

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет _____ конструювання та дизайну _____
УДК 621.43.038:621.793:620.178.16

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
надійності техніки
(назва кафедри)

доц. _____ Новицький А.В.
(підпис) (ПІБ)
“ ” _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**На тему «Підвищення довговічності агрегатів паливних систем МЕЗ
відновленням прецизійних деталей гальвано-хімічними покриттями»**

Спеціальність _____ 133 - «Галузеве машинобудування» _____
(код і назва)

Спеціалізація _____ - _____
Магістерська програма «Машини та обладнання сільськогосподарського
виробництва» _____
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

_____ д.т.н., проф. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

_____ Ловейкін В.С. _____
(ПІБ)

Керівники магістерської роботи

_____ к.т.н. _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

_____ Харьковський І. С. _____
(ПІБ керівника)

Виконав

_____ _____
(підпис) (ПІБ студента)

Форма № Н-9.01

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет _____ конструювання та дизайну _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри надійності техніки

К.Т.Н., доцент _____ Новицький А.В.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПБ)

“ _____ ” _____ 2025__ року

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
СТУДЕНТА

Лозі Антону Євгенійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність _____ 133 «Галузеве машинобудування»

(код і назва)

Спеціалізація _____

(назва)

Магістерська програма «Машини та обладнання сільськогосподарського
виробництва»

(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-наукова

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи **«Підвищення довговічності агрегатів паливних систем МЕЗ відновленням прецизійних деталей гальвано-хімічними покриттями»**

затверджена наказом ректора НУБіПУ від «16»12.2024 р. №2268 «С» _____

Термін подання завершеної роботи на кафедру 23.05.2026 р.

(рік, місяць, число)

Вихідні дані магістерської роботи: агрегати паливних систем мобільних енергетичних засобів; способи відновлення прицензійних деталей паливних систем; гальвано-хімічні покриття.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Конструкція агрегатів паливних систем мобільних енергетичних засобів.
2. Умови використання та характерні відмови агрегатів паливних систем мобільних енергетичних засобів в умовах підприємств технічного сервісу.
3. Технології відновлення деталей паливних систем гальвано-хімічними покриттями.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) 1. Актуальність, предмет,

об'єкт і методи дослідження. 2. Мета і задачі дослідження. 3 Аналіз
характерних відмов деталей агрегатів паливних систем. 4. Гальвано-хімічні
покриття при відновленні працездатності деталей. 5. Технологічний маршрут
відновлення деталей агрегатів паливних систем. Висновки.

Дата видачі завдання «17» грудня 2024 р.

Керівники магістерської роботи _____
(підпис) (прізвище та ініціали) Харьковський І. С.

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис) (прізвище та ініціали студент) Лоза А.Є.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
СТАН ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	
1.1 Проблеми забезпечення надійності та підвищення ресурсу сільськогосподарської техніки	9
1.2. Аналіз основних видів пошкоджень агрегатів паливної апаратури мобільних енергетичних засобів	13
1.3 Аналіз способів відновлення та зміцнення плунжерних пар паливних насосів високого тиску	19
1.4. Фізико-механічні властивості та механізм вивчення нанокомпозиційних електролітичних покриттів	24
1.5. Висновки до розділу	30
РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ СЕРЕДНЬОГО ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ АГРЕГАТІВ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ	31
2.1 Ресурс агрегатів паливної апаратури	31
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	37
3.1 Програма та методика експериментальних досліджень прецизійних пар плунжер–втулка паливних насосів високого тиску	37
3.2 Методики одержання нанокомпозиційних гальвано-хімічних покриттів	39
3.2.1 Методика одержання нанорозмірних частинок	39
3.3. Технологічне оснащення та підготовка електролітів для нанесення нанокомпозиційних гальвано-хімічних покриттів	45
3.4 Методика одержання нанокомпозиційних електролітичних покриттів на основі хрому	48
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ НАДІЙНОСТІ ПАЛИВНИХ НАСОСІВ ВИСОКОГО ТИСКУ	49
4.1. Результати стендових досліджень паливних насосів високого тиску з	49

відновленими прецизійними парами

4.2 Аналіз результатів стендових досліджень паливних насосів високого тиску з відновленими прецизійними парами 51

4.3. Прогнозування залишкового ресурсу агрегатів паливних систем 53

4.4. Розроблення технології відновлення плунжерних пар із застосуванням наноконпозиційного електролітичного хромування 55

ВИСНОВКИ 59

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 61

ДОДАТКИ 67

ВСТУП

Сучасний розвиток агропромислового комплексу України значною мірою залежить від технічного стану машинно-енергетичних засобів, які забезпечують виконання основних технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві. Ефективність використання сільськогосподарської техніки визначається рівнем її надійності та експлуатаційної ефективності. Водночас умови роботи машин у сільському господарстві характеризуються підвищеною запиленістю, значними динамічними навантаженнями, впливом агресивного середовища та нерівномірністю режимів експлуатації, що призводить до інтенсивного зношування деталей і передчасного виходу агрегатів з ладу. Одними з найбільш навантажених і відповідальних вузлів машинно-енергетичних засобів є агрегати паливних систем, технічний стан яких безпосередньо впливає на економічність роботи двигуна, стабільність його потужнісних показників та паливну ефективність.

Особливе значення у забезпеченні працездатності паливної апаратури мають прецизійні деталі паливних насосів високого тиску, зокрема плунжерні пари. Саме вони працюють в умовах високих контактних навантажень, недостатнього мащення та постійного тертя, що спричиняє інтенсивне зношування робочих поверхонь. Зношування плунжерних пар призводить до порушення герметичності спряжень, зниження циклової подачі палива, погіршення пускових характеристик двигуна та зменшення ресурсу паливної апаратури в цілому. Тому проблема підвищення довговічності агрегатів паливних систем шляхом відновлення їх прецизійних деталей є актуальним науково-практичним завданням.

Одним із перспективних напрямів підвищення ресурсу прецизійних деталей є застосування гальвано-хімічних покриттів, модифікованих нанорозмірними компонентами. Використання нанокомпозиційних електролітичних покриттів дозволяє формувати зміцнений поверхневий шар із підвищеними показниками мікротвердості, зносостійкості та корозійної

стійкості. На відміну від традиційних способів відновлення, наноконпозиційні покриття забезпечують більш щільну структуру поверхні, покращення триботехнічних характеристик та збільшення міжремонтного ресурсу деталей. Разом із тим питання впливу нанорозмірних частинок на властивості покриттів і довговічність відновлених деталей паливної апаратури залишаються недостатньо дослідженими, що обумовлює необхідність проведення подальших наукових досліджень у цьому напрямі.

Актуальність теми. Актуальність теми магістерської кваліфікаційної роботи обумовлена необхідністю підвищення надійності та довговічності агрегатів паливних систем МЕЗ шляхом удосконалення технологій відновлення прецизійних деталей. Значна частка відмов паливної апаратури пов'язана зі зношуванням плунжерних пар паливних насосів високого тиску, ресурс яких визначає працездатність усієї системи живлення дизельного двигуна. Існуючі способи відновлення не завжди забезпечують необхідні експлуатаційні характеристики та ресурс деталей після ремонту. У зв'язку з цим застосування наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів є перспективним напрямом підвищення зносостійкості та довговічності прецизійних спряжень паливної апаратури. Розроблення та впровадження нових технологій відновлення плунжерних пар із використанням наноконпозиційного електролітичного хромування має важливе наукове та практичне значення для ремонтного виробництва і технічного сервісу сільськогосподарської техніки.

Мета роботи. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення довговічності агрегатів паливних систем мобільних енергетичних засобів шляхом розроблення та застосування технології відновлення прецизійних деталей наноконпозиційними гальвано-хімічними покриттями на основі хрому.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є прецизійні деталі агрегатів паливних систем мобільних енергетичних засобів та технологічні способи їх відновлення.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є фізико-механічні, триботехнічні та експлуатаційні властивості наноконпозиційних гальвано-

хімічних покриттів на основі хрому при відновленні плунжерних пар паливних насосів високого тиску.

Задачі дослідження.

1. Провести аналіз причин зниження довговічності агрегатів паливних систем мобільних енергетичних засобів та визначити основні ресурсоутворюючі спряження паливної апаратури.

2. Виконати аналіз існуючих способів відновлення прецизійних деталей паливних насосів високого тиску та обґрунтувати доцільність застосування наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів.

3. Обґрунтувати склад наноконпозиційного електролітичного покриття на основі хрому та визначити оптимальні режими його нанесення на робочі поверхні плунжерних пар.

4. Дослідити вплив нанорозмірних частинок на структуру, мікротвердість, зносостійкість і корозійну стійкість гальвано-хімічних покриттів.

5. Провести стендові та експлуатаційні випробування паливних насосів високого тиску з плунжерними парами, відновленими наноконпозиційним електролітичним хромуванням.

6. Виконати прогнозування залишкового ресурсу паливних насосів високого тиску після відновлення прецизійних деталей та оцінити ефективність запропонованої технології.

7. Розробити технологічний процес відновлення плунжерних пар паливних насосів високого тиску із застосуванням наноконпозиційного електролітичного хромування та визначити перспективи його практичного впровадження.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ. ПОСТАНОВКА ЦІЛІ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Проблеми забезпечення надійності та підвищення ресурсу сільськогосподарської техніки

Ефективність сільськогосподарської техніки визначається її здатністю виконувати задані функції і, що не менш важливо, рівнем надійності, який характеризує властивість техніки тривалий час зберігати і, при необхідності, відновлювати свою працездатність при мінімальних витратах часу, праці і матеріальних засобів [2]. У зв'язку з цим основними та найважливішими завданнями сільськогосподарського виробництва є повне використання надійності сільськогосподарської техніки у процесі її експлуатації, а також якісне та маловитратне відновлення надійності до оптимального рівня, що забезпечує найменшу питому вартість одиниці напрацювання техніки між ремонтами [2].

Як відомо, надійність машини включає чотири основні властивості: довговічність, безвідмовність, ремонтпридатність і збереження [2]. Одним із важливих оціночних показників надійності є довговічність, що оцінюється міжремонтним ресурсом [1, 2], величина якого залежить від довговічності тих деталей і з'єднань, чий вихід з ладу тягне за собою виникнення ресурсної відмови та необхідність ремонту вузла або агрегату [3].

Несправності сільськогосподарської техніки в період польових робіт дезорганізують виробництво, позбавляють можливості проводити роботи в оптимальні агротехнічні терміни, часто призводячи до зниження врожайності на 20-30% [3, 4, 50].

В даний час, у зв'язку з нестачею природних ресурсів, найважливіше значення набуває раціонального використання металу та різних енергетичних матеріалів, а довговічність як нової, так і відремонтованої техніки не задовольняє сучасним вимогам [2, 4]. У середньому, простої сільськогосподарської техніки внаслідок ремонту становлять близько 45 %, що

призводить до значних додаткових витрат праці та коштів [9]. У зв'язку з цим підвищення міжремонтного ресурсу сільськогосподарської техніки, а отже, її довговічності має особливо важливе значення, оскільки високий рівень довговічності техніки є основною умовою збереження та підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва.

Велика економія засобів, металу та паливо-мастильних матеріалів може бути досягнута за рахунок збільшення зносостійкості та, відповідно, ресурсу деталей сільськогосподарської техніки [5].

У вартості ремонту сільськогосподарської техніки основна частка витрат припадає на придбання запасних частин [6]. Скорочення витрат нових запасних частин може бути досягнуто відновленням зношених деталей або підвищенням довговічності ресурсо визначальних деталей відповідальних агрегатів. У будь-якому випадку найбільш ефективним є шлях підвищення довговічності деталей як при відновленні в процесі ремонту агрегатів та МЕЗ, так і за їх виробництва в машинобудуванні [7].

В агрегатах МЕЗ та сільськогосподарській техніці найпоширеніші зноси знаходяться в межах 0,01–0,6 мм (рис. 1.1) [7, 8, 31].

Такі зноси спричиняють зміну розмірів, геометричної форми, міцності, жорсткості, маси деталей, структури матеріалу, якості поверхні і, безсумнівно, якості та собівартості виконуваних робіт [31, 32, 50]. Тому при розробці нових технологій відновлення та зміцнення насамперед слід приділяти увагу усуненню таких величин зносів [3].

Нині більшість сільськогосподарських робіт виконують на тракторах. Трактори аграрного призначення – це важлива частина з комплексу техніки та обладнання, призначена для ґрунтообробних, посадкових та збиральних робіт, догляду за сільськогосподарськими культурами, первинної обробки врожаю та багатьох інших сільськогосподарських робіт. Трактори є універсальною технікою, що повсюдно експлуатується в сільському господарстві.

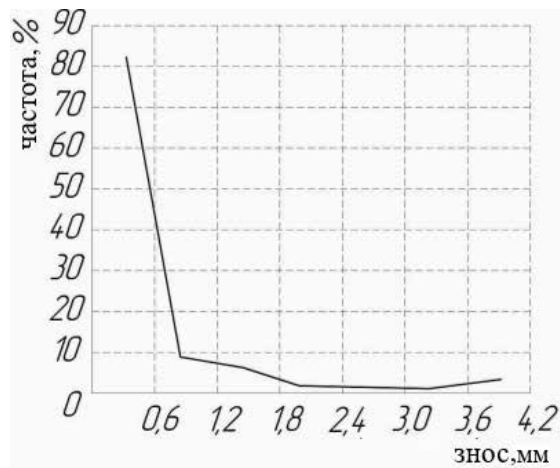


Рис. 1.1 Розподіл величин зносу деталей сільськогосподарської техніки

Найбільш типовими представниками сільськогосподарських тракторів своїх тягових класів є вітчизняні трактори ПМЗ, ХТЗ [9, 10]. Аналіз надійності представлених тракторів дає можливість виявити найменш надійні елементи, які лімітують працездатність об'єктів досліджень для їх подальшого технологічного удосконалення або ж відновлення. Дані розподілу відмов та несправностей агрегатів та систем тракторів ПМЗ, ХТЗ представлені в таблиці 1.1 [4, 10].

Таблиця 1.1

Розподіл кількості несправностей та відмов агрегатів та систем тракторів

Найменування агрегатів та систем	Кількість несправностей та відмов, %		
	ХТЗ (гусеничні)	ХТЗ (колісні)	ПМЗ
Двигун в цілому	37,2	39,1	40,5
у тому числі			
паливна система	40,8	39,7	38,5
система охолодження	6,0	7,5	7,2
система змащення	9,0	9,8	10,0
Газорозподільний механізм	8,8	9,1	8,7
циліндропоршнева група	10,2	9,4	9,9
кривошипно-шатунний механізм	6,5	6,3	6,1
щільність сполук	10,0	10,7	9,3
інші	8,7	8,5	10,8
Електроустаткування	9,8	10,1	9,0
Ходова частина	12,4	13,0	11,7
Гальмівна система	9,5	7,8	9,1
Трансмісія	7,8	7,2	6,9
Гідросистема	21,7	24,3	20,6
Інші	1,4	1,6	1,3

З таблиці 1.1 бачимо, що на двигун припадає найбільший відсоток несправностей та відмов – 37–41%, що є типовим для основного агрегату трактора через високе навантаження та складність його роботи. Для двигуна найбільша кількість відмов припадає на паливну систему – 38–41%, що свідчить про її високу навантаженість та важливість у роботі двигуна. Значна кількість несправностей та відмов також була зафіксована для гідросистем – близько 20–24%, що впливає на роботу органів керування та механізму підйому навісного обладнання. Ходова частина і електрообладнання мають помірні значення – відповідно 10–13% та 9–10% відповідно, підкреслюючи їх важливість у забезпеченні експлуатації тракторів. Відносно нижчі показники несправностей є у трансмісії МЕЗ – 6–8% і гальмівній системі – 7–9%. Але ці системи є критично важливими, тому навіть незначні несправності або відмови можуть призводити до серйозних проблем.

