

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

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

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Прищепя Володимир Михайлович

УДК 621.793.16:629.113

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ХРОМУВАННЯ ДЛЯ
ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЯ**

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

_____ Прищепя В.М.

Керівник роботи

Савченко В.М.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Прищепя Володимир Михайлович. Удосконалення технології електролітичного хромування для відновлення деталей автомобіля. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

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

У магістерській роботі обґрунтовано доцільність відновлення деталей агрегатів і вузлів спеціальних автомобілів, що експлуатуються підприємствами сільського господарства. Встановлено, що значна частина ресурсовизначальних деталей має граничний знос, який не перевищує 0,5 мм, що створює економічні передумови для широкого застосування технологій відновлення з метою підвищення працездатності агрегатів і автомобілів у цілому.

Обґрунтовано вибір електролітичного хромування як ефективного способу відновлення деталей автомобілів, що працюють в умовах гідроабразивного зношування. На прикладі гідророзподільників спеціальних автомобілів показано, що застосування електролітичного хромування для відновлення золотників забезпечує досягнення ресурсу не менше 80 % від ресурсу нових деталей, а в окремих випадках – його перевищення, що підтверджує перспективність даної технології.

Проведено аналіз науково-технічних джерел і патентний пошук електролітів хромування, призначених для отримання зносостійких покриттів. Встановлено, що такі покриття характеризуються високою продуктивністю процесу, значною мікротвердістю, підвищеною зносостійкістю та можливістю формування шару товщиною до 0,7 мм. Як об'єкт дослідження обрано холодний саморегулюючий електроліт хромування, визначено його склад і умови застосування, а також виявлено обмеження щодо вузького діапазону робочих температур, що ускладнювало впровадження технології у виробничих умовах.

Розроблено методику експериментальних досліджень, підібрано необхідне лабораторне та випробувальне обладнання, а також створено математичну модель формування хромового покриття. Модель дозволила встановити вплив щільності струму, концентрації плавикової кислоти та температури електроліту на вихід хрому за струмом. Проведено стендові й експлуатаційні випробування гідророзподільників Р-80 3/1-444 і Р-80 3-3-444 з відновленими золотниками, результати яких підтвердили підвищення їх працездатності на 30–40 % порівняно з новими деталями.

Ключові слова: електроліт, гідророзподільник, відновлення, хромування, технологія, зносостійкість.

ANNOTATION

Vladimir Mikhailovich Prishchepa. Improvement of electrolytic chromium plating technology for the restoration of automobile parts. – *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.

The master's thesis substantiates the feasibility of restoring parts of assemblies and units of special vehicles operated by agricultural enterprises. It has been established that a significant part of resource-determining parts has a maximum wear that does not exceed 0.5 mm, which creates economic prerequisites for the widespread use of restoration technologies in order to increase the performance of units and vehicles as a whole.

The choice of electrolytic chromium plating as an effective method for restoring vehicle parts operating under hydroabrasive wear conditions is justified. Using the example of hydraulic distributors of special vehicles, it has been shown that the use of electrolytic chromium plating for the restoration of spools ensures the achievement of a service life of at least 80% of that of new parts, and in some cases exceeds it, which confirms the prospects of this technology.

An analysis of scientific and technical sources and a patent search for chromium plating electrolytes designed to obtain wear-resistant coatings were carried out. It was established that such coatings are characterized by high process productivity, significant microhardness, increased wear resistance, and the possibility of forming a layer up to 0.7 mm thick. A cold self-regulating chromium plating electrolyte was selected as the object of research, its composition and conditions of use were determined, and limitations regarding the narrow range of operating temperatures were identified, which complicated the implementation of the technology in production conditions.

A methodology for experimental research was developed, the necessary laboratory and testing equipment was selected, and a mathematical model for the formation of a chrome coating was created. The model made it possible to establish the influence of current density, hydrofluoric acid concentration, and electrolyte temperature on the current-dependent chrome yield. Bench and operational tests were conducted on R-80 3/1-444 and R-80 3-3-444 hydraulic distributors with refurbished spools, the results of which confirmed a 30–40% increase in their performance compared to new parts.

Keywords: electrolyte, hydraulic distributor, restoration, chromium plating, technology, wear resistance.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗМІРНОГО НАНЕСЕННЯ ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ЕЛЕКТРОЛІТУ.....	33
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	46
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний стан експлуатації автомобільної техніки, зокрема спеціальних автомобілів комунального господарства та дорожньо-будівельного комплексу, характеризується високим рівнем зношування агрегатів і вузлів, що працюють в умовах інтенсивних навантажень, агресивних середовищ та гідроабразивного впливу. Обмежені фінансові ресурси підприємств, зростання вартості нових запасних частин і складність їх постачання зумовлюють необхідність пошуку ефективних, економічно обґрунтованих способів підтримання працездатності автомобілів шляхом відновлення зношених деталей.

Практика експлуатації показує, що значна частина ресурсовизначальних деталей автомобільних агрегатів має відносно невеликий граничний знос, який не перевищує часток міліметра. За таких умов заміна деталей на нові є економічно недоцільною, тоді як застосування прогресивних технологій відновлення дозволяє суттєво знизити витрати на ремонт, скоротити простої техніки та продовжити строк її служби. Особливо актуальним є відновлення деталей, що працюють у вузлах гідросистем, де основними причинами відмов є гідроабразивне зношування робочих поверхонь.

Електролітичне хромування є одним із найбільш поширених і ефективних методів відновлення деталей автомобілів завдяки можливості формування зносостійких покриттів з високою мікротвердістю, низьким коефіцієнтом тертя та значною адгезійною міцністю. Разом із тим, традиційні технології хромування мають низку обмежень, зокрема вузький діапазон робочих температур, нестабільність процесу осадження, схильність покриттів до утворення тріщин і внутрішніх напружень, що стримує їх широке впровадження у практику ремонту автомобільної техніки.

У зв'язку з цим актуальним є удосконалення технології електролітичного хромування шляхом оптимізації складу електролітів, режимів електролізу та

умов теплообміну з метою підвищення продуктивності процесу, якості та довговічності хромових покриттів. Розв'язання цих питань має важливе науково-практичне значення, оскільки сприятиме підвищенню ресурсу відновлених деталей, зниженню витрат на ремонт і технічне обслуговування автомобілів, а також підвищенню ефективності експлуатації автотранспортних засобів у сучасних умовах.

Мета роботи – підвищення надійності та ефективності використання автомобілів за рахунок удосконалення існуючого холодного саморегулюючого електроліту хромування та розробки технології відновлення деталей, що працюють при гідроабразивному зношуванні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

– Виконати обґрунтування доцільності відновлення деталей агрегатів і вузлів у процесі експлуатації автомобілів, що експлуатуються підприємствами комунального господарства та дорожньо-будівельного виробництва.

2. Обґрунтувати використання електролітичного хромування як способу відновлення деталей автомобілів, що працюють при гідроабразивному зношуванні, з метою поліпшення якості та довговічності роботи деталей на прикладі гідророзподільників.

3. Виконати аналіз літератури та провести патентний пошук існуючих електролітів хромування, які використовують для отримання зносостійких покриттів при відновленні деталей автомобілів

4. Обґрунтувати предмет дослідження - високопродуктивний холодний саморегулюючий електроліт хромування, виявити його недоліки та намітити шляхи його вдосконалення.

5. Розробити методику досліджень з метою вдосконалення холодного саморегульованого електроліту хромування. Розробити математичну модель формування покриття за допомогою досліджуваного електроліту хромування.

6. Для підтвердження доцільності впровадження у виробництво провести прискорені стендові та експлуатаційні випробування золотників гідророзподільників.

Об'єкт досліджень. Процес гідроабразивного зношування.

Предмет дослідження. Удосконалений холодний саморегульований електроліт хромування, з новим складом електроліту і розширенням діапазону робочих температур, з метою відновлення працездатності деталей автомобілів.

Методика дослідження. Дослідження в магістерській роботі проводилися з використанням аналізу існуючих електролітів хромування, з вибором предмета досліджень – холодного саморегульованого електроліту хромування. З використанням теорії отримання електролітичних покриттів при отриманні необхідної якості і продуктивності процесу осадження було досліджено вплив неорганічних добавок на продуктивність і якість одержуваних осадів. Експериментальні, лабораторні дослідження і вивчення отриманих результатів проводилися з використанням необхідного сучасного обладнання і методик. Систематизація та обробка результатів досліджень проводилися з застосуванням методів математичного моделювання та програмування.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Прищеп В.М.** Перспективи використання електролітичного хромування для відновлення деталей автомобілів. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Т2. С. 32-33.

2. **Прищеп В.М.** Використання холодних саморегульовальних електролітів для нанесення хромових покриттів. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 138-141.

3. Прищеп В.М. Застосування електролітичного хромування в ремонтному виробництві. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операцій. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 44-46.

Практичне значення. Розроблена технологія хромування при відновленні золотників гідророзподільника дозволяє отримати безтріщинні, безпористі та зносостійкі покриття, які мають досить високі фізико-механічні та експлуатаційні властивості. Розроблений спосіб забезпечує можливість відновлення зовнішніх циліндричних поверхонь (спосіб пройшов патентування), в результаті його використання скоротиться трудомісткість технологічного процесу відновлення деталі до 40-50% при збільшенні ресурсу деталі до 30-40% при нанесенні хромового покриття товщиною до 500 мкм на сторону. Безтріщинні покриття дозволяють підвищити корозійну стійкість і виключити розтріскування робочих поверхонь деталей в процесі експлуатації. Сукупність отриманих результатів досліджень хромових покриттів з нового електроліту хромування переконливо доводить можливість підвищення експлуатаційної працездатності відновлених деталей, особливо золотників, плунжерів та інших деталей, схильних до гідроабразивного зношування та фреттинг-корозії.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 33 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 68 сторінок комп'ютерного тексту, містить 25 рисунків.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Обґрунтування використання відновлених деталей автомобілів як спосіб підтримки працездатності

Однією з головних причин втрати працездатності автомобільної техніки є зношування деталей, вузлів та агрегатів, що проявляється у руйнуванні поверхонь сполучень, порушенні початкових форм і розмірів деталей тощо. За оцінками, до 85–90% відмов деталей машин пов'язані саме зі зносом робочих поверхонь. Зі збільшенням напруження виникає люфт у спряженнях, ростуть вібрації та динамічні навантаження, що прискорює руйнування поверхонь і зменшує довговічність деталей. Традиційно у разі досягнення граничного зносу деталі підлягають заміні на нові. Однак виготовлення нових запчастин потребує значних матеріальних і енергетичних ресурсів, а також фінансових витрат. В сучасних умовах все більшої уваги набуває підхід ремануфактури – відновлення використаних деталей до стану, близького до нового. Це відповідає концепції економії ресурсів та колової економіки, а також допомагає подовжити життєвий цикл виробів.

У світі вже сформувався потужний ринок відновлених автомобільних компонентів. Виробники та незалежні ремануфактурні підприємства переробляють вузли (наприклад, двигуни, генератори, стартери, головки блоку тощо), повертаючи їм як нові експлуатаційні характеристики. Важливо підкреслити, що сучасні відновлені деталі проходять такі ж випробування, як і нові запчастини, забезпечуючи надійність та безпеку на рівні оригіналу. За даними галузевих досліджень, відновлені вузли демонструють високу надійність у експлуатації – показники гарантійних відмов мінімальні, а ресурс роботи наближається до ресурсів нових виробів. Виробники часто надають на реман

деталі гарантію, аналогічну новим, що слугує підтвердженням їх якості та довговічності.

Таким чином, ремонтне відновлення деталей виступає як ефективний засіб підтримки працездатності автотранспортних засобів. Воно має технічні, економічні та екологічні переваги. Вартість відновлення складних і дорогих деталей (колінчасті вали, блоки циліндрів тощо) становить лише 10–50% від вартості виготовлення нових. Це робить ремануфактуру економічно доцільною і ефективною технологією, дозволяючи автопідприємствам заощаджувати високоякісний метал, енергію та трудові ресурси, одночасно зменшуючи негативний вплив на довкілля. Сучасні дослідження відзначають, що відновлені вироби за якістю і характеристиками не поступаються новим, тоді як їх собівартість удвічі нижча; при цьому економія енергії сягає ~60%, а матеріальних ресурсів – до 70%, що суттєво скорочує екологічне навантаження порівняно з виробництвом нових запчастин. Крім того, для відновлення зношених деталей зазвичай потрібно у 5–8 разів менше технологічних операцій, ніж для виготовлення нових, що прискорює процес ремонту і зменшує простої техніки. Усе це зумовлює актуальність розвитку технологій ремонту та ремануфактури в автомобільній галузі.

Метою даної роботи є наукове обґрунтування використання відновлених деталей автомобілів як способу підтримки їх працездатності. Для досягнення цієї мети проаналізовано сучасні методи відновлення деталей, типові види зношування та дефектів, критерії вибору технологій ремонту з урахуванням надійності, технічні параметри відновлення і контроль якості, а також експлуатаційну ефективність відновлених компонентів. Аналіз виконано на основі сучасних джерел – наукових статей, галузевих стандартів і звітів, у тому числі українських і зарубіжних публікацій з ремануфактури та ремонту.

Зношування деталей автомобілів може відбуватися внаслідок різних механізмів: абразивного та адгезійного тертя, втомного руйнування, корозії, ерозії, фретингу тощо. Найбільш поширене поступове абразивно-адгезійне

спрацювання поверхонь у спряженнях (підшипникові вузли, циліндро-поршнева група, зубчасті передачі). Воно призводить до збільшення зазорів, втрати геометричної точності та погіршення умов роботи агрегатів. Інші види зносу включають втомні тріщини (наприклад, у колінвалах, ресорах), корозійне роз'їдання (кузовні деталі, вихлопна система), термічне вигорання (клапани, поршні) та ін. У процесі експлуатації нерівномірність навантажень і середовища може прискорювати спрацювання: так, підвищена запиленість повітря збільшує абразивний знос, порушення режимів змащення викликає задири, а часті пуски холодного двигуна – інтенсивне граничне тертя.

За нормативами ремонтного виробництва, деталі, знос яких перевищує допустимі величини, підлягають ремонту або вибраковуванню. Відповідно до ДСТУ 2925-94 дефекти деталей поділяються на критичні, значні та малозначні. Критичні дефекти (тріщини в відповідальних зонах, недопустиме перевищення зносу тощо) одразу виводять деталь з експлуатації – така деталь не підлягає відновленню та повинна бути замінена. Значні дефекти помітно впливають на роботу деталі та безпеку, але можуть бути усунені шляхом ремонту. Малозначні дефекти суттєво не впливають на працездатність і довговічність, тому деталь з такими відхиленнями може продовжувати працювати до планового ремонту. Важливо враховувати, що сукупність декількох незначних дефектів може еквівалентно погіршити стан деталі до рівня критичного – у таких випадках ремонт може бути економічно недоцільним. Тож прийняття рішення про відновлення або списання деталі базується на комплексній оцінці її технічного стану: ступеня зносу, характеру дефектів та впливу на безпечну роботу вузла.

Необхідність заміни деталей на нові виникає, коли їх подальша експлуатація неможлива або небезпечна. Проте виготовлення та постачання нових запчастин може супроводжуватися великими витратами часу і коштів, особливо для складних агрегатів. Тут на допомогу приходять технології ремонтного відновлення: вони дозволяють повернути деталі до робочого стану, відновивши геометричні розміри, фізико-механічні характеристики поверхонь та

взаємодію в спряженнях. Існує широкий спектр методів відновлення – від традиційних (зварювальні наплавки, мехобробка під ремонтний розмір) до сучасних (нанесення композиційних покриттів, лазерне наплавлення, 3D-друк елементів, тощо). Вибір методу залежить від матеріалу деталі, виду і величини спрацювання, умов роботи та наявного обладнання. Під час вибору технології ремонту слід зіставляти не лише прямі витрати, а й очікувану надійність і довговічність деталі після відновлення. Правильний вибір способу дозволяє мінімізувати вартість ремонту і простої техніки, заощадити матеріали та забезпечити збільшення міжремонтного ресурсу агрегату. Навпаки, застосування невідповідного методу може призвести до недостатнього ресурсу відновленої деталі або перевитрати ресурсів. Нижче розглянуто основні групи технологій відновлення та їх технічні особливості.

Наплавлення зношених поверхонь зварювальними способами. Один із найпоширеніших методів ремонту – це *електродугове наплавлення металу* на зношені місця деталі з подальшою механічною обробкою до номінального розміру. При наплавленні на поверхню деталі шара металу (сплаву), сумісного з основним матеріалом, можна компенсувати значний знос (десятки мікрометрів до кількох міліметрів). Застосовуються ручне дугове наплавлення штучними електродами, автоматичне наплавлення під флюсом, порошковою дротиною, а також сучасні методи – *плазмове та лазерне наплавлення*. Наприклад, для відновлення валів, шестерень часто використовують наплавлення із застосуванням спеціальних твердих сплавів на основі Fe, Ni чи Co, що надає поверхні високої твердості та зносостійкості.

