

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Буката Дмитро Олександрович

УДК 621.436.038:629.3/.6:621.891

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ
ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Буката Д.О.

Керівник роботи
Дерев'янка Д.А.
доктор технічних наук, професор

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Буката Дмитро Олександрович. Підвищення довговічності деталей паливної апаратури сільськогосподарської техніки. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У магістерській роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення довговічності агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки шляхом відновлення прецизійних деталей із застосуванням наноконпозиційних гальвано-хімічних покриттів на основі хрому. Встановлено, що значна частка відмов техніки зумовлена зношуванням елементів паливної апаратури, а традиційні методи їх відновлення мають обмежену ефективність.

Розроблено та досліджено технологію наноконпозиційного електролітичного хромування, яка забезпечує зменшення втрат пускової циклової подачі палива та підвищення ресурсу паливних насосів високого тиску. За результатами стендових і експлуатаційних випробувань паливних насосів високого тиску дизелів ЯМЗ-238НДЗ встановлено, що показники зношування плунжерних пар, відновлених запропонованим способом, є суттєво кращими порівняно з базовим хромуванням і серійними деталями.

Прогнозований ресурс паливних насосів з плунжерними парами, відновленими наноконпозиційним електролітичним хромуванням, у середньому становить 7706 мото-годин, що забезпечує підвищення довговічності агрегатів до 1,7 рази. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження розробленої технології у практику ремонту паливної апаратури сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: електролітичне хромування, плунжерна пара, паливний насос високого тиску, довговічність, зносостійкість, ресурс.

ANNOTATION

Bukata Dmytro Oleksandrovykh. Improving the Durability of Fuel System Components of Agricultural Machinery. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering.
– Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

In the master's thesis, a scientific and practical problem of improving the durability of fuel system units of agricultural machinery has been solved by restoring precision components using nanocomposite galvanic-chemical chromium-based coatings. It has been established that a significant proportion of machinery failures is caused by wear of fuel system components, while traditional restoration methods demonstrate limited effectiveness.

A technology of nanocomposite electrolytic chromium plating has been developed and investigated, which ensures a reduction in losses of the starting cyclic fuel delivery and an increase in the service life of high-pressure fuel pumps. Based on the results of bench and operational tests of high-pressure fuel pumps of YMZ-238ND3 diesel engines, it was found that the wear indicators of plunger pairs restored by the proposed method are significantly better compared to those restored by conventional chromium plating and serial components.

The predicted service life of high-pressure fuel pumps with plunger pairs restored using nanocomposite electrolytic chromium plating averages 7,706 motor hours, which provides an increase in the durability of the units by up to 1.7 times. The obtained results confirm the feasibility of implementing the developed technology in the practice of repairing fuel system units of agricultural machinery.

Keywords: electrolytic chromium plating, plunger pair, high-pressure fuel pump, durability, wear resistance, service life.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	32
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	38
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток аграрного виробництва характеризується зростанням вимог до надійності та ефективності роботи сільськогосподарської техніки в умовах інтенсивної експлуатації, обмежених ресурсів та підвищених навантажень. Одним із найбільш відповідальних і водночас вразливих елементів машин є паливна апаратура дизельних двигунів, технічний стан якої безпосередньо впливає на економічні показники, екологічні характеристики та безперервність виробничих процесів у сільському господарстві. Значна частка відмов і несправностей техніки зумовлена саме зношуванням прецизійних деталей паливної апаратури, таких як плунжерні пари паливних насосів високого тиску.

У процесі експлуатації сільськогосподарської техніки деталі паливної апаратури працюють в умовах високих контактних напружень, абразивного та кавітаційного зношування, дії агресивних компонентів палива і температурних коливань, що призводить до прискореної втрати їх функціональних властивостей. Вартість нових прецизійних деталей є високою, а їх заміна не завжди економічно обґрунтованою, особливо в умовах зростання цін на матеріали та логістичних обмежень. Тому відновлення зношених деталей із забезпеченням ресурсу, не нижчого за ресурс нових виробів, є важливим завданням ремонтного виробництва.

Існуючі технології відновлення прецизійних деталей паливної апаратури, зокрема традиційне електролітичне хромування, не повною мірою забезпечують необхідний рівень зносостійкості та стабільності експлуатаційних показників. У зв'язку з цим актуальним є пошук і впровадження нових технологічних рішень, спрямованих на підвищення довговічності відновлених деталей. Перспективним напрямом є застосування нанокompозиційних гальвано-хімічних покриттів на основі хрому, які дозволяють покращити фізико-механічні властивості

поверхневих шарів, знизити інтенсивність зношування та збільшити ресурс агрегатів паливної апаратури.

Таким чином, дослідження спрямовані на підвищення довговічності деталей паливної апаратури сільськогосподарської техніки шляхом удосконалення технологій їх відновлення, є актуальними, мають важливе наукове і практичне значення та відповідають сучасним потребам агропромислового комплексу.

Мета роботи: збільшення міжремонтного ресурсу агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки шляхом розробки та застосування нових технологічних способів відновлення прецизійних деталей нанесенням наноконпозиційних гальванохімічних покриттів на основі хрому.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких наукових завдань:

- на підставі літературних даних визначити низькоресурсні агрегати сільськогосподарської техніки та їх ресурсовизначальні сполучення. Провести аналіз існуючих способів відновлення прецизійних деталей агрегатів паливної апаратури;
- обґрунтувати способи відновлення прецизійних деталей агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки;
- провести стендові та експлуатаційні випробування агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки з прецизійними деталями, відновленими наноконпозиційними гальванохімічними покриттями, встановити значення середніх міжремонтних ресурсів відремонтованих агрегатів;
- на основі запропонованих способів розробити технології відновлення прецизійних деталей агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки із застосуванням наноконпозиційних гальванохімічних покриттів.

Об'єктом дослідження є прецизійні деталі агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки та способи їх відновлення.

Предметом дослідження фізико-механічні властивості гальвано-хімічних покриттів хрому модифікованих нанорозмірними частинками при відновленні прецизійних деталей.

Методи наукового дослідження. Методологія досліджень побудована на основних принципах зношування прецизійних деталей агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки, електролізу та умов розвитку й адекватності дослідницьких підходів і засобів, що дозволяють отримати істинні знання про об'єкт, його фізико-механічні властивості, довговічність.

Основними методами досліджень були емпіричні (спостереження, порівняння, підрахунок, вимірювання), експериментально-теоретичні, метод математичного планування експериментів, статистичні методи обробки даних, аналіз, синтез і узагальнення отриманих результатів. Усі дослідження проводили відповідно до ДСТУ.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. Борах К.В., Міненко С.В., Савчук В.С., Буката Д.О. Перспективні напрямки підвищення надійності дизельних автотракторних двигунів. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 20-22 жовтня 2025 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 74-77.

2. **Буката Д.О.** Результати стендових випробувань паливних насосів високого тиску. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 48-49.

3. Ільченко А.В., **Буката Д.О.** Довговічність агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня

2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. С. 455-459.

Практичну інтерес для аграрних підприємств представляє модернізація існуючих технологій ремонту агрегатів паливної апаратури шляхом впровадження технологічних процесів відновлення прецизійних деталей наноконпозиційними гальвано-хімічними покриттями на основі хрому.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 25 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 52 сторінки комп'ютерного тексту, містить 10 рисунків та 1 таблиця.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ШЛЯХИ ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ

1.1. Довговічність агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки

Довговічність паливної апаратури сільськогосподарської техніки обумовлена ресурсом її агрегатів. Ефективна робота паливної апаратури визначає основні економічні та потужнісні показники двигуна, стабільність його параметрів, довговічність, рівень створюваного шуму, питомі вагові та об'ємні характеристики, токсичність і димність відпрацьованих газів [1].

Тверді частинки, при неякісній фільтрації палива, проходять разом з паливом під високим тиском і з великою швидкістю через малі зазори, зношують прецизійні пари, в результаті чого порушується нормальна робота паливної апаратури, і погіршуються техніко-економічні показники двигуна [3] Більшість дослідників [4] вказують на те, що ресурс ПНВТ і паливної апаратури в цілому визначається ресурсом прецизійних деталей – плунжерних пар.

Зношування плунжерної пари ПНВТ в процесі експлуатації викликає зниження потужності дизеля, порушення його нормальної роботи, збільшення інтенсивності зношування кривошипно-шатунного механізму, утворення нагару на поршнях і деталях розпилювачів форсунок, збільшення питомої витрати палива [2].

З метою зменшення інтенсивності зношування плунжерні пари виготовляють з високовуглецевих легованих і конструкційних сталей і піддають термообробці.

Плунжерні пари виготовляють з таких сталей, як 30ХГСА, ШХ15, 38Х2МЮА та ін. [6]. Застосування даних сталей для виробництва плунжерних пар забезпечує їх хорошу оброблюваність, здатність працювати в умовах високих

тиску і температури, високу твердість, стійкість до зносу і корозії, збереження стабільності геометричної форми і розмірів.

У зв'язку з незначними зазорами і специфічними умовами роботи плунжерних пар до них пред'являються високі вимоги до допустимих термічних і монтажних деформацій деталей, високої зносостійкості, стабільності розмірів і міцності. Для досягнення цих вимог використовують різні способи термічної обробки (цементация, азотування, гартування, ціанування, нормалізація, відпуск тощо) [4, 3]. Всі сталі після термообробки мають практично однакову твердість HRC 55...65 [1, 2, 4].

Зазор у плунжерних парах становить 0,6...2 мкм, що зумовлює високу чутливість деталей до наявності в паливі абразивних частинок, які викликають інтенсивне зношування деталей плунжерної пари та швидкий вихід з ладу [3].

Плунжерні пари працюють у складних умовах. При цьому мають місце високі тиски і швидкість переміщення робочого середовища, яке містить тверді абразивні частинки різних розмірів.

У дослідженнях, проведених авторами [4], встановлено, що знос сполучення плунжерної пари викликають мінеральні частинки, які входять до складу різних забруднень. Дослідження складу даних частинок [4] дозволило визначити, що вони на 90 % складаються з оксидів металів і кварцу.

Мікротвердість кварцу – 10300...11000 МПа, а оксиду алюмінію – 12000...13000 МПа [13], в той час як мікротвердість робочих поверхонь плунжерних пар – 8000...9000 МПа. З чого стає очевидною причина інтенсивного зносу деталей плунжерних пар.

Наявність абразивних частинок у дизельному паливі, співвідношення їх розмірів із зазором у сполученні плунжерної пари, а також висока швидкість руху дизельного палива відносно поверхонь деталей зумовлюють гідроабразивний знос плунжерних пар та їх абразивне зношування за рахунок затискання частинок у зазорі [12].

На підставі досліджень, проведених у роботах [4, 8, 15, 19], встановлено, що абразивне зношування в сполученні плунжерної пари в результаті защемлення абразивних частинок у зазорі виникає тоді, коли розмір частинок більший за зазор у сполученні.

Деякі автори [15, 18] вказують на те, що порівнянні з зазором частинки своїми гострими краями також наносять мікроподряпини на поверхні або деформують поверхневий шар при перекочуванні, а частинки менше радіального зазору в основному проявляють свою дію при гідроабразивному зношуванні.

Важливим є той факт, що знос частинками, затиснутими в зазорі, присутній в будь-якій зоні сполучених поверхонь деталей, а гідроабразивному зносу піддаються тільки ті ділянки поверхонь, які контактують з рухомим паливом.

В результаті аналізу умов роботи деталей плунжерних пар [4, 16] встановлено, що рух дизельного палива відносно деталей плунжерних пар виникає в момент його просочування через зазори в періоди початку і кінця подачі. Дизельне паливо, при перетіканні, омиває вікна втулки і плунжера.

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, співмірні з активним ходом плунжера і примикають до країв.

Відмінною особливістю зношування деталей плунжерних пар є його вогнищева концентрація на ділянках поверхонь. У втулки зони зношування розташовуються вище впускного і нижче перепускного вікон. У плунжера зони зношування розташовані на поверхнях, які поєднуються під час роботи з зонами зношування втулки.

Величини зносу у втулки і плунжера різні. Деякі дослідники [4, 9, 13, 14] вказують на те, що найбільшому зносу піддається ділянка поверхні плунжера, яка примикає до впускного вікна втулки.