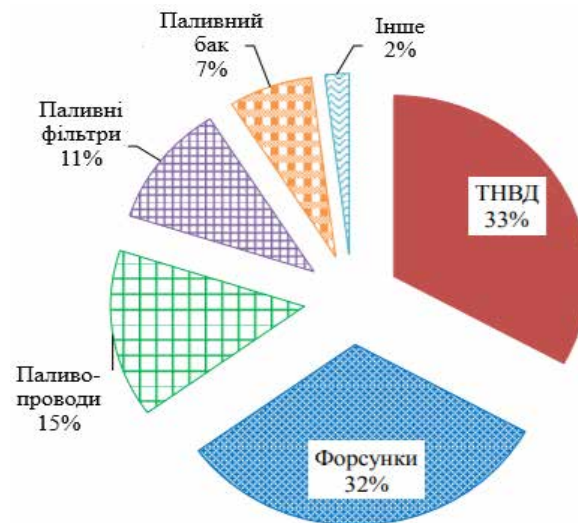


Рис. 1.2 Розподіл несправностей та відмов агрегатів паливної апаратури МЕЗ

Аналіз несправностей та відмов агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки (рис. 1.2) дозволив встановити, що ресурс паливної апаратури обмежується ресурсом ПНВД та форсунками, на які припадають відповідно 33% та 32% від сумарної кількості несправностей та відмов [37, 46, 47].

З вищевикладеного можна дійти до висновку, що надійність МЕЗ у значній мірі визначається ресурсом найбільш відповідальних агрегатів паливної апаратури.

1.2. Аналіз основних видів пошкоджень агрегатів паливної апаратури мобільних енергетичних засобів

Довговічність деталей паливної апаратури сільськогосподарської техніки, включаючи МЕЗ, обумовлена ресурсом її агрегатів. Ефективна робота паливної апаратури визначає основні економічні та експлуатаційні показники ДВЗ, стабільність його параметрів, довговічність, рівень створюваного шуму, питомі вагові та об'ємні характеристики, токсичність та димність відпрацьованих газів [18].

Тверді частинки при неякісній фільтрації палива проходять разом з паливом під високим тиском та з великою швидкістю через малі зазори, що зношують прецизійні пари, внаслідок чого порушується ефективна робота паливної апаратури, та погіршуються техніко-економічні показники ДВЗ [8].

Аналіз багатьох літературних джерел [4, 18] вказує на те, що ресурс ПНВТ та паливної апаратури в цілому визначається ресурсом прецизійних деталей – плунжерних пар [46]. Зношування плунжерних пар ПНВТ в процесі експлуатації викликає зниження потужності ДВЗ, порушення його нормальної роботи, збільшення інтенсивності зношування кривошипно-шатунного механізму, поява нагару на поршнях та деталях розпилювачів форсунок, збільшення питомої витрати палива [20].

З метою зменшення інтенсивності зношування деталей паливних систем, плунжерні пари виготовляють із високовуглецевих легованих та конструкційних сталей і піддають термообробці. Плунжерні пари виготовляють з таких сталей, як 30ХГСА, ШХ15, 38Х2МЮА та ін. Хімічний склад та фізико-механічні властивості окремих сталей, що застосовуються для виготовлення плунжерних пар наведені в таблицях 1.2 та 1.3 відповідно.

Таблиця 1.2

Хімічний склад сталей, які використовуються виготовлення плунжерних пар, %

Марка сталі	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cu	Mo	Al	Cr
				не більше						
30ХГСА	0,32-0,39	0,90-1,20	0,80-1,10	-	0,03	0,02	0,20	-	-	0,8-1,1
ШХ15	0,95-1,05	0,17-0,37	0,20-0,40	0,30	0,02	0,03	0,25	-	-	1,30-1,65
38Х2МЮА	0,35-0,42	0,20-0,45	0,30-0,60	-	0,02	0,02	0,30	0,20	0,7-1,10	1,35-1,65

Таблиця 1.3

Фізико-механічні властивості сталей, що використовуються для виготовлення плунжерних пар

Марка сталі	Межа міцності, МПа	Межа плинності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, кДж/м		Модуль пружності, МПа	Щільність, г/м
30ХГСА	1080	835	10	45	490		2,18	7673
ШХ15 20	590-730	370-410	20	45	440		2,11	7812
38Х2МЮА	825	665	16,5	64	1600		2,09	7710

Використання представлених сталей для плунжерних пар забезпечує їх хорошу оброблюваність, здатність працювати в умовах високих тисків і температур, високу твердість, стійкість до зносу та корозії, збереження стабільності геометричної форми та розмірів.

У зв'язку з незначними зазорами та специфічними умовами роботи плунжерних пар до них пред'являються високі вимоги до допустимих термічних та монтажних деформаціям деталей, високої зносостійкості, стабільності розмірів та міцності. Для досягнення цих вимог використовують різні способи термічної обробки (цементация, азотування, загартування, ціанування, нормалізація, відпустка, та інші) [4]. Представлені сталі після термічної обробки мають практично однакову твердість HRC 55 ... 65 [4].

Зазор у плунжерних парах становить 0,6...2 мкм, що визначає високу чутливість деталей до наявності в паливі абразивних частинок, які викликають

інтенсивне зношування деталей плунжерної пари та швидкий вихід із ладу агрегату паливної системи [8]. Плунжерні пари агрегатів паливних систем працюють у складних умовах. При цьому мають місце високі тиски та швидкість переміщення робочого середовища, що містить тверді абразивні частинки різних розмірів та походження.

В наукових статтях [4, 14] авторами встановлено, що знос у з'єднаннях плунжерних пар ПНВТ викликають мінеральні частинки, які входять до складу різноманітних забруднень. Дослідження складу даних частинок [9] дозволило визначити, що вони на 90% складаються з оксидів металів та кварцу. Мікротвердість кварцу – 10300 ... 11000 МПа, а оксиду алюмінію – 12000...13000 МПа [13], тоді як мікротвердість робочих поверхонь плунжерних пар – 8000 ... 9000 МПа. З чого стає очевидною причина інтенсивного зношування деталей плунжерних пар ПНВТ.

Наявність абразивних частинок у дизельному паливі, співвідношення їх розмірів із зазором у з'єднанні плунжерної пари, а також висока швидкість руху дизельного палива щодо поверхонь деталей ПНВТ визначають гідроабразивний знос плунжерних пар та їх абразивне зношування за рахунок защемлення частинок у зазорі [11].

На основі досліджень, які наведені в наукових роботах [4, 18] встановлено, що абразивне зношування поверхонь деталей плунжерної пари ПНВТ в результаті защемлення абразивних частинок у зазорі між плунжером та гільзою. Абразивні частинки, які більші радіального зазору між плунжером і гільзою, своїми гострими крайками наносять мікроподряпини на поверхні або деформують поверхневий шар при перекочуванні, а частинки, які менші радіального зазору в основному виявляють свою дію при гідроабразивному зношування. Важливим є той факт, що зношування частинками, які защемлені в зазорі, присутні у будь-якому з'єднанні сполучених поверхонь деталей, а гідроабразивному зносу піддаються тільки ті поверхоні, які контактують з потоком дизельного палива.

В результаті аналізу умов роботи деталей плунжерних пар [19] встановлено, що рух дизельного палива щодо деталей плунжерних пар виникає в момент його просочування через зазори періоди початку та кінця подачі. Дизельне паливо, при перетіканні, омиває вікна втулки та плунжера ПНВТ.

У зв'язку з тим, що нагнітання палива здійснюється на частині ходу плунжера, що становить приблизно 1,5...5,0 мм (активний хід плунжера) [4], то гідроабразивному зносу, який обумовлюється просочуванням палива, будуть піддаватися малі ділянки поверхонь деталей, які можна порівняти з активним ходом плунжера і що примикають до країв.

Відмінною особливістю зношування деталей плунжерних пар є його осередкова концентрація на ділянках поверхонь. У втулки зони зношування розташовуються вище впускного та нижче перепускного вікон. У плунжера зони зношування розташовані на поверхнях, які поєднуються під час роботи із зонами зношування втулки. Величини зносів втулки та плунжера різні. В окремих статтях вказано [4], що найбільшому зносу піддається ділянка поверхні плунжера, яка знаходиться найближче до впускного вікна втулки. Глибина каверни у максимально зношеного плунжера ПНВТ може досягати 25...40 мкм. Ширина зношеної поверхні може становити 6,5...8,5 мм, довжина – 8,5...11 мм від краю верхнього торця [194]. Менш інтенсивно зношується втулка, в дослідженнях багатьох авторів встановлено, що біля крайки впускного вікна глибина западини становить 20 мкм [43, 47].

Характерним видом зносів є те, що западини мають глибину, яка збільшується у напрямку до країв плунжера та втулки, що вирівнює переріз каналів, які утворюються в наслідок зношування. Вказана особливість зношування деталей плунжер-гільза вказує на її гідроабразивний характер [37].

В результаті аналізу літературних джерел та викладеного вище, механізм зносу плунжерних пар можна подати у такому вигляді [25]. Під час подачі дизельного палива через впускне вікно втулки (рис. 1.3, а) абразивні частинки, що знаходяться в дизельному паливі, призводять до зносу крайки впускного вікна втулки та крайки плунжера. У початковий момент нагнітання (рис. 1.4 б) і

при відсіканні подачі (рис. 1.4, в) тверді абразивні частинки, що рухаються разом з паливом наносять мікроскопічні подряпини на крайках вікон втулки та плунжера та на безпосередньо прилеглих до них зон поверхонь. При відсіканні подачі (рис. 1.4, г) виникає завихрення струменя палива, яке виходить із великою швидкістю у перепускне вікно. В результаті завихрення, окремі струмені дизельного палива, які містять абразивні частинки, що ударяються по поверхні плунжера вище відсічної крайки.

В статтях, які присвячені питанням дослідження надійності, включаючи паливних систем МЕЗ та ТТМ [37, 48, 49], зазначається, що абразивні частинки, які надходять з дизельним паливом і защемляються в зазорі плунжерної пари, призводять до зношування деталей і після відсічення подання. Тобто втрата працездатності плунжерних пар за своїм характером є гідроабразивним зношуванням і супроводжується затисканням абразивних частинок. Процес зношування здійснюється за рахунок палива, що рухається, і абразивних частинок, які контактують з деталями.

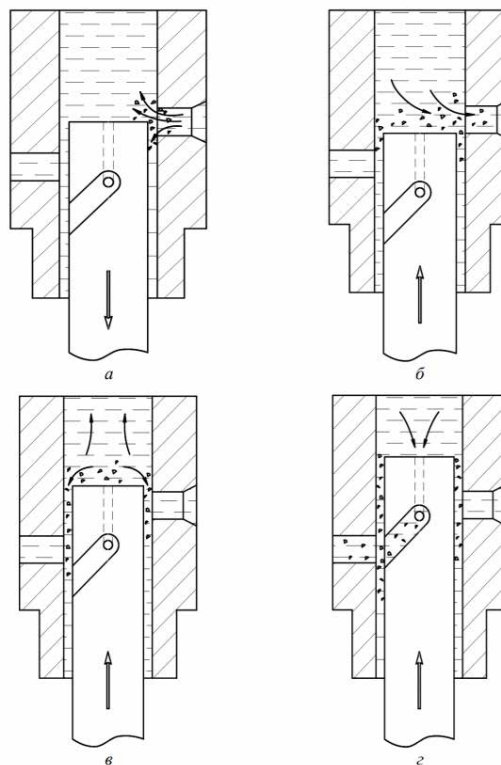


Рис. 1.3. Аналіз механізму зношування пар плунжер-гільза ПНВТ: *а* – момент подачі палива; *б* – початковий момент нагнітання; *в* – момент нагнітання палива; *г* – момент відсічення подачі

Це призводить до появи на робочих поверхнях плунжерної пари каверн та глибоких борозен (рис. 1.4) [4].

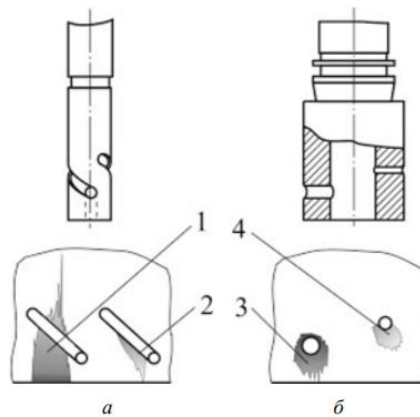


Рис. 1.4. Місця зносу пари ПНВТ плунжер-втулка: *а* – плунжера, *б* – втулки; 1, 3 – зони місцевих зносів відповідно плунжера та втулки поблизу впускного вікна; 2, 4 – зони місцевих зносів відповідно плунжера та втулки поблизу відсікового вікна

На зношування плунжерних пар суттєво впливає вода, присутня в дизельному паливі, яка сприяє розвитку електрохімічної корозії та погіршенню змащувальних властивостей палива. Внаслідок цього посилюється корозійне руйнування деталей паливної апаратури, утворюються продукти корозії, що додатково забруднюють паливо та потрапляють у зазори прецизійних сполучень. Наявність води в зазорі плунжерної пари порушує цілісність паливної плівки, викликає безпосередній контакт поверхонь тертя, що призводить до інтенсивного зношування та можливого схоплювання деталей.

Аналіз механізму та характеру зношування деталей плунжерних пар свідчить про те, що процес їх руйнування має комплексний гідроабразивний характер, обумовлений одночасною дією механічного тертя, абразивних частинок робочого середовища та впливом гідродинамічних навантажень. Встановлено, що інтенсивність зношування елементів плунжерної пари є нерівномірною: втулка характеризується в 1,5–2,0 рази меншою величиною зносу порівняно з плунжером. При цьому максимальне зношування поверхні плунжера, як правило, не перевищує 40 мкм.

Отримані результати дають підстави стверджувати, що для забезпечення підвищення довговічності плунжерних пар у процесі їх відновлення доцільним є формування на робочій поверхні плунжера зміцненого шару товщиною не більше 80 мкм. Зазначена товщина повинна враховувати граничні значення зношування плунжера та втулки, а також припуски на подальшу механічну обробку. Водночас сформований поверхневий шар має характеризуватися високими показниками мікротвердості, зносостійкості та корозійної стійкості, що забезпечить підвищення ресурсу та експлуатаційної надійності плунжерних пар.

1.3 Аналіз способів відновлення та зміцнення плунжерних пар паливних насосів високого тиску

В даний час існує ряд способів відновлення та зміцнення плунжерних пар ТНВД [1, 20, 37]: перекомплектування, виготовлення ремонтної деталі, пластичне деформування, хімічне нікелювання, повторне азотування, дифузійне хромування, борування, сульфоборування, електролітичне хромування.

Відновлення методом перекомплектування [38, 48]. Даний спосіб здійснюється за рахунок притирання, з подальшим сортуванням на розмірні групи, добірку та взаємне притирання деталей. Втулки притирають на притирочному верстаті у два етапи з використанням крупно, а потім дрібно абразивних притиральних паст.

Режими притирання: частота обертання притиру або деталі 250 хв^{-1} ; число подвійних ходів притира чи деталі $100...150 \text{ хв}^{-1}$; вихід притиру за межі обробки плунжера 10...12 мм, втулки – 20...26 мм; початковий тиск на притир 0,1 ... 0,2 Па [46, 47, 48]. Плунжер притирають за технологічним процесом аналогічно описаному. Для притирання деталей закріплюють у шпинделі, а притирання – у затискному пристосуванні.