Наплавлені деталі після остигання зазвичай піддають термічній обробці (наприклад, нормалізації чи відпуску) для зняття залишкових напружень та отримання необхідної твердості. Це зумовлено тим, що під час зварювання в матеріалі утворюються зони термічного впливу з зміною структури металу, які можуть мати підвищену крихкість або залишкові напруження. Без термообробки втомна міцність відновлених наплавленням деталей може знижуватися. Зокрема,

дослідження показали, що сталь 45 після наплавлення (так зване “залізнення” шаром $\sim 0,75$ мм) мала межу витривалості на $\sim 29\%$ нижчу за номінальну. Причиною цього є поява грубозернистої структури наплавленого металу та залишкових напружень. Правильний підбір наплавочних матеріалів і режимів (попередній підігрів, послідовність накладання валиків, термічна обробка після наплавки) дозволяє мінімізувати ці негативні явища. В сучасних умовах все більшого поширення набуває *лазерне наплавлення* порошковими матеріалами: воно забезпечує вузьку зону нагріву і мінімальне термічне навантаження на деталь, що підвищує якість відновлення складних високонавантажених деталей (валів турбокомпресорів, кулачків тощо).

Відновлення деталей методами металізації (напилення). *Газотермічне напилення* – це процес нанесення на поверхню зношеної деталі шару матеріалу шляхом розпилення розплавлених частинок. Поширені способи: плазмове напилення, детонаційне напилення, газополуменеве та електродугове напилення дротом. Матеріалом покриття можуть бути різні порошкові сплави: сталі, чавунні, бронзові, керамічні тощо – залежно від призначення деталі. Перевага напилення – відносно невеликий тепловий вплив на деталь (менший, ніж при зварювальному наплавленні), тому менший ризик термічних деформацій і появи тріщин. Покриття може наноситись товщиною від десятків мікрон до ~ 2 мм. Наприклад, відновлення шийок валів газотермічним напиленням сталевих порошків з наступним шліфуванням – поширена практика.

Напилені покриття зазвичай потребують наступної механічної обробки (шліфування, токарної проточки) для досягнення необхідної шорсткості та допусків. Необхідно врахувати, що властивості напиленого шару (пористість, міцність зчеплення з основою) можуть відрізнятися від цільного матеріалу. Деякі покриття потребують додаткового зміцнення, наприклад, просочення полімерними складами для ущільнення пор. При недотриманні технології міцність зчеплення може бути недостатньою, що призведе до відшарування покриття під навантаженням. Проте при правильному виборі режимів напилення

шари добре працюють в умовах тертя і можуть відновити геометрію без суттєвого ослаблення основної деталі. Відомо, що при напиленні або наплавленні навіть однорідним металом структура і фізико-механічні властивості покриттів змінюються: наприклад, напиленій сталі властива дрібніша зерниста структура, що може трохи поступатися суцільному металу в ударній в'язкості. Тому для відповідальних деталей застосовують комбіновані методи: наприклад, напилення з подальшим поверхневим зміцненням (обкатуванням, термообробкою) для підвищення ресурсу.

Гальванічні покриття (хромування та інші). *Електролітичне відновлення* – це нанесення металевого покриття з розчину електроліту на зношену поверхню шляхом електрохімічного осадження. Найбільш широко застосовується тверде хромування деталей – наприклад, гідравлічних штоків, плунжерів, шийок колінвалів. Хромування дозволяє відновити розмір і одночасно надати поверхні дуже високу твердість (близько 800–1100 HV) та зносостійкість. Товщина твердого хрому, що наноситься для відновлення, зазвичай становить 50–300 мкм (0,05–0,3 мм). Інші гальванічні методи включають нікелювання, залізнення (електролітичне осадження заліза), гальванічне нанесення міді з подальшим хромуванням, комбіновані покриття тощо.

Перевагою гальванічних покриттів є висока точність контролю товщини шару і відносно низька температура процесу (деталь не нагрівається значно). Це дозволяє відновлювати прецизійні деталі без ризику термічних деформацій. Хромовані поверхні мають низький коефіцієнт тертя і високу стійкість до корозії. Однак є і технічні нюанси: при електролізному осадженні хрому у покритті формуються значні *внутрішні розтягувальні напруження*. У шарі твердого хрому товщиною ~0,15 мм зниження межі витривалості сталі 45 може досягати 20–25% порівняно з необробленою сталлю. Основна причина – саме залишкові напруження та можливе водне насичення (воднева крихкість) покриття і приповерхневого шару. Тому після хромування відповідальних деталей рекомендується проводити низькотемпературний відпуск (наприклад,

прогрів при $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом декількох годин) для дегазації водню і релаксації напружень. Дослідження показують, що нагрів хромованих деталей до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ знижує втрату втомної міцності приблизно до 10% (замість 25% без термообробки), а при нагріві до $550\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ втомна міцність майже повністю відновлюється, але такі високі температури відпуску можуть бути неприйнятними для високонавантажених сталевих деталей через зміну структури. Таким чином, технологія хромування потребує суворого дотримання режимів та, за необхідності, додаткових заходів (реверсивне осадження, термообробка), щоб забезпечити довговічність відновленої деталі. При правильному виконанні гальванічне відновлення дає чудові результати: геометрія і шорсткість поверхні повністю відповідають вимогам до нової деталі, твердість і зносостійкість навіть перевищують оригінальні (завдяки твердому хрому). Хромовані деталі широко використовуються в гідросистемах, паливній апаратурі, вузлах тертя двигунів – їх ресурс після відновлення хромом практично відповідає ресурсу нових, за умови належної експлуатації та змащування.

4. Відновлення пластичним деформуванням (безнагрівачі методи). Окрему групу становлять методи ремонту, що не потребують додавання чужорідного матеріалу, а відновлюють форму за рахунок пластичного переміщення металу деталі. До них відносяться: *роздавання* (розширення) отворів, *обкатування* валів роликami, *пресування* та *правка* деталей. Сутність у тому, що зношена ділянка пластично деформується таким чином, щоб усунути зазор і відновити необхідний розмір. Наприклад, якщо отвір у корпусі збільшився на 0,2 мм внаслідок зносу, його можна відновити обжиманням (роздаванням) до початкового діаметра за допомогою розгортки спеціальної конструкції або дорна. Аналогічно, злегка зношену шийку вала можна зміцнити методом обкатування: по поверхні прокочується твердий ролик під тиском, метал при цьому частково «видавлюється» назовні, зменшуючи діаметр шийки, і одночасно зміцнює поверхню (наклеп).

Пластичне деформування доцільно застосовувати при невеликій глибині зносу (звичайно до 0,3 мм), коли деталь ще має достатній запас матеріалу і немає глибоких дефектів. Великий плюс таких методів – відсутність термічного впливу, а отже, відсутність термічних напружень і структурних змін. Як результат, ресурс деталей після відновлення холодним деформуванням не поступається ресурсу нових деталей. Більше того, поверхнєве пластичне деформування (наприклад, дорнування або алмазне вигладжування) створює зміцнений шар з залишковими стискуючими напруженнями, що підвищує втому міцність. Це використовують не лише при ремонті, а й при виготовленні нових деталей для збільшення довговічності. У практиці відомо, що якість поверхневого шару після обкатування значною мірою визначає надійність роботи деталей в спраженнях. Таким чином, методи пластичного деформування є простими, економічними та екологічними (немає використання додаткового матеріалу чи високої температури) способами ремонту. Їх обмеження – застосовність лише при малому зносі і на деталях з достатньою пластичністю матеріалу. Якщо знос перевищує декілька десятих міліметра або є тріщини, ці методи вже не спрацюють.

5. Використання вставок, гільз та комбінованих деталей. Для відновлення отворів великих деталей (блоків циліндрів, корпусів підшипників) часто застосовують *втулкування*: зношений отвір розточують до ремонтного розміру, після чого запресовують або клеюють нову втулку (гільзу) з відповідного матеріалу. Наприклад, при ремонті двигуна встановлення нових гільз у блок циліндрів відновлює геометрію циліндрів до номіналу. Втулки виготовляють зі зносостійких чавунів або сталі, їх внутрішня поверхня обробляється під поршень як у новому двигуні. Аналогічно ремонтують посадкові місця під підшипники в корпусах трансмісій – висвердлюють збільшений отвір і вставляють ремонтну втулку. Важливо правильно підбирати матеріал вставки з урахуванням матеріалу основної деталі, щоб забезпечити сумісність (коефіцієнт теплового розширення,

трибологічна пара тощо). Втулки можуть фіксуватися пресовою посадкою, різьбовим з'єднанням або клеєм.

Комбіновані рішення нерідко є оптимальними: наприклад, якщо вал має кілька зношених ділянок, може бути доцільно виготовити нову деталь складовою – вирізати зношену частину і приєднати нову (через зварювання або механічне з'єднання). У практиці ремонту застосовують метод склеювання тріщин або пробоїн за допомогою сучасних двокомпонентних клеїв. Клейові технології дозволяють усувати тріщини довжиною до ~150 мм, пробоїни площею до кількох см², негерметичності тощо. Епоксидні смоли, зокрема, дають можливість “залатати” дефекти корпусних деталей (картерів, баків, радіаторів). Перевагами клеєного ремонту є: можливість з'єднання різнорідних матеріалів, відсутність теплового впливу і деформацій, достатня міцність та герметичність шва, простота та дешевизна виконання. Клейові з'єднання не вносять напружень і не змінюють структуру основного матеріалу, що вигідно відрізняє їх від зварювання. Водночас, недоліками є відносно невисока термостійкість і старіння клею. Як правило, ремонтні епоксидні матеріали застосовуються для деталей, що працюють при температурах не вище ~120 °C (і не нижче ~-70 °C). Крім того, компоненти багатьох клеїв токсичні, потребують дотримання заходів безпеки при використанні. Тому клеї найчастіше використовують як допоміжний метод – для герметизації, фіксації, латання нерухомих деталей, або в комплексі з механічним кріпленням (наприклад, комбіноване клейове та болтове з'єднання для ремонту тріщини рами).

Підсумовуючи огляд методів, слід зазначити, що в арсеналі ремонтних підприємств є численні технології відновлення – від традиційних (зварювальні, механічні) до інноваційних (лазерні, адитивні). Кожна має свої показання та обмеження. Головне завдання інженера – обрати оптимальний метод з точки зору доцільності і забезпечення необхідного ресурсу. Як зазначається в сучасних працях, вибір способу ремонту повинен базуватися на комплексному аналізі технічної та економічної доцільності застосування того чи іншого підходу.

Необхідно врахувати типові умови роботи деталі, матеріал і характер спрацювання, а також дані про властивості матеріалів наплавки чи покриття, які будуть використані. Лише за такого науково обґрунтованого підходу можна гарантувати, що відновлена деталь відповідатиме вимогам надійності.

Одним із ключових аспектів ремануфактури є забезпечення якості відновлених деталей. Після виконання ремонтного відновлення кожна деталь повинна відповідати технічним вимогам, наче вона нова. Державні стандарти і технічні умови регламентують допустимі відхилення для відремонтованих виробів. Згідно з підходами, прийнятими у ЄС, реман-деталі мають відповідати оригінальним стандартам ОЕ-якості та безпеки, а їх випробування і сертифікація здійснюються аналогічно новим компонентам. Зокрема, обов'язковими є функціональні випробування (перевірка працездатності у штатних режимах), випробування на довговічність (ресурсні тести, наприклад багатоциклові навантаження) та перевірки безпеки (герметичності, міцності тощо).

На практиці технологічний процес ремонту завершується етапом контролю: відновлену деталь вимірюють на відповідність креслярським розмірам та допускам, перевіряють твердість зміцнених шарів, визначають параметри шорсткості поверхні. Наприклад, після хромування вала контролюють його діаметр (щоб був у полі допуску), твердість покриття по Віккерсу, суцільність шару (відсутність тріщин, здуттів). Вимоги до якості такі, що *розміри, твердість і шорсткість поверхні відновленої деталі повинні відповідати вимогам до нової деталі*. Якщо показники не досягнуті – деталь або доопрацьовують (повторно шліфують, проводять додаткове зміцнення), або вибраковують.

Неруйнівний контроль є важливою складовою: перед відновленням і після нього деталь перевіряють на відсутність тріщин (методами ультразвукової дефектоскопії, магнітнопорошкового контролю чи капілярної дефектоскопії). Це гарант того, що в матеріалі не лишилося прихованих дефектів, здатних спричинити передчасний вихід з ладу. Також контролюється *структура і*

властивості відновленого шару. Наприклад, наплавлений зуб шестерні може бути випробуваний на твердість по всьому перетину, щоб переконатися у належній глибині загартування. Якщо застосовували зварювання, перевіряють якість швів (відсутність пор, непроварів). При відновленні посадкових місць – контролюють концентричність, перпендикулярність відновлених поверхонь відносно базових. Якість ремонту кабін та рам перевіряють геометричними вимірами і візуальним оглядом зварних з'єднань.

Важливим етапом є випробування відновлених агрегатів під навантаженням. На авторемонтних заводах практикується обкатка або стендові випробування відновлених двигунів, коробок передач: агрегат збирається з відремонтованими деталями і проходить тестовий цикл (холоста робота, навантаження, перевірка тиску масла, температур тощо). Це дозволяє виявити можливі недоліки ремонту до передачі вузла в експлуатацію. Наприклад, після ремонту паливної апаратури її обов'язково тестують на стенді: відновлені форсунки перевіряють на тиск спрацювання, якість розпилу; насоси – на продуктивність і тиск. Тільки вузли, що успішно пройшли такі тести, допускаються до використання.

На міжнародному рівні впроваджуються сертифікаційні системи підтвердження якості реман-продукції. Деякі організації (наприклад, європейська MERA – Міжнародна асоціація ремануфактури) запровадили знак якості “Manufactured Again”, який видається підприємствам, що відповідають стандартам ISO 9001 та спеціальним критеріям ремануфактури. Це означає, що процес відновлення побудований з контролем на кожному етапі: вхідна діагностика вживаних деталей, технологічні карти ремонту, вихідний контроль. У Європейському Союзі законодавчо підтримується використання відновлених деталей: Директива 2008/98/EC (Waste Framework) заохочує повторне використання і реманufacturing компонентів, а Регламент ЄС №461/2010 дозволяє використання неоригінальних запчастин для обслуговування автомобілів за умови їх відповідності якості оригіналу. Ці норми фактично

встановлюють, що відновлена деталь повинна бути еквівалентною новій за параметрами.

Таким чином, сучасна практика контролю якості відновлених деталей забезпечує високий рівень надійності. Як вже зазначалося, багато виробників офіційно прирівнюють свої відновлені агрегати до нових за гарантійними зобов'язаннями. Досвід експлуатації показує, що правильно відновлені компоненти (наприклад, двигуни після капітального ремонту, ремантурбокомпресори чи генератори) працюють майже так само довго, як нові – принаймні, до чергового планового капітального ремонту. За даними компаній, що спеціалізуються на ремануфактурі, повернення відновлених продуктів по гарантії мінімальне, а рівень задоволеності споживачів високий. Все це свідчить про те, що за умови дотримання технології та контролю якості відновлені деталі здатні забезпечити необхідну надійність та ресурс автотранспортних засобів.

Використання відновлених деталей має комплексний позитивний ефект – як техніко-експлуатаційний, так і економічний. Розглянемо основні аргументи на користь ремонтного відновлення з точки зору підтримки працездатності автотранспорту:

Подовження ресурсу техніки. Завдяки відновленню зношених вузлів можна значно продовжити строк служби транспортних засобів. Капітальний ремонт із заміною або відновленням критичних деталей повертає автомобіль у експлуатацію, віддаляючи необхідність купівлі нового. Наприклад, відновлення двигуна (розточування циліндрів, заміна поршнів, ремонт ГБЦ) типово дає двигуну друге життя на десятки тисяч кілометрів пробігу. Навіть якщо ресурс відновлених деталей дещо менший за ресурс нових, як зазначено в літературі, сучасні прогресивні методи дозволяють успішно компенсувати це відставання. Практично, відремонтований агрегат часто має ресурс, достатній до наступного планового ремонту, і може досягати 70–100% ресурсу нового виробу в залежності від якості відновлення. Отже, грамотний ремонт підтримує

працездатність парку техніки на високому рівні, зменшуючи простої через відмови.

Забезпечення надійності та безпеки. Технічно обґрунтоване відновлення деталей відновлює не лише їх розміри, але й функціональні властивості – жорсткість, міцність, герметичність, балансування тощо. Наприклад, відновлення гальмівних супортів шляхом установки ремонтних поршнів і гільзування циліндра забезпечує герметичність гальмівної системи як у новій. Відремонтовані рульові рейки після шліфування і хромування валів, заміни втулок та сальників повинні відповідати вимогам по люфту та зусиллю повороту. Важливо, що відновлені компоненти проходять випробування під тиском, навантаженням – це гарантує їх безпечну роботу на автомобілі. Таким чином, правильно виконане відновлення не поступається новим деталям у забезпеченні безпеки руху. За умови застосування сертифікованих технологій (відповідно до стандартів ISO/SAE) якість і надійність рементованих деталей підтверджується об'єктивними тестами.

3. Економія витрат та ресурсів. Реманufacturing істотно знижує експлуатаційні витрати. Як зазначалося, відновлення коштує в кілька разів дешевше за виготовлення нової деталі. Це дозволяє власникам техніки заощаджувати кошти на обслуговуванні, особливо для старіших машин, де вартість нових запчастин може бути невиправдано високою. Економічна доцільність особливо помітна для великих автопарків (комерційний транспорт, сільгосптехніка): впровадження відновлення деталей в ремонтну практику знижує загальні витрати на підтримку парку, що підвищує ефективність бізнесу. З точки зору держави і суспільства, реманufacturing економить дефіцитні матеріали (сталь, кольорові метали) та енергоносії. Повторне використання деталей означає менше споживання руд, електроенергії та інших ресурсів, потрібних для виробництва нових. За оцінками, економія енергії сягає 60%, матеріалів – до 70% при реманufacturing порівняно з новим виробництвом. Це

сприяє зменшенню собівартості продукції і зниженню негативного впливу на довкілля (менше викидів CO₂, менше відходів виробництва).