Глибина місцевої западини у максимально зношеного плунжера досягає 30...35 мкм. Ширина зношеної зони становить 7,5 мм, довжина – 9...10 мм від краю верхнього торця [19]. Менш інтенсивно зношується втулка. Біля кромки впускного вікна глибина западини становить 20 мкм [13].

Примітною характеристикою місцевих зносів є те, що западини мають глибину, яка збільшується у напрямку до країв плунжера і втулки, що вирівнює перетин каналів, які утворюються в результаті зношування. Дана особливість зношування вказує на її гідроабразивний характер.

В результаті вищевикладеного, механізм зносу плунжерних пар можна представити в наступному вигляді [5, 13, 14]. Під час подачі палива через впускне вікно втулки (рис 1.1, а) абразивні частинки, які знаходяться в дизельному паливі, викликають знос кромки впускного вікна втулки і кромки плунжера. У початковий момент нагнітання (рис. 1.1, б) і при відсіканні подачі (рис. 1.1, в) тверді абразивні частинки, що рухаються разом з паливом, наносять мікроподряпини на кромках вікон втулки (на ділянках перекриття вікон) і плунжера та на безпосередньо прилеглих до них зонах поверхонь.

При відсіканні подачі (рис. 1.1, г) виникає завихрення струменя палива, яке виходить з великою швидкістю в перепускне вікно. В результаті завихрення, окремі струмені дизельного палива, які містять абразивні частинки, вдаряються об поверхню плунжера вище відсічної кромки.

Абразивні частинки, занесені дизельним паливом і затиснуті в зазорі плунжерної пари, призводять до зношування деталей і після відсікання подачі.

Таким чином, зношування плунжерних пар є гідроабразивним за своїм характером і супроводжується защемленням абразивних частинок. Процес зношування здійснюється за рахунок рухомого палива і всіх абразивних частинок, що знаходяться в ньому.

Це призводить до появи на робочих поверхнях плунжерної пари глибоких борозен (рис. 1.2).

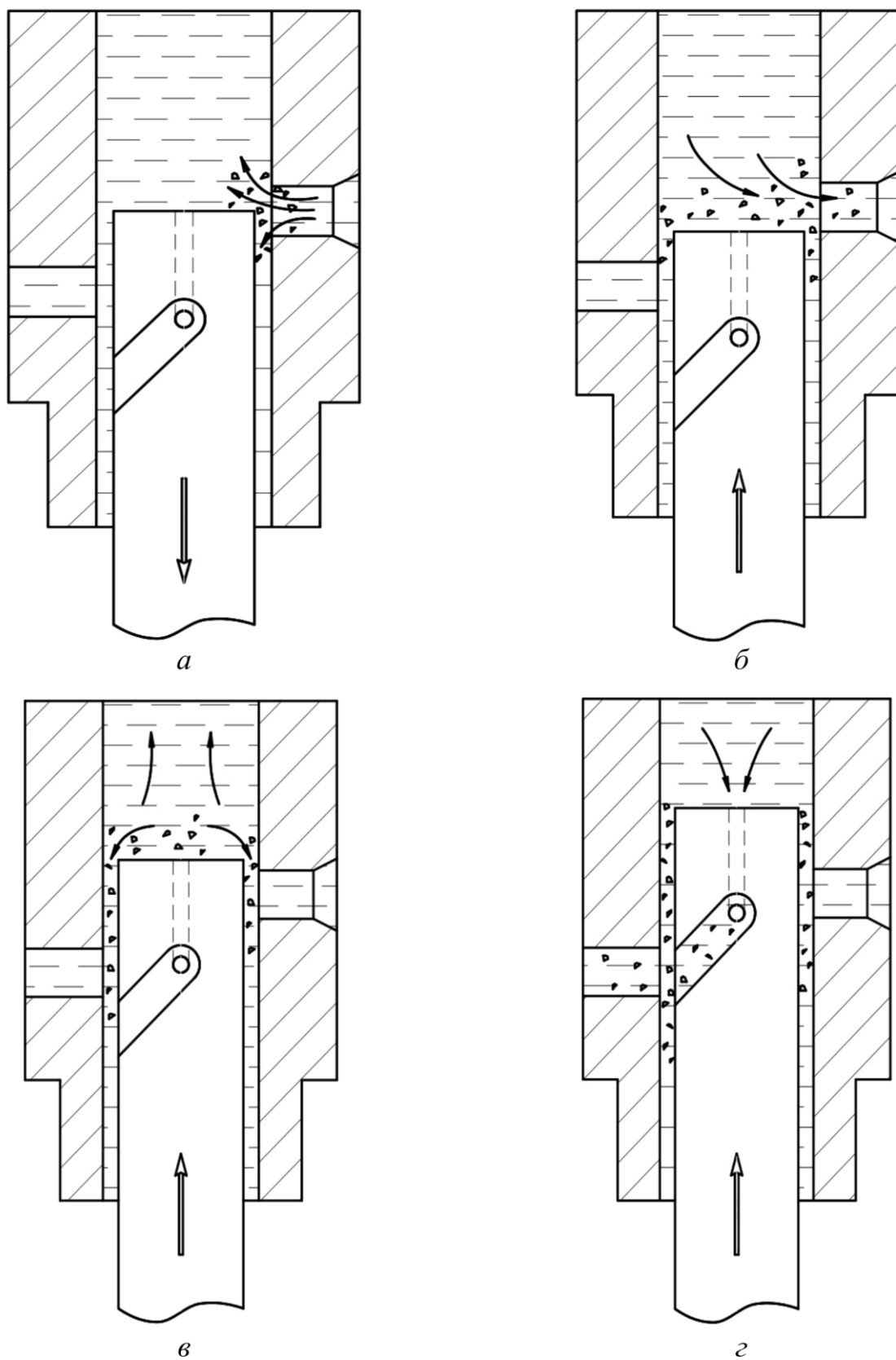


Рис. 1.1. Механізм зношування плунжерних пар: а – момент подачі палива; б – початковий момент нагнітання; в – момент нагнітання палива; г – момент відсікання подачі.

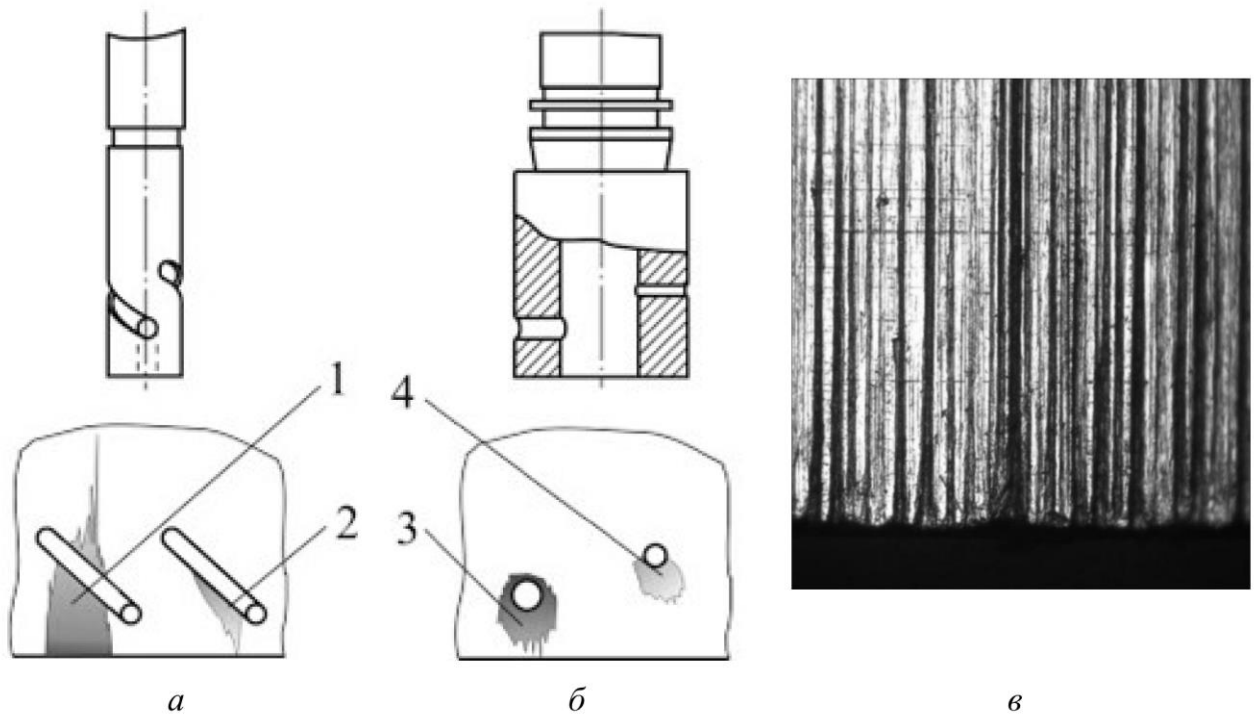


Рис. 1.2. Місця зносу: а – плунжера, б – втулки; в – зовнішній вигляд зношеної поверхні плунжера ($\times 50$); 1, 3 – зони місцевого зносу відповідно плунжера і втулки поблизу впускного вікна; 2, 4 – зони місцевого зносу відповідно плунжера і втулки поблизу відсічного вікна

Крім абразивних частинок на знос плунжерних пар впливає вода, присутня в дизельному паливі, яка сприяє утворенню слабких і сильних електролітів водорозчинних кислот, що є найбільш активними реагентами електрохімічної корозії [10]. Вода і розчинені в ній речовини викликають сильну корозію деталей паливної апаратури і призводять до додаткового забруднення дизельного палива продуктами корозії, відкладенню їх на стінках паливних баків, паливопроводів, потрапляння в зазори прецизійних деталей [14]. Іншим, важливим фактом є погіршення в'язкісних властивостей палива, що відбивається на його змащувальній здатності. При наявності в паливі емульсійної води значно погіршуються як протизносні, так і протизадирні властивості металу. Вода, потрапляючи в зазор плунжерної пари, порушує паливну плівку, що призводить до безпосереднього контакту сполучених деталей, підвищеного їх зносу і зчеплення третєвих поверхонь.

Описані механізм і характер зношування дозволяють зробити висновок про те, що знос деталей плунжерних пар носить складний гідроабразивний характер. В середньому втулка зношується в 1,5-2,0 рази менше, ніж плунжер. Максимальна величина зносу плунжера не перевищує 40 мкм. У зв'язку з цим, для підвищення довговічності плунжерних пар при їх відновленні необхідно на поверхні плунжера створити шар товщиною не більше 80 мкм (враховуючи максимальну величину зносу плунжера, втулки і припуски на механічну обробку), що володіє досить високою мікротвердістю, зносостійкістю і корозійною стійкістю.

1.2. Аналіз способів відновлення та зміцнення плунжерних пар паливних насосів високого тиску

В даний час існує ряд способів відновлення і зміцнення плунжерних пар ПНВТ [1, 2, 3, 5, 11, 12, 13, 16]: перекомплектування, виготовлення ремонтної деталі, пластичне деформування, хімічне нікелювання, повторне азотування, дифузійне хромування, борування, сульфоборування, електролітичне хромування.

Відновлення методом перекомплектування [3, 8, 12, 14]. Даний спосіб здійснюється за рахунок притирання, з подальшим сортуванням на розмірні групи, підбором і взаємним притиранням деталей. Втулки притирають на притирочному верстаті в два етапи з використанням крупно-, а потім дрібноабразивних притирочних паст.

Режими притирання: частота обертання притира або деталі 250 хв⁻¹ ; число подвійних ходів притира або деталі 100...150 хв⁻¹ ; вихід притира за межі обробки плунжера 10...12 мм, втулки – 20...26 мм; початковий тиск на притир 0,1...0,2 Па [12].

Плунжер притирають за технологічним процесом аналогічно описаному. Для притирання деталей закріплюють у шпинделі, а притир – у затискному пристосуванні.

Після закінчення притирання певної кількості деталей, здійснюють їх вимірювання, сортування на розмірні групи і підбір пари таким чином, щоб плунжер входив у втулку на $1/3$ довжини від зусилля руки. Після цього протягом 1–2 хв плунжер і втулку взаємно притирають. Частота обертання плунжера $100\ldots150 \text{ хв}^{-1}$; число подвійних ходів втулки $80\ldots100 \text{ хв}^{-1}$ [3].