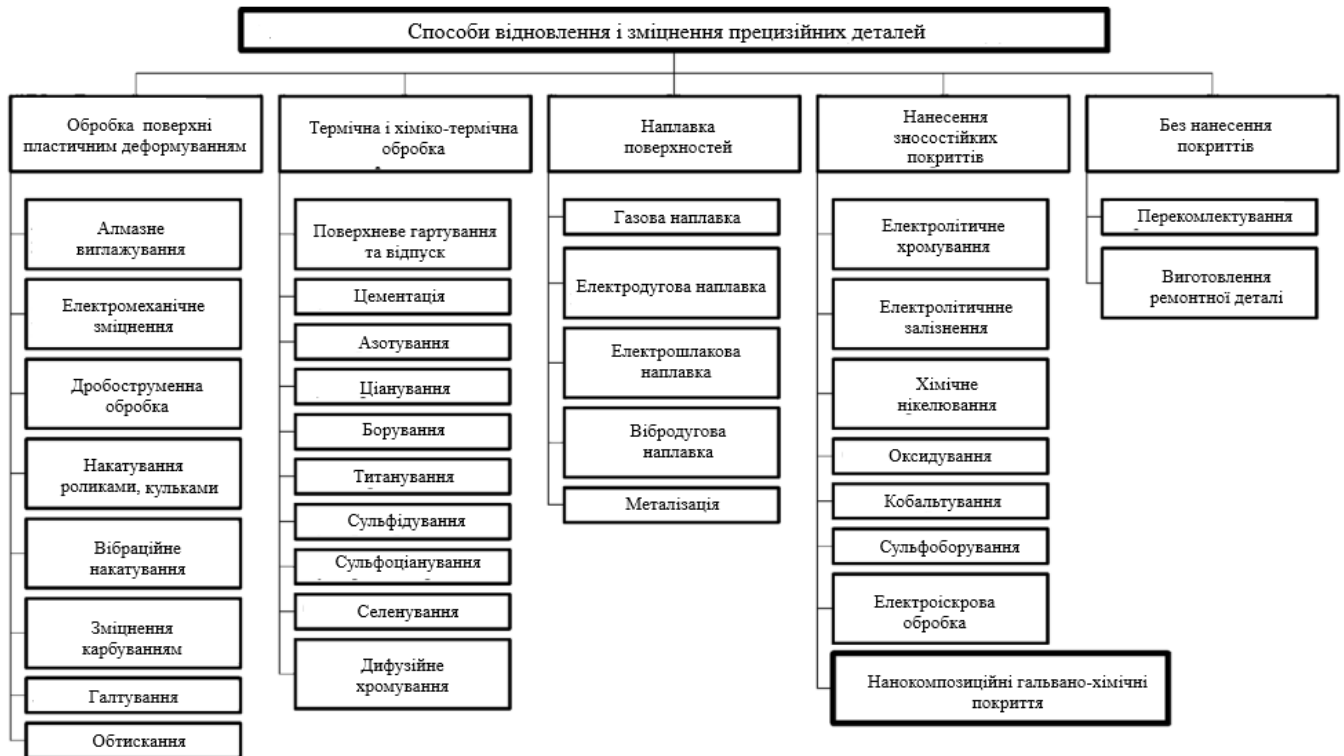


Рис. 1.5. Класифікація способів відновлення та зміцнення прецизійних деталей

Після закінчення притирання деякої кількості деталей здійснюють їх замір, сортування на розмірні групи та підбір пари таким чином, щоб плунжер входив у втулку на $1/3$ довжини зусилля руки. Після цього протягом 1-2 хв плунжер та втулку взаємно притирають. Частота обертання плунжера $100 \dots 150 \text{ хв}^{-1}$; число подвійних ходів втулки $80 \dots 100 \text{ хв}^{-1}$ [38, 46, 48].

Інший можливий спосіб відновлення – виготовлення ремонтної деталі [16]. Цей спосіб здійснюється шляхом виготовлення нової деталі з двох у з'єднанні.

На першому етапі проводять механічну обробку зношених деталей. З втулки видаляють сліди зношування, потім виготовляють новий плунжер зі збільшеним зовнішнім діаметром, після чого здійснюють їх притирання з втулкою на режимах, описаних вище. Недоліками цього методу відновлення є: висока собівартість за рахунок необхідності придбання серійного технологічного обладнання, аналогічного застосовуваному на заводі-виробнику; великий витрата металу виготовлення ремонтної деталі; збільшена

кількість селективних груп. Зазначені недоліки обмежують застосування способу для відновлення деталей плунжерних пар.

Інший спосіб відновлення деталей плунжерних пар ПНВТ – пластичне деформування втулки плунжера. Цей спосіб заснований на здатності металів змінювати свої форми та розміри без руйнування під впливом навантаження з допомогою залишкової пластичної деформації [1, 39]. При пластичній деформації обсяг деталі залишається без змін, переміщається тільки метал з однієї ділянки на іншу.

При використанні даного способу для відновлення плунжерних пар, здійснюють пластичне деформування втулки, внаслідок чого зменшується внутрішній діаметр втулки за рахунок переміщення металу внутрішньої поверхні до отвору під тиском на пресі. Пластичне деформування проводять з попереднім нагріванням металу до температури 600...650 °С. Подальше притирання отвору у втулці здійснюють за технологією заводу виробника. Зношені плунжери піддають притирання, після чого їх комплектують із втулками.

Недоліками даного способу є зміна структури та фізико-механічних властивостей деталей, складність обладнання, що застосовується, висока енергоємність процесу.

Хімічне нікелювання є одним із перспективних методів відновлення плунжерних пар, який полягає у нанесенні на поверхню плунжера нікелевого покриття з водного розчину без використання електричного струму. До складу електроліту входять солі нікелю, гіпофосфіт натрію та оцтовокислий натрій, а процес осадження покриття здійснюється при температурі 90–94 °С. Важливою перевагою даного способу є висока рівномірність отримуваних покриттів, що особливо важливо для прецизійних деталей ПНВТ.

В процесі хімічного нікелювання разом із нікелем на поверхні осаджується фосфор, присутність якого забезпечує підвищення твердості покриття до HRC 42–45. Додаткова термічна обробка при температурі 400 °С протягом 1 год. дозволяє збільшити твердість шару до HRC 65–67 [29].

Отримані покриття характеризуються високою зносостійкістю, корозійною стійкістю та здатністю забезпечувати підвищення ресурсу плунжерних пар.

Одним із методів зміцнення поверхонь плунжерних пар є азотування, яке базується на дифузії азоту в поверхневий шар металу з утворенням нітридних сполук. Процес здійснюється при температурі 440–460 °С протягом 25–30 год., при цьому середня швидкість дифузії азоту становить близько 0,01 мм/год [39]. У результаті азотування підвищуються твердість і зносостійкість поверхневого шару, однак процес супроводжується структурними перетвореннями, що можуть спричиняти зміну геометричних розмірів деталей. Основними недоліками методу є значна тривалість процесу, нерівномірність товщини азотованого шару, нестабільність розмірів деталей та складність технологічного обладнання, що обмежує його ефективність при відновленні плунжерних пар.

Для підвищення експлуатаційних властивостей плунжерів також застосовують дифузійне хромування, яке полягає у насиченні поверхневого шару сталевих деталей хромом за високих температур (950–1300 °С) [13]. Залежно від технології розрізняють тверде, рідке та газове хромування. Тверде хромування здійснюється аналогічно цементації, газове – при температурах 900–1100 °С протягом 3–6 год, а рідке – у ваннах із ферохромом при 950–1150 °С. Товщина сформованого шару становить 0,01–0,15 мм, а твердість досягає HV 1300–1350.

Дифузійне хромування забезпечує високу зносостійкість, корозійну стійкість та міцне зчеплення покриття з основним металом. Водночас застосування цього способу для відновлення плунжерних пар обмежується значною тривалістю процесу, можливістю короблення деталей та малою товщиною дифузійного шару.

Хімічне борування плунжерів і втулок ґрунтується на дифузійному насиченні поверхневого шару деталей бором [9, 39, 44]. Залежно від технології процес може здійснюватися шляхом електролізу розпавленої бури або методом рідкого борування. Формування борованого шару товщиною 0,15–0,25 мм відбувається при температурі 900–1100 °С протягом 1–3 год. Отримані

покриття характеризуються високою твердістю та зносостійкістю, однак застосування методу обмежується значною тривалістю процесу, можливістю короблення деталей і підвищеною крихкістю дифузійного шару.

Одним із різновидів хіміко-термічної обробки є хімічне сульфоборування, яке полягає у сульфідуванні сталевих деталей у середовищі з додаванням бури [44]. Процес проводиться при температурі 130–150 °С і забезпечує формування поверхневого шару товщиною близько 20 мкм протягом 50–60 хв. Сформоване покриття містить сульфіди, що покращують антифрикційні властивості поверхні, та борати з твердістю до 13000 МПа. Разом із тим метод характеризується складністю технологічного процесу та незначною товщиною покриття.

Для відновлення та зміцнення плунжерних пар широко застосовується електролітичне хромування, яке забезпечує високу мікротвердість, зносостійкість і корозійну стійкість покриття [40, 45]. Властивості хромового шару значною мірою визначаються режимами електролізу, концентрацією компонентів електроліту та температурою процесу. Електроліти для хромування являють собою розчини хромової кислоти, отримані шляхом розчинення хромового ангідриду у воді з додаванням сірчаної кислоти.

Залежно від режимів осадження формуються матові, блискучі або молочні хромові покриття. Матові покриття мають найвищу твердість (до 10000 МПа), проте характеризуються крихкістю. Блискучі покриття поєднують високу твердість і зносостійкість, тоді як молочні відзначаються більшою пластичністю при дещо нижчій твердості [40]. Дослідження показали, що блискучі хромові покриття мають розвинену сітку мікротріщин, які утворюються вже при товщині шару близько 0,01 мм [14, 20]. Наявність таких дефектів знижує корозійну стійкість покриття та сприяє проникненню абразивних частинок у зону тертя.

Разом із тим хромування забезпечує значне підвищення зносостійкості плунжерів – у середньому в 2,5–3 рази [16]. Встановлено, що зносостійкість хромових покриттів у ряді випадків перевищує показники азотованих сталей у

4–5 разів, а конструкційних сталей – у 10–15 разів [45]. Перевагами методу є висока твердість покриття, відсутність значного термічного впливу на деталь та можливість повного відновлення зношених поверхонь.

Основними недоліками електролітичного хромування є низька продуктивність процесу, недостатня міцність зчеплення покриття з основним металом і наявність мікротріщин у структурі осаду. У процесі експлуатації це може спричиняти відшаровування та викришування покриття, інтенсивне зношування втулки плунжера й виникнення заклинювання прецизійних пар [20].

Таким чином, проведений аналіз основних методів нанесення гальванічних покриттів дозволяє зробити висновок, що вони є одним із найбільш ефективних напрямів підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та довговічності деталей машин, зокрема прецизійних елементів паливної апаратури.

Встановлено, що електролітичні методи осадження металів забезпечують можливість формування покриттів із широким діапазоном фізико-механічних властивостей шляхом регулювання складу електроліту, густини струму, температури та інших технологічних параметрів. Це дозволяє отримувати як тверді та зносостійкі, так і більш пластичні покриття залежно від умов експлуатації деталей.

1.4. Фізико-механічні властивості та механізм вивчення наноконпозиційних електролітичних покриттів

Наноконпозиційні електролітичні покриття відносяться до гальванічних осадів, у яких металева матриця містить рівномірно розподілені дисперсні включення іншої природи. Така структура формується внаслідок спільного осадження металу та частинок другої фази, що дає можливість керувати експлуатаційними характеристиками отриманих шарів [5, 21].

Історично перші дослідження у напрямі композиційного електроосадження були виконані у 1925 році, який експериментально підтвердив можливість включення до структури залізного покриття частинок графіту в невеликій кількості [21, 17]. Надалі І. Принц та Дж. Фінк продемонстрували формування аналогічних композиційних осадів на основі міді з дисперсними включеннями графіту. Однак на початковому етапі розвитку ці роботи не отримали широкого практичного використання. Лише з середини XX століття технології співосадження металів із твердими частинками почали активно впроваджуватися, зокрема у виробництві зносостійких алмазовмісних покриттів.

Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із роботами [44–46], які вивчали формування композиційних осадів на основі заліза з введенням оксидних, карбідних і сульфідних частинок, таких як Al_2O_3 , MoS_2 та TiC [44–46]. Було встановлено, що введення дисперсної фази впливає на морфологію та структурну досконалість покриттів, сприяє зниженню тріщинуватості та зміні рівня внутрішніх напружень. Крім того, використання окремих наповнювачів дозволяє зменшити водневе насичення покриттів, що позитивно впливає на їх експлуатаційну стабільність. При цьому зносостійкість таких матеріалів значно перевищує показники традиційних залізних осадів.

Дослідження [5] підтвердили, що введення твердих частинок у нікелеву матрицю суттєво змінює властивості покриттів, а їх формування визначається дисперсністю частинок, умовами перемішування електроліту та параметрами електролізу [5]. Отримані результати показали підвищення мікротвердості, зносостійкості та корозійної стійкості композиційних нікелевих покриттів порівняно з традиційними аналогами.

Окремий напрям становлять дослідження композиційних хромових покриттів, які проводилися з 1960-х років і були спрямовані на вдосконалення електролітичного хромування шляхом введення дисперсних фаз та оптимізації складу електролітів [28]. Узагальнюючи, слід відзначити, що композиційні електролітичні покриття є ефективним інструментом поверхневого

інженерування, оскільки дозволяють формувати матеріали з комплексом заданих властивостей шляхом поєднання металевої основи та функціональних дисперсних включень.

Основні дисперсні матеріали другої фази, що впливають на властивості покриттів наведено в таблиці Додатку А1.

Для отримання композиційних покриттів застосовуються матеріали другої фази як штучного, і природного походження. Основні властивості матеріалів другої фази, що застосовуються для отримання наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів – в таблиці Додатку А2

Наноконпозиційні електролітичні покриття являють собою складні багатофазні системи, що формуються шляхом спільного електроосадження металевої матриці та дисперсних частинок другої фази, введених до складу електроліту у вигляді суспензії [5, 21]. Такий підхід дозволяє формувати покриття з керованими експлуатаційними властивостями за рахунок регулювання складу, розміру та концентрації частинок, а також параметрів електролізу.

Узагальнення результатів досліджень свідчить, що композиційні покриття можуть формуватися при введенні в електроліт частинок різної природи та дисперсності (приблизно 0,1–50 мкм) у концентраціях 5–100 г/л. Незважаючи на відносно невеликий об'ємний вміст другої фази в осаді (зазвичай до 2 %), її присутність суттєво впливає на структуру та фізико-механічні характеристики покриттів [18].

Встановлено, що введення дисперсної фази у розчин електроліту також впливає на кінетику процесу: підвищується вихід за струмом, зменшується крихкість осаду та зростає його пластичність. Окремі системи, такі як Cr–SiC або Cr–WC, можуть містити до 8–10 % включень, що забезпечує підвищення мікротвердості до 11–16 ГПа порівняно з 7–9,5 ГПа для базових покриттів.

Важливою особливістю композиційних покриттів є стабільність їх властивостей у часі: на відміну від традиційних гальванічних осадів, які схильні до швидкої релаксації внутрішніх напружень та зниження твердості,

нанокомпозиційні системи зберігають підвищені характеристики протягом тривалої експлуатації [5, 21]. Крім того, вони демонструють підвищену термостійкість, що підтверджується можливістю роботи окремих систем при температурах 2000–3600 °С залежно від типу дисперсної фази.

Механізм формування таких покриттів включає послідовні стадії: транспорт частинок до катодної поверхні, їх фіксацію на ній та подальше включення в зростаючий металевий шар. Переміщення частинок забезпечується як гідродинамічними процесами (перемішування, циркуляція електроліту), так і дифузійними та електрокінетичними явищами. При цьому найбільш ефективно співосадження спостерігається для частинок нанорозмірного рівня, які здатні тривалий час перебувати у зваженому стані завдяки броунівському руху.

Формування структури композиційних покриттів істотно залежить від режимів електролізу, властивостей частинок та умов їх взаємодії з катодною поверхнею. Встановлено, що дисперсна фаза впливає на локальні електричні поля, процеси поляризації та характер кристалізації металу, що визначає кінцеву морфологію та експлуатаційні властивості покриття.

Отже, нанокомпозиційні електролітичні покриття є перспективним напрямом поверхневого інженерування, оскільки дозволяють поєднувати властивості металевої матриці та функціональних дисперсних включень, формуючи матеріали з підвищеною зносостійкістю, твердістю та термостійкістю при мінімальному вмісті

Форма, розміри та морфологія частинок другої фази розглядаються як один із ключових факторів, що визначають механізм формування та структурні особливості композиційних електролітичних покриттів [18, 19]. Як показали металографічні дослідження, виконані в [18, 19], характер структури гальванічних осадів суттєво змінюється залежно від наявності дисперсних включень та співвідношення їхніх властивостей із властивостями металевої матриці (рис. 1.10) [5].