Скорочення простоїв і покращення обслуговування. Відновлення деталей може значно швидше повертати техніку в стрій, ніж очікування виготовлення або постачання нових вузлів. Особливо це актуально в умовах порушених ланцюгів постачання або для рідкісних моделей. Ремонтне підприємство може відновити вузол з наявних ресурсів за дні, тоді як поставка нової запчастини тривала б тижні. Як зауважують експерти, в умовах перебоїв постачання ремануфактура забезпечує набагато коротший цикл ремонту, оскільки в наявності вже є “ядро” – базова деталь, яку лише треба відновити. Таким чином, підтримується висока готовність парку: транспорт менше простоє, більше часу працює на користувача. Для транспортних компаній це означає підвищення коефіцієнта технічної готовності і кращий сервіс. Крім того, розвиток реман-процесів сприяє створенню локальних ремонтних виробництв, що зменшує залежність від імпорту запчастин.

Екологічні переваги та сталий розвиток. Ремонтне відновлення деталей вписується в стратегію сталого розвитку та циркулярної економіки. Повторне використання деталей зменшує кількість відходів (спрацьованих запчастин, що інакше пішли б на звалище або в переплавку). Автомобільні звалища є серйозною екологічною проблемою, і ремануфактура допомагає її пом’якшити, адже значна частина компонентів отримує “друге життя” замість утилізації. За рахунок економії енергії та матеріалів при відновленні скорочуються викиди парникових газів та забруднення від добування сировини. Наприклад, відновлення одного великого дизельного двигуна економить сотні кілограмів металу і десятки ГДж енергії, які були б витрачені на виробництво нового. Багато автовиробників сьогодні впроваджують програми реман (Nissan, Caterpillar, Bosch та ін.) саме з мотивів екологічної відповідальності, поряд з економічною вигодою. Це частина глобальних зусиль зі зменшення вуглецевого сліду транспортного сектору. Отже, використання відновлених деталей сприяє

не лише підтримці працездатності техніки, а й збереженню навколишнього середовища.

Висновки

Проведений аналіз показав, що застосування відновлених деталей є технічно та економічно обґрунтованим шляхом підтримки працездатності автомобільного транспорту. Основні висновки дослідження можна сформулювати наступним чином:

- Ремонтопридатність і відновлення є невід’ємною складовою забезпечення надійності машин. Зношування деталей – головний фактор відмов автомобільних агрегатів^e, і своєчасне відновлення спрацьованих поверхонь дозволяє відновити функціональність без заміни дорогих вузлів. Правильно класифікуючи дефекти (за критичністю згідно ДСТУ 2925) і відбираючи деталі, придатні до ремонту, можна значно зменшити обсяги вибраковки.
- Сучасні методи відновлення забезпечують високий рівень якості. Існують ефективні технології для усунення різних видів спрацювання: наплавлення і напилення для значних зносів, гальванічні покриття для точних та твердих поверхонь, пластичне деформування для дрібних дефектів, комбіновані рішення для складних випадків. Кожен метод має свої переваги, і їх грамотне поєднання дозволяє досягти характеристик, еквівалентних новим деталям. Зокрема, прогресивні холодні методи відновлення дрібного спрацювання дають ресурс не гірший за нові деталі, а наплавно-зварювальні та гальванічні – при дотриманні технології забезпечують необхідну міцність та зносостійкість відновлених поверхонь.
- Надійність відновлених деталей підтверджується досвідом і випробуваннями. Відновлені вузли проходять ретельний контроль якості – від вимірювань до ресурсних тестів, – що гарантує їх безпечну експлуатацію. За даними експлуатації, якісно відремонтовані агрегати мають малу ймовірність відмов у гарантійний період і демонструють високу залишкову довговічність. Хоча ресурс відновленої деталі теоретично може бути меншим за нову,

впровадження новітніх технологій нівелює цю різницю. У багатьох випадках відновлена деталь працює до чергового капремонту так само, як і нова.

- Економічна доцільність використання відновлених деталей є очевидною. Ремонт обходиться в кілька разів дешевше виготовлення нових запчастин, що дає пряму економію коштів для власників техніки. В умовах масової експлуатації (автопарки, підприємства) це забезпечує значне зниження витрат на одиницю пробігу або мотогодини. При аналізі ефективності слід враховувати не лише пряму різницю в ціні, а й різницю в ресурсі деталей. Втім, навіть з урахуванням можливого трохи меншого ресурсу, питомі витрати на одиницю роботи для відновлених деталей, як правило, нижчі за нові, що підтверджує економічний сенс їх використання.

- Підвищення готовності та екологічний ефект. Ремануфактура сприяє скороченню простоїв техніки і швидшому відновленню її працездатності, що особливо важливо за умов перебоїв поставок або віддаленості сервісних центрів. Одночасно за рахунок повторного використання значно скорочується споживання матеріалів і енергії, зменшується кількість відходів. Це узгоджується зі світовими тенденціями сталого розвитку та підтримується на державному рівні (наприклад, нормативами ЄС щодо повторного використання автомобільних компонентів).

Підсумовуючи, ремонтне відновлення деталей є технічно ефективним і надійним способом продовження строку служби автомобільної техніки. Комплексний підхід – від оцінки стану деталі, вибору оптимальної технології ремонту до забезпечення контролю якості – дозволяє відновленим деталям працювати з практично тією ж віддачею, що й новим. Використання відновлених деталей економить ресурси, гроші і час, не погіршуючи при цьому ні безпечність, ні працездатність транспортних засобів. Навпаки, грамотна ремануфактура підвищує ефективність технічної експлуатації і робить внесок у екологічну безпеку. З огляду на наведені факти і аргументи, можна зробити висновок про доцільність ширшого впровадження технологій відновлення

деталей автомобілів в практику ремонту та обслуговування, як один із ключових інструментів підтримання їх працездатності та продовження життєвого циклу машин.

1.2. Перспективи використання електролітичного хромування для відновлення деталей автомобілів

Проведений аналіз літературних джерел і низки наукових робіт показав можливість застосування електролітичного хромування для відновлення деталей автомобілів. Встановлено, що через складність упровадження цього процесу у виробництво та значні енергетичні витрати електролітичне хромування не отримало широкого застосування для відновлення автомобільних деталей, а використовується переважно як декоративне та антикорозійне покриття [1].

Однак хромові покриття мають такі переваги:

- висока мікротвердість ($4000 \div 12000$ МПа);
- висока зносостійкість, що перевищує еталонні пари тертя у кілька разів;
- відсутність термічного впливу на поверхню деталі, що виключає зниження втомної міцності;
- морозостійкість;
- достатньо висока міцність зчеплення з поверхнею деталі та інші переваги.

Відомо, що для отримання хромових покриттів обов'язковою умовою є наявність двох основних компонентів – хромового ангідриду та сторонніх аніонів [1].

Концентрація хромового ангідриду в електроліті хромування може змінюватися в межах $50 \div 700$ г/л. Особливе значення для отримання хромових покриттів із визначеними якісними показниками та продуктивністю має різна концентрація сторонніх аніонів. При цьому їхня кількість відносно хромового

ангідриду відіграє важливу роль у процесі формування хромового покриття з потрібними властивостями та рівнем продуктивності. У процесі роботи ванни хромування вони разом із хромовим ангідридом витрачаються, змінюючи концентрацію в електроліті, що призводить до змін якості покриттів і продуктивності. Тому під час розроблення нового складу електроліту їм приділяють особливу увагу [1].

Застосування електролітичного хромування для відновлення деталей автомобілів завдяки вищезазначеним перевагам дозволяє збільшити ресурс деталей, особливо тих, що мають високий залишковий ресурс. Однак широкого застосування для відновлення автомобільних деталей електролітичне хромування не отримало через невелику товщину якісних покриттів ($0,1 \div 0,3$ мм) [1].

Проведені дослідження сучасних автомобілів, а також прецизійних деталей показали, що граничні зноси деталей вузлів і агрегатів автомобілів, які призводять до втрати працездатності, знаходяться в межах $0,1 \div 0,5$ мм.

Використання удосконалених технологій електролітичного хромування дозволяє отримувати хромові покриття товщиною до 0,7 мм з високою продуктивністю, що відкриває можливість його застосування як способу відновлення [1].

Тому пошук і вдосконалення технологій електролітичного хромування з метою збільшення товщини якісних покриттів при високій продуктивності є головним завданням авторемонтного виробництва, що дасть змогу знизити витрати на ремонт та відновлення працездатності агрегатів [1].

Автори встановили, що застосування хромування для зміцнення та відновлення деталей автомобілів дає змогу збільшити міжремонтний період у кілька разів, що знижує експлуатаційні витрати автомобілів загалом. Тому кількість деталей, які можливо відновлювати електролітичним хромуванням, постійно зростає [1].

Результати досліджень довели, що використання хромування для відновлення прецизійних деталей підвищує їх довговічність у кілька разів, унаслідок чого зменшуються витрати на експлуатацію автомобілів і, відповідно, витрати автотранспортних підприємств [1].

При цьому дослідники зазначають, що застосування хромування для відновлення деталей, що працюють в умовах гідроабразивного зношування, має важливе техніко-економічне значення для підприємств, які експлуатують спеціальні автомобілі. Проте необхідно проводити подальші дослідження щодо вдосконалення способів хромування з метою отримання хромових покриттів із високою продуктивністю та якістю, а також можливістю впровадження у виробництво [1].

Результати аналізу літературних джерел і наукових праць свідчать, що серед усіх способів відновлення плунжерних пар і золотників гідророзподільників хромування посідає провідне місце за надійністю відновлених деталей [1].

1.3. Аналіз електrolітів хромування для відновлення деталей автомобілів

У результаті проведеного аналізу матеріалів встановлено, що одним із перспективних способів відновлення та зміцнення деталей автомобілів, які працюють в умовах гідроабразивного зношування, є хромування.

Згідно з даними щодо використання хромування як способу відновлення, визначено низку перешкод, які ускладнюють його широке застосування під час ремонту деталей автомобілів. Важливою умовою використання хромування є забезпечення достатньої продуктивності процесу за умови отримання покриттів необхідної якості.

Однією з основних проблем застосування хромування є екологічна складова та шкідливі умови праці персоналу гальванічних дільниць. Тому для розв'язання цієї проблеми необхідно розробляти технології хромування, які дозволять використовувати електроліти з високою довговічністю та мінімальним виносом електроліту з метою поліпшення умов праці [3–9].

У зв'язку з цим було проведено аналіз наявних електролітів. Згідно з даними досліджень [4–12], визначено основні напрями проведення робіт, спрямованих на підвищення якості та збільшення продуктивності отримання хромових покриттів, а саме — застосування різних органічних і неорганічних добавок у поєднанні зі зміною складу електролітів і вибором оптимальних режимів електролізу. Проте такі електроліти не набули широкого застосування через складність упровадження у виробництво та відсутність практичних рекомендацій щодо їх використання для відновлення деталей автомобілів.

Тому подальші дослідження було зосереджено на електролітах хромування, що характеризуються добрими фізико-механічними властивостями та високою продуктивністю і мають перспективи практичного застосування, зокрема на холодних саморегульованих електролітах хромування.

1.4 Використання холодних саморегульовальних електролітів для нанесення хромових покриттів

На основі проведеного аналізу наукових робіт було встановлено, що одними з перспективних електролітів для хромування є холодні саморегульовальні електроліти, які мають низку переваг. До їхніх основних переваг належать: висока продуктивність і розсіювальна здатність, покращення умов праці (через менше випаровування), а також зменшення викидів у навколишнє середовище завдяки низькій робочій температурі. Крім того, під час використання таких електролітів зменшується накопичення внутрішніх напружень, а отримане покриття характеризується меншою пористістю та

тріщинуватістю. Це робить можливим застосування зазначених електролітів для відновлення деталей, що працюють в умовах гідроабразивного зношування [2].

Розглянемо деякі холодні електроліти хромування та порівняймо їх між собою, а також із універсальним (стандартним) електролітом, який є найпоширенішим у виробництві [2].

Холодний електроліт тетрахроматного типу був розроблений у Національному транспортному університеті для відновлення деталей автомобілів, тракторів, дорожньо-будівельної техніки та інших машин. Під час його використання можливо отримувати якісні тріщинуваті осад з мікротвердістю 8300–9500 МПа, при цьому вихід за струмом досягає 40%, а максимально можлива товщина якісного покриття становить 0,7 мм [2].

Даний електроліт не потребує підігріву, має високу покривну та розсіювальну здатність, і має такий склад, г/л: хромовий ангідрид – 350–400, сірчана кислота – 2,5–2,7, гідроксид натрію – 50–60 [2].

Режими використання наступні: робоча температура електроліту 18–22 °С та катодна густина струму 10–80 А/дм². Дотримання цих режимів забезпечує отримання якісних осадів із високим виходом хрому за струмом — 30–35 %.

Ці покриття можна використовувати для відновлення деталей, де під час роботи необхідна постійна наявність мастила, наприклад, гільз циліндрів, шийок валів під підшипники тощо. При цьому зносостійкість таких покриттів є близькою за властивостями до хромових осадів, отриманих зі стандартного (універсального) електроліту [2].

Однак, обмеженнями використання цього електроліту у виробництві є такі причини:

- невеликий діапазон робочих температур (18–23 °С) – при підвищенні температури покриття стають крихкими та мають густу сітку мікротріщин;
- необхідність використання додаткового обладнання для охолодження електроліту (холодильних установок), що призводить до збільшення енергоспоживання;

- висока агресивність електролітного розчину.

Для вибору базового електроліту для проведення досліджень було проаналізовано наявні перспективні холодні саморегулювальні електроліти хромування [2].

У ННЦ «ІМЕСГ» було розроблено саморегулювальний електроліт хромування, що містить CrO_3 та добавку Chromispe1-1. З метою підвищення виходу хрому за струмом до цього електроліту вводили у вигляді йонів такі добавки: сполуки ванадію (V), молібдену (Mo) та вольфраму (W). У результаті оптимальний склад електроліту мав такий вигляд: хромовий ангідрид у кількості 100–1000 г/л, йодна кислота – 10–350 г/л. Режими осадження використовувалися такі: густина струму 50–300 А/дм², робоча температура електроліту 18–25 °С [2].

Подальше збільшення густини струму призводило до різкого зменшення виходу за струмом (див. рис. 2.1). Однак при підвищенні густини струму понад 100 А/дм² через деякий час спостерігалось падіння напруги і, відповідно, зниження виходу за струмом. Це, ймовірно, було зумовлено утворенням на анодах омічної плівки, яка збільшувала електричний опір і, як наслідок, спричиняла падіння напруги [2].

Однак дослідження розроблених холодних саморегулювальних електролітів хромування дало змогу виділити холодний саморегулювальний електроліт хромування (ХСЕХ) (див. рис. 2.1). Даний електроліт характеризується високою продуктивністю осадження та високою розсіювальною здатністю, при цьому осадження відбувається в широкому діапазоні густин струму — від 75 до 300 А/дм². Крім того, цей електроліт має низьку агресивність розчину, що є його додатковою перевагою [2].

Цей розроблений електроліт був отриманий у результаті дослідження впливу неорганічної добавки — сульфату кобальту, внаслідок чого створено високопродуктивний холодний саморегулювальний електроліт хромування з йонами Co^{2+} наступного складу, г/л: хромовий ангідрид – 400–420, карбонат кальцію – 67–75, сульфат кобальту – 15–20. Робоча температура розчину

перебувала в вузькому інтервалі — 18–23 °С. Вихід хрому за струмом становить $40 \pm 1\%$, швидкість осадження — 130–550 мкм/год, при мікротвердості осадів 8500–11500 МПа [2].