Таким способом вдається відновити близько 10–15 % всіх деталей [14].

Виготовлення ремонтної деталі [6, 14, 19]. Даний спосіб здійснюється шляхом виготовлення нової деталі з двох сполучених. На першому етапі проводять механічну обробку зношених деталей. З втулки видаляють сліди зносу, потім виготовляють новий плунжер зі збільшеним зовнішнім діаметром, після чого здійснюють їх притирання з втулкою на режимах, описаних вище.

Недоліками даного методу відновлення є: висока собівартість за рахунок необхідності придбання серійного технологічного обладнання, аналогічного застосовуваному на заводі-виробнику; велика витрата металу на виготовлення ремонтної деталі; збільшена кількість селективних груп. Зазначені недоліки обмежують застосування способу для відновлення деталей плунжерних пар.

Пластичне деформування втулки плунжера. Даний спосіб заснований на здатності металів змінювати свою форму і розміри без руйнування під дією навантаження за рахунок залишкової пластичної деформації [1, 39]. При пластичній деформації об'єм деталі залишається без змін, переміщується тільки метал з однієї ділянки на іншу.

При використанні даного способу, для відновлення плунжерних пар, здійснюють пластичне деформування втулки, в результаті чого зменшується внутрішній діаметр втулки за рахунок переміщення металу внутрішньої поверхні до отвору під тиском на пресі. Пластичне деформування проводять з підігрівом металу до температури $600\ldots650 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Подальше притирання отвору у втулці

здійснюють за технологією заводу-виробника. Зношені плунжери піддають притиранню, після чого їх комплектують з втулками.

Недоліками даного способу є зміна структури і фізико-механічних властивостей деталей, складність застосовуваного обладнання, висока енергоємність процесу.

Хімічне нікелювання. Відновлення плунжерних пар хімічним нікелюванням полягає в нанесенні на плунжер покриття нікелю у водному розчині. Основними компонентами розчину хімічного нікелювання є солі нікелю, гіпофосфат натрію і оцтовокислий натрій. Даний процес протікає в розчині при температурі 90...94 °С без використання електричного струму. Відмінною особливістю хімічного нікелювання є висока рівномірність одержуваних покриттів.

На поверхні деталі, одночасно з нікелем осідає фосфор, оскільки в розчині хімічного нікелювання міститься гіпофосфіт. Наявність у покритті фосфору сприяє підвищенню твердості покриття до HRC 42...45. Після нагрівання до 400 °С і витримки при цій температурі протягом 1 години твердість покриття підвищується до HRC 65...67 [9].

Перед нанесенням нікель-фосфорного покриття на плунжер його механічно обробляють, далі наносять покриття на робочу частину плунжера, потім плунжер притирають з втулкою.

Основними недоліками даного способу є низька стабільність процесу з великими втратами нікелю, невисока адгезія покриттів, їх лущення і відшарування [6].

Повторне азотування. Під час азотування відбувається дифузія азоту, утворення нітридів і структурних перетворень, що призводять до зміни розмірів деталей плунжерних пар [9, 15, 19]. Процес відбувається при температурі 440...460 °С протягом 25...30 год. В середньому азот дифундує вглиб металу на 0,01 мм/год.

Нерівномірність азотованого шару по товщині, тривалість процесу, нестабільність розмірів, складність застосовуваного обладнання є причинами того, що даний спосіб є малоефективним.

Дифузійне хромування плунжера. Дифузійне хромування здійснюється шляхом насичення поверхонь сталевих деталей хромом. Процес протікає при високих температурах (950...1300 °С) за рахунок дифундування хрому в залізо [13, 11].

Розрізняють тверде, рідке і газове дифузійне хромування. Тверде хромування проводиться аналогічно цементації. Рідке хромування здійснюють у ванні, в яку вводять ферохром. Для отримання шару 0,05...0,15 мм хромування проводять у твердих порошках при температурі 1100 °С протягом 6–12 год. Газове хромування триває 3–6 год при температурі 900...1100 °С для отримання шару 0,05...0,1 мм. Рідке хромування відбувається при температурі 950...1150 °С протягом 10–15 хв для отримання шару 0,01 – 0,03 мм. Твердість хромованого шару становить HV 1300 – 1350 [11].

Даний спосіб забезпечує високу зносостійкість і корозійну стійкість, а також хороше зчеплення з основним металом.

Істотними недоліками, що обмежують застосування даного способу для відновлення плунжерних пар, є викривлення деталі, тривалість процесу і низька товщина дифузійного шару.

Хімічне борування втулки і плунжера. Даний процес полягає в насиченні поверхні деталі бором [9, 39, 44]. Розрізняють два види борування. Борування при електролізі розпавленої бури і рідке борування. Для отримання шару 0,15...0,25 мм борування триває 1–3 години. Процес протікає при температурі 900...1100 °С.

Даний спосіб характеризується такими недоліками – тривалість процесу (6–8 год), викривлення деталей, висока крихкість шару.

Хімічне сульфоборування. Даний спосіб здійснюється шляхом сульфидування сталевих деталей з додаванням в розчин бури [4, 15]. Процес

хімічного сульфоборування здійснюється в розчині при температурі 130...150 °С. Протягом 50– 60 хв на поверхні, що покривається, утворюється шар товщиною 20 мкм, що складається з сульфідів, які підвищують антифрикційні властивості, і боратів, що мають твердість до 13000 МПа.

Недоліками даного методу є складність технологічного процесу і мала товщина покриття.

Електролітичне хромування. Хром характеризується досить високою мікротвердістю, міцністю зчеплення з основним металом і корозійною стійкістю [4, 5, 11]. Його властивості значною мірою залежать від режимів електролізу.

Підбираючи режими хромування, можна отримувати мікротвердість осаду від 5000 до 10000 МПа. При цьому зносостійкість покриття також може значно змінюватися [3].

Електроліти хромування являють собою розчини хромової кислоти (H_2CrO_4), які утворюються в результаті розчинення хромового ангідриду (CrO_3) в дистильованій воді. Для осадження хрому на деталі, в електроліт додають сірчану кислоту (H_2SO_4). Найбільш якісне покриття хрому і високий вихід по струму досягаються при співвідношенні $\text{CrO}_3 : \text{H}_2\text{SO}_4 = 1:100$.

Змінюючи концентрацію і температуру електроліту хромування можна отримувати матові, блискучі і молочні покриття. Матові осади характеризуються дуже високою твердістю (9000...10000 МПа), але відрізняються крихкістю і невисокою зносостійкістю. Блискучі покриття мають високу твердість (7000...9000 МПа) і зносостійкість. Молочні покриття мають меншу твердість (4000...7000 МПа), ніж блискучі, але досить пластичні і зносостійкі [4].

Дослідження, проведені в роботах [11, 13], дозволили встановити, що на поверхні блискучого хромового покриття є сітка тонких тріщин, в той час як на поверхні матових покриттів тріщини невидимі. Тріщини починають утворюватися при товщині покриття близько 0,01 мм. При хромуванні на велику товщину вони перекриваються, і в наступних шарах утворюються нові тріщини.

Таким чином, блискуче хромове покриття має видимі і приховані тріщини (пори) у вигляді сітки, величина якої залежить від режиму хромування.

Одним з недоліків хромового покриття є те, що воно погано змочується нафтопродуктами. Однак цей недолік певною мірою може бути усунутий створенням на поверхні покриття пор, поглиблень або каналів, які досить добре утримують мастило на поверхні хрому. Такі пори створюють різними способами, найпоширеніший з них – травлення шару хрому в розбавленій соляній кислоті [3].

Дослідженнями, проведеними в роботах [5, 11], встановлено, що зносостійкість хрому в деяких випадках у 4–5 разів вища, ніж азотованих сталей, і в 10–15 разів порівняно з конструкційними.

Вивчення механізму зносу хромового покриття методом рентгеноструктурного аналізу показало [1], що поверхневі шари хрому в процесі з у тертя наклепуються, отримуючи значну пластичну деформацію, після вичерпання якої відбувається відділення найдрібніших частинок хрому.

За даними [6], хромування плунжерів збільшує їх зносостійкість в середньому в 2,5–3,0 рази і дозволяє повністю відновлювати зношені деталі. При цьому автор зазначає, що стає можливою заміна високоякісних важкооброблюваних сталей вуглецевими, що підвищує стабільність розмірів прецизійних деталей, виключає можливість заклинювання, викликаного перетворенням залишкового аустеніту, і знижує вартість.

Таким чином, до переваг хромування можна віднести високу твердість хромового покриття (HV 400...1000) і його зносостійкість. При хромуванні відсутній термічний вплив на деталь (процес протікає при температурі 20...60 °C), що викликає зміну її фізико-механічних властивостей і структури.

Основними недоліками хромування є: низька продуктивність процесу; недостатньо хороша міцність зчеплення осаду з основним металом; невисока корозійна стійкість покриття внаслідок постійної присутності в ньому глибокої сітки тріщин. За даними [3], все це призводить до зниження зносостійкості,

відшарування і відколювання покриття в процесі роботи плунжерних пар і їх заклинювання, так як абразивні частинки впроваджуються в тріщини покриття і сколюють його або зношують втулку плунжера.

Проведений аналіз показав, що для відновлення плунжерних пар найбільш перспективним є електролітичне хромування, що дозволяє отримувати покриття необхідної товщини з високими фізико-механічними властивостями.

1.3. Фізико-механічні властивості та механізм утворення наноконпозиційних електролітичних покриттів

Наноконпозиційні електролітичні покриття являють собою електролітичний осад, до складу якого введені різні сторонні включення [5, 21].

Перші дослідження, що стосуються розробки технології отримання композиційних електролітичних покриттів, були здійснені Ю.В. Баймаковим у 1925 р. [11, 19]. Автор встановив можливість спільного соосадження електролітичних покриттів заліза з включенням до 1 % графіту. Дещо пізніше І. Принц і Дж. Фінк [17] змогли отримати електролітичне покриття міді спільно з графітом. Однак перші пошукові роботи в даному напрямку не знайшли практичного застосування. Тільки в 60-х роках ХХІ ст. спосіб спільного осадження металів і дрібнодисперсних твердих частинок був використаний для виготовлення і зміцнення алмазних інструментів.

Велика кількість досліджень з отримання композиційних електролітичних покриттів на основі заліза з включенням частинок оксиду алюмінію, дисульфиду молібдену, карбіду титану та ін. були проведені Ю.Н. Петровим, Ф.С. Анселлом, Г.В.

Гур'яновим та іншими вченими [7.]. Дослідниками встановлено, що при збільшенні кількості частинок Al_2O_3 і MoS_2 збільшується пластичність покриттів, знижується їх тріщинуватість, зменшується ступінь досконалості

текстури, зростають внутрішні напруження першого роду, а також значно змінюються інші фізико-механічні властивості одержуваних покриттів.

Спільне соосадження покриття заліза з карбідом бору призводило до того, що зменшувалося наводнення одержуваного композиційного покриття в 1,4–1,6 рази, а застосування в якості другої фази дисульфиду молібдену – в 1,2–2,4 рази. Також авторами визначено, що наявність частинок другої фази в покриттях на основі заліза не має істотного впливу на втомну міцність, а зносостійкість електролітичних покриттів на основі заліза в 2–20 разів вища за зносостійкість базового покриття заліза [6].

Л.І. Антропов і Ю.М. Лебединський [5] досліджували можливість включення твердих частинок різних матеріалів в електролітичний осад нікелю, а також фізико-механічні властивості цих покриттів. Вони встановили, що формування композиційних покриттів на основі нікелю при спільному осадуванні з оксидами, карбідами та іншими матеріалами визначається розмірами і фізико-механічними властивостями застосовуваних частинок, режимами перемішування електроліту-суспензії і його хімічним складом, а також режимами електролізу. Крім цього, мікротвердість, зносостійкість і корозійна стійкість композиційних електролітичних покриттів нікелю з включеннями різних оксидів і карбідів значно перевершують відповідні фізико-механічні властивості покриттів без включень.

Ф.А. Аюповим, В.А. Вандишевим, В.М. Дзицюком, Ю.Н. Лебединським, В.Ф.