Для однофазних електролітичних покриттів, отриманих без введення частинок другої фази, характерним є утворення розвиненої системи тріщин

різної орієнтації, зокрема поздовжніх і перехресних, які відображають процеси релаксації внутрішніх напружень (рис. 1.10, а).

У випадку введення дисперсних частинок, твердість яких є нижчою за твердість матричного матеріалу, розвиток тріщин не стримується включеннями, унаслідок чого вони вільно поширюються в об'ємі покриття (рис. 1.10, б).

За умови співмірних значень твердості матриці та дисперсної фази можливі два варіанти структуроутворення (рис. 1.10, в): у першому випадку частинки не перешкоджають поширенню тріщин через наявність внутрішніх дефектів або недостатню площу їх перерізу, і тріщини розвиваються переважно вздовж напрямку росту кристалів; у другому випадку включення виконують роль бар'єрів для тріщиноутворення, що сприяє підвищенню тріщиностійкості та захисних властивостей покриття.

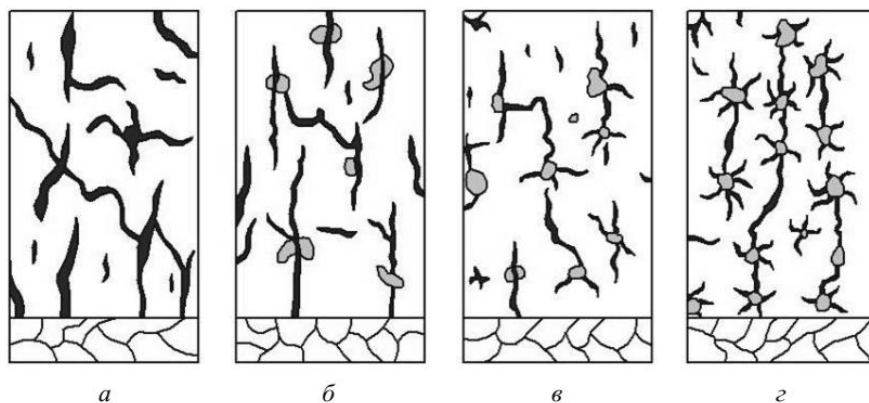


Рис. 1.10 – Моделі структури композиційних електролітичних покриттів, отриманих з електролітів без включень (а) та з введенням до їх складу частинок різної твердості (б, в, г)

Найбільш сприятлива структура формується при значному перевищенні твердості дисперсних частинок над твердістю металевої матриці (рис. 1.10, г). У цьому випадку напруження концентруються в міжчастинкових зонах, що зумовлює утворення великої кількості мікротріщин, розміри яких на кілька порядків менші порівняно з однофазними покриттями. При цьому зменшується ймовірність формування наскрізних тріщин, що в результаті підвищує загальну захисну здатність композиційного покриття.

Покриття, що мають таку структуру, меншою мірою впливають на зниження втомної міцності матеріалу, на який їх наносять. Покриття, одержувані, наприклад, хромуванням, мають межу втомної міцності в 3–5 разів менше, ніж у інших випадках [21].

Великий вплив на механізм утворення композиційних електролітичних покриттів надає природа дисперсних частинок.

Узагальнюючи результати досліджень щодо формування композиційних електролітичних покриттів, слід відзначити, що важливе значення має електрофізичний стан частинок другої фази, зокрема їх електропровідність та розмір. Згідно з узагальненими даними, використання електропровідних частинок теоретично сприяє більш інтенсивному включенню дисперсної фази в металеву матрицю. Однак у практичному аспекті такі частинки можуть викликати формування пухких, недостатньо щільних покриттів, що зумовлює необхідність додаткових операцій ущільнення та підвищення адгезії до основи [12]. У зв'язку з цим більш технологічно доцільним вважається застосування неелектропровідних частинок з розмірами порядку 0,01–0,1 мкм. Така дисперсність забезпечує їх стабільне утримання в прикатодній зоні та сприяє рівномірному включенню в зростаючий електролітичний осад у момент контакту з катодною поверхнею.

Водночас, як зазначено в [14], оптимізація процесу формування композиційних покриттів значною мірою залежить від стабільності електроліту-суспензії та розмірних характеристик частинок [14]. З позиції гідродинамічної стійкості та ефективності включення в покриття найбільш раціональним є використання частинок розміром 0,01–0,05 мкм. Більш крупні фракції (0,1–10 мкм) характеризуються меншою здатністю до включення в осад, схильністю до швидкої седиментації та виходом із прикатодної області, що призводить до зниження їх фактичної концентрації порівняно з розрахунковою.

Практика формування композиційних електролітичних покриттів показує, що найчастіше застосовують електроліти-суспензії з концентрацією дисперсної

фази в межах 1–5 г/л [17]. У ряді досліджень для підвищення вмісту частинок у покритті використовували підвищені концентрації дисперсної фази.

1.5. Висновки до розділу

1. Аналізу надійності сільськогосподарської техніки свідчить, що її експлуатаційна працездатність значною мірою визначається технічним станом агрегатів паливної системи, на які припадає близько 42 % усіх відмов і несправностей. Встановлено, що ресурс цієї системи обмежується довговічністю прецизійних пар – плунжерних елементів ПНВТ.

2. Дослідження характеру зношування прецизійних пар показало, що домінуючим механізмом їх деградації є гідроабразивне руйнування робочих поверхонь, яке супроводжується інтенсивною взаємодією механічного тертя, гідродинамічних впливів і явищами захоплювання. Максимальні значення сумарного зносу становлять до 60 мкм.

3. Аналізом встановлено, що підвищення ресурсу прецизійних пар можливе шляхом керованого збільшення мікротвердості робочих поверхонь та раціонального підбору триботехнічно сумісних матеріалів, а це дозволяє зменшити інтенсивність зношування та захоплювання у зонах тертя.

4. Встановлено недостатню технологічну керованість та обмежену здатність забезпечувати необхідний рівень довговічності відновлених деталей. У зв'язку з цим встановлена перспективність застосування наноконпозиційних гальвано-хімічних технологій, зокрема електролітичного хромування.

5. Виявлено, що підвищення ефективності відновлення прецизійних деталей потребує подальшого розвитку теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на обґрунтування механізмів зміцнення наноконпозиційних покриттів, вивчення їх структури та властивостей, а також удосконалення технологій формування покриттів на основі хрому, метою підвищення ресурсу паливної апаратури.

РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ СЕРЕДНЬОГО ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ АГРЕГАТИВ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ

2.1 Ресурс агрегатів паливної апаратури

Підвищення середнього технічного ресурсу агрегатів є найбільш раціональним. Проводити шляхом збільшення міжремонтних ресурсів, зберігаючи незмінним кількість капітальних ремонтів [32, 33].

Для поєднання деталей плунжер-втулка залежність між ресурсом і зносом можна подати у вигляді схеми (рис. 2.1) [27, 41].

Згідно з рисунком 2.1, граничний знос з'єднання $З_{np}$ [38]:

$$З_{np} = З'_{np} + З''_{np} = S_{np} - S_{поч}. \quad (2.1)$$

У дослідженнях, проведених І.В. Крагельським, Д.М. Гаркуновим [11, 33], встановлена залежність ресурсу з'єднання плунжер-втулка від швидкості зношування:

$$T_{пари} = \frac{З_{np}}{I_{h(t)}}, \quad (2.2)$$

де $I_{h(t)}$ – швидкість зношування з'єднання, мм/год.:

$$I_{h(t)} = I'_{h(t)} + I''_{h(t)}, \quad (2.3)$$

де $I'_{h(t)}$, $I''_{h(t)}$ – швидкості зношування першої та другої деталей відповідно, мм/год.;

Таким чином, відповідно до формул (2.2) та (2.3) ресурс з'єднання при постійному граничному зазорі визначається швидкостями зношування деталей, що сполучаються.

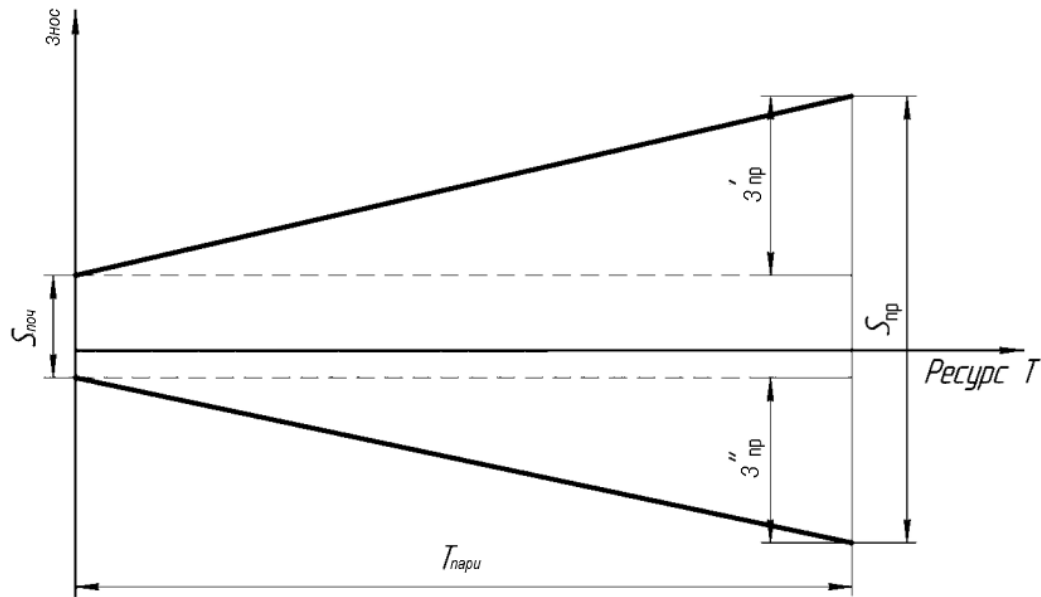


Рис. 2.1. Залежність між ресурсом та зносом для з'єднання плунжер-втулка: $З'_{пр}$, $З''_{др}$ – граничні зноси першої та другої деталей відповідно; $S_{поч}$, $S_{пр}$ – початковий та граничний зазори сполучення відповідно; $T_{пару}$ – ресурс сполучення

У розрахунках на знос при дослідженні процесу зношування прийнято використовувати значення інтенсивності зношування I_h .

Інтенсивність лінійного зношування пов'язана зі швидкістю зношування залежністю [188, 200]:

$$I_h = \frac{I_{h(t)}}{V_{тр}}, \quad (2.4)$$

де $V_{тр}$ - швидкість відносного переміщення поверхонь тертя, мм/год.

При розрахунку ресурсовизначальних з'єднань на знос важливим фактором є встановлення характеру взаємодії поверхонь тертя.

Руйнування поверхонь тертя, як правило, проявляється у відділенні частинок матеріалу, розмір яких змінюється від часток мікрметрів до кількох мікрметрів [9]. Цей процес більшою мірою супроводжується багаторазовим впливом навантажень та температурних імпульсів на одиничні нерівності. В основному руйнуванню передують зміни властивостей поверхонь тертя. У зв'язку

із зазначеним, механізми та характери зношування поверхонь поршень-втулка ПНВТ досить різноманітні.

У роботах І.В. Крагельського [33] запропоновано класифікацію фрикційних зв'язків поверхонь тертя, встановлює п'ять їх видів: пружне відтискання матеріалу; пластичне відтискання матеріалу; зріз впровадженого матеріалу; захоплювання плівок, що покривають поверхні твердих тіл та їх руйнування; захоплювання поверхонь, що супроводжується глибинним вириванням матеріалу.

Дослідження, які подані в роботах [4, 12, 15], а також передумови, викладені вище, дають підстави вважати, що в плунжерних парах переважаючим є пластичне відтискання металу та мікрорізання.

В роботах І.В. Крагельського та Д.М. Гаркунова встановлено сумарну залежність інтенсивності зношування при спільній дії кількох видів зношування [10, 11, 24, 33].

Тоді сумарну інтенсивність зношування $\sum I_h$ однієї з двох деталей плунжерних пар можна представити в наступному вигляді:

$$\sum I_h = I_h^{\text{пп}} + I_h^{\text{р}}, \quad (2.5)$$

$I_h^{\text{пп}}$ – інтенсивність зношування внаслідок пластичного відтиснення металу;

$I_h^{\text{р}}$ – інтенсивність зношування внаслідок мікрорізання.

Інтенсивність зношування внаслідок пластичного відтиснення металу можна визначити за формулою [24, 37]:

$$I_h^{\text{пп}} = \frac{\sqrt{\frac{h_{\text{max}}^v}{r}} \left\{ 1 - \frac{h_{\text{max}}}{r} \left(\frac{q_a}{HB} \right)^{\frac{1}{v}} - \sqrt{\frac{2h_{\text{max}}}{R}} \left(\frac{q_a}{HB} \right)^{\frac{1}{v}} \frac{\sigma_S + 2\tau}{\sigma_S - 2\tau} \right\}^t}{2(v+1)[\ln(1+\delta)]^t} \cdot \left(\frac{q_a}{HB} \right)^{1+\frac{1}{2v}} \quad (2.6)$$

де h - глибина впровадження (висота мікронерівності), мм;

r – радіус плями контакту, мм;

v - емпіричний коефіцієнт, що залежить від шорсткості поверхні;

q_a – тиск на номінальну площу контакту, Па;

HB – твердість;

R – радіус заокруглення мікровиступів (радіус одиничної мікронерівності), мм;

σ_s – межа плинності, Па;

τ – тангенційна міцність фрикційного зв'язку, Па;

t – показник кривої втоми;

δ – розривне подовження, %.

Інтенсивність зношування в результаті мікрорізання [17, 22, 33] можемо записати:

$$I_h^p = \frac{tg\beta}{2(n+1)} \frac{q_a}{HB}, \quad (2.7)$$

де β - кут впровадження абразивної частинки в поверхню деталі, град.;

$n+1$ – число циклів, що призводять до відокремлення частинок зносу.

Інтенсивність зношування при мікрорізанні залежить від гостроти абразивних частинок, вона пропорційна питомому номінальному тиску та обернено пропорційна твердості матеріалу деталі.

З урахуванням формул (2.5)–(2.7) вираз визначення сумарної інтенсивності зношування однієї з двох деталей сполучень плунжерних або золотникових пар набуде вигляду:

$$\sum I_n = \left[\frac{\sqrt{\frac{h_{max}^v}{r}} \left\{ -\ln \left[1 - \frac{h_{max}}{r} \left(\frac{q_a}{HB} \right)^{\frac{1}{v}} - \sqrt{\frac{2h_{max}}{R}} \left(\frac{q_a}{HB} \right)^{\frac{1}{v}} \frac{\sigma_s + 2\tau}{\sigma_s - 2\tau} \right] \right\}^t}{2(v+1)[\ln(1+\delta)]^t} \cdot \left(\frac{q_a}{HB} \right)^{1+\frac{1}{2v}} \right] + \left[\frac{tg\beta}{2(n+1)} \frac{q_a}{HB} \right]$$

Аналіз формули (2.8) показує, що інтенсивність зношування пропорційна навантаженню q_a у ступені більше одиниці:

$$\sum I_n \sim q_a^{1+\frac{t+1}{2v}}. \quad (2.9)$$

Враховуючи, що зазвичай v і t коливаються в межах 2-3, показник ступеня при навантаженні змінюватиметься в межах 1,5-2,0.

Інтенсивність лінійного зношування пов'язана з фізико-механічними властивостями матеріалу поверхонь, що труться наступною залежністю:

$$\sum I_n \sim \frac{\left(\frac{\sigma_S + 2\tau}{\sigma_S - 2\tau}\right)^{\frac{t}{2}}}{\delta^t (HB)^{1 + \frac{t+1}{2v}}} \quad (2.10)$$

Залежність (2.10) виражає зв'язок зносу з характеристиками пластичності матеріалу, твердості, фрикційними властивостями та втомою. У загальному випадку інтенсивність лінійного зношування тим менша, чим менше тангенціальна міцність фрикційного зв'язку і що вище твердість і розривне подовження.