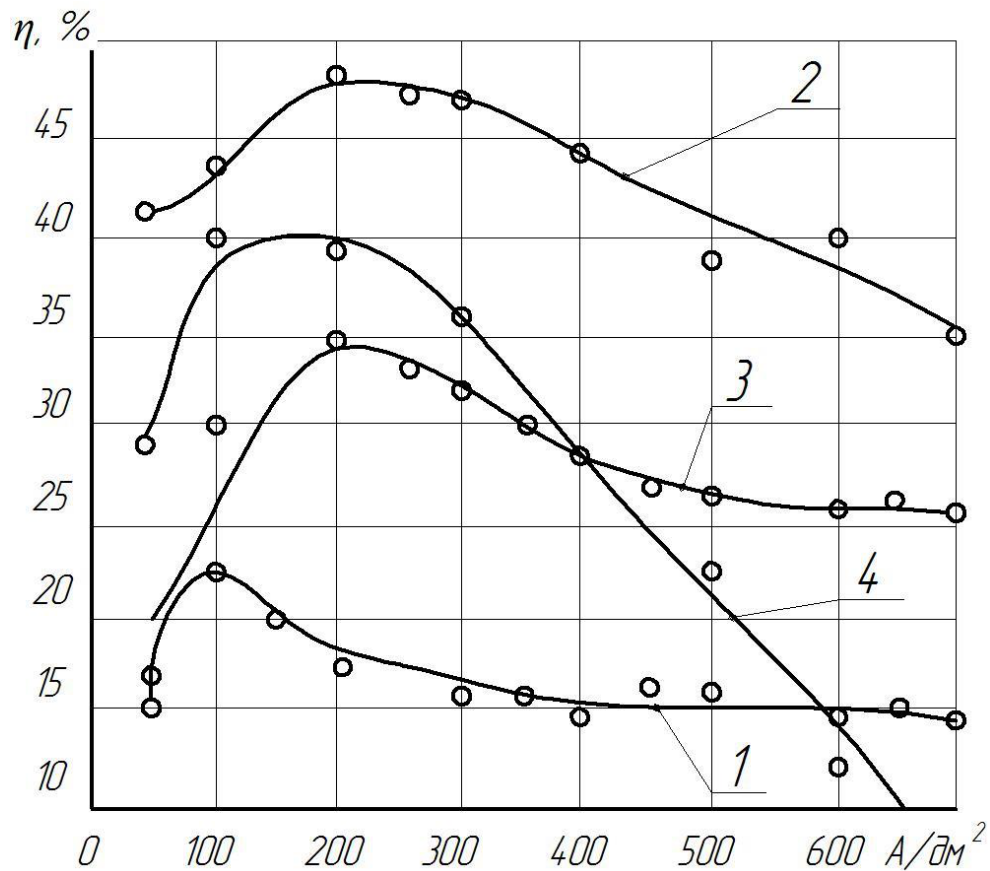


Рис. 1.1. Вплив катодної густини струму (A/dm^2) на продуктивність процесу осадження (вихід хрому за струмом, %) в електролітах: 1 – сульфатно-кремнефторидний; 2 – Chromispel-1; 3 – універсальний; 4 – холодний саморегулювальний [2].

Завдяки високим фізико-механічним властивостям і високій продуктивності цей електроліт став придатним для відновлення деталей автомобілів. Однак для деталей, що працюють в умовах гідроабразивного зношування, виникла певна проблема — наявність на поверхні шару невеликої кількості мікротріщин, що унеможливлювало використання цього електроліту для їх відновлення. Тому виникла необхідність проведення подальших досліджень щодо вдосконалення холодного саморегулювального електроліту хромування [2].

Висновки по п розділу

У результаті проведення аналізу використання відновлення деталей як способу підтримання працездатності агрегатів і автомобіля загалом установлено, що для забезпечення техніко-економічної доцільності собівартість відновленої деталі не повинна перевищувати 80 % вартості нової деталі агрегатів автомобілів.

Під час аналізу надійності спеціальних автомобілів виявлено, що найменший ресурс мають агрегати та вузли гідроприводу. При цьому виокремлено агрегати з найменшою напрацюванням на відмову, які суттєво впливають на працездатність спеціальних автомобілів у цілому, - гідророзподільники та гідронасоси. Деталі цих агрегатів піддаються гідроабразивному зношуванню, що ускладнює вибір раціонального способу відновлення, оскільки потребує одержання покриттів з визначеними властивостями — високою зносостійкістю та відсутністю мікротріщин.

Тому вибір було зупинено на застосуванні електролітичного хромування для відновлення робочих поверхонь деталей, які працюють в умовах гідроабразивного зношування, за якого необхідно отримати безтріщинні, зносостійкі покриття з достатнім зчепленням з основою деталі.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗМІРНОГО НАНЕСЕННЯ ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ЕЛЕКТРОЛІТУ

2.1. Методика проведення досліджень електроліту хромування

Для визначення оптимального складу електроліту як базовий було обрано холодний саморегульований електроліт хромування з неорганічними добавками сульфату нікелю та плавикової кислоти [7].

Для проведення досліджень концентрацію складових електроліту змінювали, г/л: CrO_3 – 250...500 з кроком 25–50 г/л; CaCO_3 – 0...80 з кроком 5 г/л; сульфат нікелю семиводний ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – 5...10 та $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 5...10 з кроком 2,5 г/л, а плавикової кислоти (HF) – 0...2 з кроком 0,05 г/л.

Електроліти хромування готували на дистильованій воді з хімічних реактивів кваліфікації «ХЧ» та «ЧДА».

У посудину з відомим об'ємом засипали навіску хромового ангідриду, необхідну для одержання дослідної концентрації хромової кислоти; доливали воду – 2/3 об'єму; обережно, невеликими порціями, додавали вуглекислий кальцій, не очікуючи повного розчинення хромового ангідриду; після цього вводили компонент, що містить аніон-«каталізатор» (SO_4^{2-}). Густина розчину вимірювали ареометром за температури 20 °С.

Оптимальний склад електроліту та режими електролізу (з точки зору продуктивності процесу хромування) відпрацьовували шляхом зміни концентрації компонентів, катодної густини струму та температури. Після цього в отриманий розчин вводили дослідну кількість однієї із зазначених добавок.

Хімічний аналіз розчинів проводили за спеціальною методикою, розробленою співробітниками кафедри [6].

Хромові покриття наносили на зразки кількох груп, які виготовляли для проведення досліджень і визначення:

1. кількісного значення виходу хрому за струмом і швидкості осадження металу;
2. мікротвердості поверхні та по товщині хромових осадів;
3. фазового складу електролітичного хрому;
4. зносостійкості хромових покриттів;
5. міцності зчеплення покриттів з підкладкою та мікроструктури.

2.2. Обладнання та прилади, що використовувалися для досліджень

Лабораторні дослідження з метою пошуку найбільш ефективних умов електролізу (з точки зору швидкості нарощування шару хрому та якості покриттів) проводилися у стаціонарній ванні.

Комплект робочого обладнання складався з:

1. ванн для хромування місткістю 3 та 8 л;
2. джерел живлення;
3. установки для автоматичного регулювання та підтримання робочої температури розчину [4, 7];
4. електроцита з пусковою, регулювальною та контрольно-вимірювальною апаратурою;
5. ванни місткістю 5 л для електрохімічного травлення зразків.

Ванни були скляними, хімічно- та теплостійкими, а також із вінілпласту. Усередині кожної з них було змонтовано змєєвик-теплообмінник, виготовлений із цільнотягнутої сталевий трубки. Для кожної групи зразків відповідно були виготовлені спеціальні підвісні пристосування та свинцеві аноди (свинець із вмістом 6 % сурми та 5 % олова). Співвідношення площі катода до анода змінювалося від 1:2 до 1:4, а міжелектродна відстань становила 50...100 мм.

Зразки виготовляли зі сталі 45 циліндричної форми діаметром 12 мм, які наведені на рисунку 3.1, із загальною площею покриваної поверхні $0,075 \text{ дм}^2$, у стаціонарній ванні об'ємом 3 л. Живлення електролізера здійснювалося від джерела постійного струму з двонапівперіодною схемою випрямлення. Перед нанесенням електролітичних покриттів зразки піддавали знежиренню у віденській вапні та анодному травленню у 30%-му водному розчині сірчаної кислоти з добавкою солі сульфату заліза в кількості 15–20 г/л за температури електроліту травлення $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Усі зразки після знежирення та травлення ретельно промивали в дистильованій воді та висушували.

Експериментальну установку було виготовлено спеціально для проведення досліджень та обладнано необхідними пристроями, пристосуваннями і приладами. Зовнішній вигляд установки для хромування та щита керування наведено на рис. 2.2.



Рис. 2.1. Зразок-втулка: а – креслення, б – хромовані зразки

Під час проведення досліджень катодну густину струму (D_k) змінювали від 50 до 250 А/дм^2 , а температуру електроліту (Тел.) — від 18 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$ з кроком $2,5 \dots 5 \text{ }^\circ\text{C}$, з точністю $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Зміна та контроль температури електроліту здійснювалися за допомогою розробленої установки для підтримання робочої температури електроліту.

Після приготування електроліту для хромування проводили його обов'язкове попереднє опрацювання з метою виділення в розчині тривалентного хрому в кількості $2 \dots 10 \text{ г/л}$, щоб продуктивність процесу досягла заданого рівня.

Режим електролізу був таким: травлення – $DA = 120 \dots 130 \text{ А/дм}^2$ протягом $1,5 \dots 2 \text{ хв}$; декапування в електроліті хромування – $DA = 50 \dots 200 \text{ А/дм}^2$ протягом

30–60 с. Хромування здійснювали в діапазоні густин струму $D_k = 50 \dots 250 \text{ A/дм}^2$ за температурного режиму електролізу $t_{\text{ел}} = 18 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Анодне травлення в електроліті хромування після завершення електролізу проводили за $D_A = 50 \dots 250 \text{ A/дм}^2$ протягом 1,5...2 хв для зняття міжелектродних напружень у хромовому покритті.

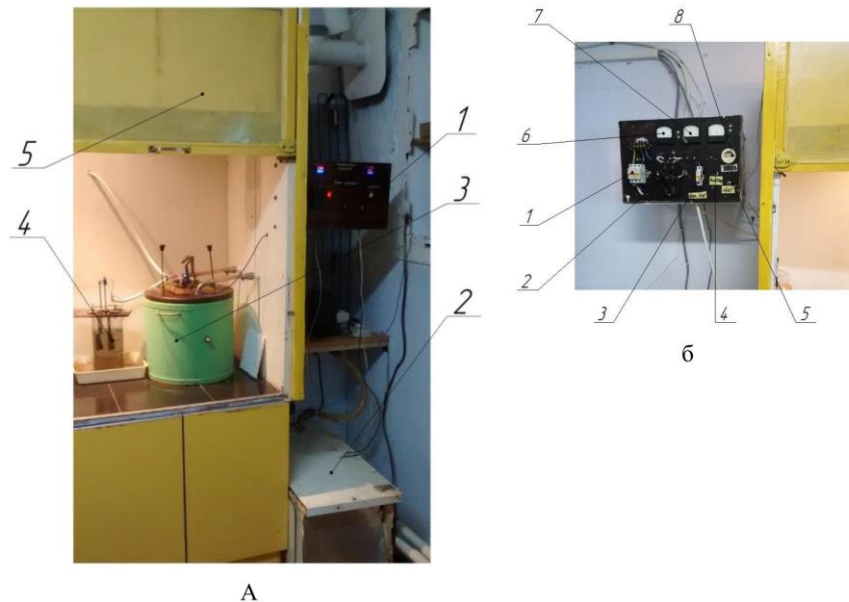


Рис. 2.2. Установка для досліджень гальванічних хромових покриттів: а – установка для підтримання заданих температурних режимів: 1 – пульт керування установкою контролю та підтримання температури електроліту; 2 – ємність охолоджувача; 3 – бак із ванночкою для хромування; 4 – ванночка для травлення; 5 – витяжна шафа; б – пульт керування установкою для хромування: 1 – трифазний автомат; 2 – ключ керування електролізом; 3 – однофазний автомат установки контролю та підтримання температури; 4 – тумблер увімкнення витяжки у шафі; 5 – тумблер увімкнення освітлення у шафі; 6 – вольтметр; 7 – амперметр; 8 – розетка на 220 В.

Після осадження хрому зразки ретельно промивали у теплій та холодній дистильованій воді, потім висушували на повітрі протягом 1 години, після чого поміщали в муфельну піч і витримували за температури $200 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ з метою видалення водню з хромованої поверхні та поліпшення фізико-механічних властивостей покриття. Процес тривав 1...1,2 години.

Величину мікротвердості визначали за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 з навантаженням на індентор 0,98 Н (відповідно до ДСТУ) за товщини покриття понад 200 мкм.

Для дослідження морфології покриття використовували оптичний мікроскоп ММУ-3 із цифровою приставкою для під'єднання до комп'ютера (рис. 2.3), що забезпечувало збільшення зображення у 250, 600 та 1000 разів. Оцінювання якості хромового покриття здійснювали за величиною мікротвердості, відсутністю дендритів і магістральних наскрізних тріщин на хромованій поверхні.

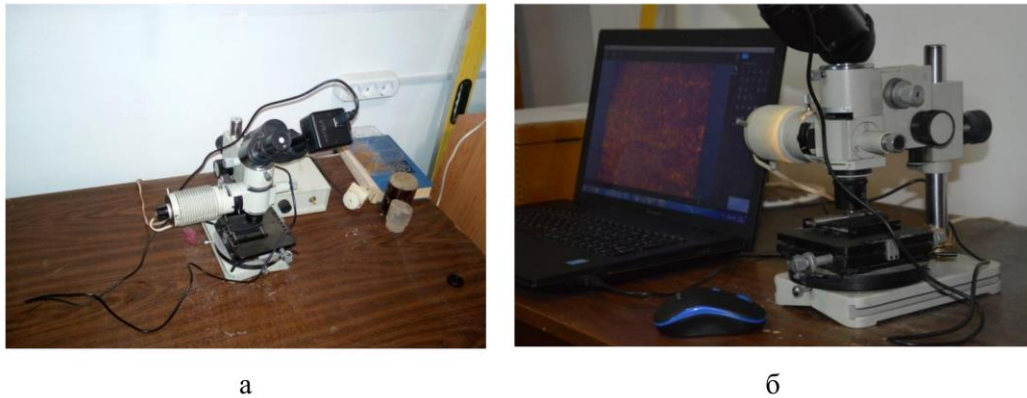


Рис. 2.3. Мікроскоп ММУ-3 з цифровою приставкою: а – вигляд мікроскопа з цифровою приставкою; б – під'єднана приставка до персонального комп'ютера.

Для приготування мікрошліфів зразки хромували на товщину 0,2...0,5 мм. Дослідження тріщинуватості та мікротвердості хромових покриттів проводили за допомогою мікроскопа ММУ-3 з приставкою для оцифрування зображення на комп'ютер. Для вивчення мікроструктури хромових покриттів за товщиною виготовляли мікрошліфи, які для наочного виявлення хромового покриття перед дослідженням попередньо протравлювали у 30%-му розчині хромового ангідриду за зворотної полярності струму протягом 7–10 с.

Перевірку міцності зчеплення хромового покриття з основною деталлю здійснювали шляхом багаторазового запресовування та випресовування підшипників за допомогою ручного гідравлічного преса з зусиллям 10 тс

відповідно до ДСТУ з використанням оправки для запресовування–випресовування підшипника (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Прес на 10 тс з оправкою для випробувань на міцність зчеплення

Як зразок для досліджень використовували вал, виготовлений із матеріалу сталь 45 за ДСТУ, з обробленою шийкою під покриття з номінальним діаметром 19,60 мм; товщина покриття становила 0,25–0,30 мм. Контртіло – підшипник кульковий, радіально-упорний № 204 за ДСТУ [7]. Хромування здійснювали до діаметра 20,1...20,2 мм. Після хромування шийки вала шліфували до діаметра 20,04...20,05 мм (рис. 2.5).

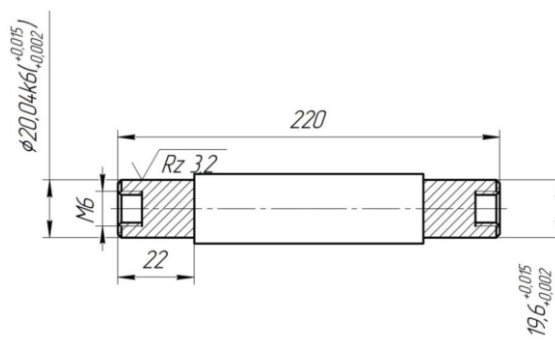


Рис. 2.5. Креслення вала для випробувань на міцність зчеплення.

Оцінювання порівняльної зносостійкості електролітичних хромових покриттів, осаджених із розробленого електроліту, виконували за допомогою машини тертя СМЦ-2М відповідно до ДСТУ з використанням цифрового осцилографа (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Машина тертя СМЦ-2М для випробування хромових покриттів на знос

Як зразки використовували ролики діаметром 49,6 мм і довжиною 12 мм, виготовлені зі сталі 40Х та хромовані на товщину 0,30...0,35 мм з таким розрахунком, щоб після механічної обробки діаметр роликів становив $\varnothing 50 \pm 0,01$ мм (рис. 2.7 і 2.8).

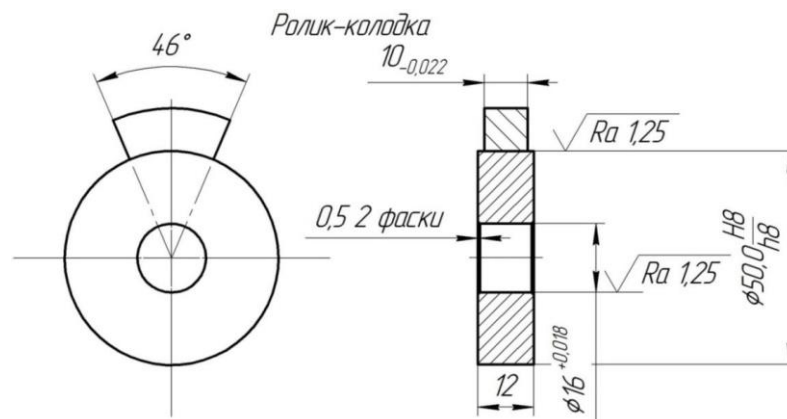


Рис. 2.7. Креслення ролика-колотки для випробувань на знос

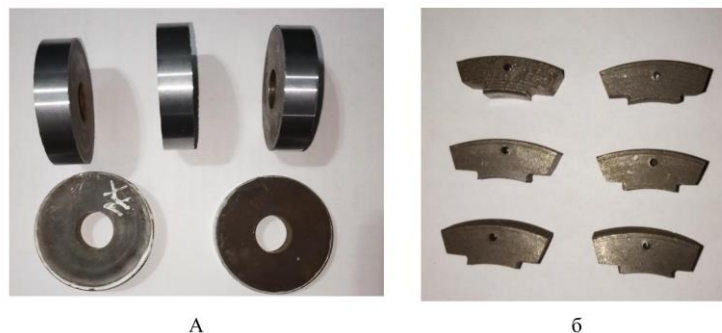


Рис. 2.8. Фото зразків для випробувань на знос: а – ролики, покриті хромом; б – колодка (контртіло).