Молчановим та іншими дослідниками [8, 13–14], починаючи з 1962 р., проводилися роботи щодо вдосконалення процесу електролітичного хромування. Ними ж у 1964 р. були проведені дослідницькі роботи з вивчення можливості отримання композиційних електролітичних покриттів на основі хрому. У 1966 р. були досліджені питання щодо вдосконалення процесу електролітичного хромування в саморегульованому сульфатно-кремнефторидному електроліті.

У роботах [5, 11, 14] вказано на те, що композиційні гальвано-хімічні покриття можна отримувати із застосуванням різних за природою матеріалів другої фази. Призначення матеріалів другої фази полягає в наданні одержуваним покриттям цінних властивостей, які не характерні для базових покриттів. Їх вплив на метал покриття може бути різним. У таблиці 1.7 представлені узагальнені дані по основних дисперсних матеріалах другої фази, які сприяють поліпшенню тих чи інших властивостей покриттів.

Таблиця 1.1 – Основні дисперсні матеріали другої фази, що впливають на властивості покриттів

Властивості покриття	Дисперсні матеріали
Твердість і зносостійкість	Al_2O_3 , WC, ZrO_2 , TiC, ZrB_2 , B_4C , Cr_3B_2 , ZrC, ThO_2 , CeO_2 , TaC, WS_2 , політітанат калію
Зносостійкість в умовах сухого тертя і 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, політітанат калію
Термостійкість	оксиди, карбіди
Пористість	карбонільний нікель
Властивості покриття	Дисперсні матеріали
Твердість і зносостійкість	Al_2O_3 , WC, ZrO_2 , TiC, ZrB_2 , B_4C , Cr_3B_2 , ZrC, TiO_2 , CeO_2 , TaC, WS_2 , політітанат калію
Зносостійкість в умовах сухого тертя і 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, політітанат калію
Термостійкість	оксиди, карбіди
Пористість	карбонільний нікель

Як відзначають багато авторів [14, 17], композиційне покриття може бути отримано при введенні в електроліт різних частинок розмірами 0,1...50 мкм в кількості від 5 до 100 г/л.

Незалежно від природи частинок вміст речовин другої фази в покритті не перевищує 2 % [18]. Незважаючи на таке незначне включення речовин другої фази в матрицю, фізико-механічні властивості покриття різко змінюються.

У роботах [11, 14] вказується на те, що мікротвердість осадів збільшується в 1,5–2,3 рази, а зносостійкість – в 10–15 разів у порівнянні з осадами, що не мають у своєму складі частинок твердої фази.

Дослідження, проведені в роботах Л.І. Антропова і Ю.М. Лебединського [5, 12], вказують на малий (0,1–0,3 %) вміст Al_2O_3 в шарах хрому. Однак навіть цих малих кількостей виявилось достатньо для зниження зносу поршневих компресійних кілець в 1,8–3,5 рази і підвищення їх мікротвердості на 1,5–2,0 ГПа. При наявності дисперсних частинок в електроліті зростає вихід хрому по струму з 18 до 24 %, зменшувалася крихкість і підвищувалася еластичність покриття. Тут же описано покриття Cr-SiC, Cr-WC з вмістом другої фази до 8–10 %. Встановлено підвищення мікротвердості покриття при співосадинні з частинками з 7,0...9,5 до 11...16 ГПа.

Багато авторів [5, 11, 14] вказують на те, що важливою перевагою композиційних покриттів є збереження підвищених значень твердості в часі в порівнянні з чистими гальванічними покриттями, які практично втрачають її вже в перші години і дні після їх отримання.

У деяких роботах [12, 14, 15] дослідники вказують не тільки на підвищення твердості і зносостійкості, але так само і на зростання термостійкості композиційних гальвано-хімічних покриттів в порівнянні з базовими покриттями. За даними [14], спільне соосадження електролітичного покриття хрому з частинками ZrB_2 сприяло отриманню композиційних покриттів, здатних витримувати температуру 2000...2500 °C, а соосадження з частинками W і Mo – 3300...3600 °C [17].

При використанні частинок малого розміру більш стійкий процес електрокристалізації, так як частинкам малих розмірів властива наявність

броунівського руху і перебування тривалий час в електроліті в підвішеному стані без перемішування [5, 11].

Дослідження, проведені в роботах Л.І. Антропова, Ф.А. Аюпова, В.А. Вандишева, Ю.М. Лебединського, В.Ф. Молчанова та ін. [5–6], доводять, що всі види гальванохімічних покриттів, отриманих з використанням частинок другої фази, мають високу зчіпність з основним металом. Відзначається також, що пористість покриттів з включенням частинок другої фази в 2,2–3,5 рази менше, ніж отриманих з електролітів, що не мають у своєму складі таких частинок.

Особливістю наноконпозиційних електролітичних покриттів є те, що їх отримують з електролітів-суспензій, які представляють собою електроліт з додаванням деякої кількості нанорозмірного матеріалу [12].

У зв'язку з цим великий інтерес представляє вивчення механізму спільного соосадження гальвано-хімічних покриттів і частинок другої фази.

У утворенні композиційних електролітичних покриттів при електролізі електроліту-суспензії Р.С. Сайфуллін [17] виділив три важливі етапи:

- 1) зустріч частинок з поверхнею катода;
- 2) затримання частинок на поверхні катода;
- 3) заростання частинок, що опинилися на поверхні катода.

Зустріч частинок з поверхнею катода відбувається в результаті перемішування електроліту-суспензії штучним або природним шляхом. Штучне перемішування здійснюють ультразвуком, механічною пропелерною мішалкою, рециркуляцією електроліту тощо. Природне перемішування є наслідком електрофоретичного перенесення, дифузії, броунівського руху. За результатами досліджень, проведених Р. С. Сайфулліним [17], швидкість руху частинок розмірами 0,01...0,1 мкм за рахунок дифузії і броунівського руху становить 50...150 мкм/год, тобто співмірна зі швидкістю осадження багатьох електролітичних покриттів або в десятки разів перевищує її. Що стосується швидкості переміщення частинок при штучному перемішуванні, то, за даними І.Н. Бородіна [11], вона може в сотні і навіть тисячі разів перевищувати

швидкість росту кристалів при осаді металів. Однак при великій швидкості переміщення, частинки, швидше за все, не будуть встигати заростати зростаючим гальванічним осадом, а будуть йти з прикатодної зони в результаті високих швидкостей руху електроліту.

Таким чином, для забезпечення зустрічі частинок з поверхнею катода при утворенні композиційних електролітичних покриттів доцільно використовувати частинки розмірами 0,01...0,1 мкм.

При затримці частинок другої фази на поверхні катода спостерігаються такі різноманітні маловивчені явища, як адгезія, налипання, адсорбція, змочуваність, електрична взаємодія катода з частинками, зіткнення твердих частинок з блоками кристалів, а також із зародками та іншими незавершеними структурами. Ці та інші явища відбуваються при зіткненні частинок [5], ймовірність якого досить велика внаслідок відмінності форми частинок, величини заряду, макро- і мікронестаціонарності потоків електроліту, що викликаються його переміщенням і гідравлічним ударом об структуру, що формується, тощо. Дані явища можуть послужити причиною виштовхування або виламування частинок з поверхні катода. У цьому випадку побудова моделі утворення таких покриттів ускладнюється ще й рядом інших факторів, зокрема, наявністю дефектів структури матриці (пор, тріщин, капілярів, мікро- і макронерівностей поверхні катода тощо). Всі ці фактори можуть або сприяти, або перешкоджати утриманню частинок на поверхні катода.

В результаті вищевикладеного можна зробити висновок, що для утримання частинок другої фази на поверхні катода необхідна, з одного боку, сукупність властивостей частинок, з іншого – металу катода, складу електроліту і режимів електролізу.

Стадія зарощування частинок осадом, що формується, визначає кількість частинок другої фази в покритті, його фізико-механічні властивості, локальні неоднорідності структури, міцність з'єднання частинок і матриці, мікропластичні деформації і напруження в покритті.

Перебуваючи в безпосередній близькості від катода або контактуючи з ним через тонку плівку електроліту, частинка другої фази впливає на процес осадження покриття. Цей вплив проявляється в спотворенні електричного і дифузійного полів, в екрануванні частинкою частини поверхні катода, в зміні фактичної площі катода і щільності анодного струму. Дані фактори впливають на поляризацію катода, адсорбцію частинок і молекул, пасивацію і характер формування та зростання покриття. За даними І.Н. Бородіна [22], ефект екранування виникає при відстані від поверхні катода не більше $0,5 \dots 0,6$ розміру частинки. Цей ефект змінює умови живлення іонами зростаючих граней покриття. Якщо частинка досить довго знаходиться біля катода, це призводить до появи поглиблення на його поверхні.

На підставі вищевикладеного встановлено, що для зарощування частинок другої фази покриттям, що формується, бажаний безпосередній контакт частинки з катодом, однак і при наявності рідкого прошарку електроліту товщиною менше певної критичної відстані утворення композиційних електролітичних покриттів цілком можливе. Безпосередній контакт частинки з катодом в процесі електрокристалізації металу залежить від ряду факторів, перш за все від властивостей частинок другої фази, їх адгезійної здатності, зарядів частинок і катода.

Порушення перерахованих вище процесів або створення перешкод їх протіканню може призвести до різних наслідків аж до того, що спільне осадження матриці і частинок стане неможливим.

Як показують дослідження [5, 12], великий вплив на структуру і склад композиційних електролітичних покриттів мають режими електролізу.

За даними деяких авторів [11, 18], при більш високих щільностях струму можливе цементування гальванічними покриттями частинок другої фази у великих кількостях, ніж при малій щільності струму. Налиплі до поверхні катода частинки при малій щільності струму можуть переміщатися разом із зростаючим

осадам, не заростаючи останнім. Великим поглинанням частинок при високих значеннях щільності струму пояснюють іноді і підвищену шорсткість осаду.

Однак, за даними Л.І. Антропова і Ю.Н. Лебединського [5, 14], зміна щільності струму практично не впливає на вміст частинок в покритті.

При осаді деяких покриттів спостерігається залежність процесу від температури електроліту [2, 6, 14]. Так, при хромуванні зі збільшенням температури електроліту вміст частинок в покритті знижується. В.А. Вандишев у своїй роботі [2] пояснює це тим, що з підвищенням температури в'язкість електроліту зменшується, це призводить до збільшення швидкості седиментації частинок, внаслідок чого концентрація частинок в суспензії знижується. Підвищення температури послаблює також адгезію частинок до поверхні катода. Однак, на думку деяких авторів [14, 17], вміст частинок у покритті не залежить від температури електроліту.

З вищевикладеного випливає, що не існує однозначного впливу щільності струму і температури електроліту на структуру, склад і, отже, фізико-механічні властивості покриття.

Деякі автори [11, 16] вказують також на те, що істотну роль у механізмі утворення композиційних електролітичних покриттів відіграє форма частинок другої фази. В результаті металографічних досліджень, проведених Л.І. Антроповим [5], було виявлено чотири характерні типи структур, властивих електролітичним осадам без включень і з включеннями частинок другої фази (малюнок 1.10).

1. Якщо в електроліті відсутні дисперсні частинки, в покриттях з'являються довгі, а іноді перехресні тріщини, що представляють собою сліди реалізації внутрішніх напружень (рис. 1.3, а).

2. Якщо в покриття впроваджуються дисперсні частинки, що мають твердість менше твердості матриці, то внутрішні напруження реалізуються за рахунок тріщин, не зустрічаючи опору частинок (рис. 1.3, б).