Таким чином, твердість матеріалу поверхонь, що труться, пов'язана з інтенсивністю зносу в такий спосіб [9–11]:

$$\sum I_n \sim \left(\frac{1}{HB}\right)^{1 + \frac{t+1}{2v}} \quad (2.11)$$

Аналізуючи вираз (2.8), можна дійти невтішного висновку у тому, що важливим фактором, що впливає на інтенсивність зносу, є твердість поверхонь тертя. Тому великий науково-практичний інтерес представляє вивчення впливу нанорозмірних частинок на мікротвердість одержуваних покриттів, інтенсивність їх зношування та ресурс сполучення загалом.

Для більшості деталей сільськогосподарської техніки вихід з ладу обумовлений зношуванням. Чим вище твердість металу, тим менше знос однак, характеристики структури або властивостей вносять певний, а іноді і суттєвий внесок у опір зношування. Отже, методи підвищення твердості поверхні приводять різною мірою до підвищення зносостійкості деталей машин.

Таким чином, очевидно, що з підвищенням твердості матеріалу буде підвищуватися його зносостійкість та збільшуватися ресурс з'єднання, виготовлених із цього матеріалу.

У дослідженнях, проведених в наукових роботах встановлено, що внаслідок внесення нанорозмірних частинок у різні електроліти та розчини мікротвердість отриманих покриттів зростає. Однак в спеціальній літературі практично немає теоретичних залежностей, які дозволяють розраховувати та прогнозувати мікротвердість нанокомпозиційних гальванохімічних покриттів. Це пояснюється великою кількістю супутніх процесу нанесення покриттів таких факторів, як електрофоретичне перенесення, дифузія, броунівський рух, налипання, змочуваність, седиментація, адсорбція, адгезія, електрична взаємодія катода з частинками, зіткнення частинок другої фази з блоками, що формуються. кристалів, зародками та іншими незавершеними структурами, виникнення дефектів структури металу покриття (пор, тріщин, капілярів, мікро- і макронерівності поверхні катода) та ін.

Найімовірнішим є визначення усередненої мікротвердості нанокомпозиційного покриття, яка є мікротвердість покриття на одиничній площі, за умови, що на збільшення мікротвердості впливає як мікротвердість самих частинок, а й мікротвердість матеріалу покриття, зміцненого внаслідок зміни його структури.

Для встановлення залежності зміни мікротвердості покриттів необхідно вивчити процеси утворення та зміцнення гальвано-хімічних покриттів нанокомпозиційними включеннями.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма та методика експериментальних досліджень прецизійних пар плунжер–втулка паливних насосів високого тиску

Експериментальні дослідження були спрямовані на встановлення закономірностей впливу наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів на показники зносостійкості, корозійної стійкості та експлуатаційної надійності прецизійних спряжень плунжер–втулка ПНВТ. Формування програми досліджень здійснювали з урахуванням вимог чинних нормативних документів ДСТУ щодо забезпечення достовірності експерименту, повторюваності результатів та контролю умов проведення випробувань [14, 37].

Загальна структура досліджень передбачала послідовне виконання комплексу лабораторних, стендових та експлуатаційних випробувань. Структурно-логічна схема виконання роботи наведена на рис. 3.1 і відображає взаємозв'язок між окремими етапами дослідження, починаючи від підготовки зразків до оцінювання ресурсу відновлених прецизійних пар у виробничих умовах.

Для зниження впливу сторонніх факторів на результати експерименту всі зразки однієї серії виготовляли з матеріалу однієї марки з однаковими параметрами термічної обробки. Формування гальвано-хімічних покриттів здійснювали в ідентичних технологічних умовах із використанням електролітів стабільного складу та одного комплекту обладнання. Під час виконання технологічних операцій підтримували сталий температурний режим у межах 18–22°C та відносну вологість повітря 45–55 %. Контроль і коригування складу робочих розчинів проводили перед початком кожного циклу нанесення покриттів та після завершення обробки чергової групи зразків. Тривалість процесу нанесення покриття для всіх дослідних деталей залишалась незмінною.

Комплексна оцінка властивостей сформованих покриттів передбачала визначення мікротвердості, інтенсивності зношування, корозійної стійкості та

адгезійної міцності покриття до основного металу. Вимірювання здійснювали за стандартизованими методиками із застосуванням атестованих засобів контролю та вимірювальної апаратури.

Дослідження корозійної стійкості проводили методом прискорених циклічних випробувань, який базувався на періодичному зануренні зразків у сольове середовище з подальшим висушуванням на відкритому повітрі. Такий режим дозволив відтворити умови дії агресивних факторів, характерних для експлуатації елементів паливної апаратури дизельних двигунів.

Прискорені стендові випробування прецизійних пар плунжер–втулка ПНВТ на знос виконували відповідно до вимог, що регламентує методи оцінювання надійності паливних насосів високого тиску тракторних і комбайнових дизелів. У ході випробувань контролювали зміну геометричних параметрів спряження, величину витоків палива, стабільність циклової подачі та характер зношування контактних поверхонь.

Експлуатаційну перевірку відновлених ПНВТ здійснювали на сільськогосподарській техніці виробництва ХТЗ та ПМЗ під час виконання технологічних операцій у реальних умовах роботи. У процесі експлуатаційних випробувань оцінювали стабільність функціонування паливної системи, працездатність прецизійних спряжень та тривалість їх безвідмовної роботи.

Розроблення технології відновлення пар плунжер–втулка здійснювали з урахуванням вимог до точності спряження, параметрів шорсткості поверхонь, герметичності та ресурсу ПНВТ. Особливу увагу приділяли забезпеченню технологічної стабільності процесу, підвищенню ефективності відновлення та зменшенню витрат на ремонт паливної апаратури.

Отже, запропонована програма експериментальних досліджень забезпечила можливість комплексного оцінювання впливу наноконпозиційних покриттів на експлуатаційні характеристики та довговічність прецизійних пар плунжер–втулка паливних насосів високого тиску в лабораторних і виробничих умовах.

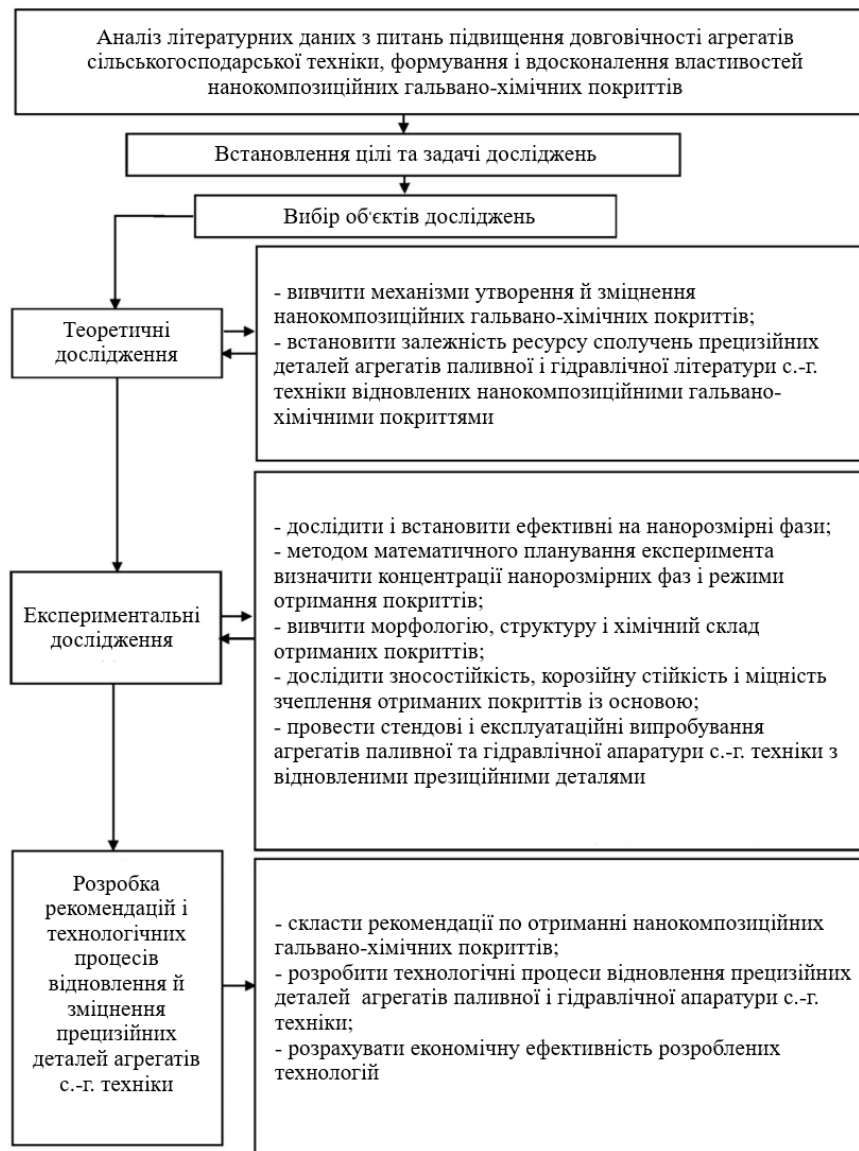


Рис. 3.1 Структурна схема програми досліджень з підвищення надійності паливних систем в сільськогосподарської техніки

3.2 Методики одержання наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів

3.2.1 Методика одержання нанорозмірних частинок

Експериментальні дослідження були спрямовані на встановлення закономірностей впливу наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів на показники зносостійкості, корозійної стійкості та експлуатаційної надійності прецизійних спряжень плунжер–втулка паливних насосів високого тиску (ПНВТ). Формування програми досліджень здійснювали з урахуванням вимог

чинних нормативних документів ДСТУ щодо забезпечення достовірності експерименту, повторюваності результатів та контролю умов проведення випробувань [24, 25].

Загальна структура досліджень передбачала послідовне виконання комплексу лабораторних, стендових та експлуатаційних випробувань. Структурно-логічна схема виконання роботи наведена на рис. 3.1 і відображає взаємозв'язок між окремими етапами дослідження, починаючи від підготовки зразків до оцінювання ресурсу відновлених прецизійних пар у виробничих умовах.

Для зниження впливу сторонніх факторів на результати експерименту всі зразки однієї серії виготовляли з матеріалу однієї марки з однаковими параметрами термічної обробки. Формування гальвано-хімічних покриттів здійснювали в ідентичних технологічних умовах із використанням електролітів стабільного складу та одного комплекту обладнання. Під час виконання технологічних операцій підтримували сталий температурний режим у межах 18–22 °C та відносну вологість повітря 45–55 %. Контроль і коригування складу робочих розчинів проводили перед початком кожного циклу нанесення покриттів та після завершення обробки чергової групи зразків. Тривалість процесу нанесення покриття для всіх дослідних деталей залишалась незмінною.

Комплексна оцінка властивостей сформованих покриттів передбачала визначення мікротвердості, інтенсивності зношування, корозійної стійкості та адгезійної міцності покриття до основного металу. Вимірювання здійснювали за стандартизованими методиками із застосуванням атестованих засобів контролю та вимірювальної апаратури.

Дослідження корозійної стійкості проводили методом прискорених циклічних випробувань, який базувався на періодичному зануренні зразків у сольове середовище з подальшим висушуванням на відкритому повітрі. Такий режим дозволив відтворити умови дії агресивних факторів, характерних для експлуатації елементів паливної апаратури дизельних двигунів.

Прискорені стендові випробування прецизійних пар плунжер–втулка ПНВТ на знос виконували відповідно до вимог, що регламентує методи оцінювання надійності паливних насосів високого тиску тракторних і комбайнових дизелів. У ході випробувань контролювали зміну геометричних параметрів спряження, величину витоків палива, стабільність циклової подачі та характер зношування контактних поверхонь.

Експлуатаційну перевірку відновлених ПНВТ здійснювали на сільськогосподарській техніці виробництва ХТЗ та ПМЗ під час виконання технологічних операцій у реальних умовах роботи. У процесі експлуатаційних випробувань оцінювали стабільність функціонування паливної системи, працездатність прецизійних спряжень та тривалість їх безвідмовної роботи.

Розроблення технології відновлення пар плунжер–втулка здійснювали з урахуванням вимог до точності спряження, параметрів шорсткості поверхонь, герметичності та ресурсу ПНВТ. Особливу увагу приділяли забезпеченню технологічної стабільності процесу, підвищенню ефективності відновлення та зменшенню витрат на ремонт паливної апаратури.

Отже, запропонована програма експериментальних досліджень забезпечила можливість комплексного оцінювання впливу наноконпозиційних покриттів на експлуатаційні характеристики та довговічність прецизійних пар плунжер–втулка паливних насосів високого тиску в лабораторних і виробничих умовах.



Рис. 3.2. Встановлення для отримання нанорозмірних частинок

Синтез нанорозмірних частинок, що застосовувалися під час формування наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів для прецизійних пар плунжер–втулка паливних насосів високого тиску, здійснювали плазмовим методом у контрольованому газовому середовищі. Використання плазмової технології забезпечувало одержання високодисперсних порошків із регульованими морфологічними та структурними характеристиками, що є необхідною умовою для підвищення експлуатаційних властивостей покриттів.

Технологічна схема синтезу нанорозмірних частинок наведена на рис. 3.3. Дисперсна сировина за допомогою дозувального пристрою подавалася у плазмовий випарник разом із потоком транспортуючого газу. У зоні високотемпературної плазми відбувалося інтенсивне випаровування вихідного матеріалу з подальшою конденсацією парової фази та формуванням нанорозмірних частинок. Швидкість охолодження газопарової суміші забезпечувала утворення дрібнодисперсної структури з мінімальним ступенем агломерації частинок.

Сформований аерозольний потік надходив до системи охолодження, після чого через циклонний сепаратор транспортувався у накопичувальний бункер, де осаджувалася основна частина синтезованого порошку.

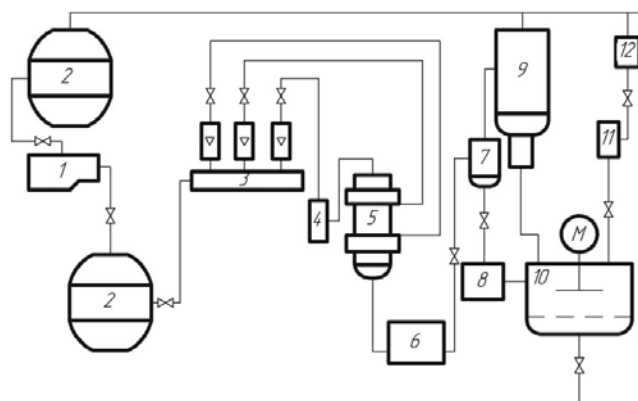


Рис. 3.3. Схема установки для отримання нанорозмірних частинок: 1 – компресор; 2 – ресивер; 3 – газова рампа; 4 – дозатор для дисперсної сировини; 5 – плазмовий випарник; 6 – холодильник; 7 – циклон; 8 – бункер уловлювання; 9 – фільтр; 10 – реактор; 11 – дозатор для рідкого вуглеводню; 12 – ємність з рідким вуглеводнем

Остаточне очищення технологічного газу та відокремлення залишкових нанорозмірних частинок здійснювали за допомогою вискоєфективної фільтраційної системи.

Для усунення пірофорних властивостей отриманого порошку застосовували додаткову стадію пасивації в реакторі стабілізації. На поверхню частинок наносили тонкий захисний шар рідкого вуглеводню, який подавався через дозувальний пристрій із технологічної ємності. Така обробка сприяла підвищенню стабільності порошків під час зберігання та подальшого використання в електролітах.

Усі стадії синтезу здійснювали в середовищі інертного газу – аргону, циркуляція якого забезпечувалася компресорною системою через ресивер. Розподіл потоку технологічного газу між окремими вузлами установки реалізовувався за допомогою газорозподільної рампи, що дозволяло підтримувати стабільні параметри процесу синтезу та забезпечувало відтворюваність характеристик одержуваних наночастинок.

У процесі формування функціональних покриттів для деталей паливної апаратури особливого значення набуває не лише підвищення мікротвердості поверхневого шару, але й забезпечення високих антифрикційних властивостей. Для прецизійних пар плунжер–втулка ПНВТ це є критично важливим, оскільки робота деталей супроводжується значними контактними навантаженнями, граничним тертям та впливом агресивного паливного середовища. За таких умов ефективність покриття визначається комплексом триботехнічних характеристик, включаючи коефіцієнт тертя, здатність до самоорганізації поверхневого шару та опір схоплюванню.