Підготовка до випробувань, хромування та обробка зразків-роликів проводилися на обладнанні кафедри агроінженерії та технічного сервісу ПНУ. Обробка складалася з операції шліфування, яку виконували в оправці на одному й тому самому верстаті за режимів, що виключали утворення шліфувальних тріщин і пошкоджень на зовнішній поверхні досліджуваних покриттів. Окружна швидкість шліфувального круга (24А 40П С1 5К5 за ДСТУ) становила 35 м/с; поперечна подача за подвійний хід столу – 0,002...0,005 мм; окружна швидкість зразка – 10...15 м/хв; поздовжня подача – 2 мм/об зразка; витрата мастильно-охолоджувальної рідини – 20...30 л/хв. Шорсткість обробленої поверхні перебувала в межах $R_a = 0,63...0,32$ мкм.

Як контртіло використовували колодку (чавун СЧ 21) з площею контакту 1 см². Частота обертання ролика становила 450 хв⁻¹. Для забезпечення граничного тертя та окиснювального зношування застосовували моторну оливу марки М10Г2, яку подавали періодично по 1 краплі протягом 3–5 хв; для цього використовували крапельницю з регулюванням подачі за допомогою мікрометричного гвинта. Для максимального прилягання колодки до ролика застосовували шарнірну опору. Перед початком випробувань виконували підгонку поверхні колодки до ролика; для цього використовували абразивний круг діаметром 50 мм з малою зернистістю, який закріплювали замість ролика на валу.

Стан поверхонь тертя досліджували за допомогою мікроскопа ММУ-3 (на наявність задирів, сколів, мікротріщин, викришувань тощо). У процесі початкового періоду зношування реєстрацію моменту тертя здійснювали автоматично за допомогою комп'ютера та перетворювача аналогового сигналу в цифровий.

Під час проведення випробувань зразків для визначення динаміки приработки пари тертя «ролик–колодка» на машині тертя СМЦ-2М, крім вимірювання зносу, необхідно було фіксувати зміну температури зразка (див. рисунок 2.9). Завдяки цьому визначали зміну коефіцієнта тертя зразка, а також

зміну шорсткості плями контакту «колодка–ролик» у процесі тертя і, відповідно, якість змочування мастилом поверхні ролика, покритої зносостійким матеріалом.

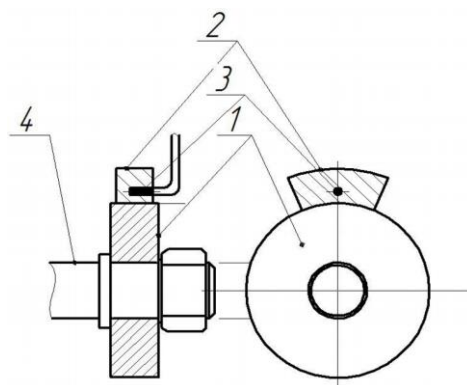


Рис. 2.9. Контроль температури в зоні тертя зразка (ролика) за допомогою термопари в районі колодки: 1 – випробуваний ролик; 2 – колодка; 3 – термопара; 4 – вал машини СМЦ-2М.

Контроль температури в зоні тертя випробуваного зразка здійснювали за допомогою термопари 3 (рис. 2.9) із використанням осцилографа Hantek 1008, під'єднаного до машини тертя СМЦ-2М [6].

З рис. 3.9 видно, що під час випробування пари «ролик–колодка» пропонується встановлювати термопару в отвір, виконаний безпосередньо в колодці 2, що дає змогу точніше визначати зміну температури і, таким чином, опосередковано оцінювати процес приработки пари «ролик–колодка» під час трибологічних випробувань ролика-зразка 1, покритого хромом. Термопара 3 як датчик під'єднувалася до одного з каналів осцилографа Hantek 1008, а за допомогою програмного забезпечення Chapter3 версії v1.0.5 сигнал перетворювався у графік, який виводився на персональний комп'ютер [7].

Для визначення можливого механізму електролітичного осадження хрому проводили поляризаційні дослідження в гальваностатичному режимі на потенціостаті марки П-5848 із використанням стандартної триелектродної електрохімічної комірки ЯСЕ-2 з розділеними катодним і анодним просторами, на платиновому індикаторному електроді із застосуванням платинового допоміжного електрода та хлорсрібного електрода порівняння. Час розгортки

струму становив 750 с. Вимірювання потенціалу робочого електрода здійснювали електронним мультівольтметром з точністю 0,01 мВ і частотою фіксації 1 Гц з постійною передачею інформації на персональний комп'ютер. Реєстрацію показань мультівольтметра виконували за допомогою програмного забезпечення «UT61C_D» версії V3.03.

Схему цієї установки для підтримання необхідних режимів під час проведення осадження хрому на зразках наведено на рис. 2.10.

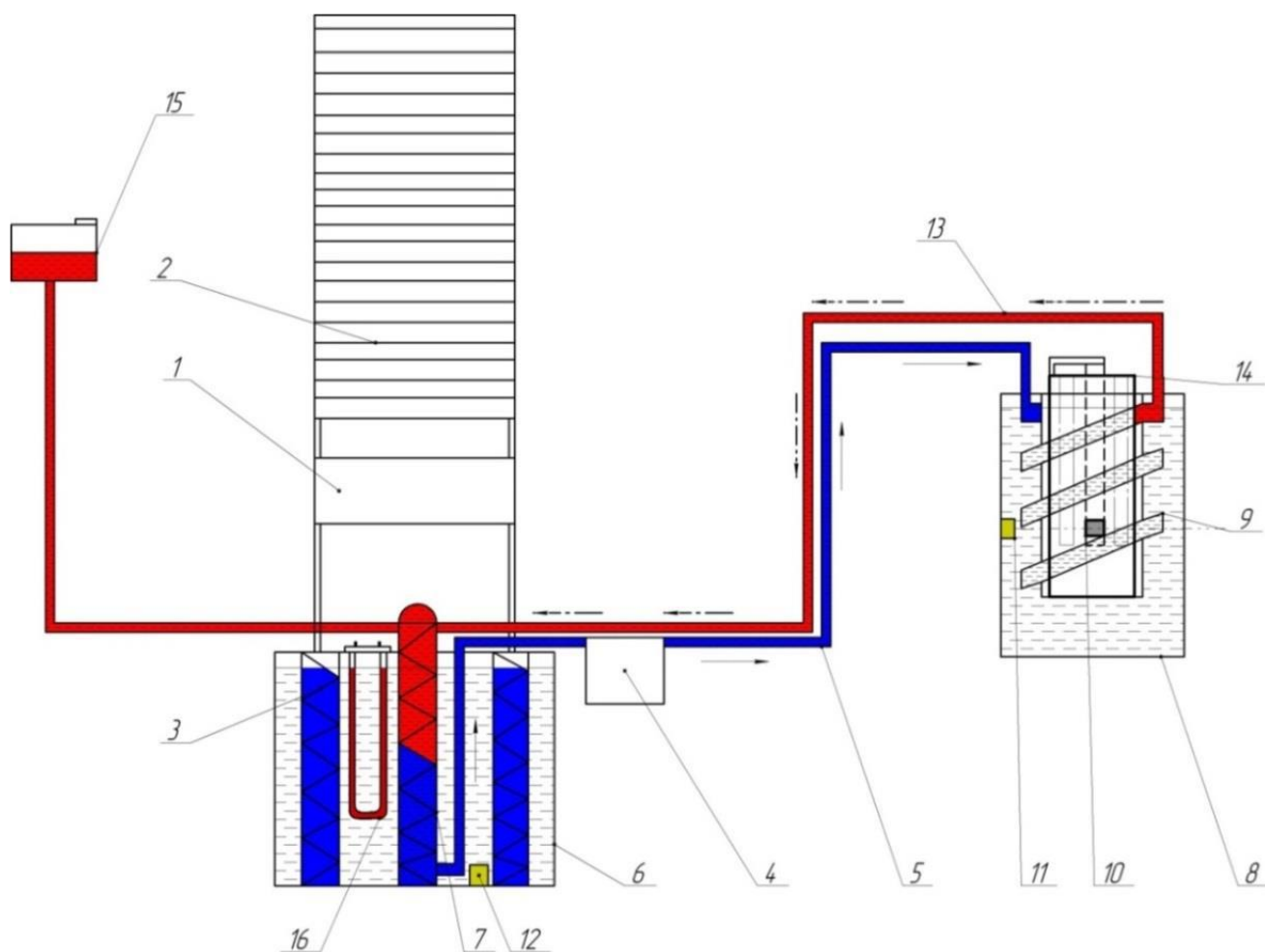


Рис. 2.10. Схема роботи установки для проведення досліджень: 1 – двигун-компресор; 2 – конденсатор; 3 – випарник; 4 – насос; 5 – трубопровід низької температури; 6 – акумуляційна ємність; 7, 9 – теплообмінники; 8 – гальванічна ванна; 10 – підвіска з деталями, що покриваються; 11 – датчик регулятора температури у ванні нанесення; 12 – датчик регулятора температури охолоджувача; 13 – трубопровід високої температури; 14 – ванна нанесення покриття; 15 – розширювальний бачок; 16 – нагрівальний елемент (ТЕН).

Підтримка робочої температури електроліту здійснювалася наступним чином: залежно від необхідної робочої температури електроліту в діапазоні $t_{el}=18\div 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, попередньо включали компресор охолоджувача 1 або нагрівач 16 (Рис. 3.10), які з'єднані з реле регулятором температури на панелі управління. При включеному компресорі охолоджувача 1 через випарники 3 температура в акумуляційній ємності 6 підвищується до необхідної робочої температури $t_{ж}=0\div 12\text{ }^{\circ}\text{C}$, що буде достатньо для відведення тепла в ванні осадження. Після досягнення верхньої заданої температури компресор 1 включатиметься з необхідною періодичністю. Управління роботою компресора здійснюється за допомогою датчика 12 і реле регулятора на панелі управління компресором холодильника (рис. 2.10) у заданому діапазоні. Також у баку можна отримувати температуру нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ завдяки використанню в якості охолоджувальної рідини розсолу або антифризу.

Принцип роботи установки. Для прискорення теплообміну використовується багатошвидкісний рідинний насос 4, який прокачує охолоджувальну рідину через теплообмінники акумуляційної ємності 6 та гальванічної ванни 8 (див. рисунок 2.10). Насос 4 вмикається за допомогою тумблера на панелі керування. У баку охолоджувача всередині змієвика 7 розміщена ванна хромування. З метою компенсації різниці температур застосовується розширювальний бачок 15 (див. рис. 2.10).

У процесі хромування відбувається нагрівання електроліту, який через стінки ванни передає теплоту рідині ємності теплообмінного бака 9. У баку встановлено датчик увімкнення рідинного насоса 4, який спрацьовує за допомогою реле насоса на панелі керування установкою.

Рідинний насос має три швидкості, що дає змогу регулювати швидкість циркуляції в системі з метою прискорення процесу теплообміну. Завдяки цьому стає можливим осадження гальванічних покриттів за підвищених густин струму (до 200 А/дм^2). Також у разі збільшення густини струму та інтенсифікації тепловиділення у гальванічній ванні виникає необхідність підвищення

швидкості теплообміну; для цього можна змінювати температуру циркуляційної рідини в системі шляхом її зниження аж до температур нижче нуля.

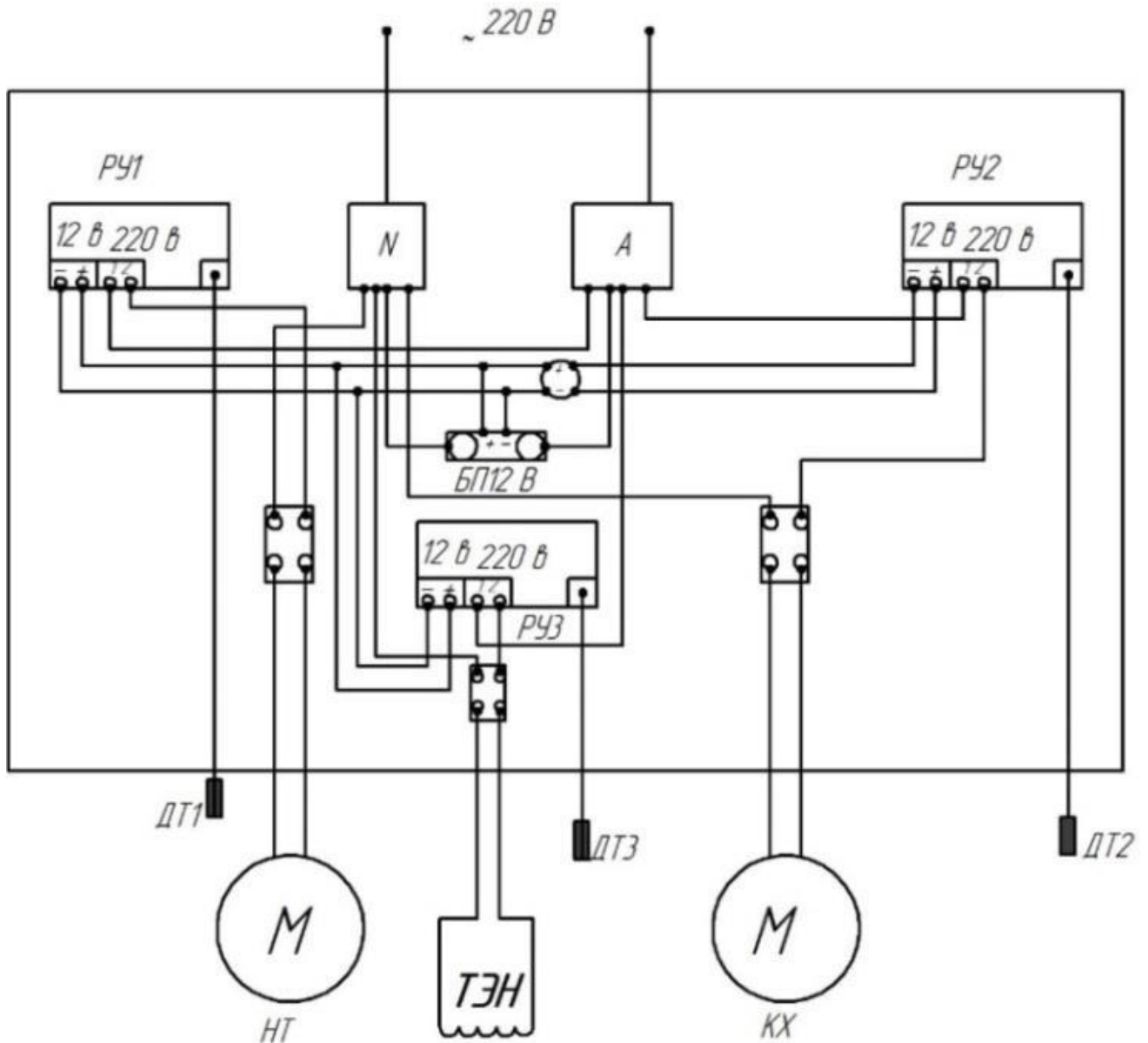


Рис. 2.11. Принципова електрична схема установки для підтримання температури електроліту.

На електричній схемі (рис. 2.11) показано компоновку з'єднань приладів на панелі керування з основним обладнанням — компресором холодильника КХ, циркуляційним насосом (теплообмінником) НТ та нагрівальним елементом ТЕН.

Також на електричній схемі наведено датчики температури ДТ1, ДТ2, ДТ3, які з'єднані з реле-регуляторами (РУ1, РУ2, РУ3) керування вмиканням і вимиканням обладнання.

Для підтримання вищих робочих температур електроліту або у разі проведення досліджень гарячих електролітів можна застосовувати нагрів із підтриманням необхідної підвищеної температури електроліту в діапазоні 30–60 °С. Для цього до кола керування установкою (див. рисунок 2.11) підключається реле керування нагрівальним ТЕНом, який спільно з охолодженням або окремо забезпечує підтримання необхідної високої температури електроліту (до 60 °С). Принцип теплообміну та нагрівання електроліту є зворотним процесу охолодження: нагрівальний ТЕН підігріває рідину в баку до температури $t_{ж} = 50...80$ °С. При цьому вмикається циркуляційний насос, який нагріту рідину з бака через трубопроводи подає у змійовик-теплообмінник гальванічної ванни. У результаті відбувається нагрівання електроліту у ванні до заданої температури, встановленої реле регулювання, після досягнення якої циркуляційний насос вимикається.

Нагрів у акумуляційній ємності 6 контролюється термореле-регулятором, який вимикає нагрівальний ТЕН після досягнення верхньої встановленої межі температури. Бак теплоізований, що дає змогу триваліше зберігати робочу температуру в ємності установки та зменшити кількість циклів увімкнення компресора і нагрівального ТЕНу, а отже, забезпечити збереження обладнання та знизити витрати електроенергії на підтримання робочої температури електроліту.