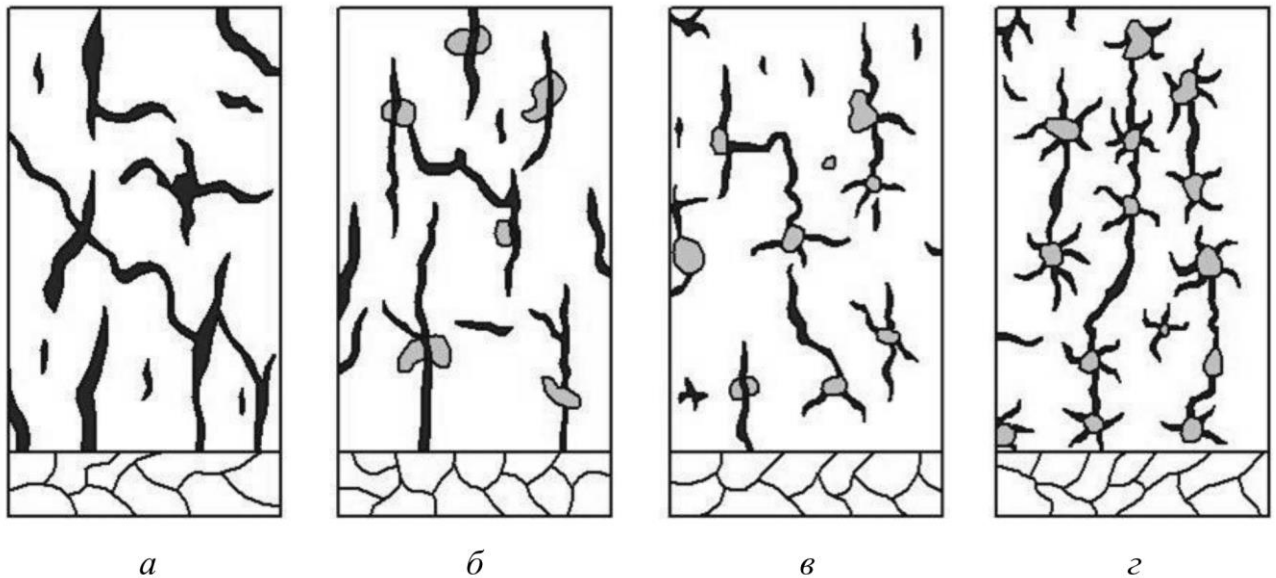


Рис. 1.3. Моделі структури композиційних електролітичних покриттів, отриманих з електролітів без включень (а) і з введенням до їх складу частинок різної твердості (б, в, з)

3. Якщо значення твердості матриці і частинки співмірні, то можливі два випадки (рис. 1.3, в):

- частинки не є перешкодою для тріщин (площа їх поперечного перерізу мала або ослаблена дефектами їх структури), в цьому випадку тріщини в матриці розвиваються в основному в напрямку росту кристалів;

- частинки є перешкодою для утворення тріщин у матриці, в результаті чого зростає захисна здатність покриття.

4. Висока твердість дисперсних частинок у порівнянні з твердістю матеріалу матриці викликає реалізацію напружень між сусідніми включеннями (малюнок 1.10, з). Крім того, біля включень утворюється велика кількість мікротріщин, розміри яких на два, три і більше порядків менше, ніж у першому випадку. Захисна здатність покриття поліпшується, оскільки довгих тріщин стає менше, а наскрізні тріщини можуть бути відсутніми. Покриття, що мають таку структуру, меншою мірою впливають на зниження втомної міцності матеріалу, на який їм завдають. Покриття, отримані, наприклад, хромуванням, мають межу втомної міцності в 3–5 разів менше, ніж в інших випадках [2].

Великий вплив на механізм утворення у композиційних електролітичних покриттів має природа дисперсних частинок. Деякі автори вказують на те, що зарощування частинок, що мають високу електропровідність, і неелектропровідних частинок відбувається по-різному (рис. 1.4) [2, 14].

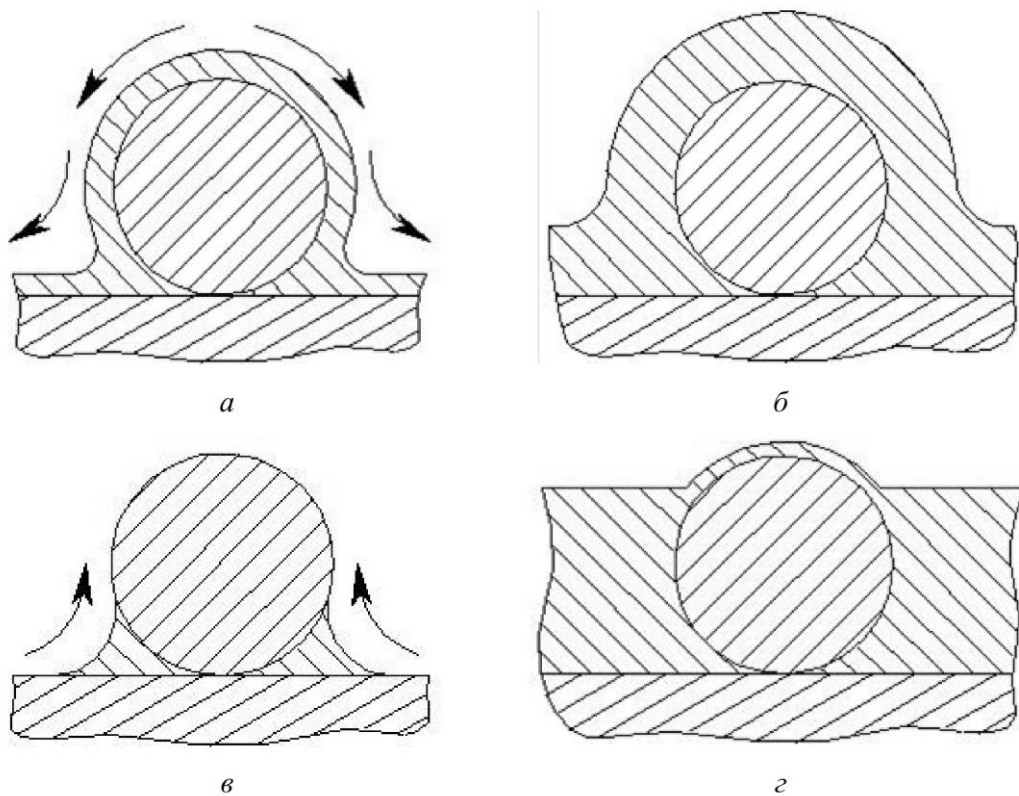


Рис. 1.4. Схема заростання дисперсних струмопровідних (а і б) і неструмопровідних (в і г) частинок.

Заростання електропровідних частинок другої фази здійснюється по всьому периметру – від основи до вершини (рис. 1.4, а, б), а заростання частинок з низькою електропровідністю відбувається в першу чергу біля основи, а потім поширюється ширше (рис. 1.4, в, г).

Л.І. Антропов у своїх роботах [5–6] розглянув механізм заростання ідеальних електропровідних і неелектропровідних кульових частинок (рис. 1.5).

Так, в момент контактування з катодом електропровідна кульова частинка (рис. 1.5, а) заростає шаром металу товщиною δ по периметру контактування з катодом по сфері.

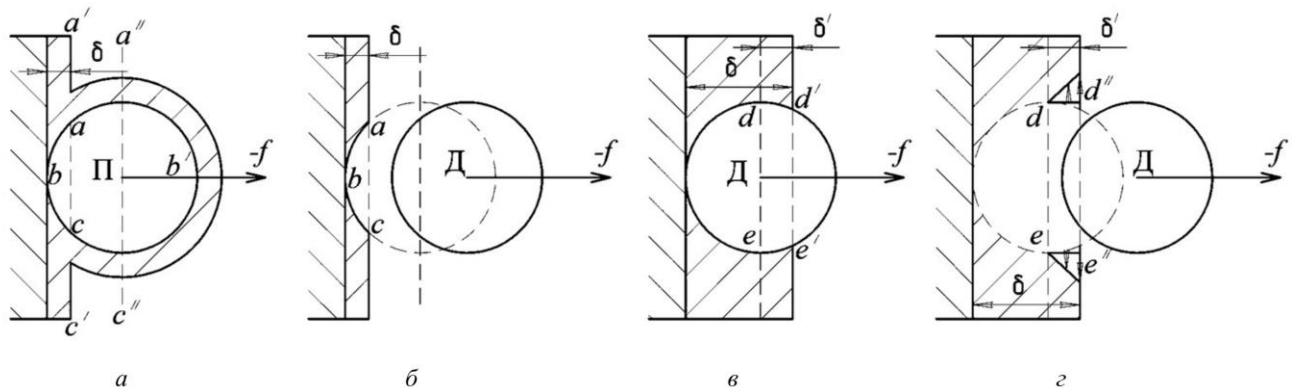


Рис. 1.5. Схема захоплення металом ідеальних кульових електропровідних (П) і діелектричних (Д) частинок.

Найімовірніше, найбільш сприятливим при осаджуванні композиційних електролітичних покриттів буде використання електропровідних частинок. Однак останні можуть бути причиною утворення пухких покриттів, які часто потребують подальшої обробки для ущільнення і зчеплення з основою [12].

Тому доцільним буде використання неелектропровідних частинок розмірами 0,01...0,1 мкм. Такий розмір є достатнім для утримання неелектропровідних частинок шаром покриття в період їх контактування з катодом.

Крім того, на думку В.Ф. Молчанова [14], з точки зору підтримки стійкості електроліту-суспензії і включення частинок в покриття, що формується, їх оптимальні розміри повинні бути близько 0,01...0,05 мкм. Автор встановив, що більші частинки другої фази (0,1...10 мкм) складніше впроваджуються в покриття, швидше седиментують, в результаті чого залишають прикатодний простір, у зв'язку з цим їхня діюча концентрація стає нижчою за рецептурну.

Найчастіше використовують електроліти-суспензії з концентрацією частинок другої фази 1...5 г/л [17]. Деякі автори [5, 21], прагнучи отримати композиційні покриття, з підвищеним вмістом частинок другої фази, використовували електроліти-суспензії з підвищеною концентрацією частинок.

Однак у цьому випадку ступінь використання частинок другої фази покриттям, що формується, значно знижується, тобто відбувається насичення покриття частинками [18].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методика отримання наноконпозиційних електролітичних покриттів на основі хрому

Для отримання наноконпозиційних електролітичних покриттів на основі хрому було обрано саморегульований електроліт хромування. Такий електроліт широко поширений у ремонтній галузі, оскільки дозволяє отримувати якісні хромові покриття з високою мікротвердістю (8...10 ГПа) [4, 9, 17, 23]. Крім того, він дає можливість у широкому діапазоні змінювати фізико-механічні властивості покриттів при зміні режимів хромування, що дуже важливо для дослідження і створення нових зносостійких покриттів.

У літературі представлені численні рекомендації щодо вибору умов електролізу, що дозволяють отримувати покриття з високими фізико-механічними властивостями [8, 15, 17]. Відповідно до цих рекомендацій були обрані склад і режими електролізу, прийняті за основу при отриманні та дослідженні властивостей наноконпозиційних електролітичних покриттів на основі хрому.

Опрацювання електроліту здійснювали з розрахунку 8...10 А·год/л при температурі 50...60 °С, катодній щільності струму 6...8 А/дм² і співвідношенні катодної та анодної поверхонь 3:1.

Технологічний процес отримання наноконпозиційних покриттів на основі хрому на зразках складався з наступних основних операцій [14, 23]:

1. Механічна обробка до виведення слідів зносу та надання поверхні правильної геометричної форми.
2. Промивання зразків бензином або ацетоном.
3. Монтаж зразків на підвіски та ізоляція поверхонь, що не підлягають нанесенню покриття.

4. Хімічне знежирення: розчин:

- тринатрій фосфат 50 г/л;
- вуглекислий натрій 25 г/л;
- їдкий натрій 10 г/л. режими:
- температура 75 °С;
- щільність струму 6 А/дм² ;
- час 5 хв.

5. Промивання в теплій, потім в холодній воді.

6. Декапування (травлення):

- розчин соляної кислоти 75 г/л;
- температура 20 °С;
- час 5 хв.

7. Промивання в холодній проточній воді.

8. 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:

- щільність струму 50 А/дм²;
- температура 50 °С.

Після завантаження у ванну деталі витримували без струму 1–2 хв для прогрівання. У перші 0,5–1,5 хв давали імпульс струму 80...120 А/дм², потім щільність струму знижували до номінального значення. Аноди свинцеві.

9. Промивання в непроточній гарячій, проточній гарячій, проточній холодній воді.

10. Сушіння.

11. Зневоднення: температура 250 °С; час 2 год.

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

У процесі роботи електролітичної ванни склад електроліту безперервно змінювався. Для підтримки необхідної концентрації компонентів його періодично коригували шляхом введення нових порцій розчинних і нерозчинних компонентів.

2.2 Методика стендових випробувань паливних насосів високого тиску

Для випробування відновлених плунжерних пар паливних насосів дизелів ЯМЗ-238НДЗ був застосований метод прискорених зносних випробувань, що проводяться з додаванням абразивних частинок в дизельне паливо [14]. Абразивний матеріал являв собою частинки кварцу розміром 3-5 мкм при концентрації абразиву 15 г/т.