З метою покращення антифрикційних характеристик до складу композиційних покриттів вводять нанорозмірні частинки твердої мастильної та зміцнювальної дії. Найбільш перспективними серед них є графіт, дисульфід молібдену, політетрафторетилен, карбід кремнію, карбіди тугоплавких металів та титанатні сполуки. Використання таких компонентів сприяє формуванню на

поверхні тертя стабільних структур, які зменшують інтенсивність адгезійного зношування та підвищують ресурс спряжених деталей.

Особливий науковий і практичний інтерес становлять політитанати калію, які належать до класу шаруватих функціональних матеріалів. Їхня кристалічна структура формується системою титан-кисневих октаедрів, між якими розміщуються іони калію. Наявність шаруватої будови забезпечує зниження опору зсуву між контактними поверхнями та сприяє покращенню трибологічних характеристик покриттів.

Політитанат калію, що утворюється як проміжний продукт синтезу волокнистих титанатів, характеризується пластинчастою морфологією частинок із лінійними розмірами переважно 200–800 нм та товщиною 50–100 нм. Синтез матеріалу здійснювали в температурному інтервалі 450–550 °С. У процесі подальшого промивання та очищення спостерігалось утворення агломератів, які руйнувалися методом ультразвукового диспергування до субмікронного стану. Така обробка забезпечувала рівномірний розподіл частинок у складі електроліту та підвищувала стабільність композиційної суспензії.

На основі аналізу науково-технічних джерел та результатів попередніх досліджень для формування наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів були обрані нанорозмірні порошкові компоненти, які характеризуються високою твердістю, термічною стабільністю та зносостійкістю. До складу дослідних композицій включено оксид алюмінію (Al_2O_3), нітрид алюмінію (AlN), карбід кремнію (SiC), карбід титану (TiC), карбід вольфраму (WC) та політитанат калію ($\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{TiO}_2$).

Використання зазначених нанодисперсних матеріалів у складі електролітичних покриттів дозволяє формувати зміцнені поверхневі шари з підвищеною мікротвердістю, покращеними антифрикційними властивостями та високою стійкістю до зношування, що є важливою умовою підвищення довговічності.

При виборі матеріалу нанорозмірних частинок для нанесення покриттів керувалися такими основними міркуваннями:

- нанорозмірні частинки повинні мати достатню мікротвердість. для збільшення мікротвердості покриття;
- вони повинні мати високу хімічну стійкість в електролітах та розчинах та добре ними змочуватися;
- частинки повинні забезпечувати підвищену корозійну та зносостійкість покриттів.

Враховуючи вищесказане, на підставі аналізу літературних даних для отримання наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів на основі хрому.

3.3. Технологічне оснащення та підготовка електролітів для нанесення наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів

Підготовка електролітів для процесів хромування та залізнення, призначених для формування наноконпозиційних електролітичних покриттів на поверхнях прецизійних пар плунжер–втулка паливних насосів високого тиску, здійснювалася за багатостадійною технологічною схемою, що забезпечувала однорідність суспензії та стабільність її фізико-хімічних характеристик.

На початковому етапі готували базовий електроліт відповідного складу. Після цього в окремій скляній ємності проводили попереднє змішування електроліту з нанорозмірним порошком до утворення концентрованої пастоподібної суспензії. Механічне диспергування суміші виконували протягом 10 хв, що забезпечувало рівномірне змочування частинок та зменшення ймовірності їх агломерації. Отриману концентровану суспензію вводили в основний об'єм електроліту за умов безперервного перемішування.

Перед внесенням нанодисперсної добавки електроліт піддавали попередній фільтрації та технологічній підготовці. Для підвищення дисперсності наночастинок і стабілізації електроліту-суспензії застосовували ультразвукову обробку за допомогою генератора типу УЗГ-2М із частотою 22 кГц (Додаток В1). Тривалість ультразвукової дії становила 10–12 хв.

Використання ультразвукової обробки сприяло руйнуванню агломератів наночастинок, підвищенню седиментаційної стійкості електроліту та забезпечувало рівномірний розподіл дисперсної фази в об'ємі розчину.

Нанесення наноконпозиційних покриттів здійснювали на лабораторній гальванічній установці в умовах безперервного ультразвукового впливу з частотою 18 кГц. Застосування ультразвукових коливань у процесі електроосадження дозволяло активізувати масоперенесення в приелектродній зоні, інтенсифікувати транспортування нанорозмірних частинок до поверхні катода та покращити умови їх включення до структури покриття.

Конструктивно установка складалася з ультразвукової ванни, оснащеної трьома ультразвуковими випромінювачами, підключеними до генератора ультразвукових коливань (Додаток В2). Під дією ультразвуку забезпечувалося одночасне перемішування електроліту, диспергування агломератів наночастинок та підтримання їх у завислому стані. Це створювало сприятливі умови для формування рівномірного композиційного шару з підвищеним вмістом дисперсної фази.

Температурний режим процесу підтримувався автоматизованою системою керування, до складу якої входили нагрівальний елемент і датчик температури. Регулювання сили струму здійснювали стабілізованим джерелом живлення, що дозволяло підтримувати необхідні параметри електролізу впродовж усього технологічного циклу.

Запропонована конструкція установки для отримання наноконпозиційних покриттів характеризується можливістю суміщення електролітичного осадження з ультразвуковою обробкою електроліту, що забезпечує підвищення рівномірності структури покриття та покращення його експлуатаційних властивостей.

Однією з основних умов формування якісних наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів є забезпечення високої седиментаційної стійкості електролітів і технологічних розчинів, які містять нанорозмірні частинки. Недостатня стабільність суспензії призводить до осадження дисперсної фази,

нерівномірного розподілу частинок у покритті та погіршення його фізико-механічних характеристик.

До першої групи належали електроліти, у яких нанорозмірні частинки вводили шляхом механічного перемішування вручну без додаткової обробки.

Другу групу становили електроліти, оброблені ультразвуковим генератором УЗГ-2М із частотою 22 кГц протягом 10–12 хв після введення нанодисперсної фази (Додаток В3).

До третьої групи відносили електроліти, у яких після ручного перемішування забезпечували тривалий вплив ультразвукових коливань за допомогою ультразвукової ванни типу УЗП 0,25 із частотою 18 кГц протягом 1 год.

Четверта група включала електроліти, для яких застосовували комбіновану схему обробки: попередню ультразвукову диспергацію генератором УЗГ-2М та подальшу тривалу ультразвукову стабілізацію в ультразвуковій ванні УЗП 0,25.

Підготовлені електроліти заливали у мірні скляні циліндри об'ємом 135 мл та діаметром 30 мм. Після нагрівання до робочої температури їх витримували в нерухомому стані протягом 1 год для оцінювання седиментаційної стійкості. Дослідження виконували у трикратній повторності, а за результат приймали середнє арифметичне значення трьох вимірювань.

Контроль кислотності робочих електролітів та технологічних розчинів у процесі нанесення покриттів здійснювали за допомогою іонометричного перетворювача І-500, що забезпечувало підтримання стабільних параметрів електрохімічного процесу та відтворюваність умов формування наноконпозиційних покриттів (Додаток В4).

3.4 Методика одержання наноконпозиційних електролітичних покриттів на основі хрому

Для отримання наноконпозиційних електролітичних покриттів основі хрому був обраний саморегулюючий електроліт хромування. Такий електроліт широко поширений у ремонтному виробництві, оскільки дозволяє отримувати якісні хромові покриття з високою мікротвердістю.

Опрацювання електроліту здійснювали з розрахунку $8...10 \text{ А} \cdot \text{ч/л}$ при температурі $50...60 \text{ }^\circ\text{C}$, катодної щільності струму $6...8 \text{ А/дм}^2$ та співвідношенні катодної та анодної поверхонь 3:1.

Технологічний процес отримання наноконпозиційних покриттів на основі хрому на зразках складалася з наступних основних операцій: механічна обробка до виведення слідів зносу та надання поверхні правильної геометричної форми; промивання зразків бензином чи ацетоном; монтаж зразків на підвіски та ізоляція поверхонь, що не підлягають нанесення покриття; хімічне знежирення: розчин: тринатрій фосфат 50 г/л ; вуглекислий натрій 25 г/л ; їдкий натр 10 г/л . режими: температура $75 \text{ }^\circ\text{C}$; густина струму 6 А/дм^2 , час 5 хв. ; промивання у теплій, потім у холодній воді; декапування: розчин соляної кислоти 75 г/л ; температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$, час 5 хв. ; промивання у холодній проточній воді; хромування: електроліт, г/л : хромовий ангідрид (CrO_3) – 250 ; калій кремнефтористий (K_2SiF_6) – 20 ; барій сірчаноокислий (BaSO_4) – 5 ; сірчана кислота (H_2SO_4) – $0,34$; нанорозмірні частинки (концентрація визначена в результаті експериментів). Режими: густина струму 50 А/дм^2 ; температура $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Після завантаження у ванну деталі витримували без струму $1-2$ хвилини для прогріву, перші $0,5-1,5 \text{ хв}$ давали імпульс струму $80 \dots 120 \text{ А/дм}^2$, потім щільність струму знижували до номінального значення, аноди свинцеві; промивання в непроточній гарячій, проточній гарячій, проточній холодній води; сушіння; зневоднення: температура $250 \text{ }^\circ\text{C}$; час 2 год .

Така технологія дозволяла забезпечити отримання зносостійких хромових покриттів, що міцно зчіплюються з основним металом.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ НАДІЙНОСТІ ПАЛИВНИХ НАСОСІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

4.1. Результати стендових досліджень паливних насосів високого тиску з відновленими прецизійними парами

Стендові випробування ПНВТ укомплектованих серійними та відновленими прецизійними парами плунжер–втулка, проводили з метою оцінювання впливу наноконпозиційного електролітичного хромування на експлуатаційні характеристики паливної апаратури. Дослідження виконували на стенді КІ-22205-01 ГОСНІТІ відповідно до методики, наведеної в розділі 3.4.

Об'єктом досліджень були плунжерні пари паливних насосів двигунів ЯМЗ моделі ЯМЗ-238НДЗ, відновлені базовим електролітичним хромуванням та наноконпозиційним електролітичним хромуванням. Для порівняльного аналізу також досліджували серійні плунжерні пари без відновлення.

Основним критерієм оцінювання працездатності плунжерних пар була величина пускової циклової подачі палива. Відповідно до технічних вимог граничним станом вважалось зниження циклової подачі нижче $180 \text{ мм}^3/\text{цикл}$. Зміна зазначеного параметра в процесі випробувань наведена на рис. 4.1.

За результатами проведених досліджень встановлено, що жоден із випробуваних ПНВТ не досяг граничного технічного стану. Разом із тим характер зміни циклової подачі палива свідчить про суттєву різницю в інтенсивності зношування прецизійних пар залежно від технології їх відновлення.

Для плунжерних пар, відновлених методом наноконпозиційного електролітичного хромування, циклова пускова подача зменшилася від 210 до $194 \text{ мм}^3/\text{цикл}$, що відповідає середньому зниженню на 7,6 %. У випадку базового електролітичного хромування зменшення становило від 210 до $188 \text{ мм}^3/\text{цикл}$, або близько 10,5 %. Найбільше зниження параметра зафіксовано для серійних плунжерних пар, у яких циклова подача палива знизилася від 210 до $181 \text{ мм}^3/\text{цикл}$, що відповідає 13,8 %.

Отримані результати свідчать про те, що застосування наноконпозиційного електролітичного хромування сприяє зменшенню інтенсивності погіршення паливоподачі в процесі експлуатаційного навантаження. Порівняно із серійними плунжерними парами використання наноконпозиційного покриття дозволило знизити темп зменшення циклової подачі палива в середньому на 7,2 %, що вказує на підвищення стабільності геометричних параметрів спряження та покращення триботехнічних характеристик контактних поверхонь.

Додатковим показником технічного стану плунжерних пар була гідрощільність, яка характеризує величину витоків палива через зазори між плунжером і втулкою та опосередковано відображає ступінь зношування спряження. До початку випробувань середнє значення гідрощільності для всіх дослідних зразків становило близько 20 с.

Після завершення стендових випробувань найвищі значення гідрощільності зафіксовано у плунжерних пар, відновлених наноконпозиційним електролітичним хромуванням – у середньому 18 с. Для деталей, відновлених базовим електролітичним хромуванням, цей показник становив 16 с, тоді як для серійних плунжерних пар – 15 с.

Підвищені значення гідрощільності прецизійних пар із наноконпозиційними покриттями свідчать про меншу інтенсивність зношування робочих поверхонь та кращу здатність покриття зберігати геометричну точність спряження в умовах циклічного навантаження. Це підтверджує доцільність використання наноконпозиційного електролітичного хромування для відновлення прецизійних пар плунжер–втулка паливних насосів високого тиску з метою підвищення їх ресурсу та експлуатаційної надійності.

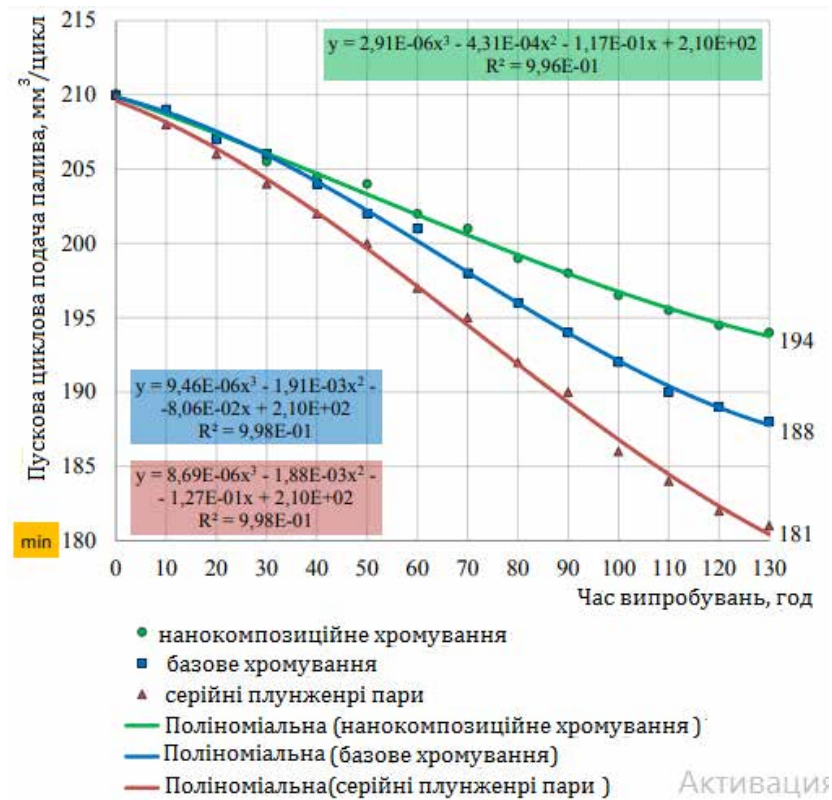


Рис. 4.1. Зміна пускової циклової подачі палива у процесі стендових випробувань ТНВД дизеля ЯМЗ-238НДЗ

Після проведення стендових досліджень, які включали випробування, розбирання та оцінку стану деталей ТНВД, слідів задирів та захоплювання на робочих поверхнях плунжерних пар виявлено не було.

4.2 Аналіз результатів стендових досліджень паливних насосів високого тиску з відновленими прецизійними парами

Обробку результатів стендових випробувань паливних насосів високого тиску з відновленими прецизійними парами плунжер–втулка виконували відповідно до вимог нормативного документа РД 50-690-89. На основі отриманих експериментальних даних було сформовано статистичні ряди розподілу та побудовано графічні залежності, наведені у додатку Д. Проведений аналіз дозволив оцінити вплив технології відновлення на стабільність параметрів паливоподачі та працездатність прецизійних спряжень.