Технологію відновлення деталей хромуванням розробляли на основі найкращих результатів проведених лабораторних досліджень та виробничого досвіду їх ремонту.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Оптимізація складу електроліту хромування з метою отримання покриттів з високими електрофізичними властивостями

Для визначення оптимального складу електроліту хромування в якості базового був обраний ХСЕХ. Розчини готували і аналізували за розробленою методикою, використовували необхідне обладнання, прилади та інструменти, які викладені в Розділі 3.

В результаті дослідження базового електроліту хромування [7] було отримано, що зі збільшенням робочої температури електроліту вище 23°C і при катодній щільності струму 200 А/дм^2 і більше, буде відбуватися зниження виходу хрому по струму від 40 до 25%. При цьому знижується якість осаду. Покриття набувають сірого, темно-сірого кольору, на поверхні збільшується кількість дендритів [2, 4].

У процесі проведення досліджень зміненого хімічного складу базового електроліту хромування, значний вплив на продуктивність і якість хромових покриттів має – зміна концентрації компонентів і режими формування хромових осадів. Отримані залежності режимів і складу відповідають ХСЕХ [5]. Крім того, було з'ясовано, що значний вплив на фізико-механічні властивості та продуктивність формування покриттів мають неорганічні добавки, завдяки яким можливе розширення діапазону робочих температур [8, 10].

Тому в результаті досвіду досліджень інших авторів були взяті за основу наступні добавки: сульфат нікелю ($\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) і сульфат кобальту ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), а також плавикова кислота (HF), яка має властивості розширення діапазону робочих температур з отриманням якісних покриттів з високою продуктивністю.

При проведенні досліджень сульфатів нікелю і кобальту, які впливають на якість осадів. Було встановлено, що максимальне значення мікротвердості (до

11500 МПа) досягається при концентрації їх до 10 г/л. (рис. 3.1).

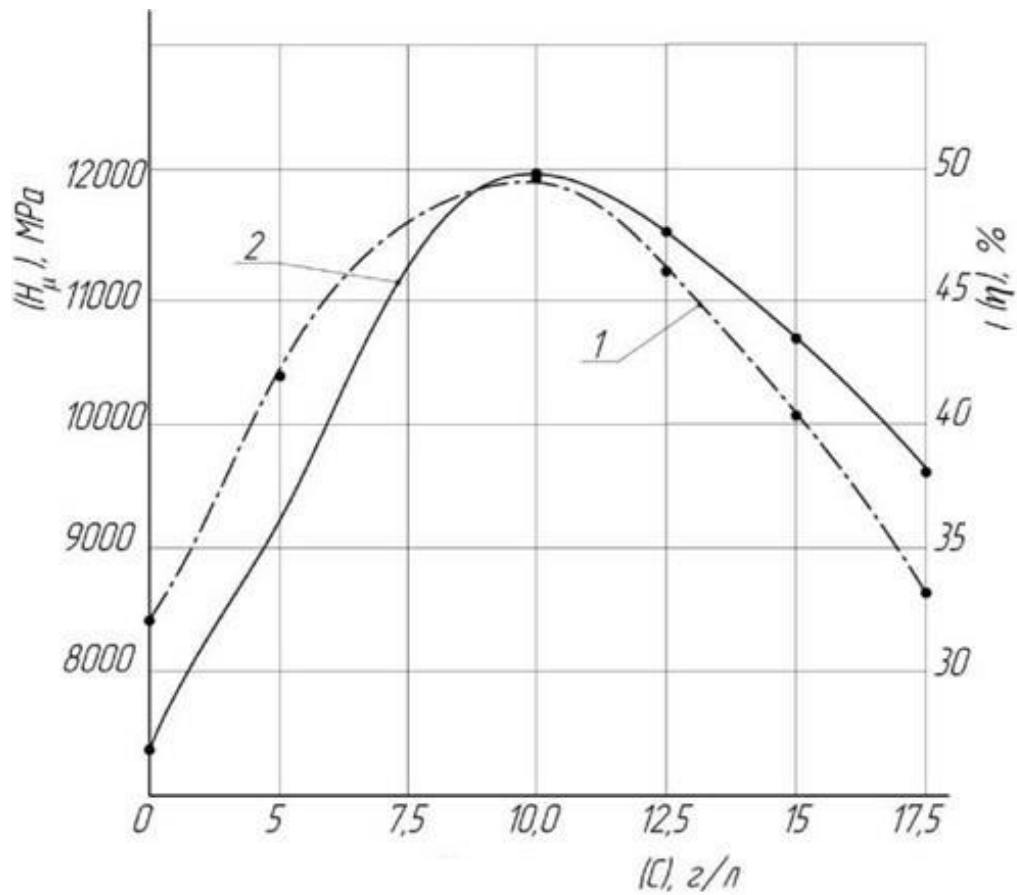


Рис. 3.1. Вплив кількості сульфату нікелю (1) і сульфату кобальту (2) на мікротвердість хромового покриття, осадженого при складі електроліту: CrO_3 – 420; CaCO_3 – 50 і HF – 0,8

Також були проведені дослідження неорганічної добавки плавикової кислоти (HF) до базового електроліту хромування. В результаті було встановлено, що зі збільшенням концентрації плавикової кислоти в діапазоні $0,65 \div 0,9$ г/л, при робочій температурі електроліту $18 \div 35^\circ\text{C}$, осідають якісні покриття товщиною більше 200 мкм, з мікротвердістю осадів до 11500 МПа (рис. 4.2), при цьому вихід хрому по струму досягає 47-50%. При подальшому збільшенні концентрації HF відбувається незначне зменшення мікротвердості покриттів, а також падіння виходу хрому по струму (зниження продуктивності). Зі збільшенням концентрації плавикової кислоти більше 1,0 г/л якість одержуваних хромових осадів погіршується, збільшується кількість наскрізних тріщин, а також знижується зчеплення з поверхнею деталі

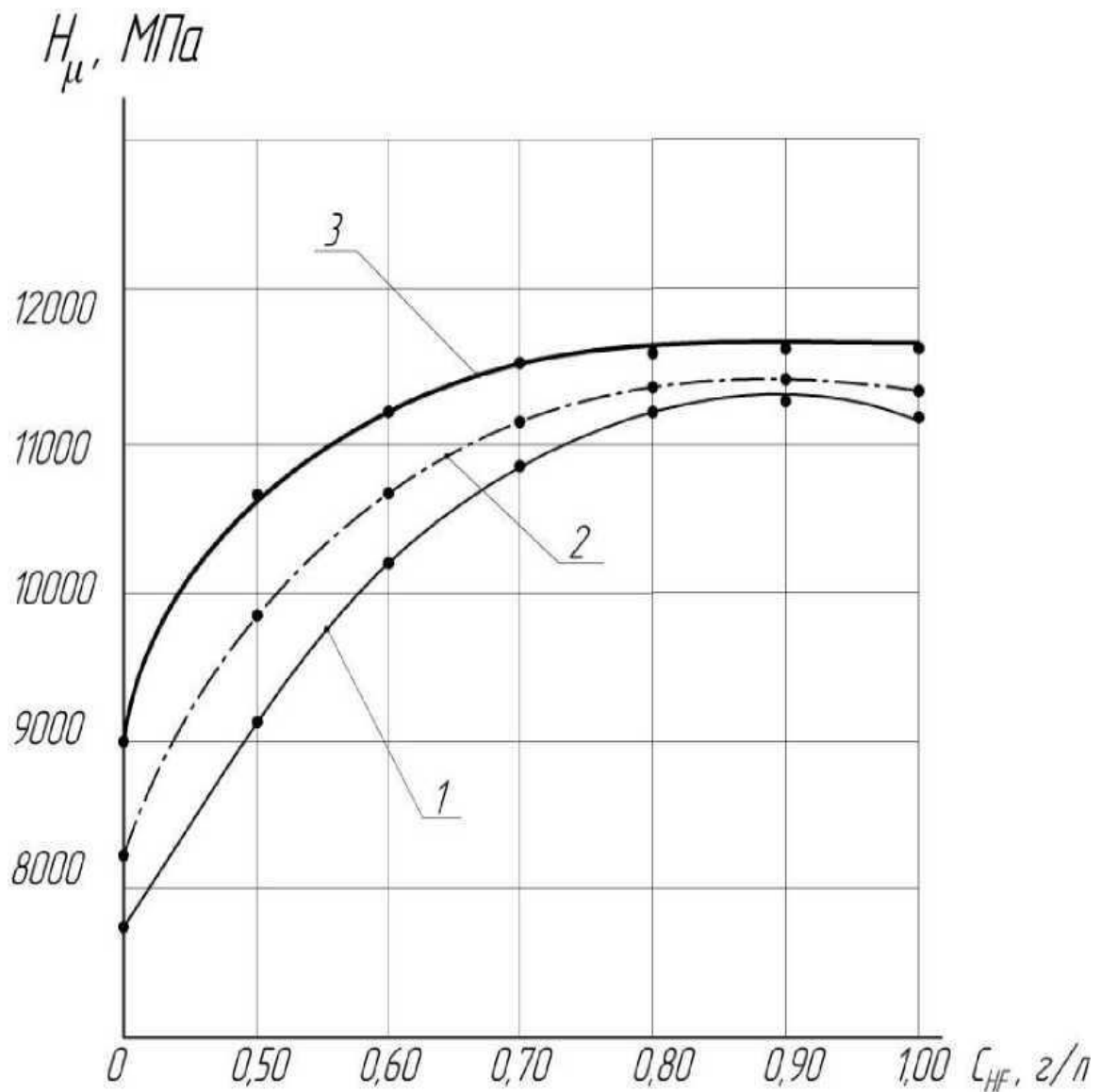


Рис. 3.2. Вплив концентрації плавикової кислоти (C_{HF}) на мікротвердість (H_{μ}) при робочій температурі електроліту $18 \div 35^{\circ}\text{C}$ і щільності струму: 1- 100 А/дм², 2 – 150 А/дм², 3 – 200 А/дм² (Склад електроліту: CrO_3 – 420 г/л; CaCO_3 – 50 г/л, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 10 г/л, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 10 г/л).

Як зазначалося вище, при всіх перевагах базового електроліту його істотним недоліком є вузький інтервал робочих температур. Для цього були проведені дослідження впливу робочої температури електроліту хромування на вихід по струму, мікротвердість і якість хромових покриттів. Робочу температуру електроліту підтримували без змін у часі, в межах від 10 до $40 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

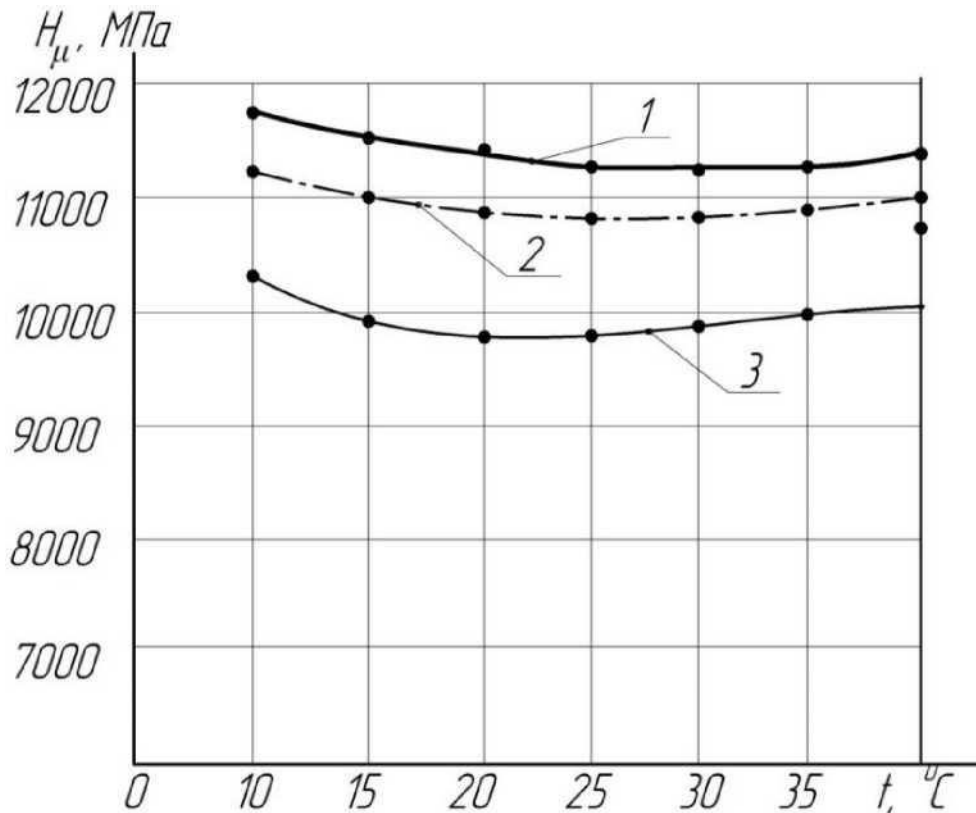


Рис. 3.3. Значення мікротвердості хромових покриттів залежно від робочої температури електроліту при різній концентрації плавикової кислоти г/л: 1 – 0,9, 2 – 0,7, 3 – 0,5, отриманих при $D_k = 200 \text{ А/дм}^2$ (в електроліті складу, г/л: CrO_3 – 420; CaCO_3 – 50, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 10, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 10)

В результаті досліджень було встановлено, що при зміні робочої температури розроблюваного електроліту в діапазоні $t_{\text{ел}} = 18 \dots 35^\circ\text{C}$ при кількості HF в діапазоні $0,65 \div 0,9$ г/л мікротвердість покриттів змінюється не значно (рис. 4.3). Зі зменшенням кількості плавикової кислоти мікротвердість починає зменшуватися, при цьому закономірності мають практично лінійний характер. Максимальна мікротвердість хромових покриттів (до 11500 МПа) при виході по струму 48% досягала при значенні щільності струму 200 А/дм^2 .

Отримані дані досліджень дозволили встановити, що в розроблюваному електроліті хромування при спільній присутності сторонніх аніонів SO_4^{2-} і F^- створюються умови, що забезпечують нанесення якісних хромових покриттів при робочій температурі електроліту $18 \dots 35^\circ\text{C}$ при товщині покриттів більше 200

МКМ.

З метою забезпечення умов саморегулювання для розробленого електроліту, для підтримки постійної величини концентрації сторонніх аніонів (SO_4^{2-}) в електроліті, було необхідно утворення донної фази важкорозчинних солей, в нашому випадку сульфату кальцію. Для цих цілей в базовому електроліті використовували вуглекислий кальцій. У зв'язку з цим були проведені дослідження, як впливає концентрація вуглекислого кальцію на вміст іонів SO_4^{2-} в електроліті і вихід хрому по струму.

Так, аналіз впливу електроліту (CrO_3 – 400 г/л, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 10 г/л, $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 10 г/л і HF – $0,7 \div 0,8$ г/л) на вміст сторонніх аніонів показав, що при температурі електроліту $30 \dots 35^\circ\text{C}$ зі збільшенням концентрації вуглекислого кальцію (CaCO_3) від 0 до 80 г/л вміст SO_4^{2-} зменшується від 4,8 до 1 г/л (рис. 3.4, крива 1). При цьому вихід хрому за струмом залишається практично однаковим, досягаючи максимальних значень при концентрації CaCO_3 в кількості $30 \div 70$ г/л (рис. 3.4 крива 2), який становить 45...47%, а екстремум (верхня точка) відповідає концентрації SO_4^{2-} 3,4 г/л. Слід зауважити, що при концентрації (CaCO_3) більше 30 г/л на дні електролізера відбувається виділення, у вигляді осаду, донної фази. Вона містить, з точки зору, не тільки

сульфат кальцію CaSO_4 , але і фторид кальцію CaF_2 . Цей факт доводить те, що спільна присутність фторидів і сульфатів підвищує саморегуляцію електроліту по відношенню до його аніонного складу, і буде автоматично підтримувати постійним співвідношення $\text{SO}_4^{2-} / \text{CrO}_3$ [6, 12].