Випробування проводили в Поліському національному університеті, використовуючи стенди КИ-22205-01 (рис 2.1). На стендах були змонтовані термокамера і змішувач, що дозволяють підтримувати температуру і задану забрудненість палива. Паливо, з додаванням абразивного матеріалу, подавалося в ПНВТ зі змішувача, після проходження палива через ПНВТ воно знову поверталось в змішувач.

Експериментальні ПНВТ комплектували серійними і відновленими із застосуванням наноконпозиційного і базового хромування плунжерними парами.

Для дотримання ідентичних умов зношування випробовуваних плунжерних пар, ПНВТ комплектували нагнітальними клапанами, форсунками і трубопроводами високого тиску однакової пропускної здатності і гідравлічної щільності. Підібрані форсунки, нагнітальні клапани і трубопроводи встановлювалися в певні секції, а перестановки протягом випробувань не допускалися. Геометричні параметри робочих поверхонь плунжерних пар

відповідали вимогам, що пред'являються до них [15-17]: шорсткість робочих поверхонь втулки і плунжера $Ra = 0,04...0,06$ мкм, нециліндричність – $2...4$ мкм, некруглість – $0,2...0,3$ мкм, конусність по довжині 20 мм – не більше $0,5...0,6$ мкм. Відновлені плунжерні пари комплектували в ПНВТ за гідрощільністю. Випробуванням піддавали по шість насосів на підприємстві. Кожні два насоси комплектували відповідно серійними плунжерними парами, відновленими базовим і наноконпозиційним хромуванням.

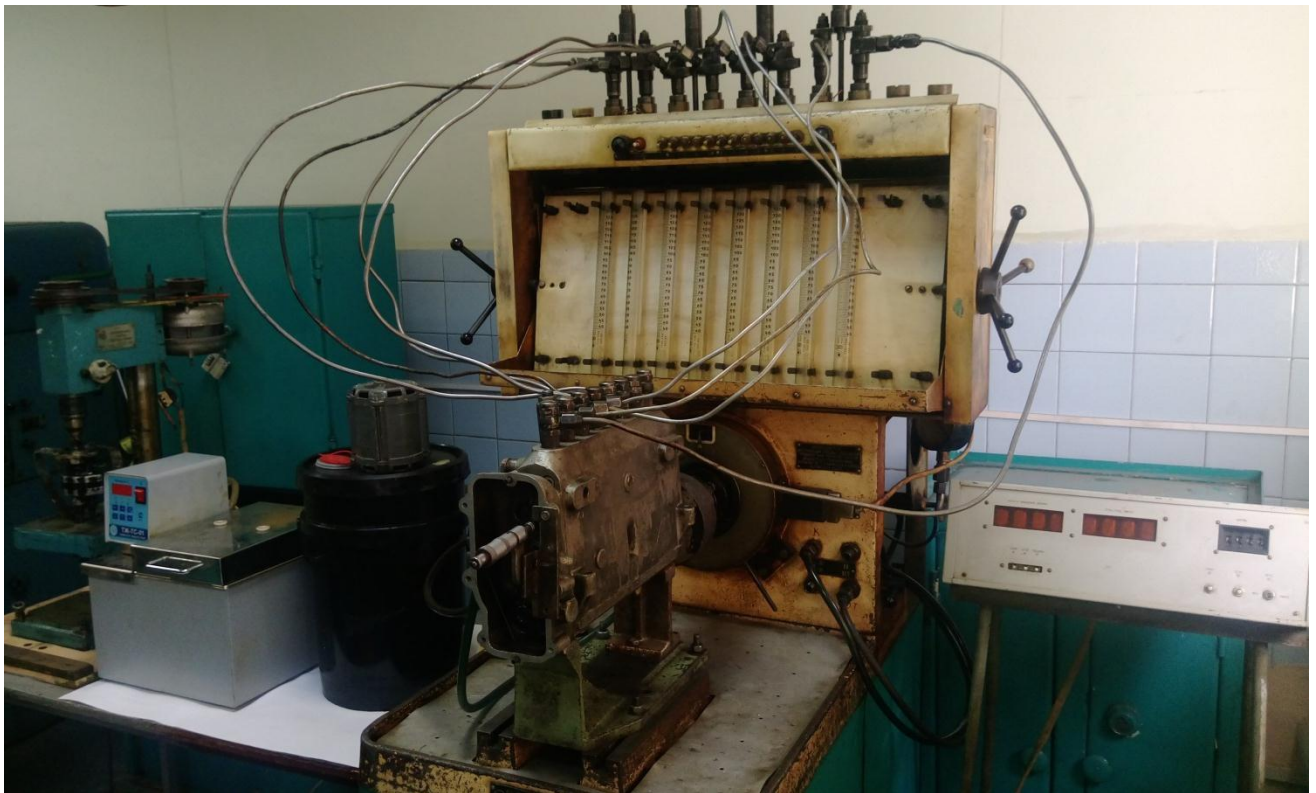


Рис. 2.1. Стенд КИ-22205-01.

Випробування проводили в два етапи: 1 – обкатка протягом 10 годин на чистому дизельному паливі; 2 – основні випробування на дизельному паливі, що містить абразивні частинки кварцу розміром 3-5 мкм при концентрації абразиву 15 г/т. Після кожної серії випробувань паливо з абразивом замінювали. У всіх випадках концентрація абразиву не змінювалася.

Випробування проводили при числі обертів кулачкового вала 830 хв^{-1} . З випробуваного ПНВТ був демонтований регулятор частоти обертання, рейка насоса фіксувалася в певному положенні, що відповідало при номінальній

частоті обертання кулачкового вала насоса значенню номінальної подачі, протягом випробування положення рейки не змінювалося.

Час випробувань – 130 год. Через кожні 10 год фіксували пускову циклову подачу палива на еталонному ПНВТ, який у процесі випробувань не брав участі.

Після випробувань плунжерні пари демонтували з насоса і перевіряли на гідрощільність за допомогою установки моделі КИ-759.

2.3 Методика експлуатаційних випробувань

Метою проведення експлуатаційних випробувань було виявлення показників довговічності агрегатів паливної апаратури з прецизійними деталями, відновленими наноконпозиційними покриттями в умовах повсякденної експлуатації.

Вибір господарства та місця проведення експлуатаційних випробувань здійснювали відповідно до вимог ДСТУ з дотриманням умови забезпечення всіх тракторів однаковими умовами експлуатації. Очищення, заміна робочих рідин, фільтруючих елементів, промивання систем і технічне обслуговування проводили через інтервали часу, встановлені заводами-виробниками.

Експлуатаційні порівняльні випробування ПНВТ з відновленими і серійними плунжерними парами проводили на тракторах ХТЗ-150, що виконують різні сільськогосподарські роботи.

Перед експлуатаційними випробуваннями експериментальні ПНВТ з відновленими і серійними плунжерними парами були відрегульовані і протягом 10 годин обкатані на стенді КИ-22205-01. Перед початком проведення випробувань на всій техніці були встановлені нові змінні фільтруючі елементи у фільтрах тонкого очищення палива, проведено регулювання ПНВТ з робочими форсунками і клапанами.

У процесі експлуатаційних випробувань контролювали напрацювання ПНВТ і зміну пускової циклової подачі палива кожні 250 мото-год на стенді КИ-22205-01 з комплектом контрольних трубопроводів і форсунок.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Результати стендових випробувань паливних насосів високого тиску

Стендові випробування ПНВТ з серійними і відновленими базовим і наноконпозиційним хромуванням плунжерними парами проводили на стенді КИ-22205-01 за методикою, викладеною в параграфі 2.2.

Граничним значенням, що обмежує працездатність плунжерних пар ПНВТ ЯМЗ-238НДЗ, була пускова циклова подача палива, яка не повинна бути нижче $180 \text{ мм}^3 / \text{цикл}$ [14].

Зміна циклової пускової подачі плунжерних пар ПНВТ ЯМЗ-238НДЗ під час проходження випробувань представлена на рис. 3.1.

В результаті проведення випробувань було встановлено, що всі випробувані ПНВТ не досягли граничного стану. З представлених на малюнку 4.27 даних видно, що після закінчення випробувань циклова пускова подача плунжерних пар, відновлених наноконпозиційним електролітичним хромуванням, знизилася з 210 до $194 \text{ мм}^3 / \text{цикл}$, або в середньому на 7,6 %, тоді як відновлених базовим хромуванням – з 210 до $188 \text{ мм}^3 / \text{цикл}$ (в середньому на 10,5 %), а серійних – з 210 до $181 \text{ мм}^3 / \text{цикл}$ (в середньому на 13,8 %).

У порівнянні з серійними плунжерними парами, відновлення пари із застосуванням наноконпозиційного електролітичного хромування дозволяє зменшити інтенсивність зниження циклової пускової подачі в середньому на 7,2 %.

Гідрощільність плунжерної пари характеризує величину витоків палива через зазори в ній і побічно дозволяє судити про наявність зносу. Після випробувань гідрощільність плунжерних пар, відновлених наноконпозиційним електролітичним хромуванням, склала в середньому 18 с, відновлених базовим

електролітичним хромуванням – 16 с, серійних – 15 с (гідрощільність всіх плунжерних пар до випробувань становила в середньому 20 с).

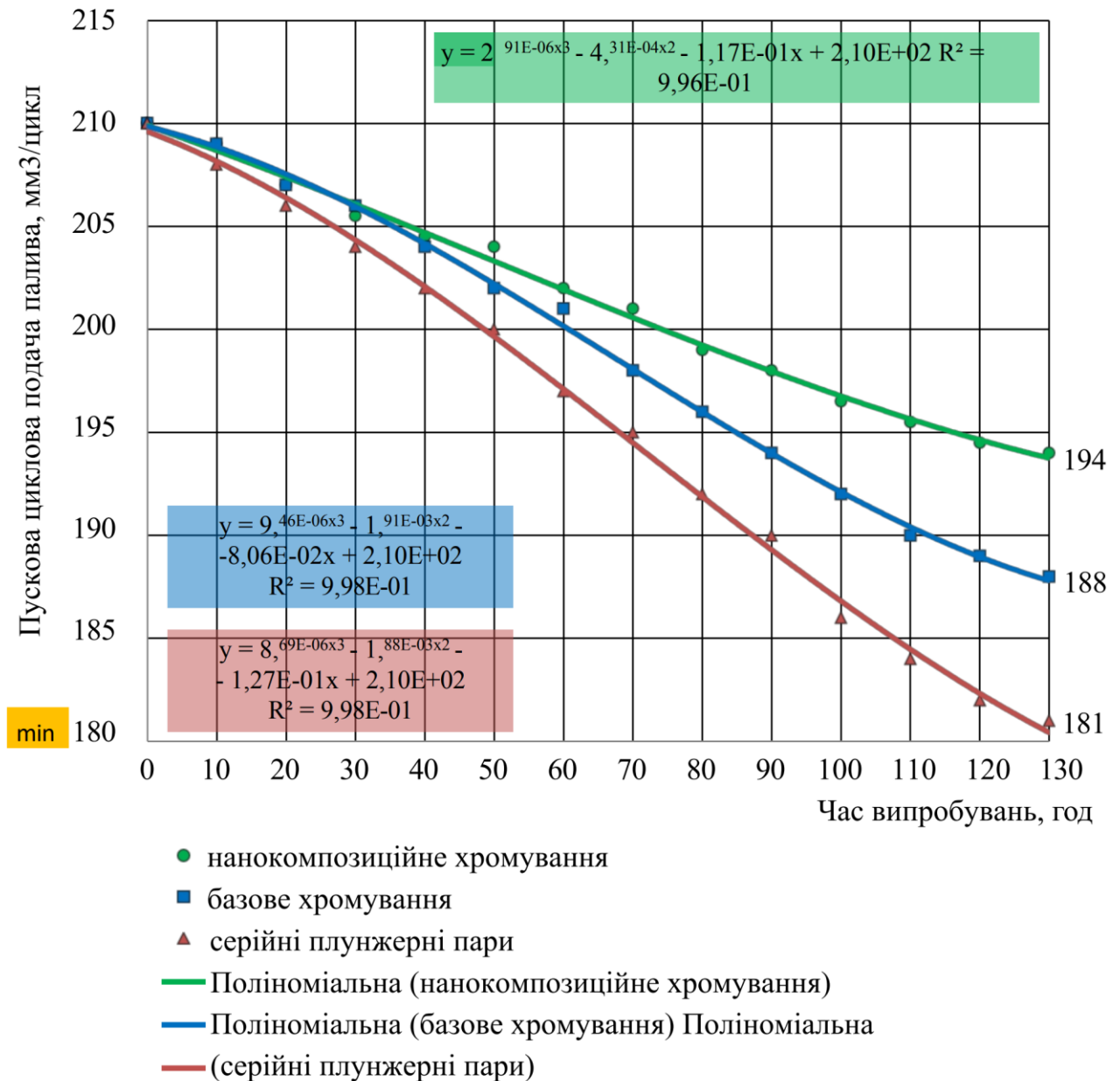


Рис. 3.1 Зміна пускової циклової подачі палива в процесі стендових випробувань ПНВТ дизеля ЯМЗ-238НДЗ.