Після завершення стендових випробувань визначено статистичні характеристики пускової циклової подачі палива для різних типів плунжерних пар. Для серійних плунжерних пар середньоквадратичне відхилення значень становило 0,70 при коефіцієнті варіації 0,282. У плунжерних пар, відновлених базовим електролітичним хромуванням, середньоквадратичне відхилення дорівнювало 0,84, а коефіцієнт варіації – 0,284. Для плунжерних пар із нанокмпозиційним хромовим покриттям відповідні показники становили 0,95 та 0,267.

Оскільки у всіх дослідних вибірках коефіцієнт варіації не перевищував 0,3, для апроксимації експериментальних даних було прийнято нормальний закон розподілу. Це свідчить про достатню однорідність результатів та статистичну достовірність проведених досліджень.

Аналіз отриманих графічних залежностей показав, що після завершення стендових випробувань найбільш імовірні значення пускової циклової подачі палива для серійних плунжерних пар знаходилися в межах 180,6–181,4 мм³/цикл. Для плунжерних пар, відновлених базовим хромовим покриттям, найбільш імовірний інтервал становив 188–189 мм³/цикл. Найвищі значення пускової подачі були характерні для плунжерних пар із нанокмпозиційним покриттям на основі хрому, де найбільш імовірний діапазон складав 193,4–194,6 мм³/цикл.

Отримані результати свідчать про те, що застосування нанокмпозиційного електролітичного хромування забезпечує більш стабільне збереження параметрів паливоподачі порівняно із серійними деталями та плунжерними парами, відновленими традиційним хромуванням. Менша інтенсивність зниження циклової подачі палива вказує на зменшення темпів зношування контактних поверхонь та кращу стабільність робочих зазорів у прецизійному sprzęженні.

Підвищення експлуатаційної ефективності плунжерних пар із нанокмпозиційним покриттям можна пояснити формуванням поверхневого шару з покращеними фізико-механічними характеристиками. Збільшення

мікротвердості та зносостійкості робочих поверхонь сприяє зниженню інтенсивності абразивного й адгезійного зношування, що особливо важливо для деталей паливних насосів високого тиску, які працюють в умовах значних контактних навантажень і високої точності спряження.

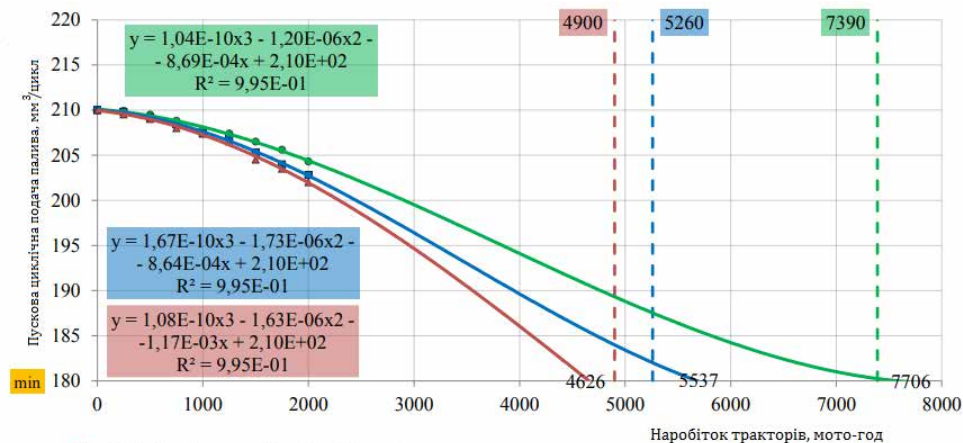
Таким чином, результати стендових випробувань підтвердили доцільність використання нанокompозиційного електролітичного хромування під час відновлення прецизійних пар плунжер–втулка паливних насосів високого тиску. Застосування таких покриттів забезпечує підвищення стабільності паливоподачі, покращення триботехнічних характеристик поверхонь та збільшення ресурсу паливної апаратури дизельних двигунів.

4.3. Прогнозування залишкового ресурсу агрегатів паливних систем

Прогнозування залишкового ресурсу агрегатів паливних систем є важливим етапом оцінювання технічного стану та визначення подальшої працездатності елементів паливної й гідравлічної апаратури сільськогосподарської техніки. Основною метою прогнозування є встановлення поточної тенденції зміни параметрів технічного стану та визначення очікуваного результату функціонування досліджуваного об'єкта у заданий момент часу в майбутньому. Для оцінювання залишкового ресурсу агрегатів паливної та гідравлічної апаратури було застосовано динамічний графічний метод із використанням програмного середовища Microsoft Excel. Побудову прогнозних залежностей здійснювали методом екстраполяції експериментальних даних шляхом формування лінії тренду. Як апроксимуючу функцію обрано поліном третього ступеня, що забезпечує достатню точність опису зміни експлуатаційних параметрів у процесі напрацювання агрегатів. Прогнозування виконували на основі результатів експлуатаційних випробувань, отриманих у реальних умовах роботи техніки. У результаті оброблення експериментальних даних було отримано відповідні аналітичні залежності та визначено коефіцієнти достовірності апроксимації R^2 . Вважають, що з

коефіцієнті R^2 , що перевищує 0,85, лінія тренда є достовірною. Аналіз отриманих графічних залежностей показав, що в усіх досліджуваних випадках значення коефіцієнтів достовірності перевищували зазначений поріг, що підтверджує надійність використаного методу прогнозування. Граничний ресурс плунжерних пар паливного насоса високого тиску дизеля ЯМЗ-238НДЗ визначали за мінімально допустимим значенням пускової циклової подачі палива, яке становить $180 \text{ мм}^3/\text{цикл}$.

Результати прогнозування свідчать, що середній ресурс паливного насоса високого тиску дизеля ЯМЗ-238НДЗ із плунжерними парами, відновленими методом наноконпозиційного електролітичного хромування, становить близько 7706 мото-год, що у 1,39 раза перевищує ресурс насосів із плунжерними парами, відновленими базовим хромуванням, та у 1,67 раза – ресурс насосів із серійними плунжерними парами.



● наноконпозиційне хромування; ■ базове хромування; ▲ серійні плунжерні пари; — — Теоретичний ресурс ПНВТ із плунжерними парами відновленими наноконпоз. хромуванням;

— — Теоретичний ресурс ТНВД із плунжерними парами відновленими базовим хромуванням;

— — Теоретичний ресурс ПНВТ із серійними плунжерними парами;

— Поліноміальна (наноконпозиційне хромування);

— Поліноміальна (базове хромування);

— Поліноміальна (серійні плунжерні пари).

Рис. 4.2. Результати прогнозування ресурсу ПНВТ дизеля ЯМЗ-238НДЗ

Теоретично визначений ресурс для плунжерних пар, відновлених із застосуванням нанокompозиційного хромування, склав 7390 мото-год, для пар після базового хромування – 5260 мото-год, а для серійних плунжерних пар – 4900 мото-год. Порівняння теоретично розрахованих і прогнозованих значень показало їх добру узгодженість, оскільки розбіжність між ними не перевищує 6%. Отримані результати підтверджують адекватність запропонованої теоретичної моделі та свідчать про ефективність застосування нанокompозиційного електролітичного хромування для підвищення довговічності плунжерних пар паливних насосів високого тиску.

4.4. Розроблення технології відновлення плунжерних пар із застосуванням нанокompозиційного електролітичного хромування

До робочих поверхонь плунжерних пар паливних насосів високого тиску висуваються підвищені вимоги щодо точності геометричної форми та якості оброблення поверхонь, оскільки саме ці параметри визначають герметичність спряження, стабільність паливоподачі та довговічність вузла. Допустимі відхилення від циліндричності робочої поверхні плунжера не повинні перевищувати 0,001 мм, величина некруглості – 0,005 мм, а конусність – 0,006 мм на довжині 20 мм робочої поверхні. У зв'язку з цим було проведено дослідження впливу нанокompозиційних гальванохімічних покриттів на точність геометричної форми плунжерів після відновлення.

Контроль геометричних параметрів здійснювали за допомогою кругломіра «Talyrond» шляхом вимірювання поперечних перерізів плунжера. У процесі досліджень отримано круглограми зношених серійних плунжерів, плунжерів після усунення слідів зношування, а також деталей після нанесення нанокompозиційного електролітичного покриття на основі хрому та завершальної механічної обробки. Аналіз результатів показав, що механічне оброблення зношених плунжерів у поєднанні з нанесенням

наноконпозиційного хромового покриття забезпечує практично повне відновлення правильної геометричної форми робочої поверхні. Максимальне значення некруглості після завершальної механічної обробки становило 0,15 мкм, що повністю відповідає нормативним вимогам до плунжерних пар паливної апаратури.

Технологічний процес відновлення плунжерних пар паливного насоса високого тиску дизеля ЯМЗ-238НДЗ передбачає комплекс послідовних операцій, спрямованих на відновлення геометричних параметрів, підвищення зносостійкості та забезпечення необхідної гідрощільності спряження (рис. 4.3.). Плунжерні пари, що надходять на відновлення, попередньо очищують у гасі або бензині, після чого продувають стисненим повітрям. Далі виконують знеособлення деталей, дефектування та визначення величини зношування. Втулки плунжерів обробляють на вертикально-довідному верстаті моделі 3820-Д із використанням притиральних паст різної зернистості до повного усунення слідів зношування.

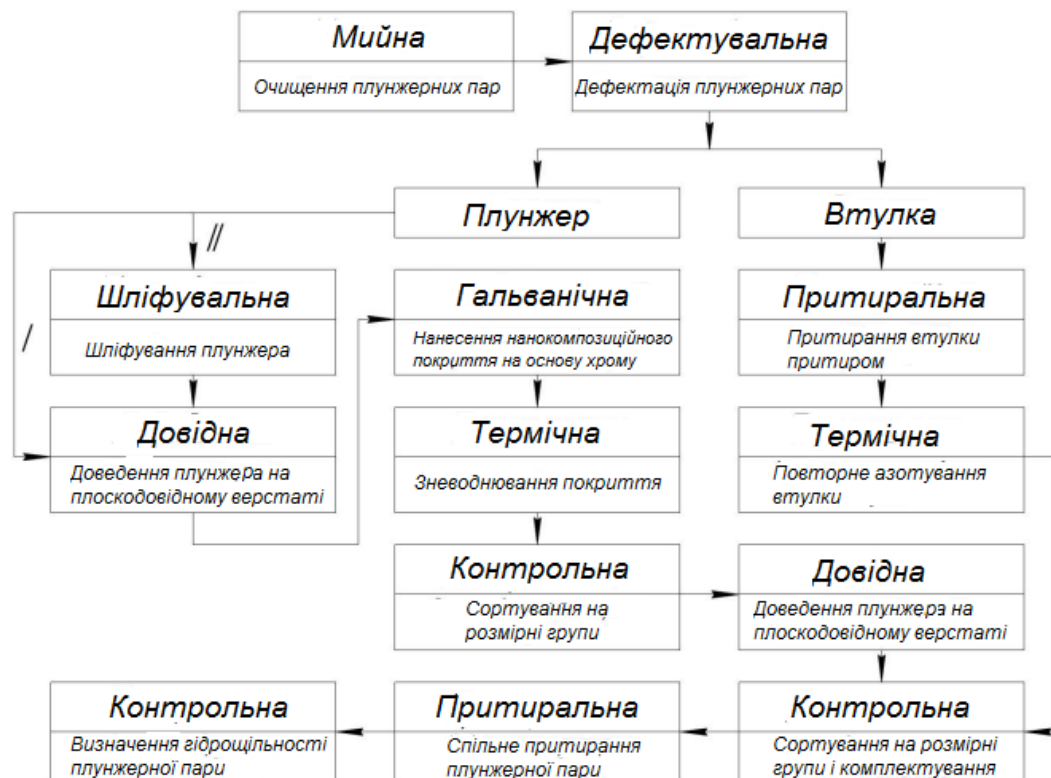


Рис. 4.3. Схема технологічного процесу відновлення плунжерних пар ПНВТ

Для чорнового притирання застосовують пасту АСМ 20/14, а для чистового – АСМ 2/1. Після завершення операції овальність і конусність поверхонь не повинні перевищувати 0,002 мм. Оброблені втулки промивають, продувають стисненим повітрям та піддають повторній хіміко-термічній обробці до досягнення твердості 55–60 HRC. Після цього втулки сортують на розмірні групи з інтервалом 0,001 мм.

Відновлення плунжерів здійснюють залежно від ступеня зношування шляхом притирання або шліфування з подальшим доведенням поверхні. Для цього використовують плоско-довідний верстат 3816 та безцентрово-шліфувальний верстат 3184. Після механічної підготовки на робочу поверхню плунжера наносять нанокomпозиційне електролітичне покриття на основі хрому з нанорозмірними частинками оксиду алюмінію (рис. 4.4). Перед нанесенням покриття поверхні деталей ізолюють у місцях, що не підлягають обробленню, після чого виконують електрохімічне знежирення в лужному електроліті. Знежирення проводять при щільності катодного струму 10 А/дм², температурі 70 °С та тривалості процесу 5 хв. Для видалення оксидних плівок і додаткового очищення поверхонь застосовують декапірування в 30 %-му розчині сірчаної кислоти при щільності струму 20 А/дм², температурі 25 °С та тривалості 2 хв.



Рис. 4.4. Установка для нанокomпозиційного електролітичного хромування

Нанокomпозиційне електролітичне покриття наносять із електроліту, до складу якого входять оксид хрому, кремнефтористий калій, сульфат барію,

сірчана кислота та нанодисперсний порошок оксиду алюмінію. Електроліз проводять при щільності катодного струму 55–60 А/дм² і температурі електроліту 50–55 °С. Швидкість осадження покриття становить 40–60 мкм/год, що забезпечує формування рівномірного та зносостійкого шару необхідної товщини. Після нанесення покриття плунжери послідовно промивають у гарячій та холодній воді, а потім піддають термічному зневодненню шляхом нагрівання до температури 200 °С із витримкою протягом 2 год.

Завершальним етапом технологічного процесу є механічне доведення, контроль геометричних параметрів та селективне комплектування плунжерів із втулками. Остаточне притирання спряжених поверхонь виконують на довідній бабці Т 9158-1А-9 із використанням пасти АСМ 2/1. Якість відновлення оцінюють за плавністю переміщення плунжера у втулці, а також за показниками гідрощільності, які визначають на приладі КІ-759. Відновлені плунжерні пари сортують за групами гідрощільності, після чого комплектують у складі паливних насосів високого тиску. Для тривалого зберігання деталі консервують та упаковують у пергаментний папір. Запропонована технологія забезпечує відновлення експлуатаційних характеристик плунжерних пар, підвищення їх ресурсу та покращення зносостійкості робочих поверхонь завдяки застосуванню наноконпозиційного електролітичного хромування.

ВИСНОВКИ

1. У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено науково-практичне завдання підвищення довговічності агрегатів паливних систем сільськогосподарської техніки шляхом відновлення прецизійних деталей паливних насосів високого тиску із застосуванням наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів.

2. Розроблено та досліджено технологію відновлення плунжерних пар ПНВТ дизелів із використанням наноконпозиційного електролітичного хромування, що забезпечує суттєве підвищення експлуатаційних характеристик деталей. Встановлено, що застосування наноконпозиційного покриття на основі хрому дозволяє збільшити ресурс відновлених плунжерних пар до 1,67 раза порівняно із серійними деталями та до 1,39 раза порівняно з деталями, відновленими базовим хромуванням.

3. Аналіз надійності паливних систем мобільних енергетичних засобів показав, що працездатність ПНВТ значною мірою визначається технічним станом плунжерних пар, які працюють в умовах високих контактних навантажень, циклічного тертя та інтенсивного зношування. Встановлено, що традиційні методи відновлення не забезпечують необхідної зносостійкості та ресурсу прецизійних деталей, у зв'язку з чим перспективним напрямом є застосування наноконпозиційних електролітичних покриттів.

4. За результатами лабораторних досліджень визначено, що найбільш ефективним для формування зміцненого покриття на основі хрому є використання нанорозмірного порошку оксиду алюмінію. Методами математичного планування експерименту встановлено оптимальні режими електролітичного хромування: температура електроліту – 50 °С, щільність струму – 59 А/дм² та концентрація нанорозмірної фази – 3,2 г/л. За таких режимів мікротвердість покриття досягала у 1,48 раза перевищує мікротвердість базового хромового покриття.