Це можна пояснити як спостережувані явища з точки зору гетерогенної рівноваги в нашій системі. Для цього порівняємо константи розчинності трьох обмежено розчинних сполук, присутніх в нашому електроліті одночасно – це карбонат кальцію CaCO_3) (його константа розчинності

тролі одночасно – це карбонат кальцію CaCO_3 (його константа розчинності $K_S(\text{CaCO}_3) = 4,8 \cdot 10^{-9}$); сульфат кальцію CaSO_4 ($K_S(\text{CaSO}_4) = 6,1 \cdot 10^{-5}$ і фторид кальцію CaF_2 ($K_S(\text{CaF}_2) = 4,1 \cdot 10^{-11}$). Оскільки розчинність

сульфату кальцію набагато вища, ніж розчинність карбонату і фториду, то саме ці компоненти і забезпечуватимуть стабілізацію сульфат-аніону в розчині завдяки рівновазі

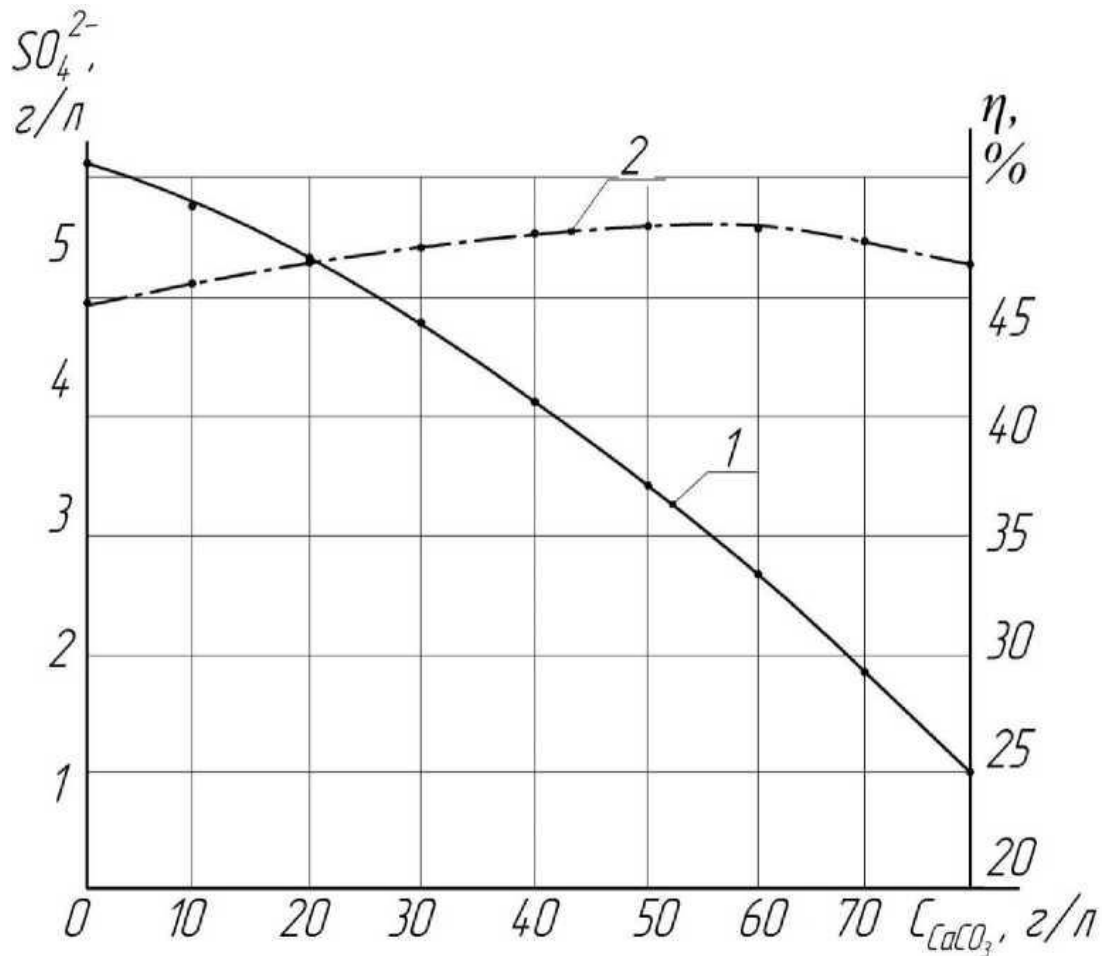


Рис. 3.4. Вплив концентрації карбонату кальцію на вміст у розчині сульфат-іонів (SO_4^{2-}) – 1 і вихід хрому за струмом (η) при $D_k = 100$ А/дм² – 2 (в електроліті складу, г/л: CrO_3 – 420; $CaCO_3$ – 50, $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 10 і $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ – 10 г/л, HF – 0,7)

3.2 Дослідження зносостійкості хромових покриттів

Внаслідок передбачуваної метастабільності осадів хрому, виникла необхідність оцінки їх зносостійкості при тривалій роботі тертьових пар (близько 250 годин).

З метою проведення досліджень зносостійкості хромових покриттів

використовували методику та обладнання, викладені в розділі 3.

Величину зносу визначали гравіметричним методом, через кожні 10 годин, зважуванням зразків і колодок з точністю до 0,1 мг до і після зносу. Формування робочого рельєфу тертьових поверхонь здійснювалося при навантаженні 35, 30, 25, 20, 15 і 10 кг/см². Після встановлення моменту тертя і припрацювання, при загальній площі контакту пари тертя не менше 90%, навантаження плавно збільшували до планованого (для уникнення підвищення моменту тертя). За гранично допустиме приймалося зовнішнє навантаження, вище якого на один інтервал пара тертя переходила на патологічну форму зношування.

Відомо, що початковий період зношування тертьових поверхонь супроводжується їх взаємним припрацюванням, протягом якого відбувається формування вторинних структур поверхневих шарів металів і робочого рельєфу поверхонь пари тертя в зоні контакту (рис. 3.5).

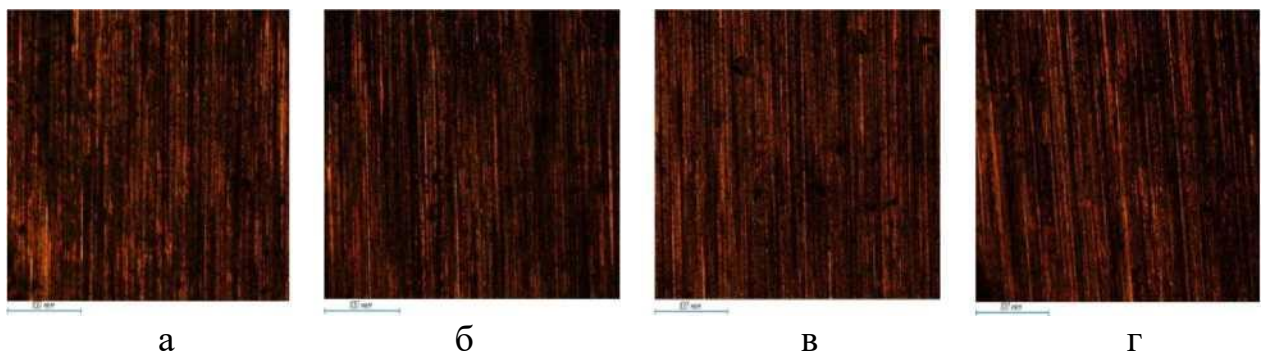


Рис. 3.5. Фото поверхні відбитка хромованих роликів-зразків (шліфованих) до початку випробування при різному вмісті в електроліті плавикової кислоти, г/л: а – 0,65; б – 0,7; в – 0,8; г.

З аналізу отриманих поверхонь підготовлених до випробування роликів-зразків (рис. 3.6) можна зробити висновок, що покриття хромом з розробленого електроліту відповідає вимогам щодо якості покриття, що можливо використовувати для відновлення деталей автомобілів, що працюють при гідроабразивному зношуванні.

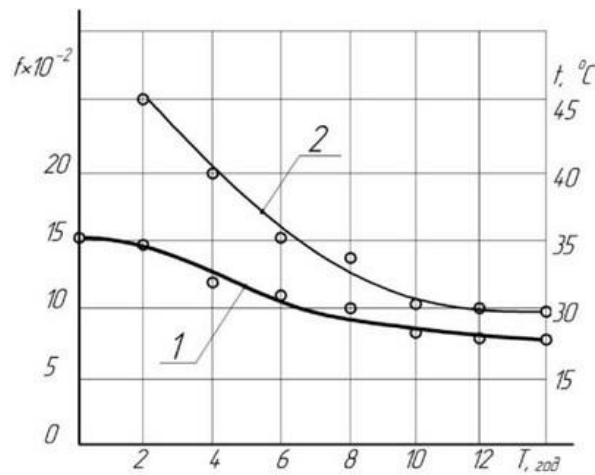


Рис. 3.6. Зміна коефіцієнта тертя – 1 і температури – 2 в процесі припрацювання хромових покриттів, отриманих в електроліті з додаванням плавикової кислоти в кількості 0,8 г/л при $D_k = 120 \text{ А/дм}^2$ при зовнішньому навантаженні 15 кг/см^2 .

Результати, отримані під час досліджень, показали, що найкращий процес припрацювання пари тертя ролик-колодка відбувається при зовнішньому навантаженні $10 \div 15 \text{ кг/см}^2$ (рис. 3.6). Досліджувані хромові покриття не пошкоджуються, з характерним вирівнюванням шорсткості до $R_z = 0,04 \div 0,16 \text{ мкм}$ (рис. 3.8 а і б). Завдяки чому коефіцієнт тертя і температура в зоні тертя знижуються до мінімального значення за короткий час.

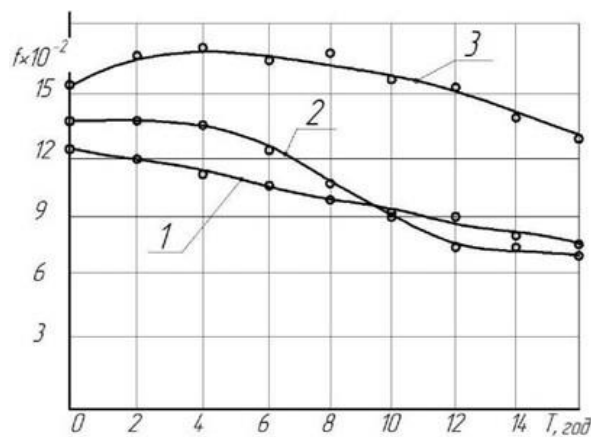


Рис. 3.7. Зміна коефіцієнта тертя в процесі припрацювання хромових покриттів, отриманих в електролітах: 1 – з добавкою HF в кількості 0,8 г/л при $D_k = 120 \text{ А/дм}^2$, 2 – універсальному, 3 – без добавки HF при $D_k = 120 \text{ А/дм}^2$ при зовнішньому навантаженні 20 кг/см^2

При зовнішньому навантаженні 20 кг/см^2 умови припрацювання пар тертя ролик-колодка більшою мірою залежать від якості та виду покриття, отриманого з різних електролітів хромування (рис. 3.7). При цьому ролики, покриті хромом, які отримані з електроліту без добавок плавикової кислоти, мають нестабільний момент тертя, а також температуру в місці контакту пари тертя і з часом проведення припрацювання (рис. 3.7, крива 3). При цьому на поверхні ролика в місці контакту з колодкою спостерігалися поодинокі пошкодження у вигляді невеликої кількості задирів (рис. 3.7 в). У процесі припрацювання відбувалося незначне зниження коефіцієнта тертя і температури в місці контакту поверхні ролика з колодкою.

У покриттів, отриманих у розробленому електроліті хромування з додаванням плавикової кислоти (HF) (рис. 3.7, крива 1) і універсальному (рис. 3.7, крива 2) при навантаженні 20 кг/см^2 пошкодження поверхонь пар тертя не виявлені. При цьому час припрацювання поверхонь у цих пар тертя довший, ніж при навантаженні $10 \div 15 \text{ кг/см}^2$

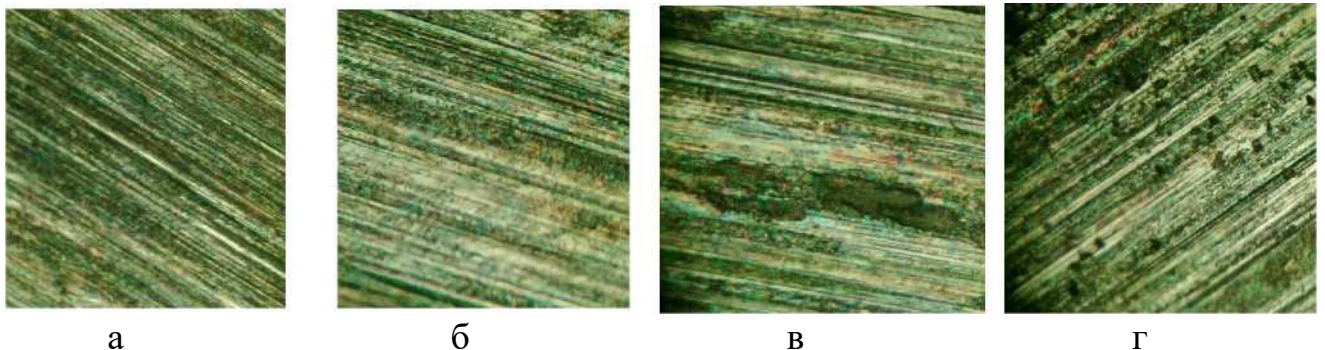


Рис. 3.8. Фото поверхні відбитка хромованих роликів-зразків після припрацювання при навантаженні, кг/см^2 : а – 10, б – 15, в – 20, г – 25.

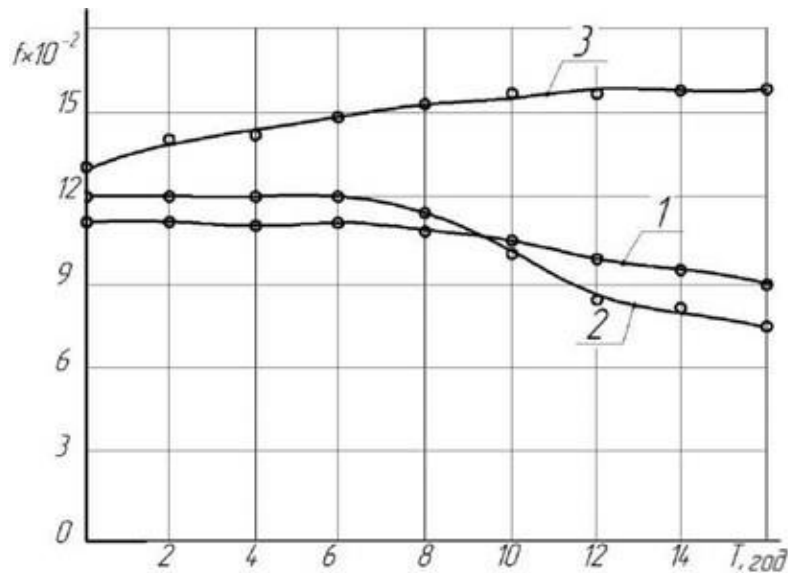


Рис. 3.9. Зміна коефіцієнта тертя в процесі припрацювання хромових покриттів, отриманих в електролітах: 1 – з добавкою HF в кількості 0,8 г/л при $D_k = 120 \text{ А/дм}^2$, 2 – універсальному; 3 – без добавки HF, при зовнішньому навантаженні 25 кг/см^2

Поодинокі пошкодження третьових поверхонь без розвитку патологічної форми зношування з'являються у пар з покриттям (рис. 3.9, крива 1), отриманим в електроліті з добавкою HF при початковому навантаженні 25 кг/см^2 (рис. 3.8 г). У таких умовах припрацювання хромове покриття, отримане в електроліті без добавки HF (рис. 3.9, крива 3), переходить на режим патологічної форми зношування. Хромове покриття, отримане в універсальному електроліті (рис. 3.9, крива 2), як і раніше - без пошкоджень. Зовнішнє навантаження в процесі припрацювання більше 30 кг/см^2 є неприпустимим для всіх досліджуваних покриттів.

Після припрацювання пар тертя шляхом ступеневого підвищення зовнішнього навантаження встановлено верхню її межу, що допускає нормальний процес окислювального зношування. Найкращі показники процесу тертя виявлені у покриттів, припрацьованих при навантаженні 10 кг/см^2 . Припрацювання при зовнішніх навантаженнях більше 20 кг/см^2 значно погіршує ці показники: коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування покриттів збільшується, а верхня межа допустимих навантажень знижується.

При підвищенні зовнішнього навантаження (в межах допустимого) коефіцієнт тертя стабілізується і починає знижуватися (рис. 3.10).

Аналіз отриманих результатів дозволив виявити деякі переваги хромових покриттів, отриманих пропонованим способом. Так, після припрацювання при зовнішньому навантаженні до 20 кг/см^2 інтенсивність зношування покриттів і контртіла найменша.

При зміні зовнішнього навантаження в межах від 50 до 125 кг/см^2 коефіцієнт тертя пари також найменший (рис. 3.9), що свідчить про підвищення антифрикційних властивостей осадів. Значною перевагою цих покриттів є й те, що зміна катодної щільності струму від 75 до 200 А/дм^2 практично не впливає на показники зношування (рис. 3.10). Однак, для покриттів, отриманих у запропонованому розчині, допускається менш широкий інтервал зовнішніх навантажень, що забезпечують окислювальне зношування (рис. 3.11). Крім того, при появі патологічної форми зношування їх зносостійкість стає більшою, порівняно з осадами з універсального електроліту.

