830-1837
<https://doi.org/10.1016/j.net.2023.01.016>.

14. Xin Zhang, Junjie Liu Operating resistance prediction of non-flat HEPA filters Powder Technology Volume 408, August 2022, 117718
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117718>.

15. Claus Schweinheim (Division Manager) Setting standards for HEPA filter efficiency Filtration + Separation Volume 52, Issue 3, May–June 2015, Pages 13-15
[https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(15\)30132-4](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(15)30132-4).

16. Perry J.L., Agui J.H., Vijayakumar R. Submicron and Nanoparticulate Matter Removal by HEPA-Rated Media Filters and Packed Beds of Granular Materials. NASA/TM-2016-218224

17. Патент CA2284964A1 <https://patents.google.com/patent/CA2284964A1/en>.

18. US6054059A 2000-04-25 Use of a ceramic metal oxide filter whose selection depends upon the Ph of the feed liquid and subsequent backwash using a liquid having a different Ph.