5. На основі теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що у їх складі елементів нанорозмірної фази, що забезпечує підвищення мікротвердості, зносостійкості та корозійної стійкості робочих поверхонь плунжерних пар. Встановлено, що наноконпозиційні електролітичні покриття на основі хрому мають зносостійкість у 1,5–1,8 раза вищу порівняно з базовими хромовими покриттями та у 2,1–2,2 раза вищу порівняно зі сталлю ШХ15.

6. Результати стендових і експлуатаційних випробувань ПНВТ дизелів ЯМЗ-238НДЗ показали, що зниження пускової циклової подачі палива у насосів із плунжерними парами, відновленими наноконпозиційним електролітичним хромуванням, є в середньому у 1,4 раза меншим порівняно з серійними плунжерними парами.

7. Прогнозований ресурс таких ПНВТ становить у середньому 7706 мото-год, що підтверджує високу ефективність запропонованої технології відновлення. Теоретично розраховані значення ресурсу добре узгоджуються з результатами прогнозування, а розбіжність між ними не перевищує 6 %, що підтверджує адекватність розробленої теоретичної моделі та практичну доцільність впровадження технології наноконпозиційного електролітичного хромування у процес ремонту агрегатів паливних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аулін В. В., Лисенко С. В., Кузик О. В., Гринків А. В., Голуб Д. В. (2016). Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення. Монографія. Кропивницький: видавець Лисенко В.Ф. 304 с.
2. Аулін В. В., Голуб Д. В., Гриньків А. В., Лисенко С. В. (2017). Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець «КОД». 370 с.
3. Редзюк А. М. Автомобільний транспорт України : стан, проблеми, перспективи розвитку: Монографія / Державний автотранспортний науководослідний і проектний інститут; За заг. ред. А. М. Редзюка. К. : ДП "ДержавтотрансНДІпроект", 2005. 400 с.
4. Sakno O. P. Моделювання технологій в системі технічного обслуговування автотранспортних засобів на основі витрати палива / О. Р. Sakno, Т. М. Kolesnikova, Ye. P. Medvediev, V. I. Stadnyk, O. V. Tatarchyk // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2020. No 2. Рр. 263-264, ISSN 2312-2676 DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280420.74.623
5. Аулін В. В., Гриньків А. В. Проблеми і задачі ефективності системи технічної експлуатації мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія технічні науки. 2016. №2 (77). С. 36-41.
6. ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення». К.: Держстандарт України: УкрНДІ, 1994. 96 с
7. ДСТУ 3004-95 «Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними». - К.: Держстандарт України: УкрНДІ, 1995. - 129 с.

8. ДСТУ 3433-96 «Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення». К.: Держстандарт України: УкрНДІ, 1996. 98 с.
9. ДСТУ EN 13306:2006 «Технічне обслуговування. Терміни та визначення понять». К.: Держстандарт України: УкрНДІ, 2006. 34 с.
10. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. посіб. / А.Г. Фесенко та [ін.]. Д.: РВВ ДНУ, 2015. 104 с.
11. Аулін В. М., Тихий А. А. Підвищення зносостійкості деталей машин методами поверхневого зміцнення. Кропивницький: ЦНТУ, 2021. 320 с.
12. Аулін В. В., Жулай О. Ю. Інформаційне забезпечення зміни технічного стану дизелів засобів транспорту. Вісник інженерної академії України. 2011. №1. С. 166–172.
13. Сідашенко О. І., Поляков В. М. Технології відновлення та зміцнення деталей машин. Харків: ХНТУСГ, 2020. 410 с.
14. Надич Т. М., Аулін В. В., Гриньків А. В., Слонь В. В. Методи і заходи удосконалення системи технічного сервісу вантажних автомобілів на основі кіберфізичного підходу і розробки науково-технічної документації його операцій. Центральнуукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. Кропивницький: ЦНТУ, 2025. Вип. 11(42). Ч.2. С. 298-312.
15. Аулін В. В. Вплив експлуатаційних чинників на довговічність дизельних двигунів / В.В. Аулін, О.Ю. Жулай, В.М. Бобрицький [та ін.] / Зб. наук. праць Луганського нац. аграр. універ. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2005, №49(72). С.17-24.
16. Аулін В. В. Узгодження зміни технічного стану з раціональним вибором об'єкту діагностування / В.В. Аулін, М.І. Черновол, А.В. Гриньків // Вісник інж. академії України. – 2015. – №2. – С. 182-188.
17. Аулін В. В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. 2014. 370 с. 2. Аулін В.В., Лізунов С.М., Бобрицький В.М. Залежність інтенсивності зношування деталей від технологічних факторів лазерної обробки. Вісник ХДГУСГ. 2003. С.101-105.

18. Аулін В.В. Аналіз діагностичних методів визначення технічного стану ЦПГ дизельних двигунів мобільної сільськогосподарської техніки / В.В. Аулін, О.Ю. Жулай / Конструювання, виробництво та експлуатація с/г машин // Загальнодерж. міжвідомчий наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ. 2005. Вип.35. С.158–164.
19. Аулін В. В., Лисенко С. В. Триботехнології відновлення спряжень деталей дизелів транспортних засобів та керування процесами зміцнення їх робочих поверхонь. Матеріали VIII міжн. наук.-практ. конф. "Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту", 19-21 жовтня 2015 року: зб. наук. праць. МОН України, Вінницький НТУ [та ін.]. Вінниця: ВНТУ, 2015. С. 24-27.
20. Гриньків А. В., Аулін В. В., Лисенко С. В., Голуб Д. В., Мартиненко О. Д. Теоретико-фізичний підхід до діагностичної інформації про технічний стан агрегатів мобільної сільськогосподарської техніки. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2015. № 158. С. 252 – 262.
21. Надійність сільськогосподарської техніки: Підручник. Друге видання, перероблене і доповнене [М.І. Черновол, В.Ю. Черкун, В.В. Аулін та ін.]. За ред. М.І. Чорновола.–Кіровоград: КОД, 2010. 320 с.
22. Погорєлов В.О. Дослідження технічного стану плунжерних пар паливних насосів високого тиску. Матеріали науково-практичної конференції. ДДАЕУ. Дніпро. 2021 С. 32–34.
23. Анісімов В. Ф. Шляхи і методи підвищення довговічності і надійності роботи паливної апаратури автотракторних двигунів / Анісімов В. Ф., Музичук В. І., П'ясецький А. А., Рябошапка В. Б. – Вінниця: ВНАУ, 2012. 142 с.
24. Zablotsky Yu. V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines / Yu. V. Zablotsky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology, Published by Indian Society of Education and Environment, May 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

25. Nichols, "Hampton roads regional travel time reliability study", Presentation for the Transportation Technical Advisory Committee Meeting, Agenda Item no. 14, June 5, 2013. – 18 p.
26. Карабиньош С. С., Новицький А. В., Ружи́ло З. В. Проектування підприємств технічного сервісу будівельної техніки. Навчальний посібник. Київ, НУБіП України, 2019. 171 с.
27. Волков В. П., Мармут І. А., Кривошапов С. І., Белов В. І. Проектування підприємств автомобільного транспорту. Підручник. Під загальною редакцією В.П. Волкова. Харків : ХНАДУ, 2013. 288 с.
28. Войтюк В. Д., Бондар С. М., Шимко Л. С. Проектування і розрахунок автосервісних підприємств. Навчальний посібник. Ніжин, ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2021. 568 с.
29. Dziubak T., Dziubak S.D. A study on the effect of inlet air pollution on engine component wear and operation. *Energies*, vol. 15, No 3, 2022, p. 1182. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15031182>.
30. Dziubak T. Experimental dust absorption study in automotive engine inlet air filter materials. *Materials*, vol. 17, No 13, 2024, p. 3249. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17133249>.
31. Novytskyi A., Melnyk V., Banniy O., Bystryi V., Stetsiuk S. Research on influence of geometric parameters of engine body parts during repair process. *Engineering for Rural Development*, 2024, pp. 811–816. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85184886375&origin=resultslist>.
32. Novytskyi A., Melnyk V., Banniy O., Bystryi V., Mykhailiuk O. Investigation of geometric parameters of camshaft supports in engine casing components. *Engineering for Rural Development*, vol. 24, 2025, pp. 429–435. <https://www.scopus.com/pages/publications/105010680840?origin=resultslist>.
33. Основи трибології: Підручник / Антипенко А.М. Белас О.М., Войтов В.А. [та ін.]. За ред. Войтова В.А. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – 342с.

34. Черновол М.І., Шепеленко І.В. Системний підхід до формування показників якості відновлених деталей. Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки. Вип.7 (38). Кропивницький, 2023. С.30–36.
35. Стецько А. Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей: монографія. Львів: Видавнича компанія «АРС», 2013. 240 с.
36. Калганков Є.В. Деякі проблеми гідроабразивно-втомного зносу деталей об'ємного гідроприводу мобільних машин. Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць. Дніпропетровск: ІГТМ НАНУ. 2013. 108. – С. 133-142.
37. Новицький А. В., Ружи́ло З. В., Банний О. О., Бистрий О. М., Сиволапов В. А. (2023). Надійність машин та обладнання. Частина 1. Оцінка та забезпечення надійності машин та обладнання. К.: НУБіПУ. 209 с.
38. Ружи́ло З. В., Мельник В. І., Новицький А. В., Ревенко Ю. І., Бистрий О. М., Мельник В. І., Попик П. С. (2023). Надійність машин та обладнання. Ремонтування машин та відновлення деталей. Том 2. Навчальний посібник: НУБіП України. Київ. 313 с.
39. Хітров І. О., Гавриш В. С. Ремонт машин : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2012. 184 с.
40. Ремонт машин та обладнання: підручник для вищих навчальних закладів / [Дирда В.І., Мельянцов П.Т., Калганков, Є.В. та ін.]. – Дніпропетровськ: Журфонд, 2015. 292 с.
41. Ruzhylo, M.J., Skorokhod T.A. On empirical distributions in spaces of growing dimensions. Continuous distributions. Random operators and stochastic equations, The Netherlands, 2005, vol. 4, pp. 184-193. DOI: 10.1163/156939705775992439
42. Novitskiy, A., Banniy, O., & Novitskyi, Yu. (2023). Logical-probabilistic model of the reliability of means for preparing and distributing fodder. Machinery & Energetics, 14(1). pp. 57–67. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.57>

43. Шепеленко І.В., Красота М.В. Сучасні технології реновації деталей автомобільного транспорту. Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали X міжнар. наук.-техн. інтернет-конф. (14-15 квітня 2022 р.). Вінниця: ВНТУ, 2022. С.325–328.

44. Novytskyi A., Ruzhylo Z., Karabynosh S., Novytskyi Yu. (2018). Povitriani filtry dlia dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia ta osoblyvosti yikh obsluhovuvannia. *Agroexpert*. 1 (114). 64–67.

45. Головащенко О. В. (2024). Систематизація схем структури забезпечення технічної готовності транспортних засобів шляхом удосконалення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності. *Вісник Приазовського ДТУ. Серія: Технічні науки*. DOI: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321399.

46. Практикум з ремонту машин. Загальний технологічний процес ремонту та технології відновлення і зміцнення деталей машин. Том 1 За ред.О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. Навчальний посібник. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 416 с.

47. Практикум з ремонту машин. Технологія ремонту машин, обладнання та їх складових частин. Том 2. За ред.О.І. Сідашенко, О.В. Тіхонова. Навчальний посібник. Харків: ТОВ «Пром-Арт», 2018. 491с.

48. Novitskyi A. V., Kharkovskyi I. S., Novitskyi Yu. A. Monitoring of the technical condition of agricultural machinery according to guidelines for its operation. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Kyiv, Ukraine, 2021. Vol. 12, No. 4. P. 85–93. DOI:[10.31548/machenergy2021.04.085](https://doi.org/10.31548/machenergy2021.04.085).

49. Pascuzzi S., Bulgakov V., Adamchuk V., Ruzhylo Z., Trokhaniak O., Nowak J., Rucins A., Paciolla F. Improved design of the working body of a flexible sectional screw conveyor. *Lecture Notes in Civil Engineering*. P. 367–377. DOI:[10.1007/978-3-031-70955-5_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-70955-5_40)

50. Novytskyi A. V., Bannyi O. O. (2021). Statistical analysis of functioning of repair service of Ukraine. *Machinery and Energetics*. 12 (2). 39–47. <https://doi.org/10.31548/machenergy2021.02.039>.

ДОДАТКИ

Додаток А1

Таблиця А1

Основні дисперсні матеріали другої фази, що впливають на властивості покриттів

Властивості покриття	Дисперсні матеріали
Твердість та зносостійкість	Al_2O_3 , WC , ZrO_2 , TiC , ZrB_2 , B_4C , Cr_3B_2 , ZrC , ThO_2 , CeO_2 , TaC , WS_2 , політитанат калію
Зносостійкість в умовах сухого тертя та підвищених температур	Al_2O_3 , TiB_2 , SiC , C
Жаростійкість	Al_2O_3 , SiO_2 , C , B_4C , ZrO_2
Корозійна стійкість	каолін, ZrB_2 , Al_2O_3 , SiC
Антифрикційність	CuF_2 , WC , MoS_2 , BaSO_4 , ПВХ, ПЕ, політитанат калію
Термостійкість	окисли, карбіди
Пористість	карбонільний нікель
Самозмазування	фторований графіт, графіт, MoS_2 , WS_2 , слюда, CaF_2
Теплопровідність політетрафторетилен	
Ерозійна стійкість	карбіди
Міцність	Al_2O_3 , SiC
Опір схоплювання	MoS_2 , ПВХ, ПЕ, політитанат калію

Додаток А1

Таблиця А

Властивості основних дисперсних матеріалів, що застосовуються для отримання наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів

Матеріал, хімічна формула	Щільність, г/см ³	Температура плавлення, °C	Коефіцієнт лінійного розширення,	Питома теплоємність , кДж/(кг·K)	Теплопровід ність, Вт/(м·K)	Електропрові дність, Див/м	Мікротвердіс ть, ДПа
Графіт	2,20	3500	1,0...24,0	0,67	88...360	(1,6...28,0)·10 ⁴	0,5...0,7
WSi ₂ 47	9,25	2160	6,2	0,15	47	8·10 ⁵	10
NbSi ₂	5,66	2150	10,0	0,15	—	1,9·10 ⁵	11
Кремній	2,33	1415	2,3	0,5...0,8	82	4·10 ⁻²	12
MoSi ₂	6,10	2100	8,7	0,46	52	4,6·10 ⁵	12
VC	5,80	2820	6,8	0,67	35	6·10 ⁵	14
CrB ₂	5,60	2200	10,5	0,45	32	30	16
ZrC	6,80	3540	6,8...7,5	0,42	31	2·10 ⁶	16
TaC	14,60	3900	4,6...6,6	0,17	23...29	5·10 ⁵	16
ZrO ₂	5,60	2900	7,0...10,0	0,46	2	1·10 ⁻⁴ ...1·10 ⁻³	16
HfC	12,70	3880	5,2...6,5	0,21	16	2,1·10 ⁶	17
ZrB ₂	6,17	3040	5,9	0,54	25	1·10 ⁷	18
ThO ₂	9,70	3050	9,0...11,0	0,25	11	2·10 ⁻¹²	7...11
SiO ₂	2,30	1650	7,5...13,7	0,74	10...12	1·10 ⁻¹²	7...12
TiO ₂	3,80	1870	10,0	0,63	5	300...800	8...19
WC	15,80	2770	5,1...7,2	0,17	—	5·10 ⁶	18...20
TiC	4,90	3140	7,4...9,3	0,42	36	1,8·10 ⁶	20
SiC	3,21	2150	4,5	1,76	45...150	770	22...24
AlN	3,26	2400	4,0	0,84	29	1·10 ⁻⁸	25...27
Al ₂ O ₃	3,97	2050	—	0,92	40	1·10 ⁻¹⁴	28...30

Додаток В1



Рис. В1. Ультразвуковий генератор
УЗГ-2М116



Рис. В2. Лабораторна гальванічна
установка



Рис. В3.. Ультразвукова ванна УЗП
0,25



Рис. В4 Іонометричний перетворювач І-
500120