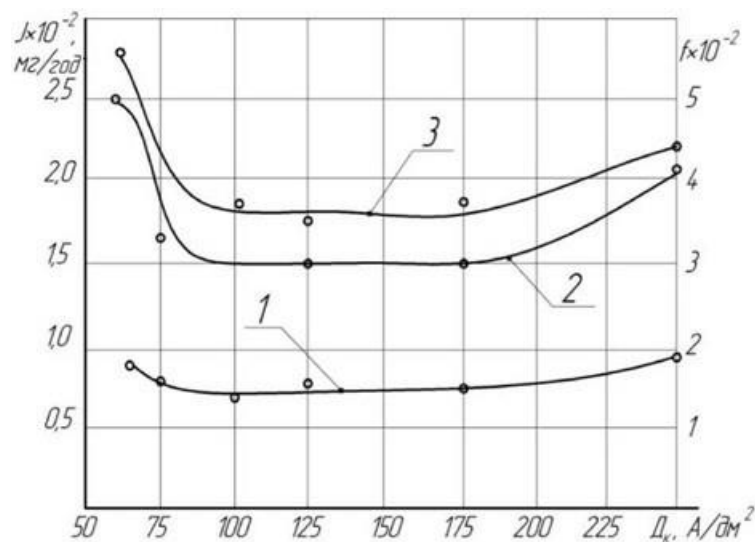


Рис. 3.10. Вплив катодної щільності струму на інтенсивність зношування хромових покриттів, отриманих в електроліті з добавкою HF в кількості $0,8 \text{ г/л}$ – 1, контртіла – 2 і коефіцієнт тертя – 3, при зовнішньому навантаженні – 100 кг/см^2

При тривалих випробуваннях інтенсивність зношування хромових покриттів, отриманих за допомогою розробленого електроліту, в порівнянні з

покриттями, отриманими в універсальному електроліті, мають кращі показники, що перевищують на 20÷30 %, у той час, як у покриттів, осаджених в електроліті без добавки HF після 100 годин роботи пари – значно зростає. Тому найкращими показниками зносостійкості володіють хромові покриття, які отримані в розробленому електроліті з добавкою HF. Незважаючи на зниження мікротвердості з 11000 до 7500 МПа, покриття володіють високою зносостійкістю при зовнішньому навантаженні до 100 кг/см².

Слід зазначити, що зміна зовнішнього навантаження незначно впливає на інтенсивність зношування всіх досліджуваних хромових покриттів.

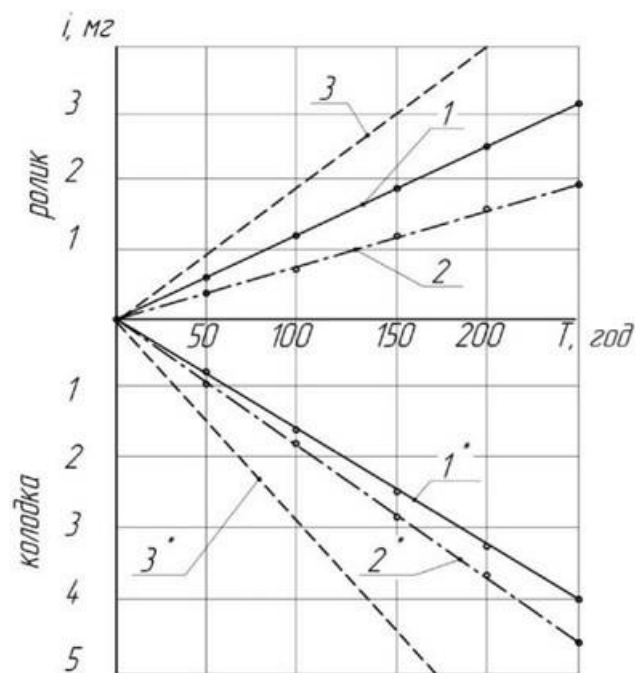


Рис. 3.11. Вплив зносу пар тертя ролик-колодка при випробуваннях різних покриттів: 1 – ролик, покритий в універсальному електроліті ($D_k = 50 \text{ А/дм}^2$, $t_{\text{ел}} = 50^\circ \text{ С}$), 2 – ролик, покритий у розробленому електроліті ($D_k = 100 \text{ А/дм}^2$, $t_{\text{ел}} = 30^\circ \text{ С}$, з концентрацією HF 0,8 г/л), 3 – ролик, без покриття (еталонний).

В результаті досліджень зносу пари тертя ролик-колодка (рис. 3.11) було встановлено, що знос в залежності від часу має лінійний характер. При цьому встановлено, що покриття, отримане з розробленого електроліту з добавкою плавикової кислоти (HF), має зносостійкість вище покриття, отриманого з універсального електроліту майже в 1,6 рази. Однак зносостійкість

стійкість колодки в порівнянні з покриттям, отриманим з універсального електроліту, нижча на 10%. При цьому загальна зносостійкість пари тертя з роликом, покритим хромом з розробленого електроліту хромування з додаванням плавикової кислоти, перевищує в 1,2 рази зносостійкість пари тертя покритого ролика з універсального електроліту.

Виявлені експериментально закономірності зношування хромових покриттів задовільно пояснюються з точки зору викладу теорії зовнішнього тертя і зносу.

В результаті отриманих даних випробування хромових покриттів на зносостійкість було встановлено, що отримані в електроліті з добавкою HF при електролізі постійним струмом, мають підвищену стабільність і за фізико-механічними властивостями практично не поступаються аналогічним покриттям, осадженим з універсального електроліту, і є придатними для відновлення автотракторних деталей.

3.3 Стендові та експлуатаційні випробування для перевірки працездатності відновлюваних деталей

Критерієм оцінки доцільності застосування розробленої технології відновлення, з використанням розробленого ХСЭХ для відновлення деталей автомобілів, що працюють при гідроабразивному зношуванні, стали результати прискорених стендових і експлуатаційних випробувань золотникових пар, відновлених за новою технологією. Прискорені стендові випробування гідророзподільників Р-80 З/1-444 проведені на базі кафедри агроінженерії та технічного сервісу Поліського національного університету.

Для порівняльної оцінки способу відновлення золотників гідророзподільників Р-80 З/1-444 проводилися випробування деталей серійного випуску, відновлених перекомплектуванням, хромуванням в універсальному і холодному саморегулюючому електроліті.



Рис. 3.12. Зовнішній вигляд золотників: а – підготовлених до хромування, б – покритих хромом.

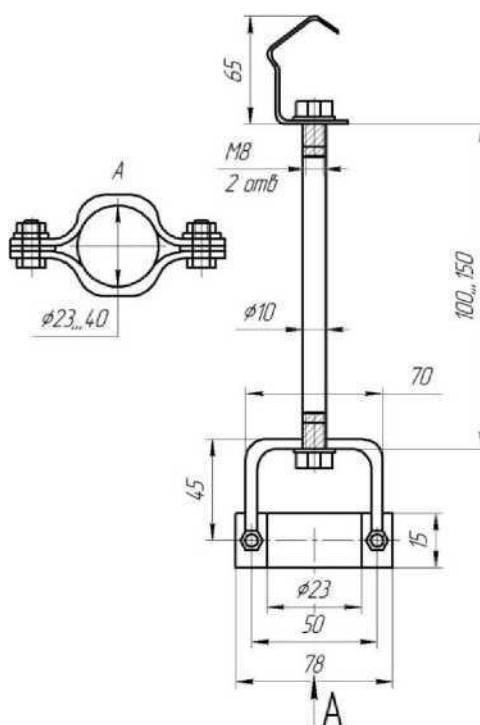


Рис. 3.13. Підвіска для хромування золотників

В результаті випробувань було встановлено, що зносостійкість золотників гідророзподільників, відновлених хромуванням в холодному саморегулюючому електроліті, рівнозначна зносостійкості серійних, вища, ніж у перекомплектованих і нікельованих, і не поступається плунжерним парам,

відновленим хромованим в універсальному електроліті.

Проведені випробування підтвердили перспективність застосування холодного саморегульованого електроліту навіть для таких деталей, як плунжерні пари, які, як відомо, є прецизійними, надточними деталями.

Для перевірки працездатності деталей, відновлених за розробленою технологією в експлуатаційних умовах, ми укомплектували гідророзподільники Р- 80 З/1-444 (3 шт) золотниками гідророзподільника однієї серії випуску, один з комплектом деталей, відновлених хромуванням в універсальному електроліті, і два комплекти - в холодному саморегулюючому електроліті.. Після закінчення проведеного обсягу робіт гідророзподільники були доставлені в лабораторію.

Огляд зовнішнього вигляду золотників показав, що на хромованих деталях в найбільш вразливих місцях видимих слідів зносу не виявилось, в той час як у серійних на головках були чітко видні ризики. Вимірювання показали, що знос хромованих поверхонь у торці головки не перевищував 1 мкм, а у серійних 3-4 мкм.

Таким чином, золотники, відновлені за новою технологією за допомогою розробленого електроліту хромування, за ресурсом перевищують серійні (нові) в кілька разів.

Додатково були проведені дослідження відновлених золотників гідророзподільників Р-80 З/З-444, де були виконані і впроваджені наступні розробки: типовий технологічний процес відновлення золотників гідророзподільників Р-80 З/З-444 з використанням розробленого нового складу електроліту зносостійкого хромування саморегулюючого типу. Розроблено методику контролю та підтримки необхідного складу електроліту при роботі гальванічної ванни. Розроблено комплект технологічних документів – технологічні та маршрутні карти для відновлення золотників гідророзподільників Р-80 З/З-444.

Результати випробувань підтвердили доцільність відновлення деталей гідроапаратури, що працюють при гідроабразивному зношуванні. При цьому

довговічність золотників гідророзподільників збільшилася на 30% в порівнянні з новими золотниками, що дало можливість підвищити працездатність агрегатів в цілому з необхідною надійністю.

У ході впровадження технології відновлення, вирішувалося завдання впровадження в ремонтне виробництво розробленої установки з підтримки заданого бічного температурного режиму при проведенні зносостійкого хромування з використанням розробленого складу електроліту [9].

При впровадженні результатів досліджень встановлено, що розроблена технологія відновлення з використанням нового холодного саморегульованого електроліту хромування дозволяє відновити золотники зі збільшенням міжремонтного терміну служби гідророзподільників і знизити трудомісткість проведення ТО і ремонту на 50%.

Висновки по розділу

В результаті досліджень нового складу електроліту було виконано наступне:

Встановлено оптимальний склад і режими осадження хромових покриттів. Проведено дослідження і встановлено закономірності впливу складу і концентрації добавок в холодному саморегулюючому електроліті хромування, його температури і катодної щільності струму на вихід хрому по струму, мікротвердість і морфологію покриттів. Отримано, що оптимальним поєднанням в електроліті є солі сульфату нікелю і кобальту з додатковою неорганічною добавкою плавикової кислоти, при якому забезпечується стійка продуктивність і якість покриттів при температурі електроліту $18 \div 35^{\circ} \text{C}$ і катодній щільності $75 \div 200 \text{ A/дм}^2$. Поляризаційними дослідженнями виявлено ступінь впливу складу електроліту на кінетику процесу осадження хромових покриттів.

Проведено випробування отриманих хромових покриттів з розробленого електроліту хромування на міцність зчеплення і зносостійкість, що підтвердило

можливість використання для відновлення деталей автомобілів, що працюють при гідроабразивному зношуванні – золотники гідророзподільників, плунжери гідравлічних і паливних насосів та ін

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконано обґрунтування доцільності відновлення деталей агрегатів і вузлів спеціальних автомобілів, які експлуатуються підприємствами комунального господарства та дорожньо-будівельного виробництва. З'ясовано, що велика кількість ресурсовизначальних деталей мають граничний знос менше 0,5 мм, що дає економічні передумови використання відновлення деталей з метою підвищення працездатності агрегатів і автомобілів в цілому.

Обґрунтовано вибір використання електролітичного хромування як способу відновлення деталей автомобілів, що працюють при гідроабразивному зношуванні, з метою поліпшення якості та довговічності роботи деталей спеціальних автомобілів. Так, на прикладі гідророзподільників, ресурсовизначальними деталями яких є золотники, було виявлено, що використання електролітичного хромування дає можливість досягти ресурсу не менше 80% від нової деталі, а в деяких випадках і більше ресурсу нової, що відкриває перспективи його застосування при відновленні деталей автомобілів, що працюють при гідроабразивному зношуванні.

Виконано аналіз літературних джерел і проведено патентний пошук існуючих електролітів хромування, які використовуються для отримання зносостійких покриттів при відновленні деталей автомобілів. Дані покриття мають ряд переваг: висока продуктивність, висока мікротвердість і зносостійкість, можливість отримання покриттів товщиною до 0,7 мм.

Обраний предметом досліджень – холодний саморегулюючий електроліт хромування наступного складу, г/л: хромовий ангідрид (CrO_3) – 420÷450, карбонат кальцію (CaCO_3) – 67÷75, сульфат кобальту ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) – 18÷20, при робочому інтервалі температур електроліту 18÷23° С. Недоліком є малий діапазон робочих температур електроліту (18÷23° С) для отримання якісних хромових покриттів з високою продуктивністю, що ускладнювало впровадження його при відновленні деталей автомобілів, що працюють при гідроабразивному

зношуванні.

Розроблено методику проведення досліджень і обрано необхідне обладнання, з визначенням необхідних параметрів і характеристик розчинів електролітів хромування, із заданою точністю, достовірністю і з урахуванням існуючих методик. Крім того, розроблено математичну модель формування хромового покриття. Отримана математична модель показала вплив щільності струму, кількості плавикової кислоти і температури електроліту на формування хромового покриття – вихід по струму.

Виконано заходи з проведення стендових та експлуатаційних випробувань гідророзподільників Р-80 З/1-444 і Р-80 З-З-444, встановлених на них відновлених золотників, за допомогою розробленої технології. Результати випробувань показали збільшення працездатності відновлених у порівнянні з новими золотниками на 30-40%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прищеп В.М. Перспективи використання електролітичного хромування для відновлення деталей автомобілів. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Т2. С. 32-33.
2. Прищеп В.М. Використання холодних саморегулювальних електролітів для нанесення хромових покриттів. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 138-141.
3. Прищеп В.М. Застосування електролітичного хромування в ремонтному виробництві. Покращення техніко-економічних показників тракторів під час виконання сільськогосподарських операції. Студентські читання–2025: матеріали науково-практичної конференції науково- педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 44-46.
4. Беляєв О. В. Відновлення деталей машин гальванічними покриттями. Київ : Техніка, 2018. 256 с.
5. Гудз Г. С., Коваленко В. М. Технологія ремонту автомобілів. Львів : Афіша, 2020. 412 с.
6. Костенко О. І., Шевченко М. П. Зносостійкі покриття в машинобудуванні. Харків : НТУ «ХП», 2019. 328 с.
7. Негура М. С. Відновлення деталей та механізмів: сучасні та інноваційні методи. Журнал головного інженера. 2022. № 10. С. 30–33.
8. Поляков П. О. Електролітичне хромування деталей гідросистем. Вісник машинобудування та транспорту. 2021. № 2. С. 45–52.

9. ДСТУ 2583–2018. Покриття гальванічні. Загальні технічні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
10. ДСТУ 8634:2016. Ремонт і відновлення деталей машин. Загальні положення. Київ, 2016.
8. Lowenheim F. A. Modern Electroplating. 5th ed. New York : Wiley, 2014. 850 p.
9. Schlesinger M., Paunovic M. Modern Electroplating. Hoboken : John Wiley & Sons, 2010. 736 p.
10. Dennis J. K., Such T. E. Nickel and Chromium Plating. Cambridge : Woodhead Publishing, 1993. 480 p.
11. Narayanan T. S. N. S. Surface pretreatment by phosphate conversion coatings — A review. Reviews on Advanced Materials Science. 2005. Vol. 9. P. 130–177.
12. Podgornik B., Hogmark S., Pezdirnik J. Comparison between different hard coatings for hydraulic components. Wear. 2012. Vol. 274–275. P. 217–224.
13. Totten G. E., Howes M. A. H., Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Materials Park : ASM International, 2002. 499 p.
14. Wang Y., Li D., Chen Z. Hard chromium coatings for wear resistance: mechanisms and performance. Surface Engineering. 2019. Vol. 35, No. 6. P. 475–485.
15. Zeller R. Galvanotechnik. Grundlagen und Praxis. München : Hanser Verlag, 2017. 622 S.
16. Schatt W., Wieters K.-P. Pulvermetallurgie – Prozesse, Werkstoffe, Anwendungen. Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2011. 480 S.
17. Benda T. Hartverchromung von Maschinenteilen. Oberflächentechnik. 2018. Nr. 4. S. 22–28.
18. Klocke F. Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen. Berlin : Springer, 2015. 400 S.
19. Legrand P. Traitements de surface et revêtements industriels. Paris : Dunod, 2016. 384 p.

20. Benea L., Bonora P. L. Wear and corrosion resistance of hard chromium coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 200. P. 132–140.
21. Czerwinski F. *Electroplating and Surface Finishing*. Montreal : InTech, 2018. 310 p.
22. Dubois M. Procédés électrochimiques appliqués à la réparation mécanique. *Revue de métallurgie*. 2017. № 9. P. 45–53.
23. ISO 2081:2018. Metallic and other inorganic coatings — Electroplated coatings of zinc with supplementary treatments. Geneva : ISO, 2018.
24. ISO 6158:2018. Metallic coatings — Electroplated coatings of chromium for engineering purposes. Geneva : ISO, 2018.
25. ASM Handbook. Vol. 5: Surface Engineering. Materials Park : ASM International, 2013. 1140 p.
26. Krolkowski A., Włodarczyk R. Hard chromium plating in remanufacturing of automotive parts. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 56. P. 920–929.
27. Li X., Zhang H. Advances in chromium electroplating technologies. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021. Vol. 30. P. 3850–3862.
28. Müller H. *Reparaturverfahren im Maschinenbau*. Stuttgart : Expert Verlag, 2019. 298 S.
29. Perrin J.-P. *Revêtements durs et tribologie appliquée*. Paris : Techniques de l'Ingénieur, 2020. 260 p.
30. Karpuschewski B., Wehmeier M. Manufacturing and repair of hydraulic components. *CIRP Annals*. 2018. Vol. 67, No. 1. P. 585–588.