Після проведення стендових випробувань і розбирання ПНВТ слідів задирів і зчеплення на робочих поверхнях плунжерних пар виявлено не було.

3.2 Результати експлуатаційних випробувань паливних насосів високого тиску

Експлуатаційні порівняльні випробування ПНВТ проводили в підприємствах Житомирського району на тракторах Т- 150К, що виконують різні сільськогосподарські роботи, згідно з методикою, представленою в параграфі 2.3.

В результаті проведених випробувань були отримані значення пускових циклових подач палива плунжерними парами через певні рівні проміжки часу.

Результати експлуатаційних випробувань ПНВТ дизеля ЯМЗ-238НДЗ представлені на рис 3.2. В результаті проведення випробувань було встановлено, що всі випробувані ПНВТ не досягли граничного стану, що обмежується величиною пускової циклової подачі – $180 \text{ мм}^3/\text{цикл}$.

При напрацюванні близько 2000 мото-год, пускова циклова подача серійних плунжерних пар знизилася з 210 до 202 $\text{мм}^3/\text{цикл}$, або в середньому на 3,8 %, в той час як відновлених базовим хромуванням – з 210 до 202,8 $\text{мм}^3/\text{цикл}$ (в середньому на 3,4 %), а нанокмпозиційним електролітичним хромуванням – з 210 до 204,3 $\text{мм}^3/\text{цикл}$ (в середньому на 2,7 %). Зниження пускової циклової подачі палива у ПНВТ з плунжерними парами, відновленими нанокмпозиційним електролітичним хромуванням, в середньому в 1,1 рази менше, ніж у ПНВТ з плунжерними парами, відновленими базовим хромуванням, і в 1,4 рази менше, ніж у ПНВТ з серійними плунжерними парами.

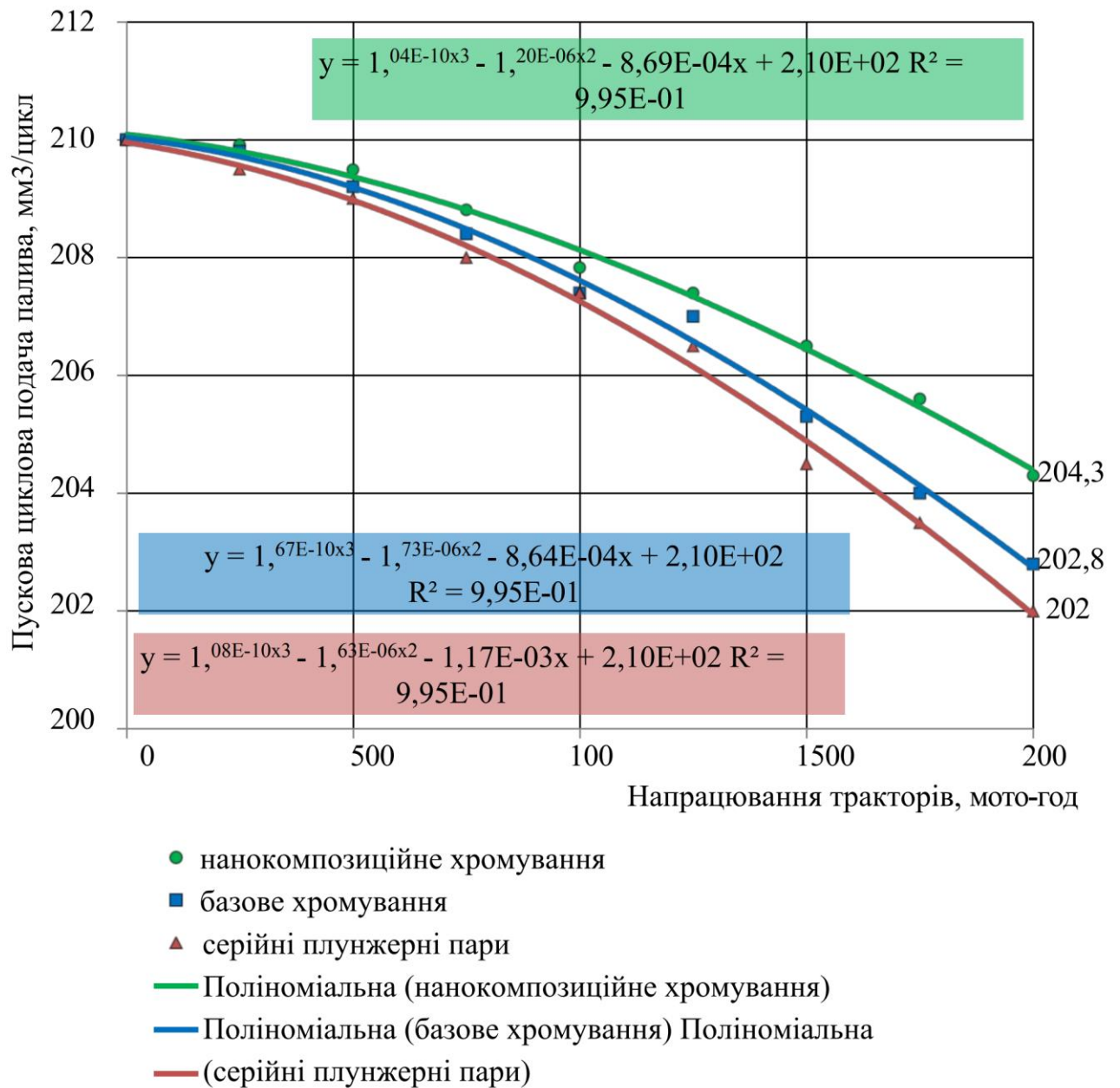


Рис. 3.2. Зміна пускової циклової подачі палива в процесі експлуатаційних випробувань ПНВТ дизеля ЯМЗ-238НДЗ.

Після проведення експлуатаційних випробувань і розбирання ПНВТ, огляд експериментальних плунжерних пар показав відсутність слідів зчеплення, задирок і корозії на робочих поверхнях.

3.3 Прогнозування залишкового ресурсу агрегатів

Метою будь-якого прогнозування є виявлення поточної тенденції та визначення передбачуваного результату щодо досліджуваного об'єкта на певний момент часу в майбутньому.

Для прогнозування залишкових ресурсів агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки було обрано динамічний графічний метод за допомогою програми Microsoft Excel.

Графічне прогнозування здійснювали шляхом екстраполяції, виконаної побудовою лінії тренду.

Вид апроксимації даних – поліноміальний 3-го ступеня. Прогнозування проводили за даними експлуатаційних випробувань.

Результати представлені на рис. 3.3.

В результаті побудови графічних залежностей були отримані відповідні рівняння і визначена достовірність апроксимації кожного рівняння R^2 (див. рис. 3.3).

Прийнято вважати, що при коефіцієнті R^2 , що перевищує 0,85, лінія тренду є достовірною. Як видно з даних, представлених на графіках, у всіх випадках лінії тренду є достовірними.

Ресурс плунжерних пар ПНВТ дизеля ЯМЗ-238НДЗ обмежений мінімальним значенням пускової циклової подачі палива $180 \text{ мм}^3/\text{цикл}$.

З представлених даних видно, що прогнозований ресурс ПНВТ дизеля ЯМЗ-238НДЗ з плунжерними парами, відновленими із застосуванням нанокompозиційного хромування, в середньому становить 7706 мото-год, що в 1,39 рази більше, ніж у ПНВТ з плунжерними парами, відновленими із застосуванням базового хромування, і в 1,67 рази більше, ніж у ПНВТ з серійними плунжерними парами.

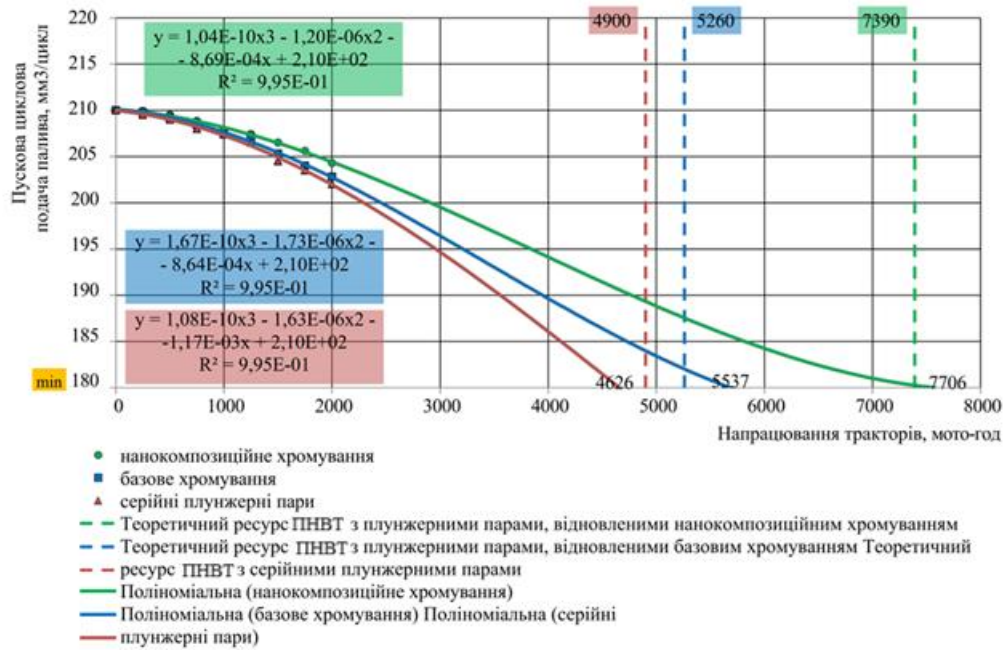


Рис. 3.3. Прогнозування ресурсу ПНВТ дизеля ЯМЗ-238НДЗ.

Теоретично розраховане значення ресурсу ПНВТ дизелів ЯМЗ-238НДЗ з плунжерними парами, відновленими із застосуванням наноконпозиційного електролітичного хромовання, склало 7390 мото-год, з плунжерними парами, відновленими базовим хромованням – 5260 мото-год, з серійними плунжерними парами – 4900 мото-год.

3.4. Технологія відновлення плунжерних пар із застосуванням наноконпозиційного електролітичного хромовання.

Як відомо, до геометричної форми робочих поверхонь плунжерних пар висувають високі вимоги [4]. Так, допустиме відхилення від циліндричної форми – не більше 0,001 мм, некрутлість – не більше 0,0005 мм, конусність – не більше 0,0006 мм на довжині 20 мм робочої поверхні плунжера.

Тому з метою визначення впливу наноконпозиційних гальванохімічних покриттів на відхилення робочої поверхні плунжера від правильної геометричної форми були проведені відповідні дослідження.

Вимірювання проводили з використанням кругломіра «Talyrond» в поперечних перерізах плунжера.

В результаті проведених вимірювань були отримані круглограми зношеного серійного плунжера і після виведення слідів зносу. А також круглограми плунжера після нанесення нанокompозиційного електролітичного покриття на основі хрому і відновленого плунжера після механічної обробки.

В результаті проведених вимірювань встановлено, що механічна обробка зношеного плунжера і нанесення на його робочу поверхню нанокompозиційного електролітичного покриття на основі хрому з подальшою механічною обробкою повністю відновлює геометричну форму плунжера. Максимальна некруглість плунжера, відновленого із застосуванням нанокompозиційного покриття на основі хрому після механічної обробки, склала 0,15 мкм, що задовольняє вимогам, що пред'являються до геометричної форми робочої поверхні плунжера.

Плунжерні пари, що надійшли на відновлення, піддають промиванню в гасі або бензині, після чого їх обдувають стисненим повітрям. Потім їх знеособлюють, проводять дефектацію з метою виявлення бракованих дефектів і визначення величин зносу.

Втулки плунжерів притирають на вертикально-довідному верстаті 3820-Д, використовуючи притирання до виведення слідів зносу.

Для зручності визначення розміру притирання по діаметру втулки, їх сортують на розмірні групи через 0,03 мм за допомогою набору пробок або ротаметра.

Для чорнової притирання використовують притиральну пасту АСМ 20/14, для чистової – пасту АСМ 2/1. Після притирання овальність і конусність не повинні перевищувати 0,002 мм. На обробленій поверхні отвору втулки не повинно бути ризок, задирок і слідів зносу. Потім втулки промивають у бензині, обдувають стисненим повітрям і піддають повторній хіміко-термічній обробці до твердості 55- 60 HRC. Далі втулки передають на контрольну операцію, де їх сортують на розмірні групи з інтервалом 0,001 мм за допомогою ротаметра.

Зношені плунжери, залежно від величини зносу, або притирають на плоско- довідковому верстаті 3816, використовуючи притирочні пасти АСМ 20/14 і АСМ 2/1, або шліфують на безцентрово-шліфувальному верстаті 3184 з подальшим притиранням на плоско-довідному верстаті 3816 до виведення слідів зносу.

Після механічної обробки на поверхні плунжерів наносять наноконпозиційне електролітичне покриття на основі хрому з нанорозмірними частинками оксиду алюмінію, в установці для наноконпозиційного хромування (рис. 3.4). Для цього плунжери закріплюють на підвісних пристосуваннях, після чого частини плунжерів, що не підлягають покриттю, ізолюють перхлорвініловою емаллю ХВ-1100. Потім плунжери піддають електрохімічному знежиренню для видалення з поверхні жирових плівок і відкладень. З метою зв'язування сторонніх частинок і випадання їх в осад знежирення проводять в електроліті 10%-го NaOH при додаванні $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ і Na^2CO_3 . Режими обробки: щільність катодного струму – 10 А/дм^2 , температура електроліту $70\text{ }^\circ\text{C}$, час операції 5 хв.

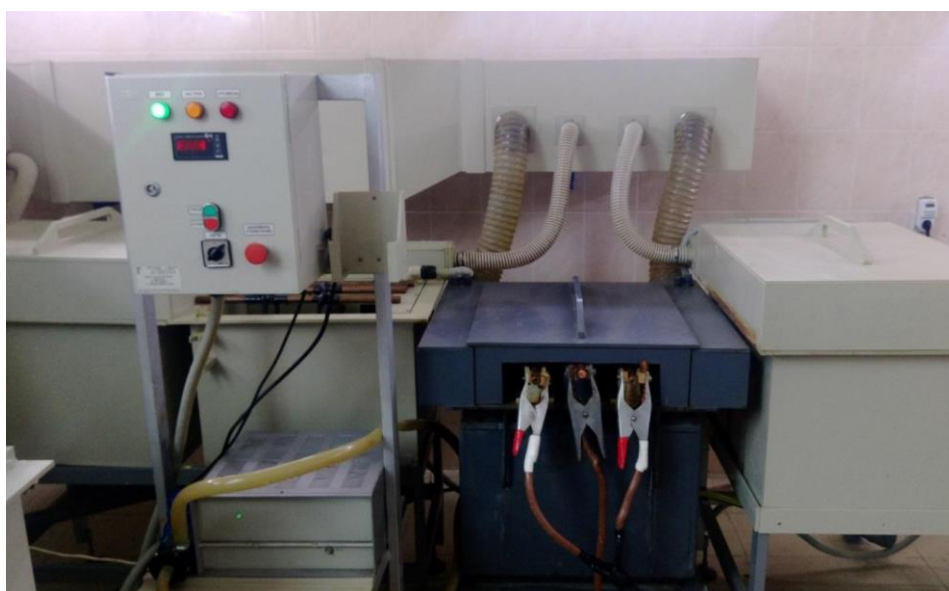


Рис. 3.4. Установка для наноконпозиційного електролітичного хромування.

З метою видалення окисних плівок і більш ретельного знежирення поверхонь, після промивання по черзі в гарячій і холодній проточній воді, деталі

піддають декапіруванню (анодній обробці) в електроліті 30%-ої H_2SO_4 . Режими обробки: щільність катодного струму – 20 А/дм^2 , температура електроліту 25°C , час операції 2 хв.

Потім проводять нанесення наноконпозиційного електролітичного покриття на основі хрому з електроліту наступного складу: CrO_3 – $225\ldots 275 \text{ г/л}$; K_2SiF_6 – $18\ldots 22 \text{ г/л}$; BaSO_4 – $5\ldots 7 \text{ г/л}$; H_2SO_4 – $0,34 \text{ г/л}$; нанорозмірний порошок Al_2O_3 – $3,0\ldots 3,5 \text{ г/л}$. Режими електролізу: щільність катодного струму – $55\ldots 60 \text{ А/дм}^2$, температура електроліту $50\ldots 55^\circ\text{C}$, час операції – до необхідної величини нанесеного шару. Швидкість осадження покриття $40\text{--}60 \text{ мкм/год}$.

Після нанесення покриття плунжери промивають послідовно в гарячій і холодній проточній воді і проводять зневоднення шляхом нагрівання деталей з покриттям до 200°C і витримки при даній температурі протягом 2 год.

Після цього плунжери передають на контрольну операцію, де їх сортують на розмірні групи з інтервалом $0,002 \text{ мм}$. Далі плунжери обробляють на плоскодовіджувальному верстаті 3816, використовуючи довіджувальні пасти АСМ 20/14 і АСМ 2/1. Потім плунжери передають на контрольну операцію, де їх сортують на розмірні групи з інтервалом $0,001 \text{ мм}$ і комплектують з втулками селективним методом. Контроль розміру і форми робочої поверхні плунжера проводять на оптикаторі або на вертикальному оптиметрі.

Спільне притирання плунжера і втулки здійснюють на доводжувальній бабці Т 9158-1А-9. Для спільного притирання використовують доводжувальну пасту АСМ 2/1. Скомплектовані плунжерні пари промивають у бензині і продувають стисненим повітрям.

Якість притирання поверхонь визначають зовнішнім оглядом і перевіркою плавності переміщення плунжера у втулці. Потім пару випробовують на гідрощільність приладом КИ-759. Відновлені плунжерні пари сортують на групи за гідрощільністю. Кожен ПНВТ слід комплектувати плунжерними парами однієї групи гідрощільності. Деталі, призначені для тривалого зберігання, консервують, після чого кожну пару загортають у пергаментний папір.

Висновки по розділу

На підставі проведених досліджень розроблено нові технології відновлення плунжерних пар ПНВТ дизелів ЯМЗ-238НДЗ нанокompозиційним електролітичним хромуванням, золотникових пар.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Вирішуючи поставлену наукову проблему підвищення довговічності агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки шляхом відновлення їх прецизійних деталей, в магістерській роботі розроблені та досліджені нові способи відновлення прецизійних деталей наноконпозиційними гальвано-хімічними покриттями на основі хрому, що дозволяють підвищити ресурс відремонтованих агрегатів до 1,7 рази в порівнянні з новими.

Аналіз надійності сільськогосподарської техніки дозволив встановити, що вона в значній мірі визначається ресурсом агрегатів паливної апаратури, на частку яких припадає до 42% несправностей і відмов відповідно. Існуючі способи відновлення прецизійних деталей паливної апаратури мають істотні недоліки. Найбільш перспективними є наноконпозиційні гальвано-хімічні покриття на основі хрому.

За результатами стендових випробувань зниження пускової циклової подачі палива у ПНВТ з плунжерними парами, відновленими наноконпозиційним електролітичним хромуванням, в середньому в 1,4 рази менше, ніж у ПНВТ з плунжерними парами, відновленими базовим хромуванням і в 1,8 рази менше, ніж у ПНВТ з серійними плунжерними парами.

Після закінчення проведення експлуатаційних випробувань ПНВТ дизелів ЯМЗ-238НДЗ зниження пускової циклової подачі палива у ПНВТ з плунжерними парами, відновленими із застосуванням наноконпозиційного електролітичного хромування, в середньому в 1,1 рази менше, ніж у ПНВТ з плунжерними парами, відновленими із застосуванням базового хромування, і в 1,4 рази менше, ніж у ПНВТ з серійними плунжерними парами.

На підставі результатів експлуатаційних випробувань спрогнозовано залишкові ресурси агрегатів. Прогнозований ресурс ПНВТ дизелів ЯМЗ-238НДЗ з плунжерними парами, відновленими із застосуванням наноконпозиційного електролітичного хромування, в середньому становить 7706 мото-год. Це в 1,39

рази більше, ніж у ПНВТ з плунжерними парами, відновленими із застосуванням базового хромування, і в 1,67 рази більше, ніж у ПНВТ із серійними плунжерними парами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борак К.В., Міненко С.В., Савчук В.С., Буката Д.О. Перспективні напрямки підвищення надійності дизельних автотракторних двигунів. Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 20-22 жовтня 2025 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс] / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет [та інш.]. – Вінниця: ВНТУ, 2025. С. 74-77.
2. Буката Д.О. Результати стендових випробувань паливних насосів високого тиску. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 48-49.
3. Ільченко А.В., Буката Д.О. Довговічність агрегатів паливної апаратури сільськогосподарської техніки. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2025. С. 455-459.
4. Скиба М. Ю. Зносостійкість композитних електролітичних покриттів. Львів : Сполом, 2022. 184 с.
5. Чорний Б. В. Удосконалення діагностування плунжерних пар паливних насосів високого тиску. Харків : ХНТУСГ, 2021. 132 с.
6. Літвінець В. М. Підвищення зносостійкості плунжерних пар паливних насосів. Вінниця : ВНАУ, 2022. 148 с.
7. Сівак Р. М. Відновлення плунжерних пар паливних насосів високого тиску. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 156 с.

8. Коваль В. І., Петренко О. П. Ефективність способів відновлення деталей плунжерних пар паливних насосів дизельних двигунів. Київ : НУБіП України, 2021. 96 с.
9. Лузан С. Технологія відновлення і зміцнення болтів штовхачів плунжерів паливних насосів шляхом плазмового напилення. Київ : Наукова думка, 2025. 256 с.
10. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 1072 p.
11. Reif K. Diesel Engine Management: Systems and Components. Berlin : Springer, 2014. 416 p.
12. Broitman E., Jahagirdar A., Rahimi E., Mol J. Microstructural and tribological properties of dense chromium coatings. Amsterdam : Elsevier, 2024. 212 p.
13. Dhinakaran V., Ravichandran M., Stalin B. Tribological characterization of electrolytic hard chromium coatings. London : Elsevier, 2021. 198 p.
14. Eriksson M. Sliding Wear Performance of Electroplated Hard Chromium. Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2014. 124 p.
15. Ashurov Kh. Technology of recovery of precision parts of fuel pumps by composite chromium coatings. New Delhi : IJARSET Publishers, 2020. 110 p.
16. Ivanov A., Petrov S. Recovery of fuel pump elements by electrolytic chromium plating. Paris : EDP Sciences, 2021. 98 p.
17. Hutchings I. M., Shipway P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 388 p.
18. Kato K. Wear mechanisms of precision friction pairs. Tokyo : Springer Japan, 2020. 246 p.
19. ISO 6158:2018. Metallic and other inorganic coatings — Electrodeposited coatings of metallic chromium. Geneva : ISO, 2018. 28 p.
20. ISO 2081:2008. Metallic and other inorganic coatings — Electroplated coatings of zinc. Geneva : ISO, 2008. 34 p.

21. Totten G. E. Handbook of Hard Coatings. New York : CRC Press, 2018. 784 p.
22. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption. Amsterdam : Elsevier, 2017. 268 p.
23. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. Engineering Tribology. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. 884 p.
24. Bayer R. G. Mechanical Wear Prediction and Prevention. New York : Marcel Dekker, 2004. 656 p.
25. Bhushan B. Introduction to Tribology. Hoboken : Wiley, 2013. 720 p.